



Université de Constantine 03
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

**VERS UNE ENVELOPPE ADAPTATIVE INSPIREE DE LA
NATURE POUR UN RAFRAICHISSEMENT PASSIF DES
BATIMENTS PUBLICS EN ZONES SEMI-ARIDES**

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Bioclimatique

Par
Khaoula FEKKOUS

Année Universitaire
2024 – 2025



Université de Constantine 03
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

N° de Série :
N° d'Ordre :

**VERS UNE ENVELOPPE ADAPTATIVE INSPIREE DE LA
NATURE POUR UN RAFRAICHISSEMENT PASSIF DES
BATIMENTS PUBLICS EN ZONES SEMI-ARIDES**

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Bioclimatique

Par

Khaoula FEKKOUS

Devant le Jury Composé de :

Samira LOUAFI	Présidente	Professeur	Université de Constantine 3
Yasmina BOUCHAHM	Directrice	Professeur	Université de Constantine 3
Abida HAMOUDA	Examinatrice	Professeur	Université Batna 1
Sarah BENCHARKAT	Examinatrice	MCA	Université de Constantine 3
Atef AHRIZ	Examineur	MCA	Université de Tébessa
Halima GHERRAZ	Examinatrice	MCA	Université d'Oum El Bouaghi

Année Universitaire

2024-2025

REMERCIEMENTS

Je remercie **Dieu**, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui gère éternellement le monde, pour m'avoir accordé la force, la santé ainsi que la patience et la volonté de commencer et de mener à bien ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers ma directrice de thèse, Madame la **Pr. Yasmina BOUCHAHM**, pour la confiance qu'elle m'a témoignée en acceptant de superviser cette thèse, même après sa retraite. Je souhaite également exprimer ma reconnaissance pour sa disponibilité et ses multiples recommandations et orientations. En outre, j'ai été particulièrement attentive à ses qualités humaines nobles, à son encouragement, à son écoute, à sa patience et à sa compréhension tout au long de mon parcours de recherche, depuis le magister jusqu'à aujourd'hui.

Mes remerciements s'adressent également à Madame la **Pr. Fatiha BOURBIA**, ancienne directrice du laboratoire **Architecture Bioclimatique et Environnement (ABE)**, considérée comme la première à avoir introduit la thématique du **biomimétisme** au sein de notre laboratoire. Son initiative a permis d'ouvrir la voie à l'exploration et au développement de ce champ de recherche innovant.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers le directeur du laboratoire ABE, **Dr. Islam BOUKHELKHAL**, pour ses encouragements et son soutien.

Je suis reconnaissante envers les membres du jury, dont la bienveillance a honoré l'évaluation de ce travail académique.

Je souhaite exprimer ma gratitude particulière envers Madame **Saliha BECHOUA** pour sa disponibilité, sa patience, son aide, ses remarques et son encouragement.

Mes vifs remerciements vont au **Dr. Awatif BOUMAAZA** pour son aide et soutien, et au **Dr. Abdelhakim Walid MAKHLOUFI** pour ses encouragements.

Je tiens tout particulièrement à exprimer mes remerciements à la responsable de l'annexe administrative sise à la cité Amirouche, Madame **Yasmina OUNISS**, ainsi qu'aux personnels de l'annexe pour leur accueil, leurs encouragements et leur aide précieuse facilitant le déroulement de l'investigation in situ.

Je remercie tous mes collègues de la direction de la gestion urbaine (Service technique) de la mairie de Batna, en particulier **Mr. Abdelkrim BERGHOUTI**, **Samir KHENDOUDI** et **Ambarek SWALHIA** pour leurs aides et encouragements au long de mon parcours de recherche.

Je vous remercie toutes et tous.

DEDICACE

Avec ma profonde affection, je dédie ce modeste travail :

À ceux qui m'ont soutenu, m'ont encouragé durant toute ma vie, À ceux qui ont toujours voulu que je sois la meilleure : **À mon père et à ma mère** : Symboles du sacrifice, de l'amour, de l'encouragement et de la tendresse. Je voudrais vous exprimer mon affection. Comme aucun hommage ne pourrait être à la hauteur pour exprimer mon amour et mon admiration. Que Dieu vous procure bonne santé et longue vie.

À mon cher frère **Ahmed**, un véritable pilier dans ma vie, dont la présence, les encouragements ont illuminé mon chemin vers la réussite.

À mes chères sœurs **Nadia** et **Sihem**, pour leurs appuis, leurs contributions, leurs encouragements et leurs soutiens tout le long de ce travail.

À la mémoire de mon **cher oncle Saleh**, qui a été mon appui pour atteindre ce stade, avec toute ma gratitude et mon affection éternelles, repose en paix et qu'Allah le reçoit dans son immense paradis.

À la mémoire de mes **chers grands-parents paternels et maternels**, paix à vos âmes et que Dieu vous accueille dans son vaste paradis.

À ma famille, à mes amies et à toutes les personnes qui me sont chères et que j'ai omis de mentionner.

Khaoula FEKKOUS

TABLES DE MATIERES

	Page
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES ABREVIATIONS	xvii
RESUME	
ABSTRACT	
ملخص	
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GENERALE	1
1.1. Introduction.....	2
1.2. Problématique.....	4
1.3. Hypothèses.....	7
1.4. Objectifs de la recherche.....	8
1.5. Approche méthodologique.....	9
1.6. Structure de la thèse.....	10
CHAPITRE II	
DIFFERENTES STRATEGIES D'ADAPTATION DANS LA NATURE	14
Introduction.....	15
2.1. Définition de la faune.....	15
2.2. Définition de la flore.....	15
2.3. Définition de l'action de s'acclimater.....	15
2.3.1. En langue.....	15
2.3.2. En biologie	15
2.4. Définition de la notion d'adaptation.....	16
2.4.1. En langue	16
2.4.2. En biologie	16
2.5. Types d'adaptation dans la nature	16
2.5.1. Adaptation morphologique	16
2.5.2. Adaptation physiologique	17
2.5.3. Adaptation comportementale.....	18
2.6. Mécanismes de la thermorégulation dans la nature.....	19
2.6.1. Définition de la notion de la thermorégulation dans la nature.....	19
2.6.2. Différents mécanismes de la thermorégulation chez la faune.....	19
2.6.2.1. Gagner de la chaleur.....	20
2.6.2.2. Retenir de la chaleur.....	21
2.6.2.3. Dissiper de la chaleur.....	22
2.6.2.4. Prévenir de la chaleur.....	25
2.6.3. L'escargot comme un modèle d'adaptation dans un milieu chaud.....	27
2.6.3.1. Adaptation morphologique.....	27
2.6.3.2. Adaptation comportementale	28

2.6.4. Différents mécanismes et stratégies d'adaptation chez la flore	29
2.6.4.1. Stratégies statiques	29
2.6.4.2. Mécanisme dynamique.....	30
2.6.5. Le cactus comme un modèle d'adaptation dans un milieu chaud.....	30
2.6.5.1. Adaptation morphologique.....	31
2.6.5.2. Adaptation physiologique.....	34
2.6.6. Les différentes stratégies de la thermorégulation chez l'être humain.	35
2.6.6.1. Adaptation morphologique.....	35
2.6.6.2. Adaptation physiologique.....	36
2.6.6.3. Adaptation comportementale.....	37
Conclusion.....	45
CHAPITRE III	
LE BIOMIMÉTISME.....	46
Introduction.....	47
3.1. Biomimétisme : définition et appréhension des concepts.....	47
3.1.1. Définition du biomimétisme.....	47
3.2. Eléments du biomimétisme.....	51
3.2.1. Ethos.....	51
3.2.2. (Re)connecter.....	51
3.2.3. Emuler.....	51
3.3. Théorie du biomimétisme.....	52
3.3.1. Modèle.....	52
3.3.2. Mentor.....	52
3.3.3. Mesure.....	52
3.4. Aperçu historique sur l'évolution du biomimétisme à travers l'histoire.....	53
3.4.1. Préhistoire (avant J.-C.)	53
3.4.2. Antiquité (3000 av. J.-C. - 476 apr. J.-C.)	53
3.4.3. Renaissance (XIVe – XVIIe siècle)	54
3.4.4. Révolution industrielle (XVIIIe – XIXe siècle)	55
3.4.5. À l'époque de la fin du XIXe siècle et du début du XXe siècle.....	56
3.4.6. Epoque moderne (XXe siècle)	57
3.4.6.1. Au début du XXe siècle.....	57
3.4.6.2. Au milieu du XXe siècle.....	58
3.4.6.3. La fin du XXe siècle.....	59
3.4.7. XXIe siècle.....	60
3.5. Différents niveaux du biomimétisme.....	61
3.5.1. Inspiration au niveau de l'organisme.....	61
3.5.2. Inspiration au niveau du comportement.....	62
3.5.3. Inspiration au niveau de l'écosystème.....	62
3.6. Techniques du biomimétisme.....	67
3.6.1. Technique directe.....	67
3.6.1.1. Les étapes de la technique directe.....	68

3.6.2. Technique indirecte.....	69
3.6.2.1. Les étapes de la technique indirecte.....	70
3.7. Principes du biomimétisme.....	71
3.8. Les intérêts de la conception biomimétique.....	71
3.8.1. Au niveau conceptuel.....	71
3.8.2. Au niveau énergétique.....	72
3.8.3. Au niveau du bien-être.....	72
3.8.4. Au niveau de l'esthétique.....	72
3.8.5. Réduction des déchets.....	72
3.8.6. Au niveau technologique.....	72
3.8.7. Durabilité	72
3.8.8. Résilience et optimisation.....	73
3.8.9. Au niveau environnemental	73
3.9. Défis, difficultés et limites de la conception biomimétisme.....	73
3.9.1. L'importance des compétences interdisciplinaires.....	73
3.9.2. Inspiration de la nature.....	73
3.9.3. Complexité de la transposition.....	74
3.9.4. Application des concepts et mise à l'échelle.....	74
3.9.5. Contraintes économiques.....	74
3.9.6. Simulation numérique.....	74
3.9.7. Délais de développement.....	74
3.9.8. Politique.....	74
Conclusion.....	74

CHAPITRE IV

LES ENVELOPPES ADAPTATIVES.....	76
Introduction.....	77
4.1. Définition de l'enveloppe.....	77
4.2. Définition de la notion d'adaptation.....	78
4.2.1. En biologie.....	78
4.2.2. En architecture.....	79
4.3. Typologie et classification des enveloppes adaptatives architecturales.....	81
4.3.1. Fonction principale de l'enveloppe.....	81
4.3.1.1. Enveloppes adaptatives thermiques.....	81
4.3.1.2. Enveloppes adaptatives lumineuses.....	82
4.3.1.3. Enveloppes adaptatives pour rafraîchissement passif via une ventilation.....	82
4.3.1.4. Enveloppes hydro-régulatrices.....	83
4.3.1.5. Enveloppes adaptatives réagissant aux vents.....	83
4.3.1.6. Enveloppes adaptatives réagissant aux précipitations.....	84
4.3.1.7. Enveloppes adaptatives sonores.....	84
4.3.1.8. Enveloppes adaptatives énergétiques.....	85
4.3.1.9. Enveloppes adaptatives multifonctionnelles.....	86
4.3.2. Mode de transformation.....	86

4.3.2.1. Enveloppe cinétique.....	86
4.3.2.2. Façade dynamique.....	89
4.3.2.3. Façade mobile.....	90
4.3.3. Mode de réponse.....	90
4.3.3.1. Enveloppe responsive.....	91
4.3.3.2. Enveloppe autonome.....	92
4.3.3.3. Enveloppe interactive.....	92
4.3.3.4. Enveloppe intelligente.....	93
4.3.3.5. Enveloppe numérique ou smart.....	94
4.3.4. Niveau de transformation.....	94
4.3.4.1. Au niveau macro-échelle.....	94
4.3.4.2. Au niveau micro-échelle.....	94
4.3.5. Technologie utilisée.....	94
4.3.5.1. Technologie passive.....	96
4.3.5.2. Technologie active.....	98
4.4. Différents systèmes de contrôle dans les enveloppes adaptatives cinétiques	102
4.4.1. Mécanisme de fonctionnement.....	102
4.4.1.1. Système de contrôle en boucle ouverte.....	102
4.4.1.2. Système de contrôle en boucle fermée.....	102
4.4.2. Stratégie de fonctionnement.....	103
4.4.2.1. Contrôle intrinsèque.....	103
4.4.2.2. Contrôle extrinsèque.....	104
4.4.2.3. Contrôle intelligent.....	104
4.4.2.4. Contrôle hybride.....	105
4.4.3. Degré de centralisation.....	105
4.4.3.1. Contrôle centralisé.....	105
4.4.3.2. Contrôle décentralisé.....	105
4.4.4. Nature du contrôle.....	106
4.4.4.1. Contrôle passif.....	106
4.4.4.2. Contrôle actif.....	106
4.4.4.3. Contrôle adaptatif.....	106
4.4.5. Niveau d'intervention.....	106
4.4.5.1. Contrôle interne.....	106
4.4.5.2. Contrôle externe.....	107
4.4.5.3. Système complexe.....	107
4.4.6. Manière d'intervention.....	107
4.4.6.1. Contrôle direct.....	107
4.4.6.2. Contrôle indirect.....	107
Conclusion.....	107
CHAPITRE V	
MURS RESPIRANTS.....	109
Introduction.....	110
5.1. Définition du mur respirant.....	110

5.1.1. Du point de vue biologique.....	110
5.1.2. Du point de vue architectural.....	111
5.2. Principes de fonctionnement des murs respirants.....	111
5.2.1. Transmission de l'air.....	112
5.2.2. Transfert de l'eau.....	112
5.2.2.1. Perméabilité et diffusion de la vapeur.....	113
5.2.2.2. Hygroscopique.....	113
5.2.2.3. Capillarité.....	113
5.3. Composition des murs respirants.....	113
5.3.1. Couche externe.....	113
5.3.2. Couche intermédiaire (mur respirant).....	114
5.3.3. Couche interne.....	114
5.4. Avantages des murs respirants.....	115
5.4.1. Isolation thermique.....	115
5.4.2. Ventilation naturelle.....	116
5.4.3. Gestion et régulation de l'humidité.....	116
5.4.4. Qualité de l'air.....	116
5.4.5. Amélioration de la performance thermique.....	116
5.4.6. Confort thermique.....	117
5.4.7. Réduction des coûts énergétiques.....	117
5.4.8. Durabilité.....	117
5.5. Différents exemples de murs respirants.....	117
5.5.1. Technologie avancée (matériaux intelligents).....	117
5.5.1.1. Thermo-bimétal.....	117
5.5.1.2. Alliages à mémoire de forme.....	120
5.5.1.3. Système pneumatique.....	125
5.5.1.4. Matériaux piézoélectriques.....	126
5.5.1.5. Matériaux composites.....	127
5.5.2. Procédés.....	129
Conclusion.....	138

CHAPITRE VI

INVESTIGATION IN SITU.....	139
Introduction.....	140
6.1. Description de la zone d'étude.....	140
6.1.1. Situation géographique.....	140
6.1.2. Contexte climatique.....	141
6.1.2.1. Température de l'air.....	142
6.1.2.2. Humidité relative.....	142
6.1.2.3. Vents dominants.....	143
6.1.2.4. Insolation.....	143
6.1.2.5. Précipitations.....	144
6.1.2.6. Analyse bioclimatique de la ville de Batna.....	145
6.1.3. Contexte démographique, administratif et énergétique.....	147

6.2. Présentation du cas d'étude.....	149
6.3. Déroulement de la campagne de mesure.....	155
6.3.1. Positionnement des points de mesure et matériels utilisés.....	155
6.3.2. Stratégie d'évaluation de l'ambiance thermique interne.....	156
6.3.2.1. Première stratégie.....	156
6.3.2.2. Deuxième stratégie.....	157
6.4. Résultats d'investigation in situ.....	157
6.4.1. Résultats de l'enquête quantitative et objective.....	157
6.4.1.1. Évaluation de l'ambiance thermique intérieure via des paramètres physiques.....	157
6.4.1.2. Évaluation de l'ambiance thermique intérieure via les indices PMV et PPD.....	167
6.4.2. Résultats de l'enquête qualitative et subjective.....	169
6.4.2.1. Évaluation de l'ambiance thermique intérieure à travers des paramètres subjectifs.....	169
Conclusion.....	175
 CHAPITRE VII	
AMELIORATION DE L'AMBIANCE THERMIQUE INTERNE.....	176
Introduction.....	177
VOLET 1	
PROCESSUS DE CONCEPTION DE L'ENVELOPPE ADAPTATIVE.....	178
Préambule.....	179
7.1. Processus de conception de l'enveloppe adaptative.....	180
7.1.1. Définir et recadrer le problème.....	180
7.1.2. Rechercher et définir la solution biologique.....	180
7.1.2.1. Inspiration de l'adaptation physiologique.....	180
7.1.2.2. Inspiration de l'adaptation morphologique.....	181
7.1.2.3. Inspiration de l'adaptation comportementale.....	183
7.1.3. Extraire le principe.....	184
7.1.3.1. Choix du type de matériau adéquat.....	185
7.1.3.2. Caractéristiques.....	186
7.1.3.3. Principes de fonctionnement.....	187
7.1.4. Application du principe.....	188
Synthèse.....	194
 VOLET 2	
ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ENVELOPPE ADAPTATIVE.....	195
Préambule.....	196
7.2. Démarche de la simulation énergétique.....	196
7.2.1. Les entrées (Inputs)	196
7.2.2. Création d'un algorithme (Making Algorithm).....	196
7.2.3. Gestion des données (Data management)	196

7.2.4. Les sorties (Outputs)	196
7.3. Logiciels de la simulation énergétique utilisés.....	197
7.4. Scénarios.....	198
7.5. Les étapes de la simulation énergétique.....	198
7.5.1. Les entrées (Inputs)	198
7.5.1.1. La partie fixe.....	198
7.5.1.2. La partie variable.....	199
7.5.2. Gestion des données (Data management)	200
7.5.3. Les sorties (Outputs)	200
7.6. Analyse et discussions des résultats de la simulation.....	201
7.6.1. Analyse et discussions des résultats du scénario 1(pré-réhabilitation thermique)	201
7.6.1.1. Analyse solaire.....	201
7.6.1.2. Température de l'air.....	203
7.6.1.3. Charges du refroidissement.....	203
7.6.1.4. Température effective.....	204
Synthèse.....	205
7.6.2. Analyse et discussions des résultats du scénario 2(post-réhabilitation thermique)	207
7.6.2.1. Analyse solaire.....	207
7.6.2.2. Température de l'air.....	208
7.6.2.3. Humidité relative.....	209
7.6.2.4. Température effective.....	212
7.6.2.5. Vote moyen prédit PMV.....	217
7.6.2.6. Pourcentage prévu d'insatisfaction PPD.....	218
Synthèse.....	220
Conclusion.....	221
CHAPITRE VIII	
CONCLUSION GENERALE.....	223
BIBLIOGRAPHIE.....	232
LISTE DES ANNEXES.....	249
Annexe A.....	250
Annexe B.....	255
Annexe C.....	261
Annexe D.....	267
LEXIQUE.....	273

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Répartition de la consommation finale de l'énergie par secteur d'activité.	3
1.2	Consommation énergétique du secteur tertiaire en Algérie.....	3
1.3	Structure de la thèse.....	13
2.1	Différents types de becs des oiseaux.....	17
2.2	Changement de couleur de la peau du caméléon.....	18
2.3	L'action de s'asperger chez l'éléphant.....	19
2.4	Regroupement des poulets dans une zone ombragée.....	19
2.5	Les différents mécanismes de la thermorégulation chez la faune.....	20
2.6	Un pigeon se réchauffe en ébouriffant ses plumes.....	21
2.7	Vasoconstriction.....	22
2.8	Vasodilatation.....	23
2.9	Oreilles des lièvres.....	23
2.10	L'échange de chaleur à contre-courant.....	24
2.11	Halètement du chien.....	25
2.12	Peau hygroscopique de lézard à cornes.....	25
2.13	Fourmis du Sahara.....	26
2.14	Fourrure de la gazelle dama.....	26
2.15	La coquille blanche de l'escargot.....	28
2.16	Températures enregistrées dans et autour d'un spécimen d'escargot.....	29
2.17	Coussin d'air isolant.....	29
2.18	Le Maïs.....	30
2.19	Agaves.....	30
2.20	Organisation des cotes de cactus.....	32
2.21	Barrel cactus.....	33
2.22	Cactus mescal.....	33
2.23	Ecorce reflétant.....	33
2.24	Protection contre les rayons solaires.....	34
2.25	Système d'auto-ventilation.. ..	34
2.26	Epines collectent l'eau de la pluie.	34
2.27	Fonctionnement des stomates.....	35
2.28	Respiration humaine.	37
2.29	Transpiration.....	37
2.30	Changement saisonnier du comportement vestimentaire.	38
2.31	Changement saisonnier du comportement culinaire.....	38
3.1	Nuage des termes relatifs au biomimétisme.....	51
3.2	Eléments du biomimétique.....	52
3.3	Eléments de la théorie du biomimétique.	53
3.4	Chapiteau ionique.....	54
3.5	Chapiteau corinthien.....	54
3.6	Chapiteaux composite.....	54

3.7	Chapiteau papyriforme.	54
3.8	Croquis de Léonard de Vinci.	55
3.9	L'ornithoptère.	55
3.10	La tour Eiffel inspirée de l'os du fémur.....	56
3.11	La cathédrale de la Sagrada Família.	57
3.12	Le pavillon Allemand de l'exposition à Montréal.....	58
3.13	Stade olympique de Munich.	58
3.14	Structures toiles d'araignées.....	58
3.15	Sources d'inspiration de L'Opéra de Sydney.....	58
3.16	Genèse de l'idée pour la conception de L'Opéra de Sydney.....	59
3.17	Architecture bioclimatique : Centre culturel Jean-Marie Tjibaou.....	60
3.18	Architecture verte.....	60
3.19	Al Bahr Towers.....	60
3.20	Stade national de Pékin.....	60
3.21	Evolution du biomimétisme à travers l'histoire.....	61
3.22	Niveau d'inspiration du biomimétisme.....	63
3.23	Différentes nominations de la technique directe.....	67
3.24	Processus de conception biomimétique basé sur la technique directe.....	69
3.25	Différentes nominations de la technique indirecte.....	69
3.26	Processus de conception biomimétique basé sur la technique indirecte....	70
4.1	Principe de base des enveloppes adaptatives.....	80
4.2	Nuage des termes interchangeables relatifs à l'enveloppe adaptative.....	80
4.3	Parking « Wind Veil »	84
4.4	Le bâtiment Bio-Intelligent Quotient (BIQ).	85
4.5	Structures cinétiques embarquées.	88
4.6	Structures cinétiques déployables.	88
4.7	Structures cinétiques dynamiques.	88
4.8	Toit rétractable en polycarbonate de l'atrium du centre commercial Sans Visa.....	89
4.9	Façade de l'université Henning Larsen.....	89
4.10	Evolution de l'architecture responsive vers l'architecture adaptative sur un certain temps.	91
4.11	La salle d'exposition Kiefer.	92
4.12	HypoSurface.	93
4.13	Technologie utilisée dans la conception des enveloppes adaptatives.....	95
4.14	Musée pour enfants à Pittsburgh.	96
4.15	Bloom.....	97
4.16	Le projet Penumbra.	98
4.17	Bâtiment du siège social Q1.	99
4.18	Le Musée de Mercedes-Benz.	100
4.19	Media-TIC.....	101
4.20	Système de contrôle en boucle ouverte.....	102
4.21	Système de contrôle en boucle fermée.....	103
4.22	Réseaux de neurones artificiels (ANN).	105

5.1	Différentes couches composant le mur respirant.	115
5.2	Débit de chaleur à travers : (1) : bâtiment respirant, (2) : mur respirant...	116
5.3	Mécanisme de fonctionnement des bandes thermobimétaboliques	118
5.4	Armoured Corset.	119
5.5	Trachéole à l'état des ouvertures ouvertes.	119
5.6	Trachéole à l'état des ouvertures fermées.	119
5.7	Oculus.....	120
5.8	Air Flow(er).	121
5.9	Fleur de crocus jaune.	121
5.10	Mécanisme du fonctionnement d'air Flow (er).	121
5.11	Prototypes d'Air Flow(er).	122
5.12	Principe de fonctionnement de l'enveloppe respirante conçue par Scott Crawford.	123
5.13	Gauche : Ouverture maximale de l'enveloppe (100%), Au centre : ouverte intermédiaire de l'enveloppe (50%), A droite : fermeture de l'enveloppe.	124
5.14	Cheminement du flux d'air vers les espaces du bâtiment.....	124
5.15	Breathing Skins conçue par Tobias Becker.....	125
5.16	Enveloppe respirante générée par les étudiants de l'Institut d'Architecture Avancée de Catalogne.	126
5.17	Composition de l'enveloppe respirante.	127
5.18	Enveloppe respirante conçue selon des matériaux composites.....	128
5.19	Stoma Brick.	130
5.20	Mur respirant généré par Elghawaby.....	131
5.21	Fenêtre respirante.	132
5.22	Le Phalanx.	135
5.23	Processus de conception, (A) : cas réel, (B) : application de système de ventilation naturelle, (C) : création de la double peau, (D) : application du grillage de support, (E) : création de la protection solaire, (F) : application du système de refroidissement par évaporation, (G) : enveloppe finale.....	137
6.1	Situation géographique et limites de la ville de Batna.	141
6.2	Température de l'air.	142
6.3	Humidité relative.	142
6.4	Rose des vents.	143
6.5	À gauche : radiation directe, au centre : radiation diffuse, à droite : radiation totale.	144
6.6	Précipitations annuelles à Batna.....	144
6.7	Différentes périodes thermiques à Batna.	145
6.8	Diagramme psychrométrique de Batna.	146
6.9	Bâtiments publics municipaux (Groupement administratif sis à Z'mala, à Batna).	148
6.10	Composition du secteur urbain :(1) : Annexe administrative, (2) : Siège du secteur urbain, (3) : Parking auto, (4) : Magasin et espace technique...	150
6.11	(a) : Secteur urbain de la cité Amirouche, (b) : Annexe administrative.....	151
6.12	Annexe administrative de la cité Amirouche.....	152

6.13	Perspectives de l'annexe : à gauche : façade sud, à droite : façade nord.	152
6.14	Fenestration de l'annexe : (a) : fenêtres d'espace guichet, (b): fenêtres du hall d'accueil, (c): ouverture maximale des fenêtres du hall d'accueil, (d) : fenêtre du bureau chef d'annexe.	154
6.15	Position des points de mesure sur les axes horizontaux.	155
6.16	Instruments de mesure utilisés.	156
6.17	Résultats du 24/07/2022, (a) : Température de l'air, (b) : Humidité relative.....	160
6.18	Vitesse de l'air de la journée 24/07/2022.	161
6.19	Effet de l'absence de la ventilation.	161
6.20	Résultats du 25/07/2022 : (a) : Température de l'air, (b) : Humidité relative.	163
6.21	Vitesse de l'air de la journée 25/07/2022.	164
6.22	Emplacement des climatiseurs dans l'annexe administrative, (a): P7, (b): P4, (c): P6 et (d): P5.	165
6.23	Résultats du 26/07/2022 : (a) : Température de l'air, (b) : Humidité relative.....	166
6.24	Vitesse de l'air de la journée 26/07/2022.	167
6.25	Résultats d'évaluation de la perception de la température de l'air.....	171
6.26	Résultats d'évaluation de la perception d'humidité.....	172
6.27	Résultats d'évaluation de la perception de la vitesse de l'air.....	173
6.28	Résultats d'évaluation de la perception de l'ensoleillement.....	174
7.1	Processus de conception de l'enveloppe selon la technique descendante.....	179
7.2	Abeilles mellifères « <i>Apis Mellifera</i> ».....	180
7.3	(a) : système de trachées chez l'abeille. (b) : les stigmates d'après Snodgrass.	181
7.4	Forme hexagonale des ruches d'abeilles comparée à d'autres formes.....	182
7.5	Ouvertures de la maison chaoui de la vallée de l'Oued Abdi	182
7.6	Stratégie du bouclier thermique.	183
7.7	a): Stratégie de refroidissement par évaporation, (b): l'action de l'évacuation de l'eau par le haut.	184
7.8	Alliage à mémoire de forme (NiTi).	185
7.9	Alliage à mémoire de forme pour : (a) : stents médicaux, (b) : appareils orthodontiques.	186
7.10	Effet de mémoire de forme de SMA.	188
7.11	Logos de Rhinoceros et Grasshopper.....	189
7.12	Script algorithmique généré pour la modélisation paramétrique du cas d'étude.	190
7.13	Genèse de l'idée.	191
7.14	Cellules appliquées à la façade sud.....	191
7.15	Cellules appliquées à la façade nord.	193

7.16	(a) : loi pour une ventilation transversale performante, (b) : dimensions de cas d'étude après application de l'enveloppe.	194
7.17	Démarche de la simulation énergétique.	197
7.18	Logiciels utilisés pour la modélisation et la simulation.....	197
7.19	Etapes de la simulation énergétique selon le scénario 2.....	200
7.20	Indicateurs agissant sur le comportement de l'enveloppe adaptative.....	201
7.21	Le cas d'étude dans son état réel.....	201
7.22	Résultats d'analyse solaire du scénario 1 : (a) : Rayonnement solaire incident, (b) : analyse des heures d'ensoleillement.	202
7.23	Température de l'air issue de la simulation numérique (scénario 1).....	203
7.24	Charges de refroidissement de la journée 25 juillet.	204
7.25	Résultats d'analyse solaire du scénario 2 : (a) : Rayonnement solaire incident, (b) : analyse des heures d'ensoleillement.	207
7.26	Valeurs de température de l'air, (b) : Valeurs d'humidité relative.....	210
7.27	Ecart de température.....	211
7.28	Gradient vertical de température.	216
7.29	PMV du scénario 2.	218
7.30	PPD du scénario 2.	220

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Différents exemples de stratégies d'adaptation naturelle et leur interprétation architecturale.....	39
3.1	Différents exemples de projets qui s'inspirent de la nature à travers ses différents niveaux.	64
5.1	Genèse de l'idée de création de la fenêtre respirante.....	133
5.2	Genèse de l'idée de création du Phalanx.....	136
6.1	Températures de l'air et humidité relative de Batna.....	143
6.2	Résultats de l'analyse bioclimatique de Batna.....	147
6.3	Dépense de l'énergie soumise à la charge de la mairie de Batna.....	149
6.4	Fiche technique de cas d'étude.....	150
6.5	Description du cas d'étude.....	153
6.6	Occupation et horaires.....	153
6.7	Détails des façades.....	154
6.8	Paramètres physiques liés au confort thermique à étudier.....	155
6.9	Fonction et positionnement de l'instrument de mesure.....	156
6.10	Différents scénarios de la campagne de mesure.....	157
6.11	Calendrier de la mise en marche des climatiseurs.....	165
6.12	Résultats des indices de confort thermique PMV-PPD des 3 jours.....	168
6.13	Informations des personnes interrogées.....	169
7.1	Température effective de l'annexe administrative (scénario1)	206
7.2	Température effective de l'annexe administrative (scénario2).....	213
7.3	Vote moyen prédit PMV.....	219

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation

PNUE :	Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
APRUE :	Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie d'Algérie.
ICU :	Ilot de chaleur urbain.
COVID-19 :	<i>Coronavirus Disease 2019.</i>
SMA :	<i>Shape memory matériel.</i>
NiTi :	<i>Nitinol.</i>
h :	Heure.
PMV :	<i>Predicted Mean Vote.</i>
PPD :	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied .</i>
3D :	Trois dimensions.
C4 :	Type spécifique de photosynthèse pour fixer le carbone.
CAM :	<i>Crassulacean Acid Metabolism.</i>
CO ₂ :	Dioxyde de carbone.
O ₂ :	Oxygène.
AIE :	Agence internationale de l'énergie.
MCP :	Matériau à changement de phase.
IA :	Intelligence artificielle.
SMM :	<i>Shape memory material.</i>
SMP :	<i>Shape memory polymer.</i>
CVC :	Chauffage, Ventilation et Climatisation.
ETFE :	Ethylène Tetra Fluoro Ethylene.
ANN :	<i>Artificial Neural Networks.</i>
FLC :	<i>Fuzzy Logic Control.</i>
BAS :	<i>Building automation system.</i>
BMS :	<i>Building Management System.</i>
HEPA :	<i>High-Efficiency Particulate Air.</i>
U :	Coefficient de transmission thermique.
USC :	<i>University of Southern California.</i>
SBM :	Syndrome des bâtiments malsains.
EPO :	Evaluation post-occupation.
EPW :	<i>EnergyPlus Weather file.</i>
ASHRAE :	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.</i>
DA :	Dinars algériens.
DA/an :	Dinars Algériens par an.
CEM :	Collège d'Enseignement Moyen.
R+1 :	Rez-de-chaussée plus étage.
RDC	Rez-de-chaussée.
BET :	Bureau d'Études Techniques.
B1 :	Bloc 1.
P0 – P10 :	Points de mesure.
ISO :	<i>International Organization for Standardization.</i>
Mo :	<i>Metabolism.</i>
Clo :	<i>Clothing.</i>
ANEM :	Agence nationale de l'emploi et de la main-d'œuvre.
ADEME :	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Cu :	Cuivre.
Fe :	Fer.
M :	Phase martensite.
Ms :	Température de début de martensite.
Mf :	Température de fin de martensite.
A :	Phase austénite.
As :	Température de début d'austénite.
Af :	Température de fin d'austénite.
½ Sc :	La moitié de la surface des cellules sud.
H :	Hauteur.
LD :	<i>Ladybug plugin.</i>
HB :	<i>Honeybee plugin.</i>
Ver :	Version.
EMB :	<i>Energy modeling of buildings.</i>
ERP :	Etablissements recevant du public.

RESUME

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie, notamment en été. La moitié de la consommation d'énergie est liée à la climatisation. Cette consommation est fortement liée à l'enveloppe architecturale, car elle est souvent mal adaptée aux particularités climatiques de la zone. Par conséquent, cette recherche vise à évaluer l'ambiance thermique intérieure dans un bâtiment public existant dans la ville de Batna (climat semi-aride). Pour cela, deux méthodes sont utilisées :

L'une est une investigation in situ s'inscrivant dans le cadre d'une évaluation post-occupation effectuée à travers 3 jours successifs du 24 au 26 juillet 2022 (mois le plus chaud) de 08h00 à 16h00, selon deux types d'enquêtes, d'une part, une enquête quantitative et objective, basée sur une campagne de mesures des paramètres physiques liés au confort thermique à travers les trois blocs composant le bâtiment. Et d'autre part, une enquête qualitative et subjective effectuée à l'aide des questionnaires afin d'évaluer la perception du bien-être et la satisfaction des occupants. Les résultats de l'investigation in situ ont indiqué une surchauffe interne qui rend l'espace inconfortable et que les usagers sont insatisfaits.

L'autre est une simulation numérique énergétique, consacrée à examiner le comportement thermique du cas d'étude via les plugins Ladybug & Honeybee, durant la journée du 25 juillet, de 08h00 à 16h00. Selon deux scénarios différents : l'un est la pré-réhabilitation thermique du cas d'étude dans son état réel, et l'autre est la post-réhabilitation thermique après application de l'enveloppe adaptative inspirée de différentes techniques d'adaptation observées dans le monde des abeilles. Cette enveloppe a été appliquée sur les façades sud et nord pour favoriser la ventilation transversale et améliorer le refroidissement estival. Sur la façade sud, nous avons appliqué une enveloppe complexe, composée de deux couches séparées par une cavité d'air comprenant un système de refroidissement par évaporation à courant descendant pour rafraîchir l'air avant qu'il n'entre dans le bâtiment. De plus, l'ouverture et la fermeture des cellules externes d'enveloppe sont garanties par l'emploi d'un matériau intelligent (alliage à mémoire de forme, ou SMA) comme capteur et actionneur qui s'adapte de manière autonome aux stimuli externes tout en remplaçant les éléments durs des systèmes de climatisation mécanique énergivore en énergie électrique.

Les résultats obtenus montrent une amélioration de l'ambiance thermique interne, caractérisée par une réduction de la surchauffe interne avec une baisse de température atteignant une valeur maximale de 7,59 °C. Ces résultats favorisent l'efficacité énergétique et réduisent l'impact du bâtiment sur l'environnement.

Mots clés : Enveloppe adaptative, Biomimétisme, Abeille, Alliage à mémoire de forme (SMA), Ventilation transversale, Bâtiment public, Climat semi-aride.

ABSTRACT

In Algeria, the building sector is the biggest consumer of energy, particularly in summer, as half of the energy is consumed by air conditioning. This consumption is closely linked to the architectural envelope, which is often unadapted to the climatic characteristics of the zone. The aim of the present study is to assess the indoor thermal environment of an existing public building in Batna city (semi-arid climate). Two methods are used:

The first method is an *in-situ post-occupancy evaluation*, which is carried out for 3 successive days from 24th to 26th July, 2022 (the hottest month) from 08:00 to 16:00, according to two types of survey: a quantitative and objective survey, based on a set of measurements of the physical parameters that are related to thermal comfort in the three blocks of the building. The second survey is a qualitative and subjective one which is carried out using questionnaires to assess occupants' perception of well-being and satisfaction. The results of the *in-situ* investigation indicated an internal overheating that made the space uncomfortable and unsatisfactory.

The second method is a digital energy simulation, to evaluate the thermal behaviour of the case study via Ladybug & Honeybee plugins, during the day of 25th July, from 08:00 to 16:00. according to two different scenarios: the first one is the thermal pre-rehabilitation of the case study in its actual state, and the second one is the thermal post-rehabilitation after application of the adaptive envelope inspired by various adaptation techniques observed in the world of bees. This envelope was applied to the south and north façades to promote cross ventilation and improve summer cooling. On the south facade, a complex envelope is applied. It is composed of two layers separated by an air cavity that incorporates a downdraft evaporative cooling system to cool the air before it enters the building. In addition, the opening and closing of the external envelope cells is ensured by an intelligent material (Shape Memory Alloy, or SMA) as a sensor and actuator that autonomously adapts to external stimuli while substituting to the hard elements of mechanical air conditioning systems that consume a lot of electrical energy.

The obtained results show an improvement of the internal thermal environment, characterised by a reduction in internal overheating, with a drop in temperature reaching a maximum value of 7,59°C. These results promote energy efficiency and reduce the building's impact on the environment.

Key words: Adaptive envelope, Biomimicry, Bee, Shape memory alloy (SMA), Cross ventilation, Public building, Semi-arid climate.

ملخص

يعتبر قطاع البناء في الجزائر من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة، خاصة في فصل الصيف. ويرجع نصف استهلاك هذه الطاقة لتكييف الهواء. ويرتبط هذا الاستهلاك ارتباطاً وثيقاً بالغللاف المعماري، لأنه غالباً ما يكون غير متكيف مع الخصائص المناخية للمنطقة. في هذا الصدد يهدف هذا البحث إلى تقييم البيئة الحرارية الداخلية في مبنى عمومي متواجد بمدينة باتنة (مناخ شبه جاف). ولهذا تم استخدام طريقتين:

الأولى عبارة عن تحقيق في الموقع ويتمثل في تقييم ما بعد الإشغال، اجري على مدى 3 أيام متتالية من 24 إلى 26 جويلية 2022 (الشهر الأكثر سخونة) من الساعة 8 صباحاً حتى 4 مساءً، وفقاً لنوعين من التحقيقات، من ناحية، عن طريق تحقيق كمي وموضوعي، اعتمد على حملة قياس للعوامل الفيزيائية المرتبطة بالراحة الحرارية عبر الاجزاء الثلاثة المكونة للمبنى. ومن ناحية أخرى، عبر إجراء تحقيق نوعي وذاتي بواسطة استبيانات تهدف الى تقييم إدراك الرفاهية والرضا لدى شاغلي المبنى. اشارت نتائج التحقيق في الموقع إلى ارتفاع درجة الحرارة الداخلية مما جعل المبنى غير مريح وشاغليه غير راضين.

والثانية تتمثل في محاكاة رقمية للطاقة، تهدف إلى فحص السلوك الحراري لمبنى موضوع الدراسة بواسطة البرنامجين الإضافيين Honeybee و Ladybug، خلال يوم 25 جويلية، من الساعة 8 صباحاً حتى 4 مساءً، وفقاً لسيناريوهين مختلفين: الأول هو ما قبل إعادة التأهيل الحراري لمبنى موضوع الدراسة وهذا ضمن حالته الطبيعية، والآخر يتجلى فيما بعد إعادة التأهيل الحراري بعد تطبيق الغلاف التكميلي المستوحى من تقنيات التأقلم المختلفة التي لوحظت في عالم النحل. تم تطبيق هذا الغلاف على الواجهة الجنوبية والشمالية لتعزيز التهوية المتقاطعة وتحسين التبريد في الصيف. على الواجهة الجنوبية قمنا بتطبيق غلاف معقد يتكون من طبقتين يفصل بينهما تجويف هوائي يحوي نظام تبريد تبخيري ذو تيار سفلي لتبريد الهواء قبل دخوله إلى المبنى. بالإضافة إلى ذلك، يتم ضمان فتح وإغلاق الخلايا الخارجية لهذا الغلاف من خلال استخدام مادة ذكية (سبائك ذاكرة الشكل، أو SMA) كمستشعر ومشغل يتكيف بشكل مستقل مع المحفزات الخارجية، والذي يسمح باستبدال العناصر الصلبة في أنظمة تكييف الهواء الميكانيكية المفرطة في استهلاك الطاقة الكهربائية.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسناً في البيئة الحرارية الداخلية والتي تتميز بتقليل السخونة الزائدة الداخلية مع انخفاض في درجة الحرارة يصل إلى قيمة قصوى تبلغ 7.59 درجة مئوية. تعمل هذه النتائج على تعزيز كفاءة استخدام الطاقة وتقليل تأثير المبنى على البيئة.

الكلمات المفتاحية: الغلاف التكميلي، التقليد الحيوي، النحلة، سبيكة ذاكرة الشكل (SMA)، التهوية المتقاطعة، مبنى عام، المناخ شبه الجاف.

CHAPITRE I
INTRODUCTION
GENERALE

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

« L'architecte du futur devrait construire en imitant la nature, parce que c'est la méthode la plus rationnelle, la plus durable et la plus économique de toutes les méthodes » Antonio Gaudi (Lesage, 2015).

1.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, le monde entier a subi des changements climatiques, caractérisés par un réchauffement planétaire global. Ce phénomène se manifeste par une augmentation remarquable des températures de l'air, particulièrement par des étés plus chauds et prolongés. Par conséquent, d'ici 2050, près de 70% de la population des pays chauds aura besoin de la climatisation pour faire face aux hausses de température (Meirone, 2022), ce qui provoque l'augmentation du nombre de climatiseurs dans le monde, atteignant 5,6 milliards en 2050 (LePoint, 2022). Ce qui influe négativement sur la consommation d'énergie en matière de facture d'électricité, ce qui va par la suite accentuer le changement climatique.

Dans le même contexte, en 2019, le programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) affirme que le secteur des bâtiments se positionne comme le premier consommateur d'énergie dans le monde par rapport aux secteurs de l'industrie et du transport, représentant une consommation de 35% de la production mondiale d'énergie, ce qui conduit en retour à produire presque 40% des émissions mondiales globales de gaz à effet de serre (Kiki, 2023).

L'Algérie ne fait pas exception : pendant la dernière décennie, le bilan énergétique national présenté par APRUE en 2017 indiquait une hausse notable de la consommation énergétique (Khadraoui, 2019), dont la consommation finale d'énergie atteint 519 millions de MWh, dont 43% sont utilisés par deux secteurs énergivores jumelés, le tertiaire et le résidentiel (Figure 1.1) (APRUE, 2017).

Par la suite, le secteur tertiaire est déterminé par une consommation d'électricité qui est prédominante, atteignant 41%, alors que la consommation du gaz naturel atteint 43% de l'ensemble de l'énergie consommée par ce secteur. Cela se justifie par l'exploitation massive des équipements de chauffage et de climatisation (Figure 1.2) (APRUE, 2017) qui sont destinés principalement pour répondre aux besoins du confort thermique des usagers en matière de chauffage et de climatisation (Khadraoui, 2019).

En conséquence, l'énergie est au cœur de toutes les préoccupations et constitue un défi pour les prochaines décennies, provoquant des préoccupations mondiales accrues,

notamment celles relatives aux questions affectant profondément le domaine architectural (Charkas, 2019). Ce qui nécessite que les architectes et les concepteurs repensent à la conception architecturale à travers une prise de mesures pertinente afin d'atteindre une maîtrise de la consommation énergétique dans le bâtiment pour créer des constructions durables, économes en énergie et en ressources (Denke, Hassar and Baradiy, 2014) qui prennent en considération les différents besoins environnementaux, économiques et sociaux.

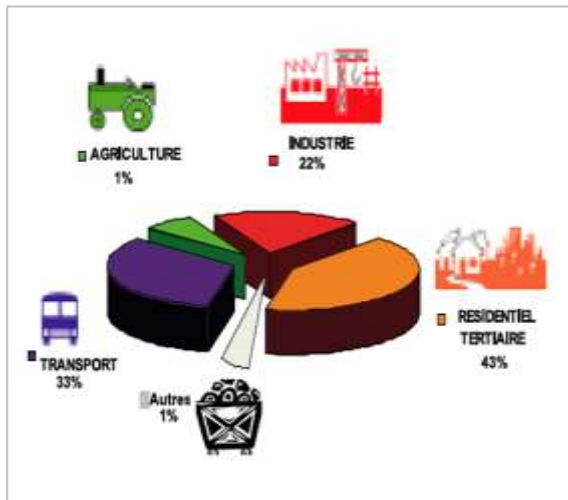


Figure 1.1. Répartition de la consommation finale de l'énergie par secteur d'activité.
Source : APRUE (2017).

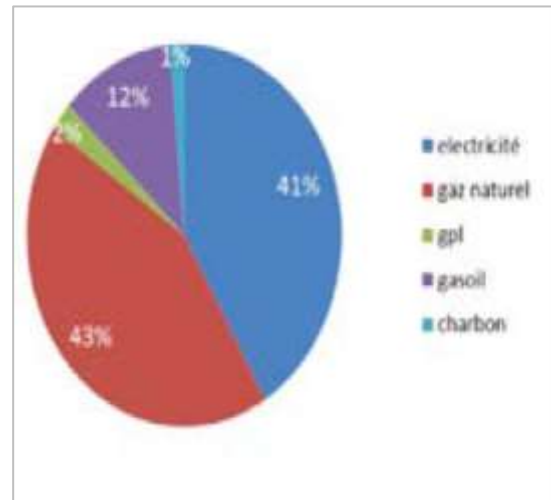


Figure 1.2. Consommation énergétique du secteur tertiaire en Algérie.
Source : APRUE (2017).

En réponse, la nature a donné des exemples remarquables d'adaptation, d'innovations et de gestion des ressources tout au long des 3,8 milliards d'années d'évolution (Nasir and Kamal, 2022), lui permettant d'être une fortune biologique dont nous devrions tirer des leçons (Nour EIDin, 2024) et d'où les architectes et les designers tirent inspiration pour concevoir des systèmes non biologiques qui peuvent résoudre des problèmes techniques déjà résolus dans le monde naturel (Fiorito *et al.*, 2016). Cette inspiration est basée sur une approche biomimétique, qui exploite les processus biologiques pour créer des solutions d'architecture novatrices et pérennes (Kuru, 2020). Cette approche offre la possibilité de faire face aux défis environnementaux, culturels, sociaux, économiques et notamment énergétiques des générations futures (Belaredj and Chebab, 2023).

À cet égard, notre défi en tant qu'architectes se focalise sur la création des futures peaux et systèmes de bâtiments qui doivent être adaptatifs et fonctionner naturellement et d'une manière autonome, sans consommation excessive d'énergie, de la même manière que les systèmes constatés dans la nature comprenant un soutien des développements technologiques. C'est dans ce domaine que s'inscrit notre travail d'études.

1.2. Problématique

Le bâtiment est probablement le défi des prochaines décennies, donc il faut construire en fonction du climat et aller vers une transition énergétique avec plus d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables en assurant l'écoconstruction en Algérie (Dali, 2017). L'enjeu actuel est donc de préserver et d'améliorer le confort des personnes et de réduire également la consommation énergétique, notamment en ce qui concerne le chauffage et la climatisation (Denke, Hassar and Baradiy, 2014).

En Algérie, le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie, en particulier en été. La moitié de la consommation d'énergie est liée à la climatisation (Hadjadj, 2017), notamment dans les bâtiments situés dans des régions chaudes et sèches. Dans cette optique, le secteur tertiaire, qui fait partie du secteur du bâtiment, est déterminé par des bâtiments publics et administratifs caractérisés par une durée de travail atteignant 8 heures chaque jour, caractérisés par des taux d'occupation importants et une fréquentation de longue durée. Les usagers de ces bâtiments souffrent du problème de la surchauffe durant la période chaude, conduisant à une ambiance thermique désagréable. Ce qui exige de changer leur comportement et de faire des actions afin de minimiser ce malaise, soit par l'ouverture des fenêtres, ce qui peut être impossible à certains moments, soit en appuyant sur la télécommande pour la mise en marche de la climatisation. Cette dernière provoque une consommation énergétique énorme et participe à la pollution atmosphérique (Elghawaby, 2013) et à multiples problèmes d'environnement et de santé, en particulier au problème d'îlot de chaleur urbain (ICU) (Cadoni, 2012).

En outre, les bâtiments municipaux de la commune de Batna font partie du patrimoine municipal et se distinguent par une consommation énergétique considérable. Cette hausse de consommation est fortement causée par leur conception architecturale basée uniquement sur la transparence et l'esthétique des façades, produisant des constructions hautement vitrées et ne prenant pas en compte les aspects environnementaux et en négligeant leur aptitude à se conformer au climat local de la région où ils ont été implantés. Donc, ils sont dominés par des problèmes durant la période chaude tels que : l'éblouissement, l'effet de serre, le gain de chaleur interne provoquant une augmentation des températures intérieures, de plus les gains de chaleur supplémentaires issus de l'éclairage et des équipements électriques (Tahri, 2018), affectant négativement à la fois le confort thermique interne et la sensation du bien-être. Ce qui entraîne par la suite des bâtiments insalubres, caractérisés par des symptômes du syndrome des bâtiments malsains tels que : des maux de tête, de gorge, de fatigue, du manque de concentration, etc (Caue-martinique, 2018).

Pour faire face à cette situation et améliorer l'ambiance thermique interne ainsi que la perception thermique tout en augmentant la productivité des occupants, des systèmes de climatisation envahissent les façades et fonctionnent en continu tout au long de la période de fonctionnement de ces bâtiments. Cela provoque une augmentation de la consommation énergétique et influe de plus négativement sur l'aspect esthétique de ces bâtiments, contribuant à la dégradation du patrimoine (Cadoni, 2012).

À cet égard, cette étude se concentre sur l'architecture biomimétique comme approche alternative permet d'arriver aux solutions architecturales appropriées et adaptées au climat chaud. En s'inspirant de la nature et de ses systèmes impressionnants, en la tenant comme source infinie des solutions développées de manière efficace et durable (Elghawaby, 2013), afin de réduire la consommation d'énergie de refroidissement, d'améliorer les conditions de travail, de promouvoir la durabilité et de protéger l'environnement.

À cette fin, il est avéré nécessaire de créer des enveloppes qui se définissent comme des médiateurs entre l'environnement intérieur occupé par des personnes et l'extérieur avec ses facteurs environnementaux (Trubiano, 2013). Ces enveloppes sont caractérisées par des mouvements qui peuvent changer de forme au fil du temps quand une certaine stimulation est déclenchée, soit les conditions météorologiques, soit les besoins des occupants (Vazquez, Correa and Poppinga, 2024).

Ces enveloppes sont réalisées grâce à l'intégration de la technologie de pointe afin d'atteindre une amélioration de la performance du bâtiment en matière de chauffage, de ventilation naturelle (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010) et de réduire l'énergie consommée dans les charges de refroidissement (ElDin, Abdou and ElGawad, 2016). Permettant de créer une symbiose entre ces enveloppes et leur environnement, en favorisant le rafraîchissement passif effectué via une ventilation naturelle, en améliorant la qualité de l'air intérieur et en garantissant une efficacité énergétique dans ces bâtiments publics, en particulier depuis la pandémie de COVID-19.

Dans la même optique, cette recherche se focalise sur une tentative de création d'un modèle conceptuel d'une enveloppe adaptative manifestée sous forme d'un mur respirant (Breathing Wall) destinée à fournir des solutions à la conception statique. Cette proposition fonctionne suivant le même principe que la respiration des êtres vivants, s'appuyant sur le principe d'introduire de l'air frais à l'intérieur et d'expulser de l'air chaud vers l'extérieur, effectué via un rafraîchissement passif manifesté par une ventilation naturelle créant un mouvement d'air en remplaçant l'air stagnant par de l'air frais d'extérieur pour créer un environnement intérieur sain et confortable.

Ce mur respirant est conçu selon une stratégie de conception passive en s'inspirant de différentes stratégies d'adaptation constatées dans le monde des abeilles qui permettent de donner naissance à une façade cinétique et thermosensible, basée sur un mécanisme d'ouverture / fermeture. Ce mécanisme exploite une technologie avancée intégrant un matériau intelligent, capable de contrôler, de réguler et de s'adapter (Dewidar, Mohamed and Ashour, 2013) aux variations climatiques de manière autonome (Denz *et al.*, 2021).

Cette enveloppe permet de réagir passivement aux stimuli externes sans recourir à une source énergétique externe ni à des systèmes de contrôle ou d'actionnement conventionnels. Elle va ainsi au-delà des façades traditionnelles, favorisant une ventilation naturelle et améliorant le confort thermique des bâtiments dans des zones chaudes, comme à Batna.

Questions de la recherche

Aujourd'hui, l'un des plus grands problèmes auxquels nous sommes confrontés dans le secteur du bâtiment est celui du refroidissement, en particulier dans les zones climatiques chaudes (Mirajkar and Agrawal, 2019). Ce problème commence à devenir plus crucial auquel il faut faire face. À cet effet, dans cette recherche doctorale, nous mettons l'accent sur la création d'un bâtiment qui respire et s'adapte aux changements de son environnement comme le ferait un organisme vivant. C'est le défi que nous relevons dans cette thèse en développant une enveloppe architecturale bio-inspirée capable de réguler naturellement le confort thermique intérieur dans un bâtiment public considéré comme patrimoine communal qui se trouve dans la ville de Batna (climat semi-aride). Où va se focaliser notre recherche sur sa capacité d'assurer un renouvellement d'air et d'atténuer convenablement la surchauffe, notamment la période chaude (estivale et caniculaire). Dans le but de créer des environnements de travail sains et stimulants.

Plusieurs questions sont soulevées à propos de ce sujet de recherche :

Au niveau de la source d'inspiration

Que peut offrir le monde des abeilles pour créer un rafraîchissement passif dans un bâtiment public souffrant de surchauffe ?

Au niveau du mécanisme

Comment les matériaux intelligents pourraient-ils être utilisés pour imiter les stratégies d'adaptation des abeilles pour une accessibilité pratique pour les architectes afin de créer une enveloppe adaptative biomimétique manifestée sous forme d'un mur respirant ?

Au niveau de la fiabilité

Cette enveloppe adaptative inspirée des abeilles peut-elle améliorer l'ambiance thermique intérieure dans un bâtiment public situé dans une région caractérisée par un climat semi-aride durant la période chaude sans utilisation d'énergie électrique ?

1.3. Hypothèses

À partir des éléments de la problématique annoncée précédemment, la présente thèse s'est basée sur les hypothèses présentées ci-dessous :

- **Au niveau de la source d'inspiration :** dans une première étape, les abeilles mellifères découvertes depuis des millions d'années sont caractérisées par différentes stratégies de thermorégulation des ruches pour assurer leur survie et leur adaptation aux conditions changeantes, manifestées soient au niveau morphologique, physiologique et comportemental. Ces stratégies peuvent offrir de nombreuses possibilités et des concepts qui aideraient à développer des systèmes et des solutions pour créer du rafraîchissement passif dans un bâtiment public qui souffre de surchauffe interne.

- **Au niveau du mécanisme :** le transfert de ces stratégies d'adaptation et de survie des abeilles en enveloppe adaptative, traduite sous forme d'un mur respirant, qui est capable de respirer de la même manière qu'un être vivant, permet d'assurer un rafraîchissement passif à l'intérieur de bâtiments situés dans une zone chaude. Le fonctionnement de cette enveloppe est basé sur un mécanisme d'ouverture et de fermeture de la même manière que celui des spiracles des abeilles, s'appuyant sur l'emploi des alliages à mémoire de forme SMA (matériau intelligent thermosensible), caractérisés par leur autonomie de fonctionnement définie en tant que capteur et actionneur à la fois, sans aucun besoin d'énergie électrique ou de programmation informatique.

- **Au niveau de la fiabilité :** cette enveloppe adaptative s'appuie sur la ventilation naturelle transversale ainsi que sur une cavité d'air équipée par un système de refroidissement par évaporation à courant descendant caractérisé par une pulvérisation d'eau permettant de réduire la température de l'air en améliorant l'ambiance ainsi que la sensation thermique intérieure, en augmentant le nombre d'heures de confort et en réduisant la demande d'énergie pour le refroidissement du bâtiment public situé dans la zone caractérisée par un climat semi-aride.

1.4. Objectifs de la recherche

Cette recherche s'inscrit dans une vision qui convoitera les objectifs suivants :

Au niveau de la source d'inspiration

Ce travail propose une tentative d'approche architecturale biomimétique, alternative de l'architecture conventionnelle, permettant d'avoir une transition des stratégies naturelles basée sur la combinaison entre l'inspiration de différentes stratégies d'adaptation des abeilles dans ces différents niveaux : physiologique, morphologique et comportementale, pour la réalisation des solutions architecturales passives, comprenant un cachet de l'architecture vernaculaire Aurésienne, notamment celle de la vallée de l'Oued Abdi, dans le but de créer une enveloppe adaptative avec un comportement comme celui de l'être vivant dans sa respiration et son acclimatation à son environnement pour améliorer les systèmes de ventilation.

Au niveau d'adoption des matériaux intelligents

Cette enveloppe adaptative est caractérisée par l'exploitation de la technologie avancée manifestée par des matériaux intelligents à changement de forme et thermosensibles, en particulier d'alliages à mémoire de forme SMA dans le modèle NiTi, qui fonctionnent en tant que capteur et actionneur, grâce à ses propriétés intrinsèques réversibles. Ce matériau sert à :

- Effectuer des changements de forme pour garantir le comportement cinétique de l'enveloppe selon une stratégie d'ouverture / fermeture, qui s'adapte de manière autonome aux stimuli, sans besoins d'énergie électrique, et ne requiert aucun équipement informatique, ce qui les rend à l'abri des pannes informatiques ou des attaques de virus et de pirates cybernétiques.
- Eliminer le recours à la commande humaine manuelle ;
- Remplacer les systèmes lourds et énergivores de la climatisation mécanique ;
- Diminuer les dépenses d'entretien.

Au niveau du confort et de la performance énergétique

Cette enveloppe est conçue pour réagir en fonction des changements de l'environnement interne et externe, définie en tant qu'une nouvelle ère de conception durable, elle sert à :

- Réduire la surchauffe interne constatée dans un bâtiment public (qui fait partie du patrimoine communal) situé dans la commune de Batna, caractérisée par un climat semi-aride durant la période chaude.

- Améliorer l'ambiance thermique en favorisant un rafraîchissement passif estival et en améliorant la sensation de confort hygrothermique intérieur, et la qualité de l'air, via une ventilation transversale et un système de refroidissement par évaporation.
- Améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et faire des économies d'énergie tout en élargissant la zone de confort et en promouvant la sensation du bien-être des occupants.
- Contribuer au développement d'une architecture plus innovante et durable qui respecte l'environnement et ses principes écologiques, tout en minimisant la pollution atmosphérique.

Afin d'atteindre nos objectifs et de vérifier nos hypothèses, nous pourrions procéder à notre travail comme suit :

1.5. Approche méthodologique

Cette thèse de doctorat vise à utiliser une approche d'évaluation post-occupation pour examiner l'ambiance thermique intérieure dans un bâtiment public reconnu comme bâtiment municipal faisant partie du patrimoine communal de Batna pendant la période chaude.

Cette étude sera développée en deux parties principales selon le processus de recherche, afin d'arriver à une conclusion générale qui confirmera ou infirmera les hypothèses citées ci-dessus et qui comporte les parties suivantes :

- **La première partie** est une partie théorique consacrée à faire une recherche préliminaire de l'état des connaissances, permettant le traitement des différents aspects théoriques sur le sujet de l'architecture biomimétique, paramétrique et respirante. Elle est destinée à mieux cerner, comprendre et maîtriser les concepts relatifs au thème. Cette partie est considérée comme un socle théorique de cette recherche qui s'étale à travers quatre chapitres, à partir du chapitre II jusqu'au chapitre V.
- **La seconde partie** est consacrée à la partie pratique de cette recherche, qui s'appuie sur la base du fondement théorique élaboré dans la partie précédente. Cette section est basée sur les étapes suivantes : Investigation – invention – analyse comparative, distribués, d'une part, sur une investigation in situ dans le cas d'étude sans aucune intervention et d'autre part, sur une stratégie de réhabilitation thermique à travers l'application de l'enveloppe adaptative proposée générée selon une approche biomimétique, caractérisée par une procédure de modélisation et d'évaluation de performance de l'enveloppe objet de notre recherche effectuée via une simulation numérique et énergétique.

Ces deux parties sont parachevées par une introduction générale et une conclusion générale, comme illustré dans la Figure 1.3, qui présente la structure de cette recherche.

Le présent manuscrit sera ainsi développé en huit chapitres, définis comme suit :

1.6. Structure de la thèse

Chapitre I

Ce chapitre constitue l'introduction générale et offre une vision globale de notre thème, comprenant le recours à la nature pour créer des enveloppes adaptatives pour réduire la consommation énergétique, effectuée à travers l'énonciation de la problématique, le développement des hypothèses et des objectifs, l'explication de l'approche méthodologique ainsi que l'exposition de la structure de la thèse.

Chapitre II

Dans ce chapitre, on va présenter une méthode heuristique explicative traduite par un apprentissage dans le monde naturel caractérisé par différents systèmes de survie développés depuis des milliards d'années, traduite par une investigation **de différentes stratégies d'adaptation** constatées chez la faune, la flore et l'être humain, manifestées soit au niveau morphologique, physiologique ou comportemental, avec des exemples pour chaque type pour une meilleure compréhension et exploitation architecturale.

Chapitre III

Comme toujours, la nature demeure la principale source d'inspiration, nous ayant conduits vers une nouvelle approche en plein essor : **le biomimétisme**. Ce chapitre est consacré à l'exploration de cette approche à travers plusieurs dimensions, afin de mieux l'appréhender.

Chapitre IV

Au sein de ce chapitre, nous allons aborder le sujet des **enveloppes adaptatives** qui sont au cœur de cette recherche, déterminées en tant qu'avancée prometteuse en architecture, permettant d'acquérir des connaissances sur leur conception. En commençant par une revue narrative sur des définitions utiles et nécessaires. En deuxième lieu, une section est consacrée à mieux comprendre ces enveloppes, leurs spécificités et leurs mécanismes de fonctionnement, présentée sous forme d'une taxonomie des stratégies de conception de ce type d'enveloppes, organisée selon différents critères de classification. Enfin, l'accent a été mis sur les différents systèmes de contrôle dans ces enveloppes adaptatives cinétiques, comprenant des exemples explicatifs pour faciliter la compréhension.

Chapitre V

Ce chapitre est considéré comme l'artère principale de ce travail de recherche, il sert à présenter la notion du **Mur Respirant** présentée comme une technique novatrice, inspirée du système respiratoire constaté chez les êtres vivants pour créer des bâtiments qui respirent, et s'adaptent aux variations environnementales afin de garantir une amélioration de l'ambiance thermique intérieure et atteindre une efficacité énergétique permettant d'aller au-delà de l'approche standard. Ce chapitre est consacré à présenter différents exemples de murs respirants, manifestants selon différentes configurations, qui sont classés selon différents critères.

Dans la deuxième partie de cette thèse, une approche pratique a été introduite :

Chapitre VI

Ce chapitre vise à effectuer une approche d'évaluation post-occupation, axée sur l'analyse de l'ambiance thermique intérieure d'un bâtiment public présenté sous forme d'une annexe administrative sise à la cité Amirouche, qui fait partie du patrimoine communal de la commune de Batna, décrit par son climat semi-aride. Cette annexe est caractérisée par la présence d'une grande surface vitrée et l'absence d'accès à la ventilation naturelle, accompagnée d'une forte fréquentation publique. Cette approche d'évaluation s'appuie sur une **investigation in situ**, menée pendant la période estivale chaude, manifestée à travers 3 jours successifs du 24 au 26 juillet 2022 (mois le plus chaud) de 08h00 à 16h00, selon deux stratégies d'enquêtes menées simultanément.

- L'une est une **enquête quantitative et objective** basée sur la collecte et l'analyse de données quantitatives relatives aux paramètres physiques liés au confort thermique (température de l'air, humidité relative, vitesse de l'air, PMV et PPD).
- L'autre est **une enquête qualitative et subjective**, consacrée à l'interprétation des résultats des questionnaires distribués aux occupants de l'annexe pour connaître leurs opinions, sentiments et sensations en matière de confort thermique.

Chapitre VII

Ce chapitre est consacré à **l'amélioration de l'ambiance thermique interne** pour faire face aux problèmes décrits dans le chapitre précédent, selon une approche d'architecture biomimétique envisagée comme un outil de conception alternative qui sera présenté en deux volets :

Volet 1 : ce premier volet repose sur la présentation du **processus de conception de l'enveloppe adaptative** respirante en s'inspirant des différents systèmes de survie du monde des abeilles, générée selon la technique descendante Top/Down. Cette conception paramétrique sera modelée en 3D en utilisant le logiciel Rhinoceros/Grasshopper.

Volet 2 : ce deuxième volet est destiné à l'amélioration de l'ambiance thermique interne de l'annexe administrative présentée dans le chapitre VI, lors de la journée du 25 juillet durant la tranche horaire de 08h00 à 16h00 via une simulation énergétique. Cette dernière est effectuée à l'aide des plugins Ladybug et Honeybee avec leurs logiciels intégrés, notamment EnergyPlus, selon deux scénarios distincts :

- **Le premier scénario** est consacré à simuler l'annexe administrative dans son état réel (pré-réhabilitation thermique), permettant d'acquérir plus d'informations sur le bâtiment qui sont difficiles à obtenir pendant l'investigation in situ pour mieux comprendre son comportement thermique.
- **Le deuxième scénario** est effectué après l'application de l'enveloppe adaptative (post-réhabilitation thermique), sert à **évaluer la performance de l'enveloppe adaptative** générée dans le volet précédent, sur le confort thermique et la perception du bien-être des occupants lors de la même journée estivale, le 25 juillet, pendant la période de fonctionnement de ce bâtiment.

Chapitre VIII

Le dernier chapitre est consacré à une conclusion générale récapitulant les synthèses et les résultats de la recherche, tout en apportant des réponses aux questions soulevées, identifiant les recommandations, de plus les défis, limites et difficultés de la recherche, ainsi que les perspectives relatives au sujet de recherche.

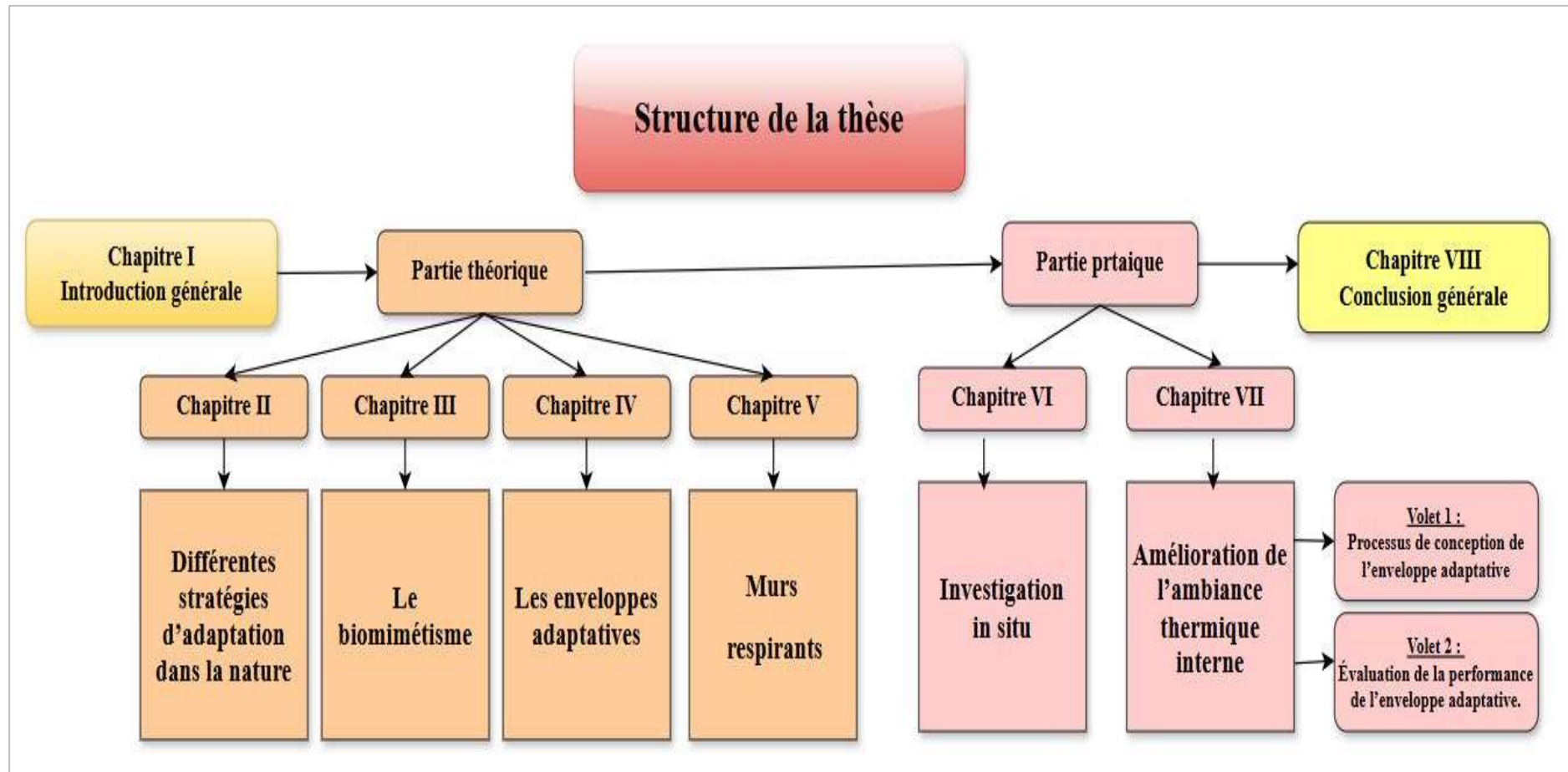


Figure 1.3. Structure de la thèse.
Source : Auteur (2023).

CHAPITRE II
DIFFERENTES
STRATEGIES
D'ADAPTATION DANS
LA NATURE

CHAPITRE II : DIFFERENTES STRATEGIES D'ADAPTATION DANS LA NATURE

« *La nature est un professeur universel et sûr pour celui qui l'observe* » Carlo Goldoni

Introduction

Les architectes trouvent dans la nature des sources inépuisables d'inspiration, grâce aux capacités d'adaptation astucieuses des organismes naturels. Il est crucial de comprendre l'interaction entre chaque organisme vivant et son environnement, que ce soit sur le plan morphologique, physiologique ou comportemental. Afin de bénéficier de cette richesse, ce chapitre examine ces mécanismes naturels essentiels et les présente comme une base de données précieuse. Cet apprentissage vise à simplifier ces stratégies naturelles pour faciliter l'accessibilité pratique pour la création de bâtiments biomimétiques, durables et adaptatifs, qui peuvent s'intégrer de manière harmonieuse dans leur environnement.

2.1. Définition de la faune

La faune désigne l'ensemble des espèces animales vivant dans un territoire géographique ou un écosystème particulier, à une période donnée (Larousse, 2023).

2.2. Définition de la flore

La flore signifie l'ensemble des plantes qui se trouvent dans une région donnée (LeRobert, 2023).

2.3. Définition de l'action de s'acclimater

2.3.1. En langue

Acclimater : désigne une action de prendre en compte quelque chose, l'intégrer, l'adapter à un environnement différent (Larousse, 2023).

S'acclimater ou être acclimaté : désigne s'habituer, se développer et se reproduire à un nouveau milieu, à un genre de vie différent (Larousse, 2023).

2.3.2. En biologie

Ce terme désigne la capacité d'un organisme naturel de faire un processus de transformations pour s'ajuster dans un nouveau milieu ou en réponse à des changements contextuels (Crawford, 2010; Larousse, 2023).

2.4. Définition de la notion d'adaptation

2.4.1. En langue

Désigne la mise en scène et l'adaptation d'une œuvre littéraire à la scène ou à l'écran, tel que signer l'adaptation d'un roman au théâtre (Encarta, 2009).

2.4.2. En biologie

L'adaptation est une notion essentielle et complexe qui implique la capacité d'évolution continue d'un organisme ou d'une population d'organismes vivants afin de mieux répondre aux besoins de son environnement. Elle s'appuie sur des solutions biologiques qui sont souvent complexes, multifonctionnelles et très réactives (Rezek, 2015).

Elle désigne également un changement progressif des espèces, appuyé par leurs données génétiques, leurs traits morphologiques et leurs stratégies comportementales et physiologiques, qui se développent au fil du temps (Öztoprak, 2018). Grâce à ce processus, les organismes vivants peuvent survivre et se reproduire dans des conditions inhabituelles, en réponse aux variations externes ou internes (El-Dabaa, 2016). L'adaptation vise à augmenter leur probabilité de survie et de reproduction tout en affrontant les contraintes environnementales, qu'elles soient locales ou globales.

2.5. Types d'adaptation dans la nature

La plupart des êtres vivants, qu'ils soient animaux, végétaux ou même humains, ont développé des adaptations variées afin de survivre et de prospérer dans leurs milieux. Ces adaptations peuvent prendre différentes formes : morphologiques, physiologiques ou comportementales (Kuru *et al.*, 2020). Ces stratégies donnent aux organismes la capacité de faire face aux défis et changements internes ou externes de leur environnement (Crawford, 2010).

Dans la section suivante, nous nous concentrerons sur les différentes stratégies d'adaptation observées dans la nature, en présentant brièvement les mécanismes qui permettent aux organismes de s'adapter aux changements de leur environnement. Ces stratégies peuvent être classées en trois catégories principales suivantes :

2.5.1. Adaptation morphologique

La notion d'adaptation morphologique fait référence aux changements physiques observés dans la structure de l'être vivant, qui affectent sa forme, sa taille, ses proportions, ses membres ou encore la texture de sa peau. Au fil du temps, ces modifications se produisent pour assurer la survie et la reproduction de l'espèce dans son milieu. Ces modifications

permettent aux organismes de faire face de manière plus efficace aux pressions exercées par leur environnement (Tabadkani *et al.*, 2021). À titre d'exemple :

- **La présence des branchies** chez les poissons leur permet d'extraire l'oxygène de l'eau.
- **La forme du bec** : chaque espèce d'oiseau possède un bec spécifique qui convient à un type de nourriture spécifique (Figure 2.1).

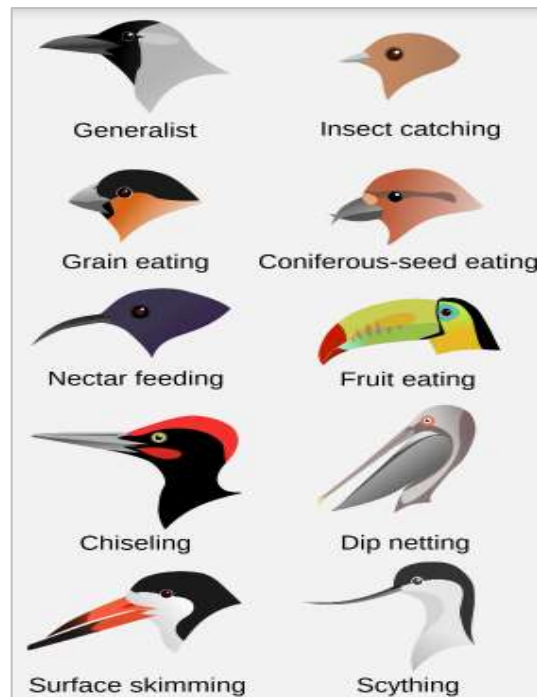


Figure 2.1. Différents types de becs des oiseaux.
Source : Techno-science (2023).

2.5.2. Adaptation physiologique

L'adaptation physiologique désigne les modifications internes et ingénieuses basées sur le fonctionnement des organes, des systèmes internes et des processus biologiques, qui permettent aux organismes vivants de réguler leurs fonctions biologiques en réponse aux changements de leur environnement pour garantir la survie et la reproduction dans des conditions environnementales diverses et parfois extrêmes (Després, 2022; Larousse, 2023). Par exemple :

- **Sensibilité à la lumière** : chez certains animaux, les yeux sont sensibles à la faible lumière, avec la pupille de l'œil qui se dilate dans l'obscurité pour permettre d'entrer plus de lumière et qui se contracte en cas de lumière vive pour protéger la rétine, comme c'est le cas des chats (MyPet, 2024).

- **Changement de couleur de la peau** pour se camoufler et se dissimuler des prédateurs, ce qui lui permet de chasser leurs proies aisément, c'est le cas du caméléon (N'konou, 2023) (Figure 2.2).



Figure 2.2. Changement de couleur de la peau du caméléon.
Source : N'konou (2023).

2.5.3. Adaptation comportementale

L'adaptation comportementale dans la nature est une réaction qui reflète des actions ou des manières effectuées via des modifications ou des changements du comportement des organismes vivants individuels ou collectifs, qui se traduisent principalement par une flexibilité pour effectuer des mouvements. Ce type d'adaptation est plus avantageux aux organismes, facilitant de trouver de la nourriture, de se reproduire avec succès et d'échapper aux prédateurs dans les conditions environnementales variées (Tabadkani *et al.*, 2021).

Les adaptations comportementales peuvent se manifester de diverses manières, notamment :

- **Communication** : les animaux communiquent entre eux de différentes manières via des vocalisations, des signaux visuels ou des phéromones, pour se coordonner, se défendre ou se reproduire. C'est le cas de la communication complexe entre les abeilles pour indiquer l'emplacement des sources de nourriture à leurs congénères effectuée sous forme de danses (Von Frisch, 1973).

- **Le halètement** : il s'agit d'une source de refroidissement majeure en ouvrant la bouche de certains animaux afin d'augmenter la fréquence respiratoire et d'évacuer de l'air chaud et humide. Ce processus aide à éliminer la chaleur excessive du corps et à maintenir une température corporelle constante (Abdullah, Said and Ossen, 2018).

- **L'action de s'asperger** d'eau fraîche chez les éléphants afin de se refroidir quand il fait chaud (Khan Academy, 2024) (Figure 2.3).

- **La recherche de l'ombre** : de nombreux animaux recherchent l'ombre quand ils ont trop chaud (Khan Academy, 2024) (Figure 2.4).

D'autres actions sont présentées dans l'annexe A.



Figure 2.3. L'action de s'asperger chez l'éléphant.
Source : Khan Academy (2024).



Figure 2.4. Regroupement des poulets dans une zone ombragée.
Source : Khan Academy (2024).

2.6. Mécanismes de la thermorégulation dans la nature

2.6.1. Définition de la notion de la thermorégulation dans la nature

La thermorégulation désigne la capacité d'un organisme vivant de maintenir sa température corporelle constante en dépit des fluctuations de la température ambiante (Khelil *et al.*, 2020), selon différents mécanismes tels que : gagner, retenir, dissiper et prévenir (Badarnah, 2012). Ces mécanismes jouent un rôle crucial dans sa survie, car ils garantissent des conditions idéales pour ses fonctions biologiques (LeRobert, 2023). Cette thermorégulation repose sur quatre mécanismes physiques : la conduction, la convection, le rayonnement et l'évaporation, dont l'efficacité est conditionnée par les propriétés morphologiques, physiologiques et comportementales de l'organisation (Peeks and Badarnah, 2021).

2.6.2. Différents mécanismes de la thermorégulation chez la faune

En examinant le règne animal, on peut identifier deux grandes catégories d'organismes, en fonction de leur mécanisme de régulation thermique. Donc, on trouve les Ectothermes et Endothermes (Khan Academy, 2024).

Les ectothermes, également appelés poikilothermes, sont des animaux à sang froid qui sont définis comme des organismes qui ne produisent pas ou peu de chaleur interne et dont leur température corporelle varie en fonction de la température de leur environnement (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010). Ils se distinguent par un mécanisme de

thermorégulation comportemental. Cette catégorie comprend : les amphibiens, la majorité des poissons, la majorité des reptiles non aviaires, tous les invertébrés aquatiques et la majorité des invertébrés terrestres, dont les lézards et en particulier les serpents (Khan Academy, 2024).

Les endothermes ou les homéothermes, également connus sous le nom d'animaux à sang chaud, sont des organismes capables de réguler leur température corporelle interne de manière autonome grâce à des mécanismes physiologiques (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010), tels que le taux métabolique et l'isolation. Cette catégorie comprend les mammifères (ours, hommes, baleines, chauves-souris, etc.) et les oiseaux (aigles, colibris, pingouins, etc.) (Khan Academy, 2024).

À travers l'observation de la nature, on constate que la faune a développé différentes stratégies et mécanismes pour s'adapter aux conditions environnementales difficiles. Ces stratégies sont spécifiques aux types d'environnements dans lesquels les animaux vivent et sont généralement classées en quatre grandes catégories (Figure 2.5) :

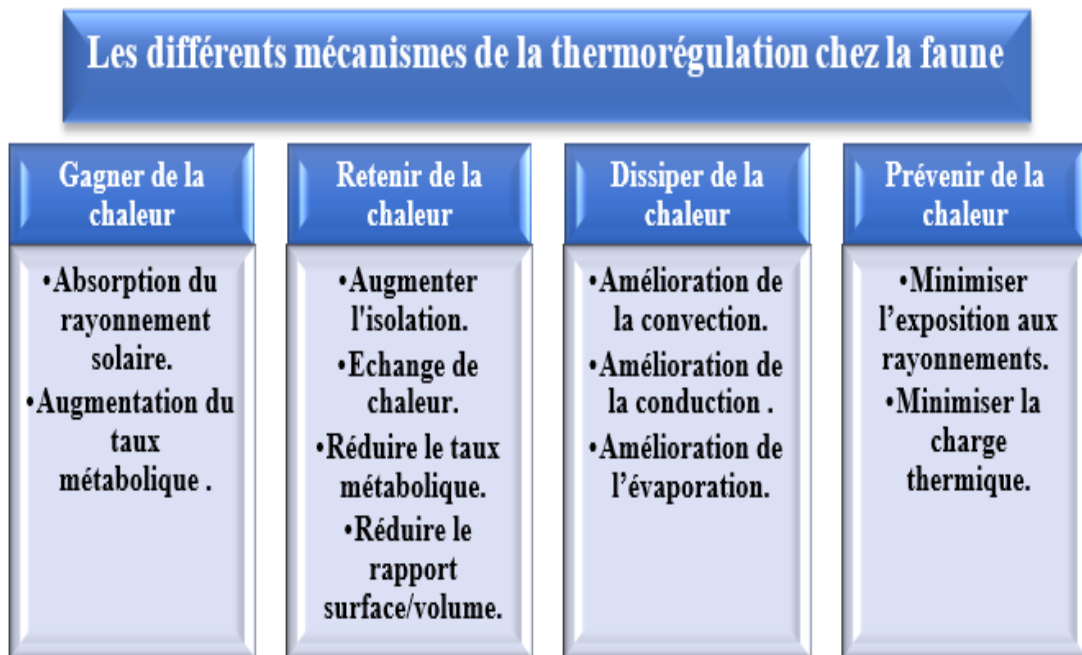


Figure 2.5. Les différents mécanismes de la thermorégulation chez la faune.
Source : Khelil et al. (2020).

2.6.2.1. Gagner de la chaleur

Ce mécanisme s'effectue via différentes actions telles que :

- **Absorption du rayonnement solaire** : durant les périodes froides, pour un maximum de captage des rayons solaires, une combinaison de la peau pigmentée et de

comportements d'exposition au soleil pour maximiser l'absorption des rayons solaires et maintenir leur température corporelle, par exemple : lézards.

- **Augmentation du taux métabolique** : cette méthode se manifeste notamment chez les ectothermes, lorsqu'ils sont exposés au froid, ce qui entraîne la libération d'hormones telles que l'adrénaline et la noradrénaline, qui augmentent la fréquence cardiaque, la respiration et la production de chaleur, ou lorsque la contraction des muscles involontaires du frissonnement résulte en une production de chaleur par friction (Khan Academy, 2024).

2.6.2.2. Retenir de la chaleur

- **Augmenter l'isolation** : constitue une autre façon de restreindre et d'empêcher la dissipation de chaleur vers l'environnement et de maintenir une température constante indépendamment des conditions extérieures, par le biais de la présence de poils denses, de cheveux, de spins, de fourrures, de couches externes cireuses et épaisses (ParlonsSciences, 2023). Exemple : les oiseaux ébouriffent leurs plumes afin de renforcer la couche d'isolation en période froide (Khan Academy, 2024) (Figure 2.6).



Figure 2.6. Un pigeon se réchauffe en ébouriffant ses plumes.
Source : Khan Academy (2024).

- **Minimiser l'échange de chaleur** : ce processus s'effectue via une vasoconstriction, définie comme un phénomène physiologique observé chez les endothermes, qui se traduit par une diminution du diamètre des vaisseaux sanguins situés près de la surface de la peau lorsque le froid s'applique (Figure 2.7). Le rétrécissement résulte de la contraction des cellules musculaires lisses situées dans la paroi des vaisseaux sanguins, ce qui diminue le flux sanguin pour favoriser la rétention de chaleur et limiter la perte de chaleur sous forme de conduction (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010). Exemple : les iguanes réduisent leur flux sanguin cutané lorsqu'ils nagent dans des eaux froides afin de retenir la chaleur accumulée sur la terre ferme (Khan Academy, 2024).

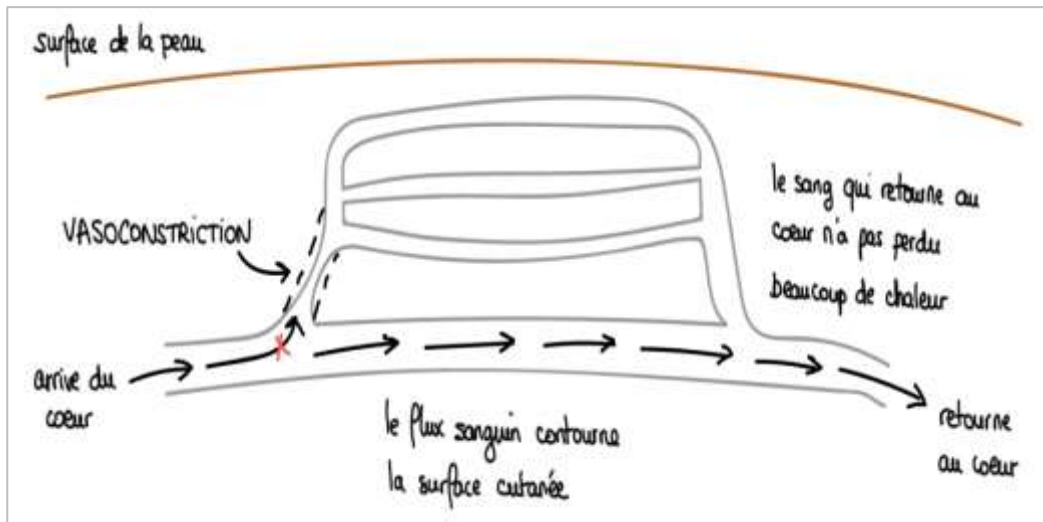


Figure 2.7. Vasoconstriction.
Source: Khan Academy (2024).

- **Réduire le taux métabolique :** de nombreux animaux utilisent la réduction du taux métabolique comme stratégie pour s'adapter aux environnements extrêmes, froids ou chauds. Cette diminution permet de maintenir la chaleur corporelle dans les environnements froids, tandis que dans les environnements chauds, elle contribue à l'économie d'eau et d'énergie. Par exemple, l'escargot du désert entre dans un état de léthargie (une longue période d'inactivité) lorsque les températures sont trop élevées (LeTémoin, 2024).

- **Réduire le rapport surface/volume :** le principal point d'échange thermique avec l'environnement est la surface du corps. Le rapport surface/volume (S/V) élevé signifie que l'organisme a une surface importante par rapport à son volume. Ceci permet une diminution de la chaleur plus rapide par convection et rayonnement, exceptionnellement bénéfique dans des environnements chauds afin d'éviter la surchauffe. D'autre part, en milieu froid, un rapport S/V bas, combiné à des formes plus compactes, réduisant ainsi les pertes de chaleur en diminuant la surface exposée, ce qui favorise la conservation de la chaleur (Konkel, 2012; Peeks and Badarnah, 2021).

2.6.2.3. Dissiper de la chaleur

En raison d'une exposition permanente à des températures élevées, certains animaux doivent gérer leur température corporelle afin de réaliser les divers processus nécessaires à leur survie.

- **Amélioration de la convection :** la diminution de l'excès de chaleur interne par convection s'effectue à travers un processus physiologique appelé la vasodilatation (Figure 2.8), qui consiste à dilater ou élargir les vaisseaux, ce qui augmente le flux sanguin vers la surface de la peau. Ce flux sanguin accru permet à la chaleur corporelle de s'échapper du

corps par convection et rayonnement vers l'environnement (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010; Khan Academy, 2024).

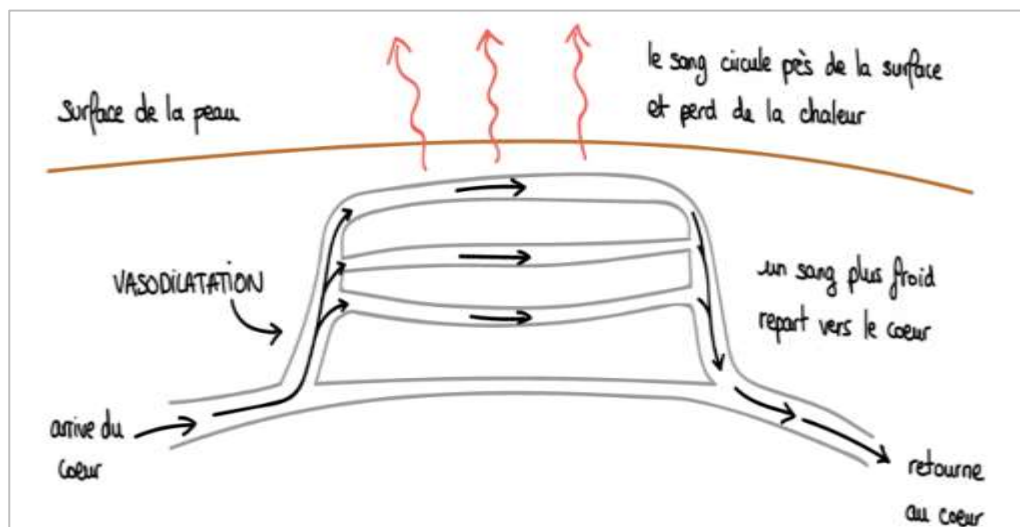


Figure 2.8. Vasodilatation
Source: Khan Academy (2024).

Exemple : la présence de grands appendices qui sont des parties longues ou grande surface corporelle utilisée pour dissiper et perdre l'excès de chaleur et d'énergie métabolique, ce qui se manifeste par la présence de grandes oreilles comme les oreilles des lièvres, qui sont dotées d'un vaste réseau de vaisseaux sanguins leur permettant de libérer rapidement la chaleur excessive du corps grâce à la convection (Khan Academy, 2024) (Figure 2.9).

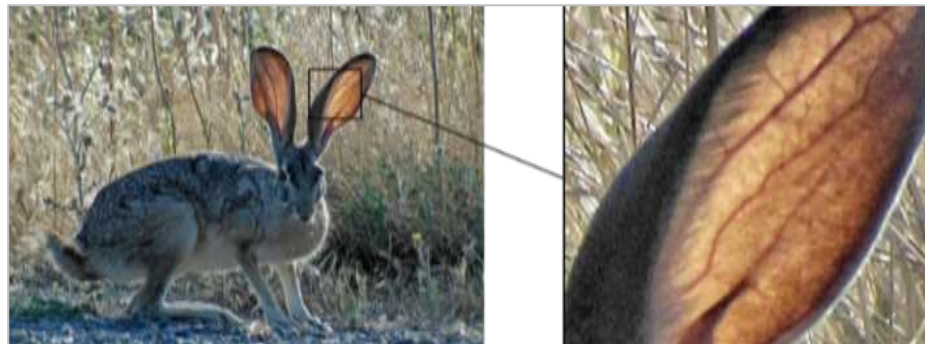


Figure 2.9. Oreilles des lièvres.
Source : Khan Academy (2024).

- **Amélioration de la conduction :** ce processus se manifeste à travers l'échange de chaleur à contre-courant, autant qu'un mécanisme physiologique ingénieux utilisé par de nombreux animaux pour conserver la chaleur corporelle dans les environnements froids tout en dissipant l'excès de chaleur dans les environnements chauds (Abdullah, Said and Ossen, 2018). Cette stratégie repose principalement sur la conduction comme mécanisme de transfert de chaleur, qui repose sur le contact direct entre les parois des vaisseaux sanguins

proches. Cela permet de transférer de manière efficace la chaleur du sang chaud provenant du cœur vers le sang-froid des extrémités. Cela diminue les déperditions thermiques et garantit une régulation précise de la température du corps. On retrouve ce mécanisme principalement chez les oiseaux aquatiques et certains reptiles tels que les serpents (Khan Academy, 2024) (Figure 2.10).

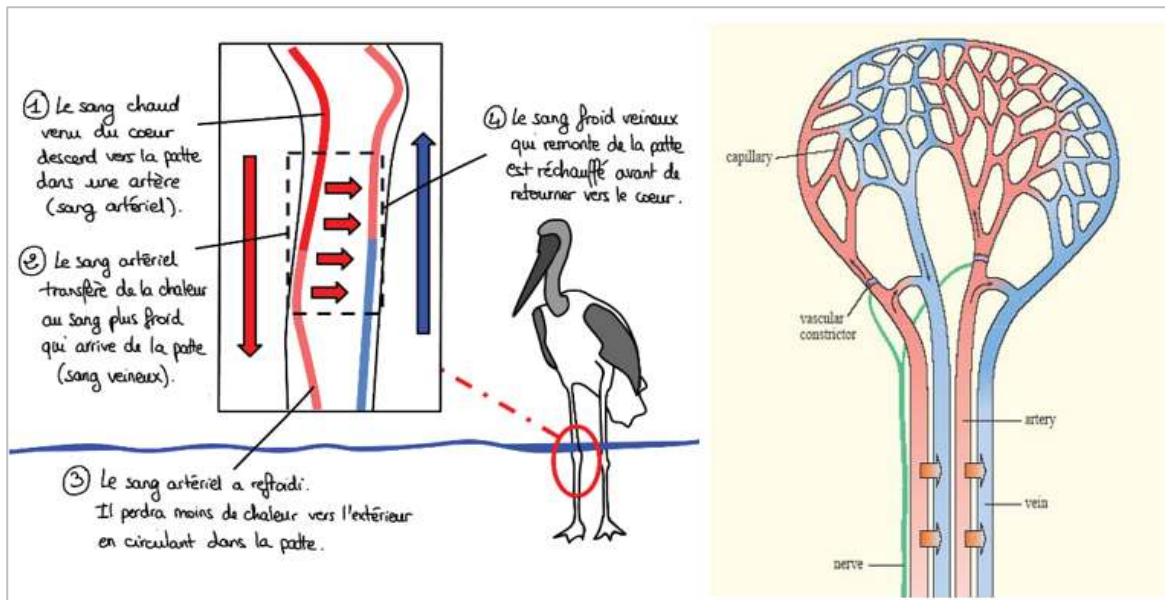


Figure 2.10. L'échange de chaleur à contre-courant.
Source : Khan Academy (2024).

- **Amélioration de l'évaporation** : le processus d'évaporation est très important pour la dissipation de la chaleur chez de nombreux animaux. Ce mécanisme est amélioré grâce à différentes actions (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010), telles que :

La transpiration est un phénomène essentiel de régulation de la température chez certains mammifères, avec la présence de glandes sudoripares. Elle a pour effet de diminuer la température corporelle grâce à un processus de refroidissement par évaporation, agrandi par une augmentation du flux sanguin vers la peau (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010).

Le halètement sert à augmenter le flux d'air sur leur langue et favorise l'évaporation de la salive, ce qui contribue à les refroidir, par exemple le halètement des chiens (Peeks and Badarnah, 2021) (Figure 2.11).

Récolter l'eau et d'humidité : plusieurs animaux adoptent différents mécanismes pour récolter suffisamment d'eau pour soutenir le mécanisme d'évaporation, tels que le diable épineux ou cornu (*Moloch horridus*). Il peut collecter de l'eau après la pluie, car il possède également une peau écailleuse qui capte l'humidité de l'air, en particulier de la rosée

matinale, par un réseau de canaux qui l'achemine vers sa bouche (Aly, Ibrahim and Abdelmohsen, 2021). Cette approche favorise la production d'eau et empêche la perte d'humidité par évaporation, qui est cruciale dans les déserts arides (Smith, 2015) (Figure 2.12).



Figure 2.11. Halètement du chien.
Source : Fressnapf (2024).

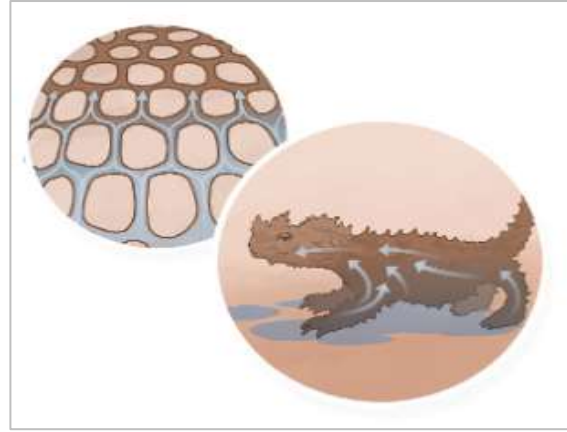


Figure 2.12. Peau hygroscopique de lézard à cornes.
Source : JW (2015).

Pour plus d'exemples illustrant les stratégies d'amélioration de l'évaporation chez la faune, voir l'annexe A.

2.6.2.4. Prévenir de la chaleur

- **Minimiser l'exposition aux rayonnements** : désigne de minimiser les surfaces exposées au soleil par :

Mode nocturne : la majorité des animaux préfèrent éviter l'exposition au soleil, ce qui les rend inactifs pendant quelques heures de la journée. Ils dorment dans des grottes ou des terriers frais afin de s'échapper à la chaleur intense du désert par les journées chaudes. Ils sont toutefois actifs la nuit, quand les températures sont plus fraîches, afin de réduire l'exposition aux rayons solaires et d'éviter les gains de chaleur, comme de nombreux mammifères, reptiles et amphibiens.

Réfléter : la forme triangulaire des fourmis du Sahara, la structure des poils et leur couleur argentée ont permis d'assurer une bonne protection contre les rayons solaires avec une réflexion atteignant 97% des radiations solaires et une bonne émissivité des rayonnements infrarouges, ce qui refroidit efficacement la fourmi par rayonnement, Par conséquent limite grandement son réchauffement (Horvath, 2015) (Figure 2.13).



Figure 2.13. Fourmis du Sahara.
Source : AskNature (2019).

Pour plus d'actions pour prévenir de la chaleur chez la faune, voir l'annexe A.

- **Minimiser la charge thermique** : certains animaux développent des stratégies pour minimiser la charge thermique via :

Coloration : joue un rôle crucial dans la diminution de l'absorption de chaleur grâce à une réflexion accrue des rayons solaires, ce qui entraîne une couleur du pelage plus clair ou pâle, plus fréquente chez les animaux du désert (Minsolmaz Yeler and Yeler, 2017).

Peaux isolantes : certains animaux sont recouvertes de poils denses, ce qui crée une bonne isolation et empêche la chaleur estivale d'entrer dans la peau (Elghawaby, 2013). C'était le cas de la fourrure de la gazelle dama (Figure 2.14).

Ces poils servent à :

- Augmenter le flux d'air au niveau de la peau,
- Augmenter la perte de chaleur par convection ;
- Empêcher la chaleur d'être piégée par la couche d'air immobile entre poils.



Figure 2.14. Fourrure de la gazelle dama.
Source : Dela Ghesquière (2024).

2.6.3. L'escargot comme un modèle d'adaptation dans un milieu chaud

L'escargot du désert (*Sphincterochila Boissieri*) est une espèce d'escargots terrestres de petite taille pesant environ quatre grammes, à respiration aérienne, constituée de deux parties principales : une espèce molle, constituant le spécimen vivant, et une coquille (Al Amin and Taleb, 2016).

Ce mollusque terrestre adopte différentes stratégies d'adaptation spécifiques afin de maintenir sa température corporelle convenable, permettant de survivre dans les zones désertiques (Kuru *et al.*, 2019), en raison de sa forme unique, de son matériau et de ses mécanismes incroyables de refroidissement qui le maintiennent beaucoup plus frais et humide, car le gain de chaleur par rayonnement solaire direct est considéré comme l'une des principales menaces à sa vie (Clendaniel, 2012; Al Amin and Taleb, 2016).

Ces stratégies de survie intéressantes sont expliquées en détail ci-dessous :

2.6.3.1. Adaptation morphologique

La forme spirale de la coquille et sa couleur blanche permettent d'assurer à l'escargot sa température de vie via différentes stratégies citées ci-dessous (Altaf, 2012) (Figure 2.15) :

- **Réflexion** : la coquille blanche de l'escargot est une surface brillante hautement réfléchissante permettant de réfléchir environ 90% du rayonnement solaire visible incident et 95% du rayonnement infrarouge. Cette capacité réduit significativement le flux de chaleur entrant. En raison de cette réflectivité élevée, elle empêche ainsi l'augmentation de la température interne de l'escargot. Par conséquent, l'espace intérieur de la coquille reste plus frais, permettant à l'escargot de survivre dans des environnements désertiques extrêmes (Clendaniel, 2012; AskNature, 2016; Kuru *et al.*, 2019).

- **Protection thermique** issue de sa forme spirale et incurvée, créant des zones d'ombre maximales ; ceci permet de réduire l'exposition au rayonnement solaire direct et de réduire la température de la surface du sol en dessous de l'escargot. De plus, en limitant les points de contact avec le sol surchauffé, elle réduit considérablement le transfert de chaleur par conduction (Abdullah, Said and Ossen, 2018), garantissant ainsi la survie de l'escargot dans des conditions extrêmes (Clendaniel, 2012; AskNature, 2016).

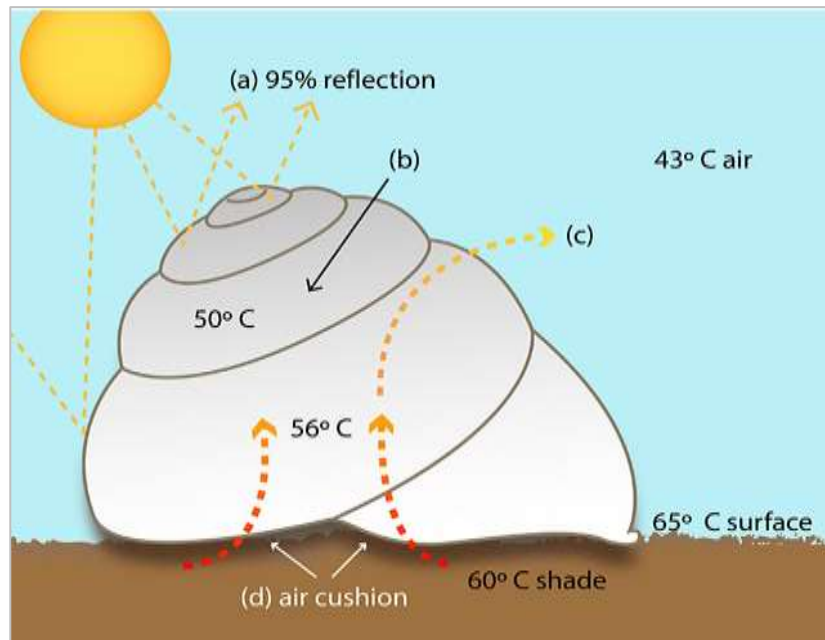


Figure 2.15. La coquille blanche de l'escargot.
Source : AskNature (2016).

2.6.3.2. Adaptation comportementale

- Le retrait dans la partie supérieure de la coquille :** dans le désert, où les températures au sol atteignent entre 65 °C et 70 °C en été, l'escargot peut survivre jusqu'à 50 °C, avec un seuil d'étal thermique autour de 55 °C. L'escargot utilise un comportement d'adaptation unique, se manifeste dans son positionnement dans la partie supérieure de sa coquille, où la température est plus basse que celle du sol, atteignant une valeur de 43°C, ce qui est idéal pour sa survie (Figure 2.16). Ce positionnement permet de créer un système de stratification thermique dont la température est la plus élevée dans le verticille le plus proche du sol et diminue progressivement vers le plus petit vertige supérieur où l'escargot se retire permettant de fournir de l'ombre et d'avoir une couche d'air qui agit comme un coussin d'air isolant entre la surface du sol et la partie supérieure, constituant un obstacle supplémentaire au flux de chaleur (Altaf, 2012; Clendaniel, 2012; Al Amin and Taleb, 2016; Liorhobashi, 2016; Abdullah, Said and Ossen, 2018; Kuru *et al.*, 2019) (Figure 2.17).

- Refroidissement par évaporation :** le poids d'un escargot change du jour à la nuit pour réguler la température corporelle, il absorbe et stocke l'eau en aspirant l'humidité du sol pendant la nuit lorsque les températures sont plus fraîches, puis le libère par évaporation pendant la journée lorsque la température augmente (Al Amin and Taleb, 2016).

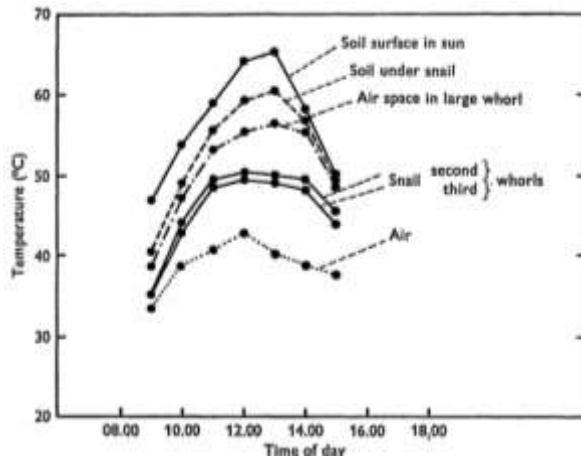


Figure 2.16. Températures enregistrées dans et autour d'un spécimen d'escargot.
Source: Al Amin and Taleb (2016).

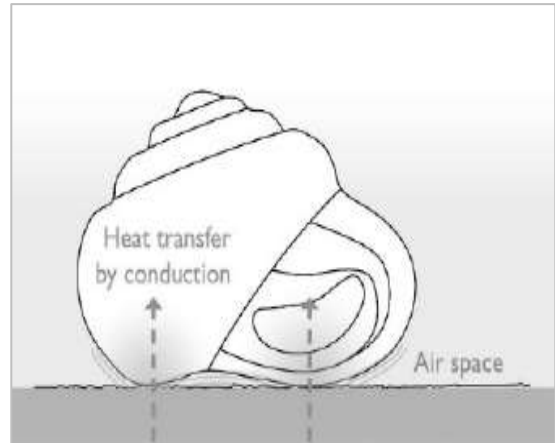


Figure 2.17. Coussin d'air isolant.
Source : Al Amin and Taleb (2016).

2.6.4. Différents mécanismes et stratégies d'adaptation chez la flore

La flore, c'est-à-dire les plantes, sont des êtres vivants qui ne peuvent pas se déplacer, mais elles ont évolué dans des formes diverses et variées depuis environ 460 millions d'années (Sandak *et al.*, 2019). En vue de cette immobilité et pour faire face aux variations des conditions environnementales, elles possèdent deux propriétés d'adaptation ingénieuses à différents environnements qui peuvent être classées en deux catégories comme stratégies statiques et mécanismes dynamiques (Nour EIDin and Abdou, 2020).

La section suivante est consacrée à présenter les merveilles d'adaptation végétale, soit au niveau morphologique, physiologique et comportementale.

2.6.4.1. Stratégies statiques

Les stratégies d'adaptations statiques se réfèrent aux acclimations d'une manière permanente (Nour EIDin and Abdou, 2020) qui sont liées aux adaptations morphologiques qui sont généralement associées à:

- **Forme des feuilles** qui fait référence à la phyllotactiques, qui explique comment les feuilles sont disposées sur une tige et leur angle de divergence. Les plantes modifient la forme de leurs feuilles en fonction de leur environnement (Blacha and Bots, no date). Donc, on trouve des feuilles fines, succulentes, larges et plates.
- **Type de racines** qui s'ajustent également en fonction des conditions du sol et des besoins en eau. Dans ce sens, on trouve des racines profondes et superficielles.
- **Forme des tiges** : on retrouve différentes formes, structures et caractéristiques des tiges qui permettent aux végétaux de survivre et de se développer dans des environnements différents, tels que : tiges superficielles, grimpantes, souterraines et photosynthétiques.

L'annexe A présente des exemples de ces adaptations morphologiques.

2.6.4.2. Mécanisme dynamique

Les mécanismes d'adaptation dynamique se réfèrent aux :

- **Adaptation physiologique** comprenant :

Photosynthèse C4 : il s'agit d'un des trois moyens de fixation du carbone des plantes, considéré comme un processus plus efficace qui réduit la perte d'eau, observé chez les plantes dans les régions chaudes telles que *le Maïs* et la *Canne* à sucre (Schweig, 2009) (Figure 2.18).

Dormance : durant les périodes difficiles et afin de faire face à des conditions défavorables telles que le gel, la sécheresse, et afin de préserver leurs ressources, certaines plantes entravent leur métabolisme et diminuent leurs besoins en eau et en énergie. Comme les plantes vivaces du désert qui passent une période d'inactivité et de dormance pendant la sécheresse, puis se réveillent et recommencent à s'activer après une période de pluie ou la présence de grandes quantités d'eau, ce qui les rend plus résistantes que les autres plantes. Le yucca à feuilles courtes **Agaves** est l'un des plus connus (Figure 2.19).



Figure 2.18. Le Maïs.
Source : Aujardin (2024).



Figure 2.19. Agaves.
Source : Defleurenleur (2022).

- **Adaptation comportementale** : ce type d'adaptation se manifeste au niveau :
Mouvements foliaires des feuilles ou fleurs de certains végétaux, pour mieux capter les rayons solaires ;
Pliage des feuilles pour diminuer la surface exposée au soleil ;
Changements de couleur des feuilles pour les protéger contre les rayons ultraviolets et le stress thermique, en limitant l'absorption de chaleur.

Pour mieux comprendre ce type d'adaptation, voir annexe A.

2.6.5. Le cactus comme un modèle d'adaptation dans un milieu chaud

Le cactus : les **Cactus**, **Cactées** ou encore **Cactacées** (*Cactaceae*) sont des plantes grasses ou succulentes, ce qui en fait des plantes xérophytes qui symbolisent les régions

arides. Ce terme a été utilisé pour la première fois comme nom de genre par Karl Von Linné, dans sa classification binominale en 1753 (*Species Plantarum*). On dénombre actuellement environ 2 500 espèces réparties en 124 genres (Hunt, 2006).

Des systèmes d'adaptation exceptionnels ont été développés par ces plantes pour faire face aux longues périodes de sécheresse et s'adapter aux températures extrêmes en utilisant un mécanisme de capture optimale de l'eau, ce qui limite la perte d'eau (Wikipédia, 2023).

En raison de sa diversité et de sa variété, le cactus constitue l'un des exemples captivants d'adaptation à un environnement hostile, avec des stratégies statiques et des mécanismes dynamiques d'adaptation qui nécessitent une étude :

2.6.5.1. Adaptation morphologique

La morphologie du cactus présente une stratégie statique d'adaptation (Khorasani, Burry and Salehi, 2014; Attia, 2015), permettant d'améliorer ses performances et ses caractéristiques thermiques effectuées grâce aux :

- **Forme compacte** : il existe une grande variété de formes de cactus, qu'elles soient rondes ou cylindriques, qui permettent de réduire la surface exposée au soleil et au vent et de stocker de l'eau par rapport à une surface plane.
- **L'organisation en côtes** : de nombreux cactus, tels que les cactus colonnaires et certains globulaires, ont une forme côtelée qui leur offre de nombreux bénéfices en matière d'adaptation aux environnements secs. Permettant d'avoir une régulation thermique et hydrique en réduisant les surfaces exposées au soleil et en créant des zones ombragées (Figure 2.20), caractérisées par un microclimat interne qui permet d'atteindre une température interne plus fraîche que l'extérieur pendant les heures les plus chaudes de la journée (Farimani, 2014). De plus, cette organisation aide à réduire la perte d'eau par évaporation. Ceci s'accomplit grâce à une flexibilité structurelle des côtes, agissant comme un accordéon en fonction de la disponibilité d'eau pour prévenir la fissuration de l'épiderme (TPE sur les Cactus, 2016).

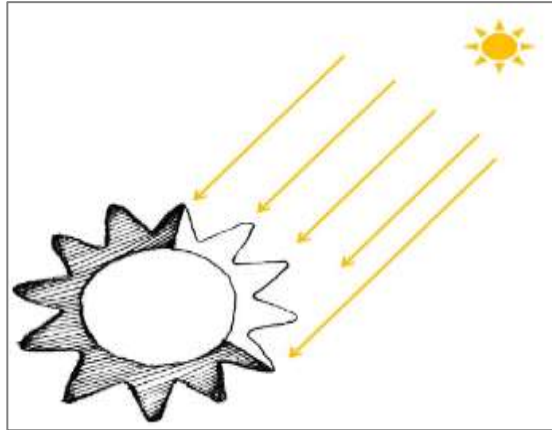


Figure 2.20. Organisation des cotes de cactus.
Source : Farimani (2014).

- **Tiges des cactus** : sont de différentes formes et jouent un rôle essentiel dans plusieurs fonctions, telles que la photosynthèse et le stockage d'eau. Elles ont aussi la capacité de créer des structures spécialisées, telles que les épines, qui sont utilisées pour se protéger. Les cactus peuvent s'adapter aux environnements les plus extrêmes grâce à ces caractéristiques, garantissant ainsi leur résistance face aux conditions de stress hydrique et thermique. Voici quelques exemples :

Les tiges du cactus en baril sont d'un vert pâle, très-côtelées, avec de nombreuses aréoles portant des épines radiales très-aiguës. Ces cactus, généralement sphériques ou un peu allongés, diffèrent d'une espèce à l'autre : les aréoles sont placées sur les côtes ou sur des mamelons dressés en spirale. Grâce à un rapport surface/volume élevé et une disposition limitant l'exposition directe au soleil, cette forme arrondie est parfaite pour optimiser le stockage d'eau tout en réduisant les pertes (Hunt, 2006; Farimani, 2014) (Figure 2.21).

Les tiges du cactus mescal présentent des colonnes nervurées, qui peuvent varier de volume selon les saisons. La tige se rétracte pendant les périodes froides, se rétrécit vers le bas pour s'enfoncer dans le sol, ce qui assure la protection de la plante contre le froid et les vents violents. La tige absorbe l'eau, se dilate et revient à la surface pour absorber la lumière et échanger des gaz avec l'air extérieur. Cette méthode singulière d'adaptation morphologique permet à la plante de conserver de l'eau et de résister aux périodes de sécheresse prolongées (Figure 2.22).



Figure 2.21. Barrel cactus.
Source : Farimani (2014).

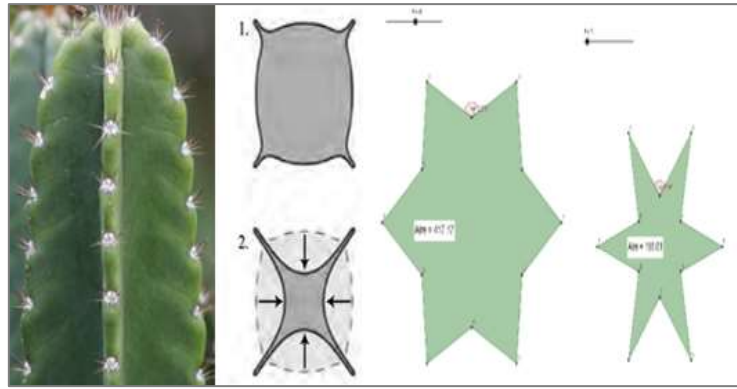


Figure 2.22. Cactus mesclal.
Source : TPE sur les Cactus (2016).

- **Racines** pénètrent en profondeur et cherchent l'eau inaccessible aux autres plantes, ce qui permet d'améliorer l'absorption des eaux souterraines.

- **Une écorce épaisse et cireuse** présente un nombre limité de stomates, constituée d'une cuticule épaisse et imperméable recouvrant l'épiderme de la plante (Figure 2.23). Elle sert à :

- Augmenter la réflectance du rayonnement solaire ;
- Empêcher l'évaporation ;
- Limiter les échanges gazeux avec l'extérieur.



Figure 2.23. Ecorce reflétant.
Source : Farimani (2014).

- **Épines** : les feuilles des cactus se métamorphosent en épines (Farimani, 2014), longues, droites ou légèrement courbées, de différentes teintes de jaune ou parfois de blanc. Ils ne font pas de photosynthèse et ne transpirent pas, ce qui leur permet de produire ces aiguilles, permettant :

-La protection contre les rayons solaires, notamment les rayons ultraviolets, en minimisant la surface exposée au soleil (TPE sur les Cactus, 2016) (Figure 2.24) ;

-La création d'un système d'auto-ventilation grâce à un coussin d'air immobile et légèrement humide que l'air ambiant considère comme une isolation supplémentaire à l'épaisseur de la peau et diminue la température à l'intérieur (Farimani, 2014) (Figure 2.25) ;

-La diminution de la perte d'eau par transpiration pendant la journée chaude en collectant l'eau de pluie, la condensation de l'humidité nocturne ou du brouillard qui ruisselle vers le sol sur des surfaces rainurées et qui sera captée par les racines peu profondes du cactus (Farimani, 2014) (Figure 2.26) ;

-La prévention contre les prédateurs, la poussière et les particules étrangères.

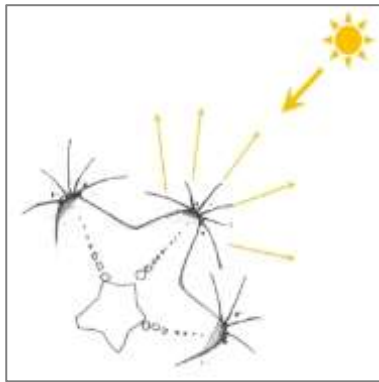


Figure 2.24. Protection contre les rayons solaires.
Source : Farimani (2014).

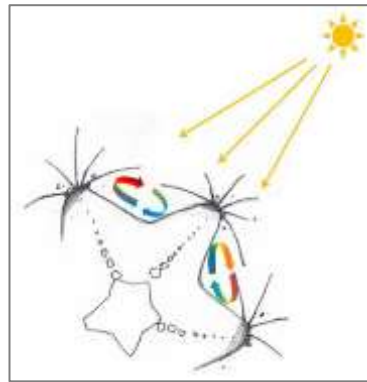


Figure 2.25. Système d'auto-ventilation.
Source : Farimani (2014).

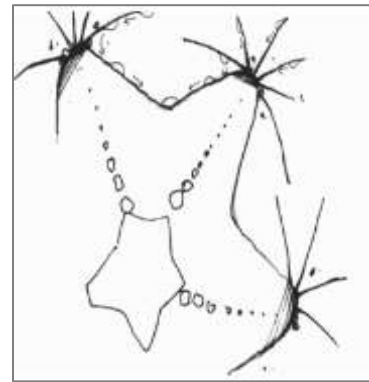


Figure 2.26. Epines collectent l'eau de la pluie.
Source : Farimani (2014).

2.6.5.2. Adaptation physiologique

- **Crassulacean Acid Metabolism (CAM) :** le métabolisme à acide crassulacé (CAM) est une forme spécifique de photosynthèse, fréquemment observée chez les cactus. L'ouverture des stomates des plantes CAM se fait principalement la nuit, à des températures plus basses et où une humidité est plus élevée, pour restreindre l'évapotranspiration. Ainsi, le dioxyde de carbone (CO_2) est absorbé et transformé en acide malique, qui est conservé dans les vacuoles des cellules. Toutefois, ce processus ne permet pas de produire directement des sucres, car la lumière, indispensable au cycle de Calvin (TPE sur les Cactus, 2016), est absente pendant la nuit. Pendant la journée, les stomates demeurent clos afin de limiter la perte d'eau, et le CO_2 est libéré des vacuoles pour être utilisé dans la photosynthèse (Farimani, 2014).

- **Ouverture et fermeture des stomates :** les stomates sont de petits orifices microscopiques, situés dans l'épiderme des cactus, dont un stomate est composé de deux

cellules stomatiques appelées cellules de garde qui marquent la limite de l'orifice stomatique ou ostiole (Roger, 2021) (Figure 2.27).

Le cactus présente moins de stomates que les plantes typiques de taille relativement similaire (Farimani, 2014). Ces stomates restent fermés la journée pendant la période chaude pour limiter la perte d'eau. Et s'ouvrent la nuit pour absorber le CO₂.

Ce système d'ouverture et de fermeture des stomates permet une régulation des échanges gazeux entre le cactus et l'atmosphère et limite la perte d'eau par transpiration (Padmanabhan, 2013; López *et al.*, 2015).

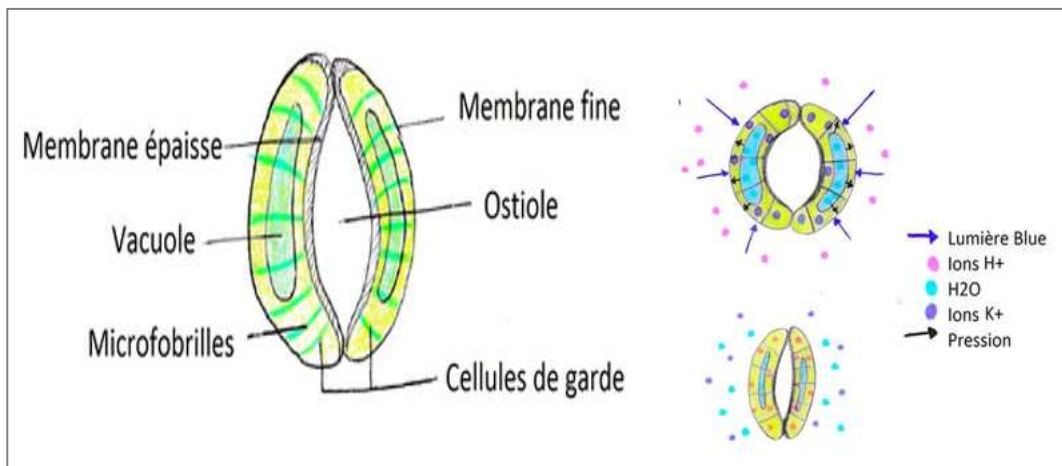


Figure 2.27. Fonctionnement des stomates.
Source : Académie Nantes (2023).

2.6.6. Les différentes stratégies de la thermorégulation chez l'être humain

L'homme est un organisme d'une adaptabilité remarquable, capable de survivre et de se reproduire dans une diversité d'environnements. Étant donné que sa température corporelle est généralement maintenue de façon constante autour de 37 °C, elle peut toutefois varier légèrement en fonction des caractéristiques physiologiques de chaque individu (Saha *et al.*, 2014). Afin de garder cette température stable pour garantir la survie et le bon fonctionnement des organes et des cellules malgré les variations de son environnement, l'homme adopte différentes stratégies efficaces de la thermorégulation (Nasr, 2017).

On peut distinguer deux grandes catégories de mécanismes d'adaptation chez l'homme :

2.6.6.1. Adaptation morphologique

Ces adaptations sont des modifications du corps humain qui se produisent à long terme, au fil de plusieurs générations.

- **La graisse corporelle** : en tant que couche protectrice, elle joue un rôle essentiel dans la régulation thermique du corps afin de maintenir sa température corporelle. En cas de froid, elle empêche la chaleur de s'échapper du corps, tandis qu'en cas de chaleur, la graisse corporelle peut également aider à stocker l'excès de chaleur.

- **La forme du nez** : la forme du nez varie considérablement d'une population à l'autre. Par exemple, les personnes vivant dans les climats froids ont généralement un nez plus étroit et plus allongé, ce qui permet de réchauffer l'air avant qu'il n'atteigne les poumons. En revanche, les personnes vivant dans les climats chauds et secs ont généralement un nez plus large et plus plat, ce qui permet d'augmenter la surface d'échange de chaleur et de refroidir l'air (Demey, 2022).

- **Les poils vellus humains** jouent un rôle crucial dans notre bien-être et notre survie, car ils créent une fine couche d'air autour de notre corps, en créant une barrière contre le froid entre la peau et les poils, ce qui permet de maintenir une température corporelle stable. Ils contribuent à normaliser la température corporelle, à protéger le corps humain et à servir de conduits pour éliminer la transpiration (Elghawaby, 2013; Nasr, 2017).

2.6.6.2. Adaptation physiologique

Parmi les exemples d'adaptations physiologiques chez l'être humain, on peut citer :

- **Respiration** : en tant qu'un processus physiologique essentiel de la survie, effectuée grâce à un système respiratoire interne, permettant l'échange O_2 et le CO_2 entre l'air et le sang à travers deux étapes principales, l'une est l'inhalation permettant la diffusion de l'oxygène dans le sang et l'autre, celle d'expiration qui repose sur l'expulsion du dioxyde de carbone, issu des échanges métaboliques en dehors du corps (Badarnah and Knaack, 2007). Ce processus permettant d'acheminer l'air par les voies respiratoires (nez, pharynx, larynx, trachée et bronches) jusqu'aux alvéoles pulmonaires, dont les poumons sont les organes principaux de la respiration (Figure 2.28).

Ce processus peut s'adapter en fonction des conditions changeantes pour maintenir une thermorégulation :

En cas de chaleur : la respiration s'accélère et s'approfondit pour permettre à l'organisme de se refroidir par évaporation de la sueur.

En cas de froid : la respiration ralentit et devient plus superficielle pour conserver la chaleur à l'intérieur du corps.

- **Transpiration** : c'est la méthode principale pour refroidir le corps. Quand la température interne du corps augmente, le processus de sudation augmente, où les glandes

sudoripares de la peau sécrètent de la sueur à la surface du corps pour optimiser la perte de chaleur par évaporation dans la surface, ce qui entraîne un rafraîchissement (Elghawaby, 2013; Nasr, 2017) (Figure 2.29).

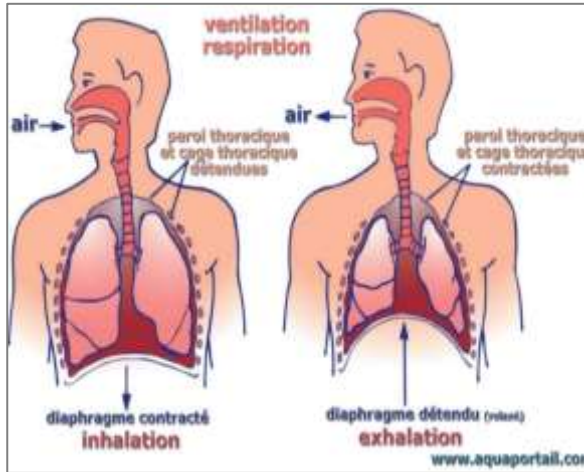


Figure 2.28. Respiration humaine.
Source : Aquaportail (2023).



Figure 2.29. Transpiration.
Source : Bacquaert (2022).

- **Augmenter sa température interne** : lorsque la température interne est trop basse, les vaisseaux sanguins se contractent pour limiter la perte de chaleur par convection et rayonnement. Les muscles se contractent involontairement pour produire de la chaleur (frissonnements).
- **Diminuer sa température interne** : lorsque la température interne est trop élevée, les vaisseaux sanguins se dilatent pour favoriser la perte de chaleur par convection et rayonnement. La transpiration est augmentée pour évacuer la chaleur par évaporation.

2.6.6.3. Adaptation comportementale

Ces adaptations désignent des changements du comportement humain qui se produisent à court terme, en réaction à un changement immédiat de l'environnement circonscrit. Ce ne sont pas des conséquences de la sélection naturelle, mais de l'apprentissage et de l'affinité. Il y a plusieurs exemples d'adaptations comportementales chez l'homme :

- **Le port de vêtements** : les vêtements sont utilisés pour préserver le corps du froid, de la chaleur et des conditions météorologiques en fonction de la température ambiante. Dans les régions chaudes, il est recommandé de porter un tissu léger et de couleurs claires afin de favoriser le flux d'air et favoriser l'évaporation de la sueur (Elghawaby, 2013) (Figure 2.30).
- **Le changement de régime alimentaire** : il est possible de modifier selon la saison, comme consommer des boissons chaudes ou froides (Figure 2.31).

- **La migration** : lorsque les conditions locales deviennent trop difficiles, la migration permet de se déplacer vers des régions plus favorables. Tel que se mettre à l'ombre ou au soleil.
- **Prendre une douche, ect.**








Figure 2.30. Changement saisonnier du comportement vestimentaire.
Source : Grimaud (2023).









Figure 2.31. Changement saisonnier du comportement culinaire.
Source : Infobae (2022).

Le Tableau 2.1 présente une vision synthétique de différents exemples naturels en termes de faune, insectes, reptiles, mollusques, flore et êtres humains, et leur transfert en architecture. Son objectif est de faire une taxonomie désignée comme un outil d'aide aux architectes, concepteurs et étudiants en architecture pour faciliter l'imitation du génie naturel afin d'atteindre des bâtiments adaptatifs et durables.


Tableau 2.1. Différents exemples de stratégies d'adaptation naturelle et leur interprétation architecturale. Source : Auteur (2022).

Type d'espèce	Type D'adaptation	Principe naturel	Mécanisme / avantages	Solution architecturale
1.Faune				
Fennec / Renard des sables 	Morphologique	Appendice sous forme des grands oreilles (environ 15 cm).	Dissiper l'excès de chaleur corporelle lors des journées chaudes dans le désert.	Des tours à vents favorisant une ventilation naturelle pour perdre de la chaleur (Elghawaby, 2013).
		Fourrure épaisse.	Isolation pendant les nuits froides du désert.	Isolation thermique efficace dans les bâtiments pour minimiser le transfert de chaleur à l'intérieur.
		La plante des pattes est recouverte d'une fourrure épaisse.	Protège du sable chaud.	
	Fourrure pâle en jaune ou beige semblable à la couleur du sable (sableuse).	Reflète également la chaleur du désert Permettant le camouflage.	Utiliser des couleurs extérieures claires pour minimiser l'apport solaire.	
	Comportementale	Un mode de vie fouisseur et nocturne.	Pendant la journée chaude, le fennec est en sécurité sous terre, dans son terrier, pour bénéficier d'une température plus fraîche. Pendant la nuit : il sort en dehors de son terrier, ce qui signifie moins de chaleur et moins de perte d'eau lors de l'exécution d'activités.	Utiliser un mécanisme de la ventilation nocturne.
Rongeurs 	Comportementale	Mode nocturne.	Réside dans leur terrier le jour, pour minimiser les heures d'exposition au soleil.	Les bâtiments souterrains pour éviter l'exposition directe aux rayons solaires (Elghawaby, 2013).
Chien de prairie 	Comportementale	Création de deux orifices aux deux extrémités de leurs terriers longs et étroits en forme de monticule et d'entonnoir, l'un à bord pointu, l'autre à sommet arrondi.	Permettant d'induire un flux d'air dans leurs terriers, en se basant sur le principe de Bernoulli, favorisant des gradients de vitesse sur la surface du sol, ce qui entraîne l'induction du vent à travers le terrier malgré la direction du flux de vent.	Création d'un système de refroidissement dans les bâtiments basé sur un système de ventilation naturelle en se basant sur le principe de Bernoulli.
Tortue de désert 	Morphologique	Vessie surdimensionnée.	Comme un réservoir pour le stockage d'eau, d'une manière exceptionnelle, puisqu'elle supporte l'eau supplémentaire jusqu'à 50% ce qui lui permet de survivre de longues périodes sans accès à l'eau potable.	Système de collecte, de stockage et de gestion efficace d'eau, ou utilisation des matériaux hydrophobes, matériau hydrogel, pour un système de refroidissement par évaporation pendant les périodes chaudes.
Chameau 	Physiologique	Refroidissement par voie respiratoire.	Le chameau refroidit le sang qui irrigue son cerveau grâce à l'air inhalé qui traverse ses cavités nasales humides.	Installer des cavités dans les façades comprenant des matériaux poreux imbibés, permettant au flux d'air traversant qu'il soit refroidi avant son entrée dans le bâtiment.






<p>Gazelle dama</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Forure en poils courts et aéré.</p>	<p>Elle constitue une couche isolante, permettant une meilleure circulation de l'air et évite la surchauffe de la peau.</p>	<p>Isolation thermique efficace dans les bâtiments pour minimiser le transfert de chaleur à l'intérieur.</p>
2.Insectes				
<p>Papillon</p> 	<p>Physiologique</p>	<p>Réflexion des yeux de papillon.</p>	<p>Des yeux composés de milliers de petites cellules qui les rendent très sensibles aux couleurs.</p>	<p>Façades avec du vitrage thermochromique, ou photochromique, qui change de sa teinte en fonction de changement de la lumière et de la chaleur, permettant de bloquer la chaleur solaire mais permettant la transmission de la lumière. Fenêtre avec un système antireflet, permettant de réduire les reflets de la lumière sur la surface du verre, améliorant la visibilité et la transmission de la lumière.</p>
<p>Coléoptère</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>De microstructures des ailes.</p>	<p>Un système hydrophobe et autonettoyant.</p>	<p>Création des surfaces hydrophobes et autonettoyantes, notamment dans les gratte-ciels et les tours.</p>
	<p>Comportementale</p>	<p>Collecte de l'eau.</p>	<p>Lorsqu'il incline ses ailes arrière dans le brouillard, la micro-condensation amène des gouttelettes d'eau à s'accumuler sur les bosses et les rainures hydrophobes canalisent les gouttelettes d'eau dans la bouche du coléoptère.</p>	<p>Système de collecte, de stockage et de gestion efficace d'eau, ou l'utilisation des matériaux hydrophobes, matériau hydrogel, pour un système de refroidissement par évaporation pendant les périodes chaudes.</p>
<p>Fourmis du Sahara</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Structure des poils et leur couleur argentée</p>	<p>Réflexion et protection contre les rayons solaires.</p>	<p>Utiliser des couleurs extérieures claires et réfléchissantes pour minimiser l'apport solaire.</p>
3.Reptiles				
<p>Caméléon</p> 	<p>Physiologique</p>	<p>Changement de couleur de la peau.</p>	<p>Dissimuler des prédateurs.</p>	<p>Vitrage thermochromique qui change de sa couleur pour atteindre un confort thermique intérieur.</p>

Diablot épineux 	Morphologique	Peau formée d'une structure cellulaire de Voronoi en 2D.	Au niveau 3D par un chevauchement créant une zone ombrée.	Façades ou surfaces structurées en motifs de Voronoi permettant d'assurer l'ombre.
		Peau imperméable.	Minimise la perte d'eau par évaporation pendant les journées chaudes.	L'emploi du matériau hydrogel à capacité d'absorption, rétention et de libération de l'eau, permettant l'absorption de grandes quantités d'eau lors des précipitations.
	Physiologique	Absorption maximale de l'humidité de l'environnement.	Un réseau cutané constitué de canaux capillaires connectés entre eux depuis ses pattes jusqu'à sa gueule et débouchent sur les côtés de sa gueule, pour collecter et transporter l'eau de pluie trouvée et l'humidité de l'environnement sur les surfaces tégument via les forces capillaires selon le principe à contre-gravité dans des espaces étroits.	Systèmes de canaux interconnectés remplis d'eau froide circulant dans des tuyaux intégrés dans la structure d'un bâtiment pour absorber la chaleur et la dissiper vers l'extérieur. Un système de dalle froide caractérisée par une circulation de l'eau froide et un refroidissement par rayonnement.




4. Mollusque

Escargot 	Morphologique	Coquille en couleur blanche et brillante.	Réflexion du rayonnement solaire visible incident et infrarouge.	Utilisation des revêtements extérieurs réfléchissants des rayons solaires excessifs, isolants thermiques et réduisant l'accumulation de chaleur, en Thermo-shield hautement réfléchissant composés de résines acryliques remplies de particules de céramique.
		Coquille en forme spirale et incurvée.	Réduit le contact direct avec le sol surchauffé.	Réduisant le transfert de chaleur par conduction via l'emploi des matériaux à changement de phase.
			Assure l'ombre.	Création des protections solaires cinétiques pour minimiser les surfaces exposées au soleil et créer des surfaces ombragées.
	Comportementale	Le retrait dans la partie supérieure de la coquille.	Formant un coussin d'air isolant, déterminé comme un obstacle au flux de chaleur.	Favoriser une isolation thermique efficace à l'aide d'un isolant haute performance Aerogel.
			Stratification thermique.	Par la création d'une zone intermédiaire (espace tampon) séparant l'espace intérieur principal et l'environnement externe.
		Refroidissement par évaporation.	L'absorption et stockage de l'eau en aspirant l'humidité du sol, puis la libère par évaporation pendant la journée.	Refroidissement par évaporation pour minimiser la température. Matériaux hygroscopiques aidant à stabiliser l'humidité intérieure grâce à un mécanisme basé sur l'absorption de l'excès d'humidité lorsque l'air est saturé et la libèrent lorsque l'air est sec. Matériaux hydro-réactifs changent de forme ou de densité en fonction du taux d'humidité, permettant à la façade de s'ouvrir ou de se refermer pour réguler l'humidité.

5.Flore

<p>Cactus</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Forme compacte.</p>	<p>Régulation thermique et hydrique ; Réduire la surface exposée au soleil et au vent ; Fournit de l'ombre ; Améliore et dirige le rayonnement de chaleur ; Stocke de l'eau par rapport à une surface plane.</p>	<p>Enveloppe compacte qui minimise les surfaces exposées au soleil.</p>
<p>Tiges</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Tiges gonflées/dégonflés.</p>	<p>Flexibilité du volume, permettant de stocker l'eau.</p>	<p>Système de collecte, de stockage et de gestion efficace d'eau, ou utilisation des matériaux hydrophobes, matériau hydrogel, pour un système de refroidissement par évaporation pendant les périodes chaudes.</p>
<p>Écorce</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Écorce épaisse, avec cuticule épaisse et imperméable.</p>	<p>Augmente la réflectance du rayonnement solaire ; Empêchement de l'évaporation, Limiter les échanges gazeux avec l'extérieur.</p>	<p>Utiliser des revêtements isolants pour minimiser la conduction thermique et favoriser l'isolation thermique.</p>
<p>Épines</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Des épines longues, droites ou légèrement courbées.</p>	<p>Minimiser la surface exposée au soleil ; Protection contre les rayons solaires, notamment les rayons UV, en minimisant la surface exposée au soleil ; Former un coussin d'air, comme un système d'auto-ventilation ; Réduire la perte d'eau par transpiration ; Prévention contre la poussière ; Garder les cactus à l'abri des prédateurs.</p>	<p>Enveloppe adaptative hygrothermique, comprenant : Un système de protection solaire ; Emploi des matériaux à changements de phase ; Création d'une isolation thermique sous forme d'une cavité d'air ; Création des filtres pour empêcher le passage des particules.</p>
<p>Stomates</p> 	<p>Physiologique</p>	<p>Ouverture / fermeture des stomates.</p>	<p>Limiter la perte d'eau par transpiration ; Réduire l'absorption de chaleur ; Régulation des échanges gazeux entre le cactus et l'atmosphère.</p>	<p>Façade adaptative respirante qui optimise la ventilation naturelle.</p>

<p>Rhododendron</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Feuilles larges et plates.</p>	<p>Maximiser l'absorption de la lumière solaire précieuse.</p>	<p>Utiliser des vitrages avec des PV pour maximiser le captage des rayons solaires afin de garantir une autonomie d'énergie en matière d'électricité.</p>
<p>Acacia</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Racines étendues et profondes.</p>	<p>Accéder à l'approvisionnement en eau en dessous et atteindre les réserves d'eau souterraine plus stables et moins affectées par les variations saisonnières.</p>	<p>Utiliser des systèmes souterrains pour profiter de refroidissement géothermique pendant la période chaude pour le refroidissement.</p>
<p>Lierre</p> 	<p>Morphologique</p>	<p>Tiges grimpantes.</p>	<p>S'accrochent à des supports pour atteindre la lumière du soleil.</p>	<p>Utiliser des murs végétalisés pour créer des protections solaires bistournées et un microclimat favorable.</p>
<p>Tournesols</p> 	<p>Comportementale</p>	<p>Orientation des feuilles vers la source de la lumière.</p>	<p>Optimiser leur exposition à la lumière tout en limitant le gain solaire excessif ; Optimiser la photosynthèse sur une longue période de la journée.</p>	<p>Façade adaptative tournante.</p>
<p>Mimosas</p> 	<p>Comportementale</p>	<p>Mouvements foliaires exprimés par Pliage des feuilles.</p>	<p>Réduire la surface exposée au soleil ; Réduire la perte d'eau par transpiration ; Protéger les feuilles des températures froides ; Offrir un camouflage des plantes vis-à-vis des herbivores.</p>	<p>Façade adaptative avec un système de protection solaire pliable.</p>
<p>Erables</p> 	<p>Physiologique</p>	<p>Changements de couleur des feuilles dû à une accumulation de pigments.</p>	<p>Protéger les feuilles des dommages causés par les rayons ultraviolets ; Réduire le stress thermique en limitant l'absorption de chaleur.</p>	<p>Vitrage thermochromique, photochromique ou électro-chromique.</p>

Pin d'Alep 	Morphologique	Feuilles fines.	Réduire la surface exposée au soleil ; Réduire la quantité d'eau perdue par transpiration ; Favorise la circulation de l'air, permettant une ventilation naturelle efficace.	Enveloppe compacte ; Protection solaire.
	Physiologique	Pomme de pin qui s'ouvre et se ferme en réponse du taux d'humidité.	Régulation du taux d'humidité.	Enveloppes hydro-régulatrices basées sur des matériaux hygroscopiques ou matériaux hydro-réactifs.
Feuille de lotus 	Physiologique	Feuille hydrophobe est recouverte de papilles.	Autonettoyant.	Façade avec des vitrages autonettoyant, soit hydrophile ou photocatalytique
6.L'être humain				
L'être humain 	Physiologique	Transpiration sécrétée.	Eliminer la chaleur par évaporation à travers une peau avec des glandes sudoripares.	Un système de refroidissement par évaporation ; Un système de refroidissement basé sur le transfert de chaleur latente via une technologie des échangeurs de chaleur.
		Système vasculaire de la peau.	Vasodilatation : dilation des vaisseaux sanguins pour augmenter le flux sanguin près de la surface de la peau, pour la dissipation de chaleur, en période chaude ; Vasoconstriction : contraction des vaisseaux sanguins, réduisant le flux sanguin à la surface pour conserver la chaleur, en période de froide.	Utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) afin d'absorber et de libérer la chaleur en fonction des exigences.
		Valvules unidirectionnelles.	Empêcher le reflux du sang et assurer qu'il circule dans une seule direction.	Un système de ventilation avec un flux d'air unidirectionnel, y compris la capacité de réguler le flux.
	Morphologique	Morphologie fractale entre poumons, diaphragme.	Créer des variations de volume pour transférer l'air à l'intérieur et à l'extérieur du poumon.	Créer un gradient de pression, permettant une régulation du flux d'air sans avoir recours à des dispositifs mécaniques ; Réduction progressive des conduits pour maximiser la surface d'échange et créer des systèmes de ventilation basés sur la morphologie fractale.
		La graisse corporelle. Les cheveux vellus humains.	Protection thermique.	Isolation thermique efficace dans les bâtiments pour minimiser le transfert de chaleur à l'intérieur.

Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons examiné les différentes stratégies d'adaptation morphologique, physiologique et comportementale observées dans la nature, à travers la faune, la flore et l'être humain. Ces adaptations représentent des réponses aux conditions environnementales changeantes, favorisant la survie dans différents milieux. Nous avons conclu ce chapitre par un tableau récapitulatif, offrant une comparaison claire et facile des stratégies des organismes naturels dans divers contextes.

Cette taxonomie, en tant qu'outil de soutien à la conception dotée biomimétique, favorise une architecture plus robuste et en harmonie avec le milieu naturel. Cette récapitulation est destinée aux architectes, concepteurs et étudiants en architecture, permettant une meilleure compréhension et utilisation simplifiée du transfert des données d'adaptation issues de la nature en techniques de conception architecturales, pour une accessibilité pratique dans leurs projets de construction. Afin d'avoir des enveloppes de constructions qui se comportent de la même manière que celle de la nature, permettant d'être adaptatives, durables et favorables au bien-être pour faire face aux changements climatiques.

CHAPITRE III
LE BIOMIMÉTISME

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME

« Apprenez de la nature, vous y trouverez votre avenir » *Léonard de Vinci.*

Introduction

Depuis 3,8 milliards d'années, la nature joue le rôle de maître inépuisable de la biodiversité en réunissant environ 15 millions d'espèces qui sont adaptées et harmonisées à leur milieu (Gonzalez and Routier, 2014). Cette richesse a inspiré l'être humain à concevoir des méthodes techniques astucieuses, basées sur les stratégies naturelles pour relever des défis complexes. On appelle généralement cette approche biomimétisme.

Dans ce chapitre, nous servirons à préciser l'approche du biomimétisme en utilisant un contexte théorique. Il comprend des définitions essentielles et des éclaircissements à propos de ses composants, de sa théorie, de ses principes, de son évolution à travers l'histoire et des explications relatives aux différents niveaux d'imitation, de plus, aux différentes techniques utilisées. Le but est de fournir une meilleure compréhension et accessibilité pratique aux architectes qui explorent l'usage du biomimétisme dans leur conception architecturale.

3.1. Biomimétisme : définition et appréhension des concepts

Durant des milliards d'années d'évolution, dont le génie de la nature est manifesté à travers les animaux, les végétaux et les microbes, qui ont progressé pour se présenter comme un architecte et un ingénieur astucieux (Elghawaby, 2013). À cet effet, la nature avec cette richesse a inspiré les gens par des méthodes innovantes pour se nourrir, se loger, pour résoudre les problèmes de l'environnement et de ses habitants, afin d'assurer leur survie dans des environnements difficiles (Aziz and El Sherif, 2016; Jamei and Vrcelj, 2021). À l'époque contemporaine, ceci se traduit par le terme biomimétisme comme une nouvelle façon de considérer et d'apprécier la nature.

3.1.1. Définition du biomimétisme

Le terme *biomimétisme* (*biomimicry* en anglais) provient de la combinaison de deux mots grecs : «*bios*» (βίος) signifiant la **vie** ou **vivant**, et «*mimesis*» (μίμησις) signifiant **imitation** (Benyus, 1997; Zwart, 2018). Otto Schmitt a introduit le concept de biomimétisme pour la première fois en 1969 (Fiorito *et al.*, 2016) et a été ensuite popularisé par Janine M. Benyus, biologiste, naturaliste, écrivaine, observatrice, scientifique et consultante en innovation (Delbreil-bergès, 2015) dans son

livre « *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature* », publié en 1997, présente une évolution du paradigme, mettant en avant le biomimétisme comme une nouvelle discipline du design (Awadalla, 2023). Cette approche utilise la nature comme source d'inspiration pour résoudre des problèmes de conception (Mohamed, Mandour and Marey, 2022).

À cet égard, le biomimétisme est défini comme une nouvelle démarche d'innovation (Nasir and Kamal, 2022), qui encourage l'observation, la compréhension et l'inspiration de la nature sous toutes ses formes : faune, flore, micro-organismes et écosystèmes en tant que source d'inspiration, d'idéation et d'apprentissage.

Cette démarche repose sur des conceptions, des processus et des modèles qui incarnent des solutions à haute performance et économes en ressources (Mohamed, Mandour and Marey, 2022). Ces solutions, présentées de manière créative, précise et efficace ont pour objectif de résoudre les problèmes humains, de reconnecter les individus à la nature afin de favoriser une meilleure compatibilité entre la société humaine et la biosphère, et de développer des solutions techniques novatrices, performantes et respectueuses de l'environnement. Elles contribuent ainsi à une planète plus saine et durable (Badarnah, 2017; Chayaamor-Heil and Laracuate, 2018).

Dans ce contexte, le biomimétisme en tant que discipline en plein essor (Bechtel, 2021) et approche interdisciplinaire (Biomimicry3.8, 2017). Elle se manifeste dans de nombreux domaines comme le transport, l'agroécologie, la biochimie, la biologie, la pharmacie, l'ingénierie, l'architecture, la science des matériaux, l'énergie, l'industrie, la médecine, l'automobile, l'agriculture, l'électronique et les vêtements (Elghawaby, 2013; Rosenfeld, 2013).

Le biomimétisme, qui a connu une progression rapide et notable au cours des dernières années, se manifeste particulièrement en ingénierie, notamment dans le domaine de l'architecture. Il s'appuie sur l'inspiration de la nature en utilisant des analogies, des matériaux ou des procédés innovants. Cette approche contribue à améliorer le processus de la conception architecturale afin d'arriver à une conception architecturale durable, non polluante, moins énergivore, axée sur le climat et respectueuse de l'environnement (Badarnah and Kadri, 2014; Öztoprak, 2018; Jamei and Vrcelj, 2021).

L'architecte Michael Pawlyn, reconnu comme un précurseur à mettre en pratique les principes biomimétiques dans le domaine de l'architecture, dans son ouvrage « *Biomimicry in Architecture* » paru en 2011, a étudié la nature en imitant des fonctions, des formes, des processus et des systèmes biologiques pour bâtir des constructions plus performantes, mettre

en place des systèmes sans déchets et produire de l'énergie (Pawlyn, 2011; López *et al.*, 2017) dans le but d'offrir des solutions durables (Yedeki Arslan, 2014).

Le concept de biomimétisme a évolué au fil du temps. Dans cette partie, nous examinons les différentes définitions proposées par différents auteurs pour mettre en évidence ses bases et ses évolutions.

- **Jeronimidis et Atkins (en 1995)** ont défini la biomimétique comme : « l'abstraction de la bonne conception de la nature » (Fiorito *et al.*, 2016).
- **Panchuk (en 2006)**, indique le biomimétisme comme une science appliquée qui s'inspire des solutions des systèmes et des processus naturels aux problèmes humains (Soba, Zaki and Aliyu, 2016).
- **Julian Vincent (2007)** interprète le biomimétisme comme : "l'abstraction d'un bon design de la nature" (Awadalla, 2023).
- **Biomimicry Europa (en 2008)** définit le biomimétisme comme un processus d'innovation favorisant le transfert d'idées, de concepts et de stratégies inspirés du monde vivant, dans le but de concevoir des applications humaines visant un développement durable» (Gamage and Hyde, 2011).
- **Baumeister et al. (2012)** : « le biomimétisme est l'examen de la nature, de ses modèles, processus, systèmes et éléments à imiter ou dont s'inspirer pour résoudre les problèmes humains » (El-Rahman *et al.*, 2020).
- **Scott & Vare (2012)** : « le biomimétisme est la science qui consiste à copier des systèmes et des conceptions naturels pour créer de nouveaux produits industriels. Il est basé sur ce que nous pouvons apprendre de la nature et non sur ce que nous pouvons en extraire » (El-Rahman *et al.*, 2020).
- **Kshirsager, Malani et VSTiware (2017)** : « l'ont défini comme un processus au cours duquel ont imité des modèles, des systèmes, des processus et des éléments entiers de la nature pour résoudre les problèmes » (Ardabili, 2020).
- **Lipholt en 2019** : « le biomimétisme comme une approche de l'innovation qui cherche des solutions durables aux défis humains en imitant les modèles et les stratégies éprouvés de la nature » (El-Rahman *et al.*, 2020).
- **AFNOR** : « le biomimétisme est une philosophie consistant à prendre la nature pour modèle, notamment à un niveau organisationnel, afin de répondre aux enjeux du développement durable (sociaux, environnementaux et économiques) » (Fayemi *et al.*, 2013).

Étant donné que ces termes se chevauchent et sont interdisciplinaires, caractérisant la discipline du biomimétisme. La section présentée ci-dessous a pour but d'apporter des éclaircissements et de faire la distinction entre les différents termes utilisés, ainsi que de préciser leur champ d'application (Figure 3.1).

Biomimétique (*Biomimetic*) : il s'agit d'une coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation. Son processus de mise en œuvre repose sur l'imitation des stratégies, des mécanismes et des principes observés dans la nature. Elle met l'accent sur les stratégies fonctionnelles, leur représentation et leur appropriation pour développer des solutions techniques adaptées à la résolution de problèmes pratiques (Badarnah, 2017; Bechtel, 2021).

Bio-inspiration : un processus basé sur l'observation des systèmes biologiques, consistant à s'inspirer des mécanismes, formes ou stratégies du vivant pour résoudre des problèmes humains. Elle comprend la mise au point de nouveaux systèmes, matériaux et conceptions innovants, sans nécessairement chercher à copier intégralement le vivant, mais en adaptant ses principes à des contextes particuliers (Nasr, 2017; Bechtel, 2021).

Biomorphie (*Biomorphic*) : une discipline qui s'inspire du monde naturel en examinant les modèles, formes et morphologies des systèmes vivants. Son attention est portée sur la dimension formelle de ces structures afin de les adapter et de les intégrer dans l'art, le design et l'architecture. Grâce à cette méthode, il est possible de concevoir des œuvres architecturales et artistiques originales, souvent avec des significations symboliques et esthétiques inspirées de la nature (Kuru, 2020).

Bionique (*Bionics*) : est une discipline technique qui repose sur l'imitation des fonctions des systèmes biologiques, notamment celles liées à des mécanismes naturels complexes tels que le cerveau, pour développer leurs équivalents électroniques ; la mécanique, très liée à la robotique, sont étroitement liés, avec des applications dans les domaines industriels ou militaires (Brayer, 2019; Bechtel, 2021; Jamei and Vrcelj, 2021).

Biophilie (*Biophilia*) : un concept introduit par le biologiste Edward O. Wilson (1984), qui désigne l'affinité innée de l'être humain pour le vivant. Il s'agit d'un lien instinctif entre les êtres humains et les autres organismes vivants, exprimé par une fascination et un amour pour la nature et les êtres vivants (Brayer, 2019; Kuru, 2020).

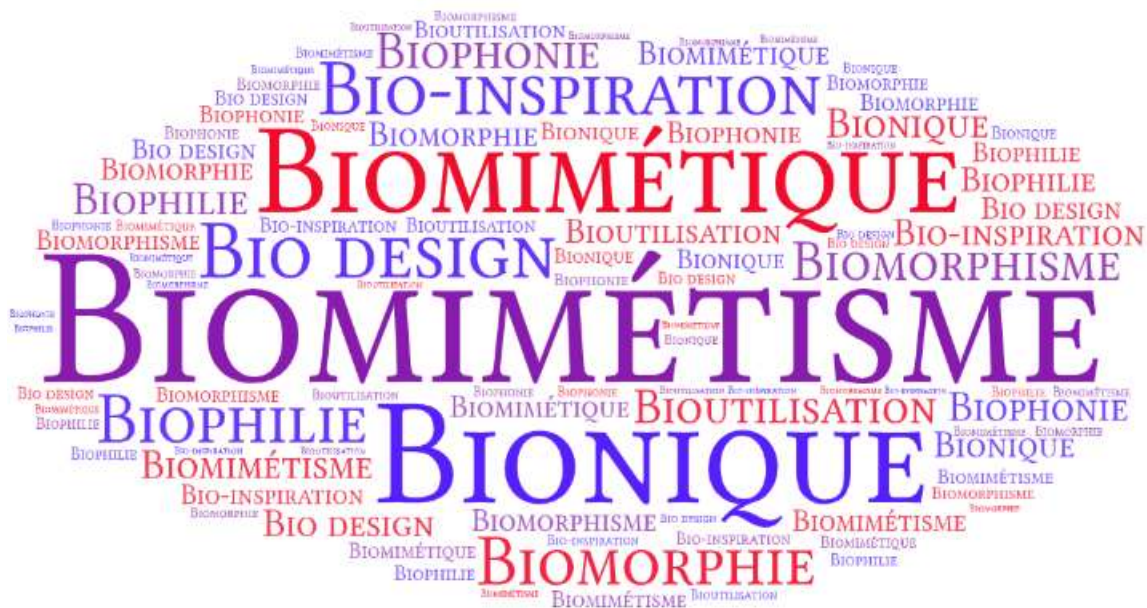


Figure 3.1. Nuage des termes relatifs au biomimétisme.
Source : Auteur (2022).

3.2. Eléments du biomimétisme

Le fondement du biomimétisme obéit à un triple élément interconnecté illustré dans la Figure 3.2 (Biomimicry3.8, 2017). Ces éléments sont cités ci-dessous :

3.2.1. Ethos

L'élément ethos constitue le fondement de leur éthique, de leurs intentions, de leur respect, de leurs responsabilités et de la philosophie qui sous-tend leur adhésion au biomimétisme. De même que notre reconnaissance pour notre humanité, notre planète et notre milieu commun que nous partageons avec des millions d'espèces.

3.2.2. (Re)connecter

Cet élément fait référence à une pratique et à un état d'esprit qui vise à explorer et approfondir la relation entre les personnes et le reste du monde vivant. Malgré une apparente séparation. Cette approche sert à repenser à notre place dans l'écosystème et à rétablir un lien qui reconnaît l'interconnexion entre toutes les formes de vie.

3.2.3. Emuler

L'élément émuler désigne la recherche des stratégies, des fonctions, des modèles et des principes présents dans le monde vivant afin d'inspirer des conceptions (designs) qui pourraient contribuer à transformer nos modes, permettant d'avoir des solutions naturelles pour améliorer l'efficacité, la durabilité et l'impact écologique de nos actions humaines, en suivant l'ingéniosité et l'efficacité des systèmes biologiques.

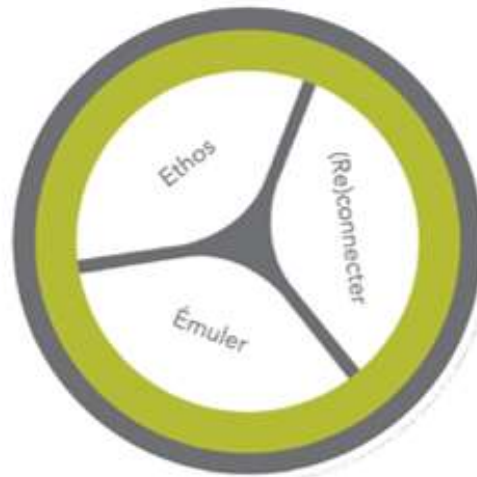


Figure 3.2. Eléments du biomimétisme.
Source : Biomimicry3.8 (2017).

3.3. Théorie du biomimétisme

D'après Benyus (2002), il est crucial de comprendre la nature à travers la théorie du biomimétisme, qui repose sur plusieurs principes fondamentaux regroupés en trois grandes catégories : le modèle, la mesure et le mentor (Figure 3.3). Ces éléments guident la manière dont nous pouvons imiter la nature pour créer des solutions durables et résoudre les problèmes humains de manière stable, tout en générant des innovations en conception, en accord avec le développement durable (Öztoprak, 2018).

3.3.1. Modèle

L'étude du biomimétisme consiste à analyser les divers modèles de la nature et à les reproduire dans leurs conceptions, que ce soit en termes de formes, de processus ou d'écosystèmes, dans le but de résoudre de manière durable les problèmes humains (Badarnah, 2012; Aziz and El Sherif, 2016; ElDin, Abdou and ElGawad, 2016).

3.3.2. Mentor

Le biomimétisme est une approche innovante pour observer et mettre en valeur la nature. Il s'appuie sur ce que nous pouvons apprendre d'elle, non sur ce que nous pouvons en extraire, ce qui nous donne une nouvelle vision de la nature et de ses enseignements (Badarnah, 2012; Aziz and El Sherif, 2016; ElDin, Abdou and ElGawad, 2016).

3.3.3. Mesure

Le biomimétisme utilise les lois, les stratégies et les principes de la nature comme outil de mesure, afin de déterminer ce qui fonctionne, ce qui est approprié et ce qui est durable, pour évaluer la durabilité et la pertinence de nos innovations. Cela nous conduit à une conception plus performante (Badarnah, 2012; Aziz and El Sherif, 2016; ElDin, Abdou and ElGawad, 2016).

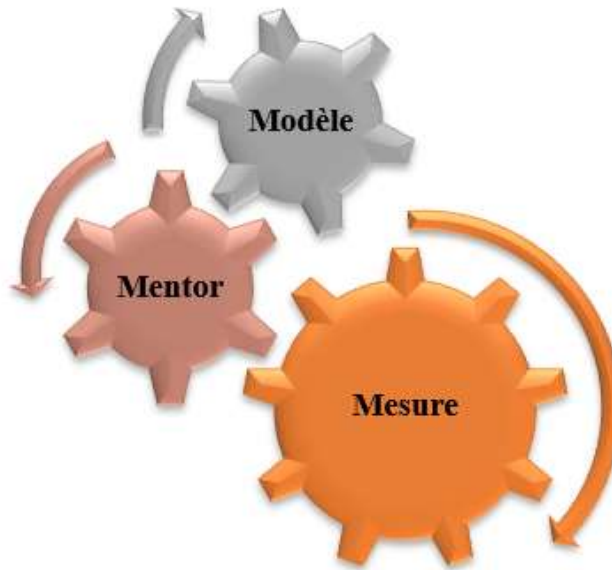


Figure 3.3. Eléments de la théorie du biomimétisme.
Source : Auteur (2022).

3.4. Aperçu historique sur l'évolution du biomimétisme à travers l'histoire

Depuis l'âge de la pierre jusqu'à nos jours, la nature est une source précieuse d'innovations. Elle a continuellement inspiré l'humanité à concevoir et construire des abris destinés à les protéger contre les agressions extérieures de l'environnement, offrant de la sécurité et du confort. Cette inspiration du génie de la nature a évolué au fil des époques, s'enrichissant d'améliorations à chaque période.

Cette section est consacrée à présenter un aperçu de son évolution à travers l'histoire :

3.4.1. Préhistoire (avant J.-C.)

Avant 3000 ans, l'homme a observé la nature avec une compréhension intuitive, ce qui lui permettait d'imiter les stratégies d'adaptation et de survie des êtres vivants et d'utiliser les matériaux disponibles dans son environnement pour se protéger des intempéries et des menaces extérieures. Cette époque est marquée par l'imitation de la nature d'une manière moins formalisée, qui s'est développée à travers le temps et sera revêtue dans différents domaines comme l'architecture et l'ingénierie (Bioxegy, 2022).

3.4.2. Antiquité (3000 av. J.-C. - 476 apr. J.-C.)

Le biomimétisme est apparu depuis l'Antiquité, manifesté par l'imitation directe de la nature. Il est exprimé par des constructions telles que les branches d'arbre et des fleurs, etc. (Soba, Zaki and Aliyu, 2016).

L'architecte Romain Vitruve a décrit l'architecture comme une imitation de la nature, en se basant sur les proportions du corps humain pour déterminer les proportions des temples (Baron, 2016).

Les colonnes grecques et romaines sont caractérisées par des ornements végétales issues de la nature, notamment par leurs chapiteaux : ioniques (Figure 3.4), corinthiens (Figure 3.5) et composites (Figure 3.6), et de la même manière, l'architecture égyptienne intégrait des motifs végétaux dans la conception de ses colonnes, telles que le palmier, le papyrus ou le lotus, créant ainsi un lien symbolique et esthétique entre l'homme et son état naturel (Figure 3.7). Ces éléments témoignent à la fois d'un goût pour l'ornementation et d'une symbolique profonde, où les formes végétales représentent des concepts de fertilité, de renouvellement et de reconnaissance de la nature (Elghawaby, 2013; Mohamed, Mandour and Marey, 2022).



Figure 3.4. Chapiteau ionique.
Source : Wikipédia (2023).



Figure 3.5. Chapiteau corinthien.
Source : Wikipédia (2023).



Figure 3.6. Chapiteau composite.
Source : Badie (2020).



Figure 3.7. Chapiteau papyriforme.
Source : Wiktionnaire (2023).

3.4.3. Renaissance (XIVe – XVIIe siècle)

En 810-887, Abbas Ibn Firnas fut un pionnier de l'aviation primitive grâce à ses exemples d'étude et à des tentatives de vol inspirées par le vol des oiseaux (Elmoudjahid, 2022). Plus tard, au XVe siècle, le grand génie italien Léonard de Vinci (1452-1519) a étudié

la nature pour développer des inventions basées sur l'imitation du fonctionnement vivant selon une idéologie préfigurant l'esprit du biomimétisme s'appuyant sur : « *Apprenez de la nature, vous y trouverez votre futur* ».

Léonard de Vinci, après avoir examiné attentivement et étudié l'anatomie des ailes, les fonctions et les positions des plumes, le système de vol des oiseaux et des chauves-souris (DaSilva Lima *et al.*, 2023) (Figure 3.8). Il a essayé de concevoir une machine, l'ornithoptère (Taylor, 2022) (Figure 3.9), qui fonctionne par la force musculaire humaine et était destinée à transporter les hommes dans les airs. Si cette découverte n'a pas abouti en raison des contraintes techniques de l'époque, elle a été l'inspiration des recherches suivantes. Ce n'est qu'en 1903, au début du XXe siècle, que les frères américains Orville et Wilbur Wright parvinrent à développer le premier avion motorisé et contrôlé, ce qui marqua le commencement de l'aviation moderne (Rosenfeld, 2013).



Figure 3.8. Croquis de Léonard de Vinci.
Source : Taylor (2022).



Figure 3.9. L'ornithoptère.
Source : Phouthonnesy (2019).

3.4.4. Révolution industrielle (XVIIIe – XIXe siècle)

Durant cette époque, l'inspiration de la nature a été effectuée dans une nouvelle dimension qui est basée sur la recherche de la manière de résister et de stabiliser, à travers des produits et de nouveaux matériaux, tels que le fer, la fonte, l'acier et le verre. Ceci permit d'ouvrir une nouvelle voie à un grand nombre de nouvelles techniques de constructions (Elghawaby, 2010; Yedeki Arslan, 2014; Lesage, 2015).

Le bâtiment révolutionnaire Crystal Palace de Londres (1851), réalisé par Joseph Paxton, qui était initialement jardinier paysagiste et spécialisé dans l'aménagement des jardins, s'inspira de la nature pour concevoir une structure légère, modulaire et résistante. Ce bâtiment illustra parfaitement l'innovation architecturale de l'époque à travers son

potentiel manifesté par une structure à grande échelle faite de nouveaux matériaux qui sont le verre et le métal (Badarnah, 2012).

La tour Eiffel est une tour métallique de 324 mètres de hauteur construite entre 1887 et 1889 à Paris, conçue par l'ingénieur français Gustave Eiffel, symbolisant la puissance industrielle et le savoir-faire technique de la France. Cette tour a été inspirée par la structure osseuse du fémur humain et ses capacités mécaniques remarquables de supporter les charges (Figure 3.10) (Jamei and Vrcelj, 2021).



Figure 3.10. La tour Eiffel inspirée de l'os du fémur.
Source : Mortelmans (2020).

3.4.5. À l'époque de la fin du XIXe siècle et du début du XXe siècle

Cette période est marquée par l'apogée de l'influence de la nature dans l'art et l'architecture, en particulier dans le mouvement artistique de l'Art Nouveau, qui se distingue par des représentations symboliques et esthétiques de la nature, exprimées par des formes structurelles étonnantes et des ornements inspirés des fleurs, des arbres, des insectes et des animaux. Ceci est constaté dans l'architecture du moine (Aziz and El Sherif, 2016; Chayaamor-Heil, Guéna and Hannachi-Belkadi, 2018).

Antoni Gaudí, un architecte catalan, avait une passion profonde pour l'architecture, la nature et la religion. Il était directement inspiré par les formes et les principes de la nature, qu'il voyait comme une source inépuisable de solutions architecturales. Dans sa célèbre citation, Gaudí exprimait cette perspective : « *Je n'invente rien, je copie le grand livre toujours ouvert de la nature* » (Biomimetisme, 2016). Dans cette optique, son architecture est véritablement exceptionnelle, utilisant des méthodes plus rationnelles, durables et

économiques, en se basant sur des structures rigides, des formes géométriques organiques découvertes dans la nature (Aziz and El Sherif, 2016).

La cathédrale de la Sagrada Família à Barcelone (Figure 3.11), caractérisée par des colonnes robustes inclinées aux formes ondulées, qui sont inspirées des branches d'arbres de la forêt (BIOMIMETISME, 2016; CLEMPEYRON, 2017; Synth, 2020).



Figure 3.11. La cathédrale de la Sagrada Família.
Source : Biomimetisme (2016).

3.4.6. Epoque moderne (XXe siècle)

Cette période s'étale de 1900 à 1970, souvent appelée « siècle de la physique » en raison des progrès considérables dans ce domaine, a aussi été marquée par les premières phases de la structuration du biomimétisme en tant que science. Cette méthode, qui repose sur l'élaboration de solutions naturelles pour résoudre des problèmes humains, a connu trois étapes principales :

3.4.6.1. Au début du XXe siècle

Cette période est très remarquable, car elle se manifeste par plus de possibilités pour les architectes de réaliser leurs idées inspirées de la nature grâce à la création du béton armé.

L'architecte allemand Frei Otto est reconnu pour ses conceptions basées sur des formes efficaces, traduisant les principes des propriétés, des structures, les proportions, les formes et les structures de la nature en architecture (Kuru, 2020). Cela se manifeste à travers des projets iconiques tels que le pavillon allemand de l'exposition à Montréal (1967) (Figure 3.12) et le stade olympique de Munich conçu en 1968 (Figure 3.13), qui sont inspirés des toiles d'araignées (Figure 3.14) (Bechtel, 2021).



Figure 3.12. Le pavillon Allemand de l'exposition à Montréal.
Source : Duval (2017).



Figure 3.13. Stade olympique de Munich.
Source : TPEBiomimétisme (2024).

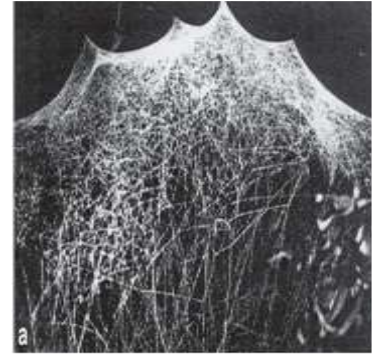


Figure 3.14. Structures toiles d'araignées
Source : Bechtel (2021).

3.4.6.2. Au milieu du XXe siècle

À partir des années 1970, avec l'apparition de nouvelles conceptions qui témoignaient d'une prise de conscience plus grande des enjeux environnementaux et des relations entre l'homme, le bâti et son environnement. Durant cette période, différentes approches ont été développées et mises en avant, comme : l'architecture organique et symbolique.

L'exemple emblématique de cette période c'était L'Opéra de Sydney, conçue par Jorn Utzon en 1973, reposant sur des formes modulaires préfabriquées.

Cette œuvre puise son inspiration de la nature, à travers ses formes, ses fonctions et de ses couleurs, notamment les ailes d'oiseaux, les nuages, les coquilles, les noix et des palmiers (Figure 3.15).

Jorn Utzon a déclaré que la conception finale des coquilles, composée de 14 toits séparés formant une sphère lorsqu'ils sont assemblés, s'est inspirée de l'épluchage d'une orange (Figure 3.16).



Figure 3.15. Sources d'inspiration de L'Opéra de Sydney.
Source : Utzon (2001).

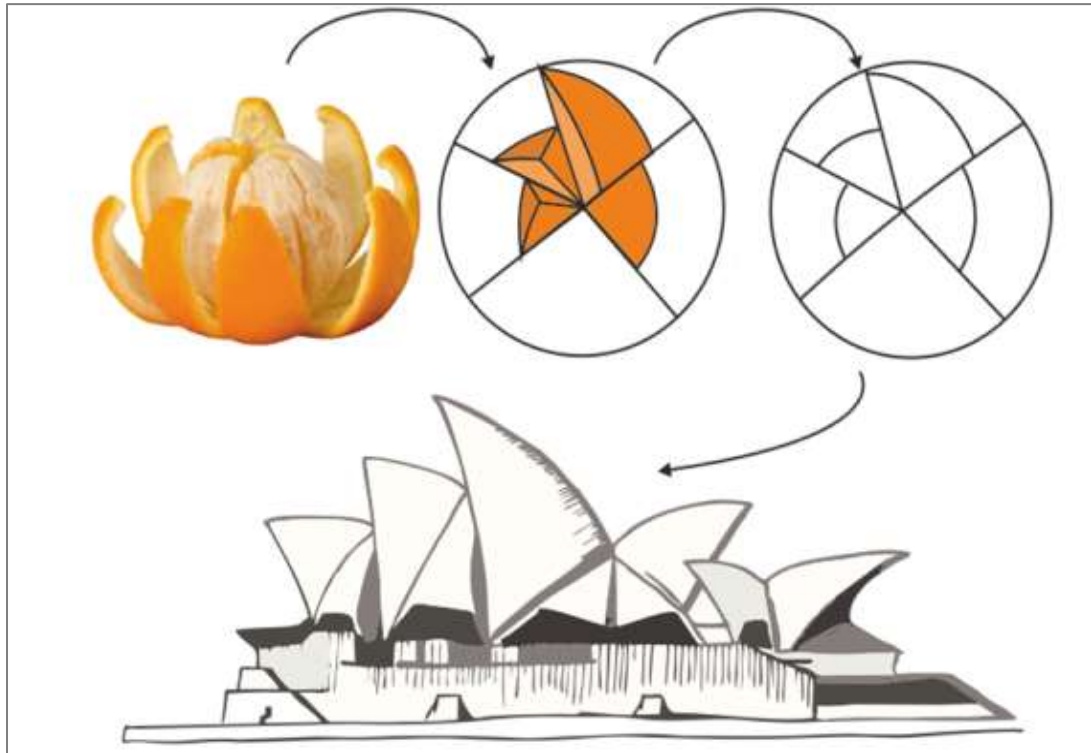


Figure 3.16. Genèse de l'idée pour la conception de L'Opéra de Sydney.
Source : Utzon (2001).

3.4.6.3. La fin du XXe siècle

La période qui s'étend des années 1970 aux années 1990 est marquée par l'apparition du biomimétisme dans l'architecture et le design s'inspirant des systèmes naturels. Cette méthode s'appuie sur une collaboration interdisciplinaire entre biologie, ingénierie et science des matériaux. En raison des progrès technologiques, cela a donné lieu à la création de solutions innovantes et durables qui répondent aux défis environnementaux et technologiques de l'époque et à la minimisation de l'impact humain.

L'un des exemples les plus marquants est l'émergence de l'architecture bioclimatique (Figure 3.17), l'écoconception et de l'architecture écologique et verte (Figure 3.18), qui place la végétation au cœur de ses conceptions, que ce soit dans les façades arborées, les toitures vertes ou les espaces urbains. Ces méthodes, fréquemment inspirées de la nature, contribuent à réguler la température, à améliorer la qualité de l'air et à contribuer à la diversité biologique en milieu urbain.



Figure 3.17. Architecture bioclimatique :
Centre culturel Jean-Marie Tjibaou.
Source : Wikipédia (2023).



Figure 3.18. Architecture verte.
Source : ENDB (2024).

3.4.7. XXI^e siècle

Cette époque, souvent désignée comme le « siècle de la biologie », se traduit par l'émergence du biomimétisme moderne intégré dans différents domaines tels que la médecine, l'ingénierie et l'architecture, en tant que philosophie globale caractérisée par l'intégration de technologies avancées. Elle a été marquée par l'essor des nouvelles technologies de l'information et de la communication, des technologies avancées et de l'intelligence artificielle, qui ont apporté de nouvelles valeurs et idées au domaine du biomimétisme (Elghawaby, 2010).

Les enveloppes adaptatives sont destinées pour atteindre plusieurs objectifs tels que : le confort, le bien-être des utilisateurs, l'efficacité énergétique et réduire l'impact de la bâtisse sur l'environnement afin d'atteindre une durabilité via différentes techniques telles que des enveloppes biomimétiques, intelligentes, réactives. Exemple : les Al Bahr Towers à Abu Dhabi (Figure 3.19) et le stade national de Pékin (Figure 3.20).



Figure 3.19. Al Bahr Towers.
Source : Cilento (2012).



Figure 3.20. Stade national de Pékin.
Source : Ballanger and Chaverou (2022).

La Figure 3.21 sert à récapituler tout ce qui a été cité précédemment, permettant d’avoir un aperçu sur l’évolution du biomimétisme à travers l’histoire.

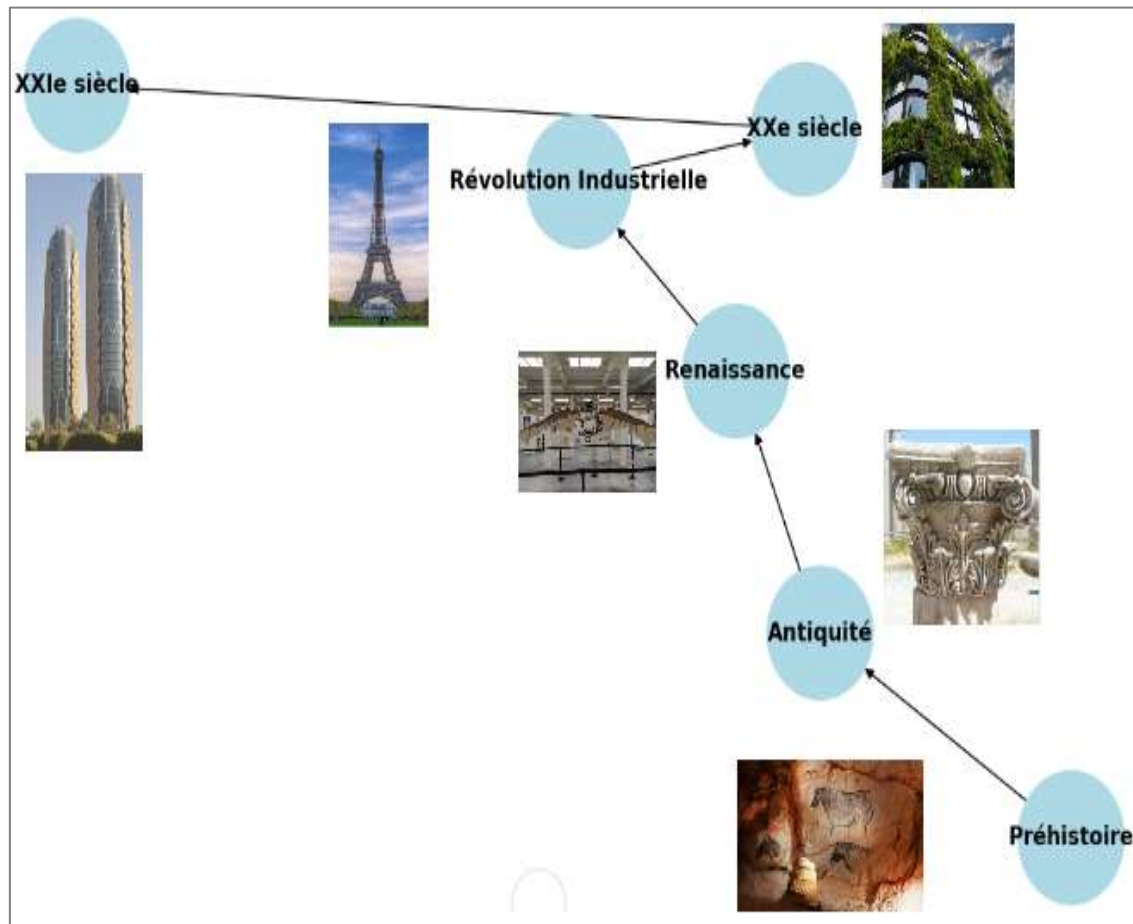


Figure 3.21. Evolution du biomimétisme à travers l’histoire.
Source : Auteur (2022).

3.5. Différents niveaux du biomimétisme

D'après Janine Benyus, la science du biomimétisme imite la nature en tant qu'une source d'inspiration immense à travers trois niveaux d'émulation, en fonction de ce qui est imité dans le vivant : organisme, comportement et écosystème, pour créer des solutions durables pour des systèmes non biologiques (Mirajkar and Agrawal, 2019).

3.5.1. Inspiration au niveau de l'organisme

Ce premier niveau d'inspiration biomimétique se réfère à une imitation directe, souvent sous forme de métaphore, qui consiste à reproduire les caractéristiques visuelles et physiques d'une partie ou de l'ensemble d'un organisme particulier (plante, animal ou corps humain). L'imitation repose sur les traits morphologiques de l'organisme, comme la forme, les structures, les couleurs et les textures, qui reflètent son adaptation à son milieu naturel. En règle générale, l'objectif est de renforcer l'aspect esthétique, symbolique et formaliste de

la création, tout en s'inspirant des stratégies de construction de la nature (El-Rahman *et al.*, 2020) (voir Tableau 3.1).

3.5.2. Inspiration au niveau du comportement

Le deuxième niveau d'inspiration va au-delà de l'imitation de la forme ou de l'apparence des organismes naturels. Son objectif est d'imiter les processus et comportements naturels qui permettent à un organisme de réaliser une fonction particulière et de s'intégrer de manière optimale à son environnement. Ce genre d'inspiration implique donc d'imiter les processus, les fonctions et les comportements des organismes, en se basant sur une maîtrise des technologies contemporaines pour résoudre des problèmes techniques dans des environnements contemporains (Öztoprak, 2018; Sheikh and Asghar, 2019) (voir Tableau 3.1).

3.5.3. Inspiration au niveau de l'écosystème

Ce troisième niveau d'imitation représente un biomimétisme profond et complexe, qui se concentre à une échelle élargie, notamment urbaine, en s'appuyant sur une compréhension approfondie de l'écologie. Son objectif est de s'inspirer des écosystèmes naturels pour concevoir des systèmes en imitant les relations entre les espèces et leur environnement. Ces écosystèmes naturels, en tant que systèmes stables, sont capables de fonctionner de manière autonome et durable sur de longues périodes (Jamei and Vrcelj, 2021) (voir Tableau 3.1).

En 2007, Pedersen Zari a défini chacun de ces niveaux. Il existe cinq autres dimensions d'inspiration biomimétique qui facilitent le processus de recherche du bon créneau dans l'ensemble de solutions naturelles (Figure 3.22) (Zari, 2007).

- **Forme** : désigne l'inspiration tirée de l'apparence visuelle ou des structures physiques des êtres vivants. Cela inclut les formes, les motifs, les textures et les configurations observées dans la nature. L'objectif est de s'appuyer sur les caractéristiques morphologiques des organismes (Aziz and El Sherif, 2016; El-Rahman *et al.*, 2020).
- **Matériau** : il s'agit de s'inspirer de la composition, des propriétés, des matériaux observés dans la nature (Aziz and El Sherif, 2016; El-Rahman *et al.*, 2020).
- **Construction** : il est possible de s'inspirer des méthodes de fabrication naturelles employées par les organismes vivants afin de construire des structures (Aziz and El Sherif, 2016; El-Rahman *et al.*, 2020).

- **Processus** : cette dimension du biomimétisme s'intéresse aux mécanismes et méthodes biologiques utilisés par des êtres vivants pour créer des structures ou produire des substances (Aziz and El Sherif, 2016; El-Rahman *et al.*, 2020).

- **Fonction** : l'objectif est de reproduire les principes fonctionnels en imitant des mécanismes naturels et des stratégies biologiques employées par les organismes vivants pour réaliser des tâches particulières ou résoudre des problèmes (Aziz and El Sherif, 2016; El-Rahman *et al.*, 2020).

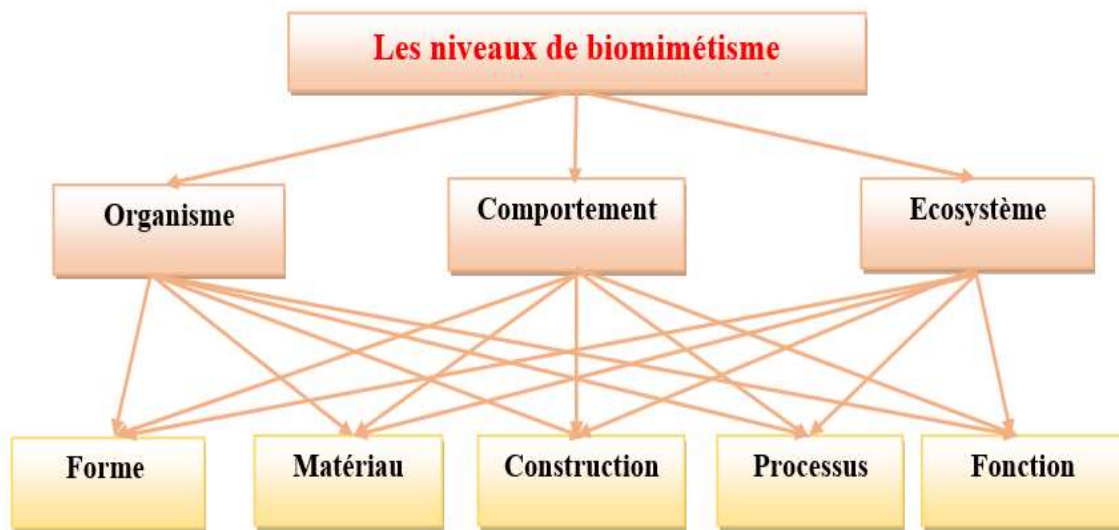













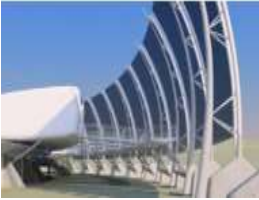






Figure 3.22. Niveau d'inspiration du biomimétisme.
Source : El-Rahman et al. (2020).

Le Tableau 3.1 présente une vision synthétique et globale de différents exemples des projets qui s'inspirent de la nature. Son objectif est de démontrer comment les principes naturels ont été traduits dans des conceptions architecturales selon différents niveaux d'inspiration, allant de l'imitation de l'organisme, du comportement et de l'écosystème.

Tableau 3.1. Différents exemples de projets qui s'inspirent de la nature à travers ses différents niveaux. Source : Auteur (2022).

Nomination	Situation	Architecte	Source d'inspiration	Descriptions	Figures
1. Au niveau d'organisme					
Esplanade Théâtre	Singapour (Malaisie)	DP Architects et Michael Wilford (1992)	<p>La peau aux épines dures des fruits du Durian</p> 	<p>La peau du théâtre a été inspirée de la forme de la peau épineuse protégeant le fruit de la surchauffe. Réalisée par un système de protection solaire réactif via des lamelles triangulaires en aluminium situées dans les cadres en acier léger qui forment les pyramides, qui ajustent leur angle pendant la journée en fonction de la position du soleil. Ces lamelles empêchent non seulement la température dans les bâtiments de s'élever, mais elles créent également un jeu d'ombres dans les différentes pièces. Cette texture réduit de 30% l'énergie totale consommée dans le bâtiment et de 55% l'utilisation de l'éclairage artificiel.</p>	
Musée Art Science	Singapour (Malaisie)	Moshe Safdie (2011)	<p>Fleur de lotus</p> 	<p>La forme du musée, qui suit l'arrangement particulier des pétales de la fleur de lotus, permet de récupérer l'eau de pluie en vue de la recycler pour la cascade qui se trouve au centre de l'édifice et pour les sanitaires, et laisse entrer la lumière naturelle dans plusieurs directions, diminuant ainsi l'usage de l'éclairage artificiel. Avec ses fonctions respectueuses de l'environnement et son magnifique design, le musée lui-même constitue un accomplissement exceptionnel de l'union entre l'art et la science.</p>	
Maison d'adoration Bahai	New Delhi (L'Inde)	Fariborz Sahba (1986)		<p>Ce temple contient neuf répétitions inspirées des pétales de la fleur de lotus. Cette conception peut cacher les rayons intenses du soleil et garder les intérieurs frais et bien éclairés.</p>	
Kaktos	Le quartier du Chaudron à Saint-Denis	Joël Bonnot et Marius Roumieu (2019)	<p>Cactus</p> 	<p>Ce projet remporte le 2^{ème} prix du concours Eiffel 2019, il est conçu sous forme d'une tour de 21 étages constituée de volumes en saillie, en forme d'épine, qui permet à la fois de récupérer l'eau de pluie et de faire de l'ombre au corps du bâtiment. L'ensemble du projet repose sur une structure légère bois-métal qui limite le stockage de chaleur tout en intégrant une ventilation traversante.</p>	

Tour du Ministère des Affaires Municipales et de l'Agriculture	Doha (Qatar)	Le cabinet Aesthetics Architects Go Group (2009)	<p align="center">Cactus</p> 	<p>La conception du bâtiment s'inspire de la capacité des cactus de s'adapter à un environnement difficile comme le désert. Présentée sous forme d'un système de panneaux pare-soleil qui s'ouvrent et se ferment en fonction de l'intensité du soleil, ainsi qu'un dôme botanique s'ajoutant à sa cote verte. Ce bâtiment suit l'approche innovante de l'architecture durable qui prouve que les conceptions biologiques existantes peuvent être utilisées avec succès pour une économie d'énergie qui a été une composante indispensable dans cette région, notamment durant la période chaude.</p>	
Stade Olympique	Munich (Allemagne)	Frei Otto (1972)	<p align="center">Toile d'araignée</p> 	<p>La conception de ce stade présente une œuvre symbolique du design architectural qui a marqué l'histoire de l'architecture moderne, caractérisée par ses formes et structures naturelles qui présentent des solutions à la fois fonctionnelles et esthétiques, adaptées à l'environnement.</p>	
Stade Olympique	Pékin (Chine)	Herzog & de Meuron (2008)	<p align="center">Nid d'oiseaux</p> 	<p>La structure du stade, innovante et inspirée de celle des nids d'oiseaux, permet d'augmenter les capacités de répartir et supporter les charges, d'offrir une résistance considérable, d'assurer le confort à l'intérieur de la structure, en matière des températures, la vitesse du vent et l'humidité et d'assurer un système d'éclairage et un système de filtration du vent.</p>	
Salle De concert Armadillo	Scotland (Écosse)	Norman Foster (1997)	<p align="center">Armadillo</p> 	<p>Cette forme inspirée d'Aradillo permet de concevoir les coques permettant disposant d'une sensation de mouvement, de fluidité et d'une esthétique.</p>	
Maison de désert	Yazd (Iran)	Shaikh Nawaz Altaf (2012)	<p align="center">Escargot</p> 	<p>La forme et la couleur de la coquille d'escargot lui permettent de rester à la fois fraîche et humide même dans les températures les plus rudes, tout en améliorant le confort des habitants et réduire la consommation d'énergie.</p>	

2. Au niveau du comportement					
Le projet Eden	Bodelva Royaume-Uni	Nicholas Grimshaw (2001)	Termites 	Le projet est conçu selon une conception élaborée pour tirer parti des variations de température et de pression entre l'intérieur et l'extérieur, facilitant ainsi un flux d'air qui maintient la fraîcheur durant l'été et conserve la chaleur en hiver en imitant le principe de la thermorégulation des termites.	
Centre hydrologique de l'université	Namibie	Matthew Parkers de KSS Architectes (2014)	Petit coléoptère 	La structure de centre permet de capter l'humidité de l'air, favoriser la condensation et le drainage de l'eau, optimisant ainsi la gestion des ressources hydriques en milieu aride, selon un mécanisme passif, tel que le mécanisme de collecte de la rosée du matin via ses élytres, de plus sa propre usine à faire de l'eau, là où il ne pleut jamais.	
Le centre d'innovation	Skolkovo (Russie)	Herzog & de Meuron (2012)	Regroupement des pingouins empereurs 	Le plan de masse de ce centre a été inspiré du regroupement des pingouins empereurs, ce qui a permis de gagner 5°C de température.	
3. Au niveau d'écosystèmes					
Masdar City	Abu Dhabi (ÉAU)	Foster (2006)	L'écosystème des oasis désertiques 	La conception de cette ville s'inspire de l'environnement des oasis désertiques et de leur aptitude à capturer et à utiliser de manière efficace les ressources naturelles rares, telles que l'eau et l'énergie. Cela permet d'avoir une ville durable, qui repose sur l'énergie solaire et intègre des solutions passives pour le climat naturel des oasis.	
Bosco Verticale	Milan (Italie)	Stefano Boeri Architetti	Forêts naturelles 	Les tours de Bosco verticale accueillent environ 900 arbres et 20 000 plantes, créant ainsi un véritable micro-écosystème vertical. En favorisant activement l'amélioration de l'environnement urbain, en purifiant l'air, en régulant le climat, afin de favoriser la diversité biologique dans les villes.	

La particularité de cette approche réside dans sa capacité à partir d'un problème ou d'un besoin particulier à chercher rapidement des inspirations dans la nature. Ses fondements sont basés sur une collaboration entre différentes disciplines, où biologistes, ingénieurs et designers collaborent afin de transformer le potentiel naturel en solutions techniques appropriées et performantes (Aziz and El Sherif, 2016).

3.6.1.1. Les étapes de la technique directe

Cette technique repose sur la progression d'étapes dynamique et non linéaire en boucle de rétroaction citées ci-dessus (Figure 3.24) (Al-Obaidi *et al.*, 2017) :

- **Définir le problème technique** : déterminer les besoins à travers la définition précise du problème technique.
- **Recadrer le problème** : cette étape consiste à effectuer une meilleure compréhension du défi à résoudre, en identifiant tous ses aspects afin d'approfondir la définition du problème.
- **Rechercher la solution biologique** : cette étape est cruciale, elle repose sur l'étude des systèmes naturels pour trouver des solutions biologiques en travaillant en collaboration avec des spécialistes de différentes disciplines afin d'observer et d'analyser comment la nature a résolu des problèmes similaires.
- **Définition de la solution** : repose sur une analyse détaillée des organismes vivants, des écosystèmes ou des processus pour l'identification des stratégies les plus adaptées et les plus pertinentes.
- **Extraire le principe** : étudier les principes de la nature afin de les mettre en pratique dans une solution technique. L'objectif de cette étape est de convertir les observations biologiques en modèles techniques, puis de les tester et d'ajuster sur des prototypes afin de confirmer les résultats.
- **Appliquer le principe** : désigne appliquer la solution technique qui a été inspirée de la nature à des situations concrètes. Comprenant une réalisation à grande échelle et l'amélioration continue afin d'assurer la fonctionnalité et l'adéquation aux exigences.

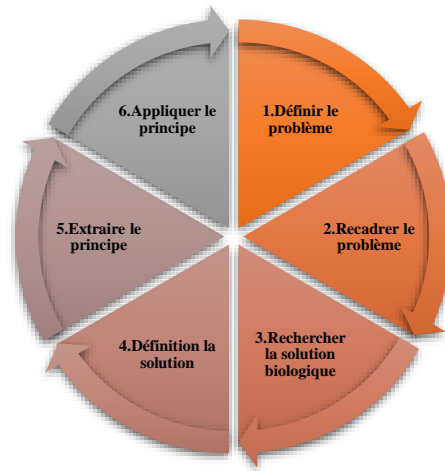


Figure 3.24. Processus de conception biomimétique basé sur la technique directe.
Source : Auteur (2022).

3.6.2. Technique indirecte

La technique indirecte, également appelée technique basée sur des solutions, a diverses appellations en fonction des contextes et des approches (Figure 3.25).

La technique biomimétique indirecte s'appuie sur l'observation et l'analyse des systèmes biologiques et des connaissances préalables sur la nature. À la différence de la méthode descendante, elle se base sur les solutions naturelles déjà existantes pour extraire des principes généraux, qui sont ensuite adaptés et appliqués à divers domaines, tels que la construction ou l'ingénierie, dans le but de créer des solutions novatrices, durables et performantes. Bien que ce processus soit souvent plus long que la méthode directe, il conduit généralement à des progrès techniques importants et à une meilleure intégration des principes naturels pour des applications technologiques (Aziz and El Sherif, 2016; Al-Obaidi *et al.*, 2017; Badarnah, 2017).



Figure 3.25. Différentes nominations de la technique indirecte.
Source : Auteur (2022).

3.6.2.1. Les étapes de la technique indirecte : est basée sur les étapes suivantes (Figure 3.26) (Al-Obaidi *et al.*, 2017) :

- **Identification de la solution biologique particulière :** repose sur une observation approfondie et l'identification du modèle biologique marquant et de son potentiel issu des recherches biologiques ou des connaissances antérieures sur la nature.
- **Définition de la solution biologique :** consiste à extraire et déterminer une caractéristique particulière, ou un comportement spatial ou une structure efficace d'un modèle biologique, de plus, une connaissance de son contexte biologique.
- **Extraction du principe biologique :** désigne une formulation de ces principes dans un langage compréhensible pour les ingénieurs et concepteurs, s'articule sur une collaboration entre biologistes et ingénieurs pour plus de performance.
- **Recadrement de la solution :** cette phase, qui est une tâche spéciale des concepteurs, consiste à reformuler la solution biologique pour qu'elle soit adaptable et applicable à un domaine technique en termes de matériaux et de coûts.
- **Recherche du problème :** lors de cette phase, les designers et les ingénieurs servent à identifier les besoins et les problèmes techniques auxquels cette solution naturelle pourrait y répondre.
- **Définition du problème :** L'objectif de cette étape est de définir clairement et de manière détaillée les contraintes spécifiques du problème, afin d'orienter le processus de conception.
- **Application principale :** désigne la mise en œuvre pratique de la solution biomimétique adaptée au problème identifié.

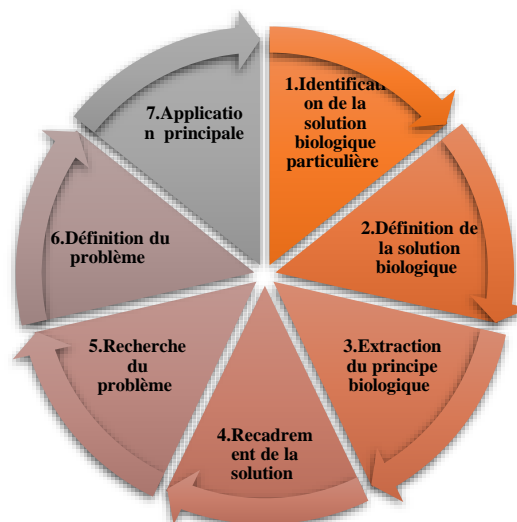


Figure 3.26. Processus de conception biomimétique basé sur la technique indirecte.
Source : Auteur (2022).

3.7. Principes du biomimétisme

Dans son ouvrage, Benyus (1997) détaille les principes du biomimétisme dans le domaine de la conception architecturale, pour une pratique réparatrice où le bâti et l'environnement deviennent un élément essentiel dans l'intégration et la régénération des écosystèmes naturels. Cela peut être atteint en respectant les lois naturelles (Soba, Zaki and Aliyu, 2016) :

- La nature fonctionne à l'énergie du soleil ;
- La nature n'utilise que l'énergie dont elle a besoin ;
- La nature adapte la forme à la fonction ;
- La nature recycle tout ;
- La nature récompense la coopération ;
- La nature parie sur la diversité ;
- La nature valorise l'expertise locale ;
- La nature freine les excès de l'intérieur ;
- La nature détient le pouvoir d'imposer des limites ;
- La nature utilise l'énergie pour plus d'efficacité ;
- La nature utilise les déchets comme ressources ;
- La nature transforme les limites en opportunités.

3.8. Les intérêts de la conception biomimétique

Le biomimétisme est une démarche d'innovation interdisciplinaire en plein essor qui suscite un intérêt croissant dans différents domaines, en particulier en architecture. Dans le but de créer des bâtiments novateurs, cette approche s'inspire des stratégies et des mécanismes développés par la nature, afin de se comporter comme des organismes vivants, en interagissant de façon dynamique avec leur environnement. Il s'agit d'un changement par rapport au modèle traditionnel des constructions statiques, en favorisant des structures intelligentes, adaptatives et durables. Cette approche présente plusieurs avantages qui sont énumérés dans les points suivants :

3.8.1. Au niveau conceptuel

Avoir une nouvelle pensée en matière de conception architecturale se manifeste à travers les enveloppes adaptatives biomimétiques afin d'avoir la résolution et la remédiation des erreurs des constructions existantes, en répondant aux exigences fonctionnelles de l'environnement bâti.

Utilisation des techniques innovantes dans le domaine de la construction à travers l'exploitation de divers types de formes, d'éléments légers et de structures innovantes qui s'adaptent efficacement, permettant d'avoir un contrôle des conditions environnementales extérieures et intérieures d'une manière durable (Kuru, 2020; Jamei and Vrcelj, 2021).

Exploitation des matériaux de construction nouveaux, efficaces et non polluants, notamment les matériaux biosourcés, adaptatifs servant à réduire les déchets, le poids et le coût, et participant à créer des relations synergiques entre l'environnement et la structure en favorisant la santé et atténuant les effets des îlots de chaleur urbains (Attia, 2015; Jamei and Vrcelj, 2021).

3.8.2. Au niveau énergétique

Atteindre une efficacité énergétique en réduisant la consommation énergétique des bâtiments, en s'appuyant sur des concepts biomimétiques permettant de concevoir des systèmes autonomes et indépendants (Bechtel, 2021).

Adaptabilité environnementale aux différentes conditions changeantes via des matériaux durables ou des solutions technologiques innovatrices de contrôle et d'actionnement (Mohamed, Mandour and Marey, 2022). Favorisant une symbiose entre le bâtiment et son environnement.

3.8.3. Au niveau du bien-être

Amélioration du bien-être des usagers et des différents aspects du confort : hygrothermique, visuel, olfactif et sonore.

3.8.4. Au niveau de l'esthétique

Donner l'importance à l'esthétique qui fait référence à la nature via des formes et des structures organiques et souvent cinétiques capables de s'adapter en raison des conditions changeantes, qu'elles soient intérieures ou extérieures.

3.8.5. Réduction des déchets

En s'inspirant des cycles naturels, elle favorise des systèmes constructifs intégrant le recyclage et la réutilisation selon le principe de cradle-to-cradle qui désigne que les déchets = ressource (Bechtel, 2021).

3.8.6. Au niveau technologique

Renforcement de la créativité et de l'innovation (Badarnah, 2012) via une intégration de la technologie avancée dans les systèmes de contrôles et d'actionnement.

3.8.7. Durabilité

Réduction d'impact des bâtiments sur l'environnement via un processus respectueux de l'environnement.

3.8.8. Résilience et optimisation

Des bâtiments robustes, flexibles et adaptables face aux changements environnementaux.

3.8.9. Au niveau environnemental

Des bâtiments au cœur du développement durable répondent aux défis de société en vue d'une meilleure performance environnementale entre l'homme et la nature et à la réduction de la pollution (Mohamed, Mandour and Marey, 2022).

3.9. Défis, difficultés et limites de la conception biomimétisme

Le biomimétisme en tant que domaine de recherche interdisciplinaire qui repose souvent sur des compréhensions et des compétences très spécifiques (Tabadkani *et al.*, 2021) nécessite un travail entre les biologistes et les ingénieurs pour assurer une meilleure compréhension de la nature et de ses mécanismes, et afin de faciliter l'imitation pour créer des produits hautement résilients (Badarnah, 2012; Kuru, 2020), car les domaines de la biologie et de l'ingénierie sont fondamentalement différents (Kruiper *et al.*, 2020).

À cet effet, la recherche sur la biomimétique en tant qu'outil de conception efficace reste un défi majeur qui réside dans le manque d'une méthodologie systématique de conception sélective (Badarnah and Kadri, 2014). Comme ce processus de conception a subi des difficultés lors de son processus d'application et de mise en œuvre afin d'avoir une conception durable. Parmi ces difficultés :

3.9.1. L'importance des compétences interdisciplinaires

La pratique biomimétique nécessite une collaboration interdisciplinaire (Badarnah, 2017) étroite entre biologistes, thermiciens, physiologistes, mathématiciens, philosophes, informaticiens, physiciens, chimistes et/ou écologistes et autres experts, en raison des différences de terminologie et de méthodologies entre les différents domaines.

3.9.2. Inspiration de la nature

La nature nous offre un réservoir incommensurable d'inspiration. Avec près de 15 millions d'espèces vivantes, cette vastitude même représente un défi pour une pratique biomimétique en termes de choix, de compréhension et de transformation de ces merveilles naturelles en innovations techniques, notamment architecturales, adaptées aux changements externes et aux besoins humains.

3.9.3. Complexité de la transposition

Cette difficulté est due au manque de données biologiques accessibles, préparées et coordonnées permettant de faciliter son abstraction et la transformation en solutions constructives et techniques performantes.

3.9.4. Application des concepts et mise à l'échelle

La complexité de la concrétisation de la conception biomimétique réside dans les difficultés de transfert des idées biologiques à petite échelle, celle de prototype, et plus précisément à l'échelle architecturale réelle. Comprenant le choix des procédés et des matériaux adéquats.

3.9.5. Contraintes économiques

Les coûts élevés du processus conceptuel biomimétique, notamment lors de la phase de prototypage et de mise en œuvre des solutions biomimétiques en raison des prix élevés des matériaux de construction.

Le coût des ouvrages est élevé et le manque de financement.

3.9.6. Simulation numérique

Dans le but d'évaluer la performance d'innovation biomimétique, ce qui repose fortement sur des logiciels informatiques qui se caractérisent par un écart entre les adaptations naturelles et les modélisations et simulations informatiques algorithmiques. Ces dernières nécessitent spécialement beaucoup de temps et d'efforts pour les familiariser (Tabadkani *et al.*, 2021).

3.9.7. Délais de développement

Les processus de recherche et développement biomimétiques sont plus longs que les approches conventionnelles.

3.9.8. Politique

Insuffisance de considération politique et absence des réglementations liées aux textes législatifs relatifs à la mise en œuvre du biomimétisme.

Conclusion

La nature est le meilleur enseignant qui puisse nous orienter. Depuis des milliards d'années, elle a développé des méthodes, des stratégies et des matériaux qui peuvent s'ajuster aux évolutions récurrentes de l'environnement. Cette source inépuisable de génie continue d'être enseignée par l'homme, qui s'inspire des solutions naturelles pour faire face à ses propres défis.

Dans cette optique, ce chapitre se focalise sur l'étude du biomimétisme dans ses diverses facettes. Il s'attache tout d'abord à exposer le cadre théorique de cette approche, pour en faciliter la compréhension et poser les fondements pour les évolutions suivantes.

Deuxièmement, ce chapitre vise à exposer l'utilisation du biomimétisme dans le domaine d'architecture. D'une part, il offre un panorama historique de l'évolution de cette discipline au fil des siècles. De plus, il examine la pratique biomimétique en expliquant en détail les différents niveaux d'inspiration, avec des exemples illustrés. Cette approche met l'accent sur les méthodes de conception architecturale qui permettent de dépasser les cadres traditionnels. Ce processus incite les architectes à faire preuve d'innovation, de réinvention et à intégrer la nature comme une source inépuisable d'inspiration et d'innovation.

CHAPITRE IV
LES ENVELOPPES
ADAPTATIVES

CHAPITRE IV : LES ENVELOPPES ADAPTATIVES

Introduction

À l'horizon 2050, pour faire face aux changements climatiques, les objectifs internationaux visent à atteindre la neutralité climatique et zéro émission nette. Dans ce contexte, le rapport de L'Agence internationale de l'énergie (AIE) de 2022 met en exergue la nécessité d'apporter des modifications notables dans le domaine du bâtiment afin de diminuer la demande énergétique. Il souligne également l'intégration d'enveloppes de bâtiment à haute performance (Sommese, Badarnah and Ausiello, 2023). Parmi ces solutions, une attention particulière est portée aux enveloppes adaptatives, en tant qu'une partie intégrante du bâtiment qui est capable de réagir instantanément aux conditions changeantes. Ces enveloppes sont basées sur l'incorporation de technologies innovantes pour assurer un climat interne confortable (Harry, 2016), pour minimiser la consommation d'énergie et les rejets de carbone incorporés, tout en réduisant les dépenses et l'impact écologique des constructions dans lesquelles ils sont incorporés.

En tenant compte de la progression rapide dans le domaine de la construction, ce chapitre donne un aperçu des enveloppes adaptatives via des connaissances essentielles et des détails pour simplifier leur compréhension. Il présente une classification des différents types d'enveloppes selon divers critères pour approfondir cette compréhension. Enfin, une analyse des systèmes de contrôle intégrés à ces enveloppes est proposée, à travers une taxonomie basée sur différents paramètres, afin d'aider les architectes à mieux distinguer et adopter ces solutions pour une pratique alignée sur une approche adaptative dans l'environnement bâti.

4.1. Définition de l'enveloppe

L'enveloppe est un concept polysémique qui se retrouve à la fois en :

- **En finance**, il fait référence à l'ensemble de crédits alloués à un département ministériel ou à un organisme public (Encarta, 2009).
- **En botanique** : indique une membrane extérieure protectrice d'un végétal telle que l'enveloppe d'une graine (Encarta, 2009).
- **En biologie** : désigne une membrane extérieure protectrice d'une partie du corps ou d'un organisme vivant, par exemple : les enveloppes bactériennes (Encarta, 2009).

- **En langue** : c'est la structure et les éléments qui entourent un mot ou une phrase pour en préciser le sens ou la fonction.

- **En littérature**, l'expression « enveloppe » fait référence à ce qui enveloppe ou sert à envelopper, qui couvre en entourant. Ou bien la matière ou l'objet souple qui s'adapte à la forme de l'objet (CNRTL, 2024).

- **En architecture**, l'enveloppe du bâtiment est largement reconnue comme l'enceinte globale du bâtiment (Barozzi *et al.*, 2016), considérée comme le premier élément architectural perçu de l'extérieur en interaction avec l'environnement (Öztoprak, 2018). Elle est définie aussi en tant que modérateur environnemental et comme une interface de séparation entre les facteurs environnementaux extérieurs et les exigences intérieures des occupants (López *et al.*, 2017).

Cette enveloppe se compose de plusieurs éléments : horizontaux, verticaux ou inclinés (Mosa, 2018), sans distinction entre murs, toiture, planchers et ouvertures (Badarnah, 2017; López *et al.*, 2017). Elle indique que les occupants sont entourés dans un espace de la même manière que les êtres vivants dans la nature (Öztoprak, 2018). Elle assure diverses fonctions sociales, humaines, architecturales et énergétiques, exprimées à travers des actions telles que protéger, supporter, contrôler, embellir et distribuer des services (Romano *et al.*, 2018).

4.2. Définition de la notion d'adaptation

4.2.1. En biologie

L'adaptation est un concept complexe et fondamental qui désigne la capacité des organismes naturels d'effectuer des changements physiologiques, morphologiques ou comportementaux (Sommese, Badarnah and Ausiello, 2023), en se basant sur les informations inhérentes à leur patrimoine génétique. Ces adaptations, qu'elles soient immédiates et involontaires (Öztoprak, 2018), permettent aux organismes de réagir aux fluctuations environnementales telles que la température, l'humidité, la lumière, la pluie, le gel, le feu, le mouvement ou la qualité de l'air. Ces adaptations se développent au fil du temps et des générations (Laboratorio biomimetico, 2020) visant à augmenter leurs chances de survie et de reproduction, tout en facilitant leur résistance aux stress et aux variations environnementales en constante évolution, qu'elles soient locales ou globales (pour plus de détails, voir Chapitre II).

4.2.2. En architecture

Au cours des trois dernières décennies, les pratiques architecturales ont suivi une nouvelle orientation caractérisée par une tendance spectaculaire de conception des enveloppes modernes de bâtiments. Ces enveloppes, souvent adaptatives et inspirées de la nature, symbolisent un passage des idées d'architecture statique vers une architecture cinétique basée sur des modifications géométriques d'éléments ou sur des changements des propriétés des matériaux (Turrin *et al.*, 2014).

Ces enveloppes sont conçues à travers un processus particulièrement complexe, nécessitant l'implication de nouveaux systèmes, stratégies et techniques de fabrication innovantes, tout en exploitant des technologies avancées (Sommese, Badarnah and Ausiello, 2023). Elles ont la capacité de changer leurs propriétés ou leur comportement en modifiant les caractéristiques, la géométrie, l'emplacement ou l'usage de l'espace en temps réel. Ces changements se produisent en réaction à des facteurs environnementaux précis et aux variations dynamiques quotidiennes et saisonnières, sans nécessité d'intervention humaine (Mosa, 2018).

Ce passage d'une forme statique à une forme dynamique dans l'architecture via des enveloppes adaptatives, qui s'opèrent via des actions telles que : réguler, protéger, transférer, réfléchir, stocker, transformer pour répondre aux défis environnementaux (Sommese, Badarnah and Ausiello, 2023). Ces actions visent à maximiser la qualité de l'environnement intérieur, à améliorer différents aspects du confort en répondant aux besoins et préférences des occupants, à réduire la consommation d'énergie et les émissions liées aux bâtiments, tout en augmentant l'efficacité énergétique, la rentabilité économique et l'esthétique du bâtiment (Romano *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, un vocabulaire architectural inédit est apparu, fréquemment employé de façon interchangeable pour décrire les façades adaptatives. Ces dernières sont basées sur l'incorporation de technologies de pointe, comprenant des matériaux, des composants, des systèmes et des techniques de construction qui ont progressé au cours du temps (Elkhayat, 2014). Elles s'appuient sur une relation étroite entre trois éléments clés : usagers, enveloppe et climat (Figure 4.1).

En conséquence, un cadrage sémantique a été mis en place, constituant un lexique comprenant des termes similaires, considérés comme synonymes, descriptifs, comportementaux et méthodologiques. Ces termes permettent d'interpréter les enveloppes adaptatives dans de nombreux ouvrages de recherche, offrant un support aux chercheurs et

aux concepteurs pour mieux maîtriser l'approche (Aelenei, Aelenei and Pacheco, 2016; Romano *et al.*, 2018).

On retrouve dans ce lexique des termes tels que : **adaptive, interactive, réactive, biomimétique, vivante, cinétique, mobile, dynamique, commutable, transformable, reconfigurable, réglable, ajustable, intelligente, smart, avancée, contrôlable, active, multifonctionnelle, etc.** (Figure 4.2).

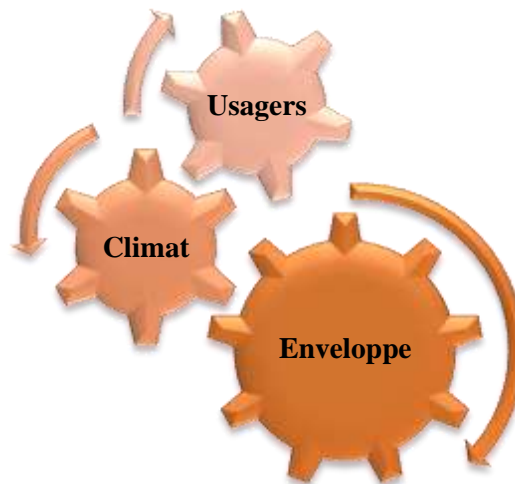


Figure 4.1. Principe de base des enveloppes adaptatives.
Source : Auteur (2022).



Figure 4.2. Nuage des termes interchangeables relatifs à l'enveloppe adaptative.
Source : Auteur (2022).

À cet effet, ces derniers temps, la discipline biomimétique a émergé comme une alternative prometteuse visant à imiter les structures, mécanismes et modèles biologiques de

survie et d'acclimatation observés dans la nature, qui constituent une vaste base de données de solutions (Benyus, 1997; Pawlyn, 2019) (pour plus de détails sur le biomimétisme, voir Chapitre II). Cette approche est exploitée dans le domaine de la construction pour concevoir des enveloppes de bâtiments capables de s'adapter aux conditions environnementales et aux besoins des occupants, tout en offrant des solutions aux problèmes créés par l'homme.

Ces enveloppes biomimétiques se distinguent par l'intégration des avancées technologiques et des applications informatiques (Charkas, 2019), ainsi que par l'utilisation de matériaux innovants, permettant une réaction aux stimuli externes et internes. Elles visent à réguler et optimiser le bilan énergétique, améliorer les performances globales du bâtiment, maintenir un confort optimal pour ses occupants (Badarnah, 2012; Sommese *et al.*, 2024), tout en renforçant l'harmonie entre le bâtiment et son environnement naturel, avec un impact minimal sur l'écosystème.

4.3. Typologie et classification des enveloppes adaptatives architecturales

Toutes les définitions énumérées ci-dessus se réfèrent aux enveloppes adaptatives cinétiques, permettent de répondre aux défis climatiques, énergétiques et aux besoins de confort des bâtiments modernes. Afin de mieux comprendre ces enveloppes ainsi que leurs spécificités et leurs mécanismes de fonctionnement. La section suivante présente une taxonomie de stratégies de conception de ce type d'enveloppes, organisée selon différents critères de classification :

4.3.1. Fonction principale de l'enveloppe

Lors de la phase conceptuelle, les enveloppes adaptatives ont pour fonction principale de répondre aux besoins spécifiques en réagissant aux défis environnementaux, notamment aux stimuli environnementaux en temps réel. Cela est rendu possible grâce à l'intégration de technologies avancées, visant à créer une architecture durable, respectueuse de l'environnement et adaptée aux enjeux climatiques actuels tels que :

4.3.1.1. Enveloppes adaptatives thermiques

Les enveloppes adaptatives thermiques, également appelées enveloppes thermorégulatrices, sont caractérisées par leur capacité à modifier leur comportement thermique pour s'adapter aux variations climatiques. Cela se fait par l'utilisation de matériaux adaptatifs ou intelligents, qui ajustent l'isolation thermique ou l'absorption de chaleur, permettant ainsi de maintenir une température intérieure confortable. Elles contrôlent les

échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, réduisant ainsi les besoins en chauffage et climatisation.

Exemples :

- Les enveloppes adaptatives thermiques utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) absorbent ou libèrent de la chaleur lors du passage de l'état solide à liquide, ou vice versa, afin de stabiliser la température intérieure (Ardabili, 2020).
- Des enveloppes équipées de vitrages thermochromiques changent de couleur ou d'opacité en fonction de la température. Ces vitrages, caractérisés par leur faible émissivité thermique, permettent de réduire l'absorption de chaleur (Wang, Beltrán and Kim, 2021).

4.3.1.2. Enveloppes adaptatives lumineuses

Ces enveloppes sont conçues pour apporter de la lumière naturelle et contrôler les niveaux d'éclairage à l'intérieur des bâtiments. Elles modifient leur transparence ou opacité en fonction de l'intensité lumineuse, permettant ainsi d'ajuster l'absorption, la réflectivité et la transmission de la lumière. Elles réduisent l'éblouissement, améliorent le confort visuel et optimisent l'éclairage intérieur, contribuant à la réduction des coûts liés à l'éclairage, au chauffage, à la ventilation et à la climatisation, tout en éliminant le besoin des stores activés mécaniquement (Harry, 2016).

Exemples :

- Les vitrages intelligents, photochromiques ou électro-chromiques sont caractérisés par des propriétés optiques intégrées permettant de réguler les flux de lumière et de bloquer certaines longueurs d'onde, tout en laissant passer la lumière visible et l'énergie à travers les façades en verre. Ces vitrages peuvent ainsi passer de la transparence à la translucidité et inversement (Harry, 2016; Romano *et al.*, 2018).

4.3.1.3. Enveloppes adaptatives pour rafraîchissement passif via une ventilation

Ces enveloppes consistent à introduire de l'air extérieur approprié dans les pièces intérieures pour optimiser une ventilation naturelle, permettant de réduire la chaleur intérieure, de réguler le flux d'air et d'améliorer la qualité de l'air intérieur, permettant une régulation d'humidité et de chaleur et à réduire la charge de climatisation pour un confort thermique (Rezek, 2015).

Exemple :

- **Façades respirantes**, grâce à l'emploi des matériaux poreux, elles favorisent la circulation de l'air tout en régulant l'humidité pour rafraîchir les espaces internes (Gheznawy *et al.*, 2020).

4.3.1.4. Enveloppes hydro-régulatrices

Ce type d'enveloppes se transforme en fonction de l'humidité ambiante afin de stabiliser le climat intérieur et d'optimiser le confort des occupants. Ces enveloppes sont réalisées particulièrement dans les climats humides où la régulation de l'humidité revêt une importance capitale (Nasr, 2017).

Exemples : ces enveloppes comportent :

- **Les matériaux hygroscopiques** aident à stabiliser l'humidité intérieure grâce à un mécanisme basé sur l'absorption de l'excès d'humidité lorsque l'air est saturé et à la libération lorsque l'air est sec (Nasr, 2017).
- **Les matériaux hydro-réactifs** changent de forme ou de densité en fonction du taux d'humidité, permettant à la façade de s'ouvrir ou de se refermer pour réguler l'humidité.

4.3.1.5. Enveloppes adaptatives réagissant aux vents

Ces enveloppes sont réactives en fonction des vents qui affectent la façade, qui doivent être prises en considération lors de la phase conceptuelle pour exploiter les propriétés des vents afin d'optimiser le confort intérieur des occupants via une ventilation naturelle et d'augmenter passivement la performance énergétique du bâtiment (Aelenei, Aelenei and Pacheco, 2016).

Exemple :

- L'un des premiers exemples marquants ce type d'enveloppe est la façade du parking appelée « Wind Veil » situé à Charlotte en Caroline du Nord (Figure 4.3), conçu par Ned Kahn en 2000, caractérisé par des mouvements de façade fluides et amorphes, basée sur une structure de filet de câble, effectués sans aucun système de contrôle, mais grâce à l'énergie éolienne qui influe sur des charnières articulées à 8 000 petits panneaux en aluminium. Permettant la traduction des mouvements invisibles du vent en un spectacle visuel fascinant grâce à des milliers de pièces métalliques mobiles servant à créer des motifs infinis de lumière et d'ombre à l'intérieur du bâtiment, permettant d'avoir une ventilation de l'intérieur de la zone de stationnement (Fouad, 2012; Matin, Eydgahi and Shyu, 2017).



Figure 4.3. Parking « Wind Veil ».

Source : Matin et al. (2017).

4.3.1.6. Enveloppes adaptatives réagissant aux précipitations

Ces enveloppes servent à collecter ou détourner l'eau de pluie pour une gestion durable des ressources hydriques, à rafraîchir l'air entrant dans le bâtiment et à réduire les dégâts structurels liés à une exposition prolongée à l'humidité.

Exemples : ces enveloppes comportent :

- **Des matériaux hydrophobes** qui repoussent l'eau, permettant de glisser facilement pour la collecter et la rediriger vers des réservoirs ou des systèmes de drainage pour une exploitation ultérieurement.
- **L'hydrogel**, comme un matériau intégré dans une matrice céramique, c'était le composant essentiel du mur hydrocéramique, considéré comme un exemple de mur adaptatif, particulièrement pertinent dans les climats semi-arides où l'évaporation est intense et la pluie peut être irrégulière. Ce matériau est défini par sa capacité d'absorption, de rétention et de libération d'eau, permettant l'absorption de grandes quantités d'eau lors des précipitations, puis permettant son évaporation lorsque les températures augmentent, créant un effet de refroidissement par évaporation optimisant le confort intérieur du bâtiment (Nessim, 2015; Sommese, Badarnah and Ausiello, 2023).

4.3.1.7. Enveloppes adaptatives sonores

Ce type d'enveloppe se caractérise par une forte variabilité temporelle pour atteindre un niveau de confort acoustique adéquat à l'intérieur des locaux, à travers l'amélioration de l'acoustique intérieure, la réaction d'une manière innovante avec l'environnement sonore et la réduction du bruit et de la transmission des nuisances sonores provenant de l'environnement extérieur causées principalement par la circulation (Aelenei, Aelenei and Pacheco, 2016).

Exemple :

- **La salle de concert** Elbphilharmonie à Hambourg (Allemagne) utilise des panneaux et surfaces acoustiques ajustables pour assurer une qualité acoustique du lieu et s'adapter à différents types de concerts (Tremco, 2023).

4.3.1.8. Enveloppes adaptatives énergétiques

Ce type d'enveloppes génèrent de l'énergie comme l'électrique en fonction des conditions météorologiques externes telles que l'énergie solaire. Elles favorisent également l'autonomie énergétique du bâtiment et diminuent et réduisent sa dépendance aux énergies non renouvelables.

Exemple :

- **La tour rotative** (la Dynamic Tower) conçue par David Fisher est un bâtiment cinétique caractérisé par sa capacité de changer de forme grâce à des étages qui tournent individuellement autour d'un noyau central. Cette tour intègre des éoliennes qui sont installées horizontalement entre les étages, qui sont capables de capter les vents, contribuant à alimenter le bâtiment en électricité (Wang, Beltrán and Kim, 2021).

- **Le bâtiment bio-intelligent quotient (BIQ)** Hambourg, en Allemagne (Figure 4.4), est caractérisé par une enveloppe bio-réactive constituée de panneaux en verre remplis de microalgues. Ces algues exploitent l'énergie solaire pour réaliser la photosynthèse, absorbant le CO₂ et générant de la biomasse qui sera convertie en biogaz grâce à un processus de fermentation, puis exploitée pour générer de la chaleur ou de l'électricité. Ce dispositif adaptatif fournit aussi une protection dynamique, optimisant la performance énergétique et le bien-être intérieur (Harry, 2016; Öztoprak, 2018).



Figure 4.4. Le bâtiment Bio-Intelligent Quotient (BIQ).
Source : Malsch (2023).

4.3.1.9. Enveloppes adaptatives multifonctionnelles

Une autre perspective pour illustrer les façades adaptatives est celle des enveloppes multifonctionnelles. Ces dernières offrent une diversité de fonctionnalités d'une manière plus avancée qui vont au-delà de la fonction de la façade traditionnelle. Ce genre d'enveloppe se caractérise d'une part : par sa capacité de répondre de manière répétitive et réversible aux exigences de performance et aux changements des conditions climatiques au fil du temps, et d'autre part : son aptitude de fournir les différents aspects de confort à travers différents mécanismes tels que la régulation thermique, optimisation de la ventilation, éclairage naturel, acoustique, et la protection contre les intempéries via une protection solaire efficace, une isolation et masse thermique contrôlable, échange de chaleur radiante, permission d'accès d'éclairage naturel suffisant, favorisation de la ventilation naturelle, contrôle d'humidité et récupération d'énergie (Aelenei, Aelenei and Vieira, 2016; Romano *et al.*, 2018). Donc, elle est considérée comme le prochain objectif à atteindre dans le domaine de la technologie de conception des façades en utilisant un minimum d'énergie (Harry, 2016; Romano *et al.*, 2018).

4.3.2. Mode de transformation

Dans le but d'atteindre une adaptabilité, ces enveloppes se transforment, changent et modifient leur forme ou leur configuration en changeant l'orientation ou la disposition des éléments via des déplacements ou des mouvements en fonction des conditions climatiques, permettant d'optimiser la lumière, l'air ou la chaleur entrant dans le bâtiment afin d'atteindre un niveau de satisfaction des usagers et d'améliorer de la performance thermique, la ventilation et l'esthétique du bâtiment, permettant de répondre aux besoins esthétiques, fonctionnels et environnementaux.

Citation de quelques types de ces transformations :

4.3.2.1. Enveloppe cinétique

Ce type d'enveloppe est déterminé comme la façon la plus spectaculaire de ces transformations ainsi que comme l'une des manières les plus descriptives et visibles d'illustrer la capacité d'adaptation du bâtiment pour répondre aux conditions changeantes. Donc, il est nécessaire de comprendre cette notion profondément :

- **Dans la littérature**, le mot cinétique est d'origine grecque, kinêtikos (kinesis), relatif ou associé à ce qui se meut, ce qui met en mouvement (Wikipédia, 2023). Ce terme exprime une théorie expliquant un ensemble de phénomènes qui a un adjectif qui a une

signification liée à impliquer ou produire un mouvement (Wang, Beltrán and Kim, 2021; LeRobert, 2023; Tu, 2023).

- **En biologie**, la cinétique indique également la réponse d'un organisme à un type particulier de stimulus (Wang, Beltrán and Kim, 2021).
- **En mécanique**, désigne l'étude des lois du mouvement en tenant compte des forces appliquées et des masses des objets impliqués (Barozzi *et al.*, 2016).
- **En architecture**, notamment la façade, la cinétique est perçue comme l'une des options les plus efficaces. Elle vise à satisfaire les capacités d'adaptation générées par le mouvement qui seraient inaccessibles via des façades statiques. Zuk et Clark ont donné la première définition de l'architecture cinétique en 1970 (Fouad, 2012) comme une forme architecturale capable d'être déplaçable, déformable, extensive ou en mouvement (Romano *et al.*, 2018).

En outre, en 2005, à la conférence Smart Architecture organisée en Géorgie aux États-Unis, le professeur Carmina Sanchezdel Valle a exposé le concept de cinétique comme des changements géométriques réversibles totales ou partielles sans compromettre la cohérence du système (Fouad, 2012).

Ce genre de façade se distingue par l'incorporation d'éléments capables d'être modifiés, déplacés entièrement ou partiellement, de changer de position, de pivoter ou d'ajuster grâce à des pièces pliables, coulissantes, extensibles et transformables. Grâce à ses caractéristiques géométriques, matérielles et à l'utilisation de stratégies technologiques comme les mécanismes mécaniques ou électromécaniques. Il est possible d'effectuer des configurations des éléments de construction de manière flexible. Cela est possible grâce à la capacité d'adaptation, de reconfiguration et de personnalisation par les utilisateurs et les conditions environnantes changeantes au fil du temps. Permettant d'améliorer l'adaptation du bâtiment avec son environnement, l'optimisation du confort, sans oublier la dimension esthétique et l'efficacité énergétique (Fouad, 2012; Sharaidin, 2014; Romano *et al.*, 2018).

Fox et Yeh, en 2000 ont classé en trois catégories les différents systèmes d'enveloppes cinétiques (Rezek, 2015):

- **Structures cinétiques embarquées** : ce sont des dispositifs cinétiques fixés et intégrés qui se trouvent au sein d'un ensemble architectural du bâtiment (Figure 4.5). Leur objectif principal est de contrôler le système architectural en général afin de l'ajuster aux changements environnementaux, notamment les conditions sismiques et éoliennes (Fouad, 2012; El-Dabaa, 2016).

- **Structures cinétiques déployables** : ces structures se distinguent par leur emplacement temporaire, qui se traduit par la facilité et la rapidité d'assemblage et de démontage (Figure 4.6). Elles ne sont généralement pas associées à un contrôle informatique. On retrouve ce genre de structure dans celles employées pour concevoir des expositions et des pavillons (Fouad, 2012; El-Dabaa, 2016).

- **Structures cinétiques dynamiques** : généralement, ces dispositifs sont les plus couramment utilisés qui se trouvent dans les ensembles architecturaux et agissent indépendamment (Figure 4.7), tels que les persiennes, les murs, les cloisons ou les toits (Fouad, 2012; El-Dabaa, 2016).

Ce système englobe trois catégories énumérées ci-dessous (Fouad, 2012):

- **Systèmes mobiles** : ceux qui peuvent être déplacés physiquement dans un espace architectural vers divers endroits.
- **Systèmes transformables** : ceux qui peuvent se transformer pour une configuration spatiale différente et peuvent servir à des fins d'économie d'espace ou utilitaires.
- **Systèmes cinétiques incrémentaux** : ce sont des dispositifs permettant des modifications graduelles ou répétées de leur configuration, généralement par l'ajout ou la suppression d'éléments.

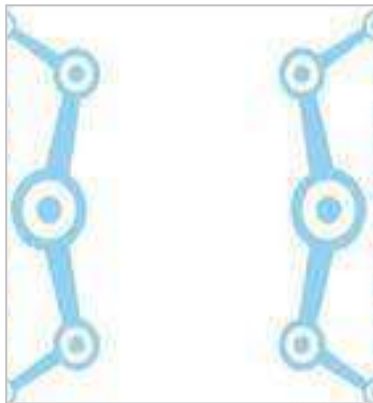


Figure 4.5. Structures cinétiques embarquées.
Source : Rezek (2015).

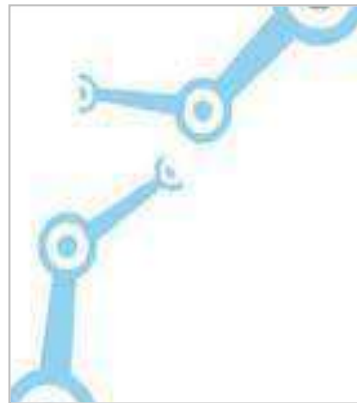


Figure 4.6. Structures cinétiques déployables.
Source : Rezek (2015).

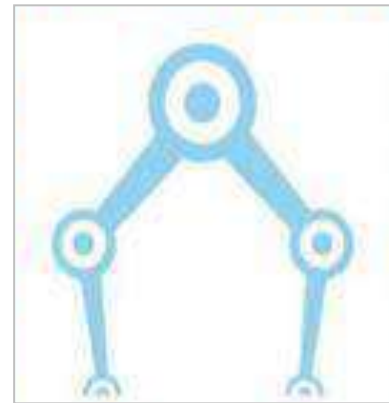


Figure 4.7. Structures cinétiques dynamiques.
Source : Rezek (2015).

La cinétique des façades se traduit par différentes transformations géométriques, qui peuvent être réalisées de diverses manières, comme illustré ci-dessous :

- **Translation** : c'est le mouvement, le déplacement ou le glissement d'un composant de la façade, qu'il soit horizontal ou vertical. Comme les couvertures rétractables en polycarbonate (Figure 4.8) ou d'autres matériaux où la membrane pliée ou regroupée (Elkhayat, 2014).

- **Rotation** : représente le déplacement des composants de la façade autour d'un axe provenant d'une façade rotative qui pivote pour optimiser la transmission de chaleur solaire ou créer de l'ombre. Telle que la façade de l'université Henning Larsen qui se trouve à Kolding, au Danemark (Figure 4.9), conçue par Henning Larsen Architectes en 2014. Cette façade est constituée de panneaux inclinés, inspirés des moucharabiehs traditionnels d'architecture islamique. Ils sont conçus en aluminium et fixés au bâtiment grâce à un système de charnière spécifique. Cela permet la création de mouvements rotatifs de la façade grâce aux capteurs chargés de réguler la quantité de lumière naturelle, les températures et l'air qui pénètrent dans le bâtiment tout au long du jour (El-Dabaa, 2016).



Figure 4.8. Toit rétractable en polycarbonate de l'atrium du centre commercial Sans Visa.
Source : Fekkous (2017).



Figure 4.9. Façade de l'université Henning Larsen.
Source : El-Dabaa (2016).

- **Pliage** : c'est le résultat de deux types de mouvement : celui de la translation et celui de la rotation. Ainsi, on distingue deux méthodes distinctes de pliage : le pliage en ligne courbe et celui par l'origami (Tabadkani *et al.*, 2021).

- **Mise à l'échelle** : désigne la modification de la masse d'un objet par expansion ou contraction (El-Dabaa, 2016), par exemple : les structures gonflables.

- **La torsion ou le roulis** sont une combinaison des trois mouvements de base (translation, rotation et mise à l'échelle) (El-Dabaa, 2016).

- **Déformation** : indique une transformation de la taille et de la forme initiale de la façade, subordonnée aux propriétés des matériaux, notamment leur élasticité (El-Dabaa, 2016).

4.3.2.2. Façade dynamique

Dans le même contexte, on trouve la notion de la façade dynamique. Pour mieux comprendre ce type, il est nécessaire de connaître sa définition.

- **Dans la littérature**, la dynamique est une branche de la mécanique qui étudie le mouvement en relation avec les forces qui le produisent (LeRobert, 2023).

- **En architecture**, une façade dynamique est un concept plus large qui comprend toutes sortes d'enveloppes de bâtiments capables de se déplacer (Barozzi *et al.*, 2016), de changer, de se déformer ou de s'adapter en réponse aux changements continus de l'environnement extérieur et aux exigences de l'occupant à l'intérieur. Grâce à des dispositifs mobiles ou mécanisés, il est possible d'ajuster les caractéristiques de la façade en temps réel, en utilisant des systèmes de contrôle automatique qui reposent sur des technologies intelligentes et des capteurs, ou/et des entrées humaines pour intervenir en fonction des circonstances contextuelles ou des besoins opérationnels comme la robotique, la mécanique et l'électronique (Mosa, 2018).

4.3.2.3. Façade mobile

- **Dans la littérature**, le terme "mobile" fait référence à la capacité d'un objet de se déplacer en mouvement linéaire (translation) ou en rotation.

- **En architecture**, la façade mobile est une façade qui peut s'adapter rapidement aux conditions de son environnement. Grâce à des dispositifs technologiques ou mécaniques, qui opèrent de façon manuelle ou automatique, elle facilite le contrôle du milieu interne et garantit le confort des occupants. Cela aide à diminuer la consommation d'énergie des constructions, qu'elles soient nouvelles ou existantes (Romano *et al.*, 2018).

La différence entre une enveloppe cinétique, dynamique et mobile réside dans

- **Enveloppe cinétique** est un dispositif architectural destiné à se déplacer ou à modifier sa forme par le biais de mécanismes mécaniques ou électromécaniques.

- **Enveloppe dynamique** : c'est une structure dynamique qui dépasse la simple cinétique en incorporant une capacité de réponse automatisée et adaptative, généralement grâce à des technologies intelligentes et des capteurs.

- **Enveloppe mobile** : c'est une enveloppe mobile qui fait référence à une structure ou un composant de façade capable de changer de position ou de configuration, sans forcément nécessiter un mécanisme complexe ou réactif.

4.3.3. Mode de réponse

Plusieurs études ont examiné la nécessité de l'adaptation des constructions à travers différents modes de réponse. Dans ce contexte, on observe :

4.3.3.1. Enveloppe responsive

- **En littérature**, le mot responsif désigne en latin *responsivus*, de *respondere* (répondre) (La langue Française, 2024).
- **En informatique** : implique de rendre un site internet accessible et adaptable à toutes les machines : tablettes, smartphones, etc (ATinternet, 2024).
- **En architecture**, l'enveloppe responsive est considérée comme la base de la façade adaptative (Figure 4.10), offrant une réaction dynamique en temps réel face aux conditions environnementales externes et aux exigences des occupants du bâtiment. Cette réponse, rendue possible grâce à l'intégration de technologies de pointe, comme des capteurs, des actionneurs et des matériaux intelligents, permet à la structure d'évoluer pour maximiser le confort interne et l'efficacité énergétique (Tabadkani *et al.*, 2021).

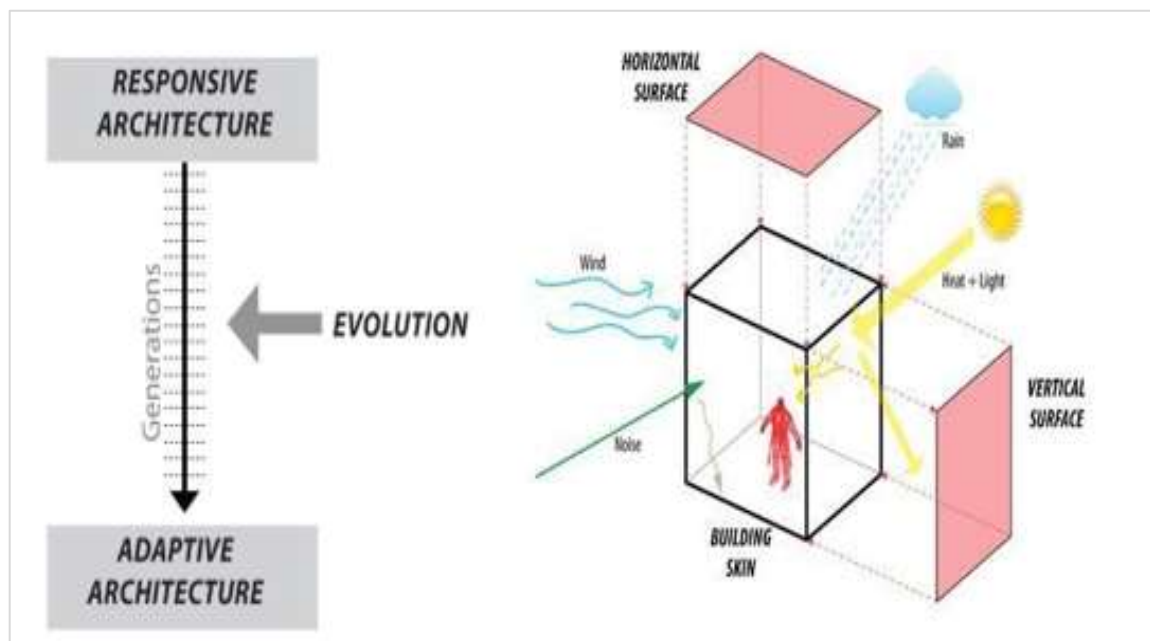


Figure 4.10. Evolution de l'architecture responsive vers l'architecture adaptative sur un certain temps.
Source: Eltanboly and Ibrahim (2022).

Exemple :

- La salle d'exposition Kiefer Technique qui se trouve en Vienne (L'Autriche), réalisée en 2010. La façade de ce bâtiment repose principalement sur des modèles d'ombrage changeant en fonction des différentes conditions climatiques intérieures et extérieures via des mouvements des panneaux de façade (Figure 4.11). Dont cette façade peut être déplacée pour contrôler la quantité de lumière solaire entrant dans l'espace et refléter les mauvais rayons du soleil (Eltanboly and Ibrahim, 2022).



Figure 4.11. La salle d'exposition Kiefer.
Source : Tabadkani et al. (2021).

4.3.3.2. Enveloppe autonome

- **En littérature**, on fait référence à une personne dotée d'une certaine indépendance, qui est capable d'agir sans solliciter les autres : Individu indépendant ou autonome (Larousse, 2023).
- **En architecture**, une enveloppe autonome est une forme de façade intelligente qui opère sans intervention humaine via des décisions autonomes basées sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique. Elle ne requiert pas d'intervention humaine pour se conformer aux conditions environnementales et aux exigences des occupants. Son système de fonctionnement repose sur la collecte d'informations provenant de l'environnement extérieur et interne par le biais de capteurs. Ensuite, des actionneurs déclenchent les ajustements de la position et l'état des éléments de la façade en fonction des données collectées pour optimiser ses performances.

4.3.3.3. Enveloppe interactive

- **En littérature**, l'expression interactive fait référence aux phénomènes qui réagissent entre eux (Larousse, 2023).
- **En architecture**, une façade interactive se caractérise par sa capacité de prendre en compte les retours d'information et de favoriser une communication directe avec les usagers. Ce concept, souvent utilisé dans des œuvres d'art, des espaces ou des environnements numériques, se base sur la communication et l'implication active des usagers. En fonction de leurs préférences ou besoins spécifiques, les occupants ont la possibilité de contrôler ou de modifier manuellement certaines parties de la façade. Cette interaction peut se déclencher par le biais d'interfaces tactiles ou gestuelles, de capteurs, de l'intelligence artificielle (IA) ou d'outils comme les applications mobiles. Les progrès technologiques et les matériaux innovants permettent de modifier la forme, le fonctionnement ou le mouvement des

composants de la façade en se basant sur un cycle prédéfini ou une action spécifique. Ceci permet de prévoir les besoins d'adaptation, d'optimiser les économies d'énergie et de satisfaire les utilisateurs (Mosa, 2018; Romano *et al.*, 2018; Tabadkani *et al.*, 2021).

Exemple :

- Le projet Hypo-surface (Figure 4.12), conçu par Mark Goulthorpe de dECOi Architects, est une surface mécanique pneumatique interactive qui capte les regards, constitué par des plaques métalliques triangulées transformables, composé d'une matrice d'actionneurs et d'un ensemble de capteurs électroniques utilisés pour déclencher une variété de programmes de déploiement mathématiques qui se déforment en temps réel (Tabadkani *et al.*, 2021) en réponse à différents facteurs environnementaux, comme les sons et les mouvements d'individus, la météorologie et les informations électroniques.

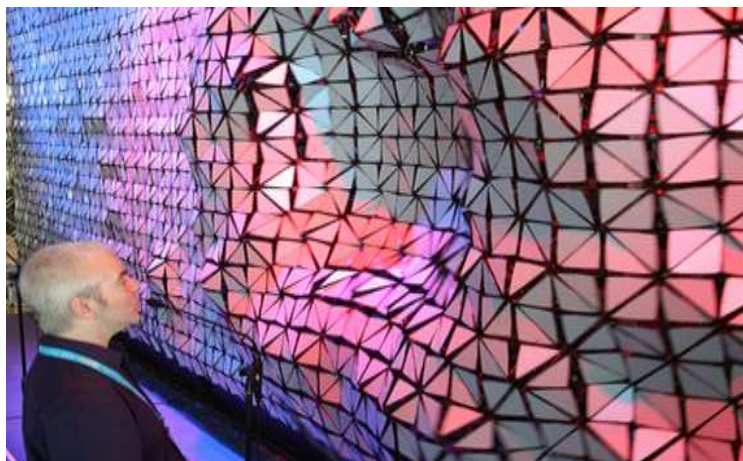


Figure 4.12. HypoSurface.
Source : Goulthorpe (2011).

4.3.3.4. Enveloppe intelligente

- **En littérature**, l'adjectif intelligent indique la capacité de connaître et de comprendre (LeRobert, 2023).

- **En architecture**, l'émergence des enveloppes intelligentes remonte aux années 1960 et 1970. Ces systèmes de construction exploitent des technologies avancées capables d'adaptation et de réactivité grâce à la reconfiguration automatique de ces dispositifs face aux changements environnementaux et aux exigences des résidents du bâtiment en temps réel. En se basant sur des modèles prédictifs, diverses réponses, actives ou passives, elles sont utilisées pour créer un environnement interne plaisant, optimiser le confort des occupants, maintenir un équilibre énergétique et assurer la durabilité (Romano *et al.*, 2018; Tabadkani *et al.*, 2021).

4.3.3.5. Enveloppe numérique ou smart

- **En littérature**, le mot numérique désigne un ensemble de techniques qui exploitent des signaux numériques (LeRobert, 2023).
- **En architecture**, est une sous-catégorie d'enveloppes intelligentes qui utilise des surfaces et des matériaux modifiables, ou repose sur des systèmes connectés et automatisés, intégrant des technologies de l'information et de la communication. Ces propriétés permettent une transformation autonome des attributs physiques et géométriques de l'enveloppe, afin de s'adapter aux variations de son environnement et d'optimiser ses performances (Romano *et al.*, 2018). Cette façade s'appuie sur la collecte et le traitement d'informations, permettant une régulation fine des éléments de la façade.

4.3.4. Niveau de transformation

Concernant les changements effectués par la façade cinétique, on distingue deux classes de mécanisme : l'une entraîne des changements au niveau macro-échelle et l'autre au niveau micro-échelle, comme décrit ci-dessous (Loonen *et al.*, 2013) :

4.3.4.1. Au niveau macro-échelle

Les changements visibles effectués dans ce niveau indiquent la modification de la géométrie de l'enveloppe du bâtiment à grande échelle selon des mouvements observables afin d'atteindre une configuration souhaitée via des pièces mobiles selon différentes techniques telles que le pliage, le glissement, la rotation, l'ouverture, le gonflage (Kolodziej and Rak, 2013; Tabadkani *et al.*, 2021).

4.3.4.2. Au niveau micro-échelle

La transformation à ce niveau, désigne des modifications invisibles effectuées à petite échelle qui reposent directement sur le changement des propriétés matérielles et leur structure moléculaire, notamment les propriétés thermo-physiques, optiques du matériau et ses déformations (Kolodziej and Rak, 2013; Tabadkani *et al.*, 2021).

4.3.5. Technologie utilisée

Les solutions cinétiques peuvent varier pour atteindre un niveau d'adaptabilité, en fonction de leur complexité des enveloppes. Dans cette perspective, Matin *et al.* (2017) ont essayé d'élaborer une classification des différentes technologies utilisées dans la conception des enveloppes adaptatives proposées, en termes de détection (captage), de contrôle et d'actionnement (Figure 4.13).

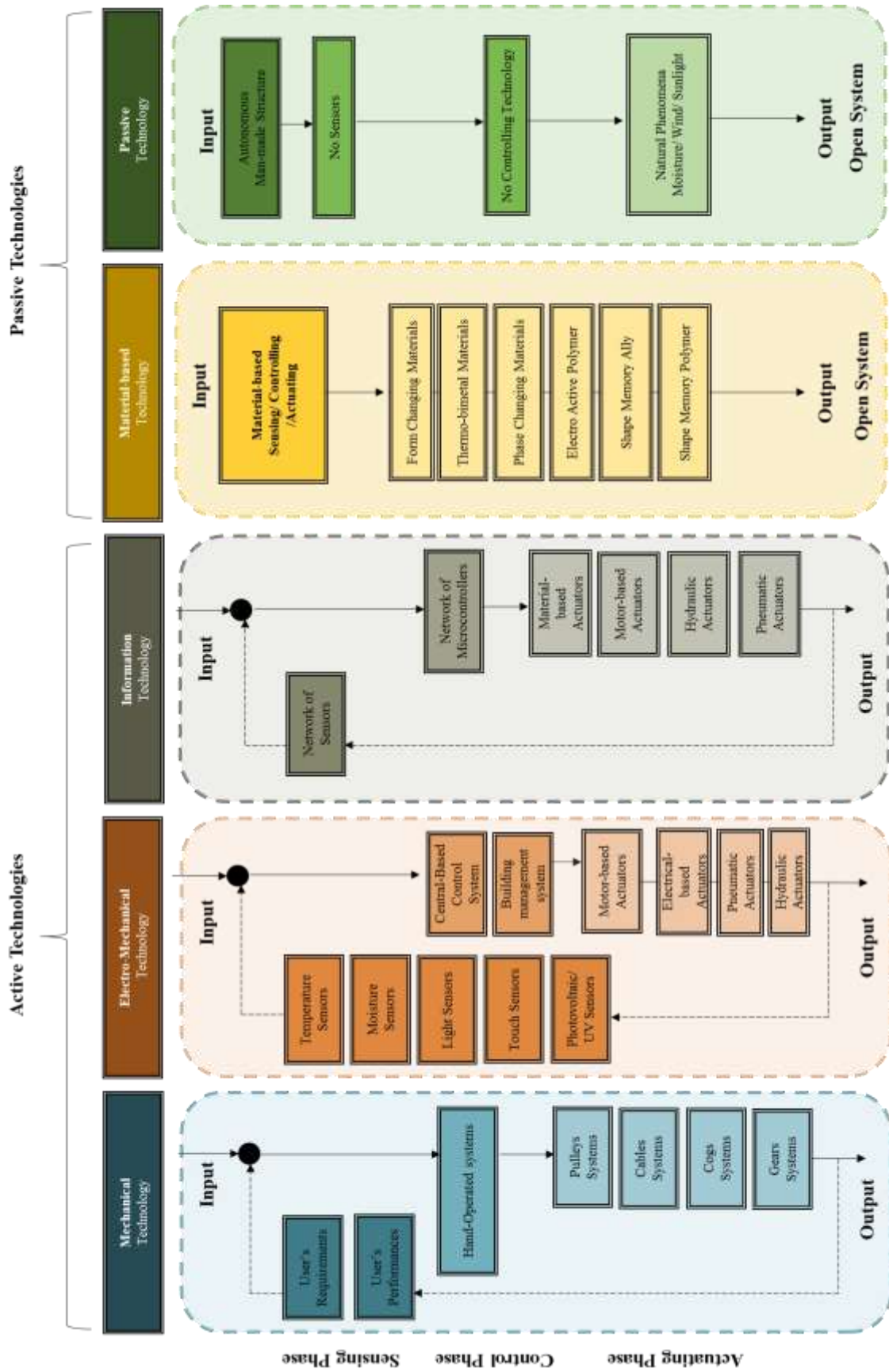


Figure 4.13. Technologie utilisée dans la conception des enveloppes adaptatives.
Source : Matin et al. (2017).

4.3.5.1. Technologie passive

- **Enveloppe adaptative basée sur la technologie passive** : les enveloppes basées sur la technologie passive sont issues de conception architecturales passive et bioclimatique (Tabadkani *et al.*, 2021), caractérisées par leur capacité d'interagir aux stimuli environnementaux tels que : les vents, le taux d'humidité relative, d'une manière passive, autonome et naturelle sans aucune installation mécanique ou électromécanique ni apport énergétique supplémentaire pour assurer son adaptation. Ce système est plus simple, peu coûteux, durable, et facile à utiliser et nécessite moins de maintenance (Matin, Eydgahi and Shyu, 2017).

Exemple :

- La façade du musée destiné aux enfants à Pittsburgh, en Pennsylvanie, conçu par Ned Kahn en 2004 (Figure 4.14) est une œuvre emblématique qui se base sur une technologie passive illustrée par son design artistique. Elle comprend 39 000 clapets fabriqués à partir d'une substance spéciale d'acrylique (plastique translucide), montés sur des supports en acier inoxydable et attachés à un système de structure spatiale en aluminium qui vibrent rapidement au vent. Cette structure dynamique modifie la qualité visuelle des lieux internes et offre une expérience visuelle fascinante tout en mettant en lumière le comportement des composants naturels (Matin, Eydgahi and Shyu, 2017).



Figure 4.14. Musée pour enfants à Pittsburgh.
Source : Ned Kahn Studios (2004).

- **Enveloppe adaptative basée sur la technologie des matériaux** : cette méthode repose sur l'exploitation de matériaux innovants qui diffèrent des matériaux traditionnels, qu'ils soient intelligents ou adaptatifs. Ils réagissent automatiquement, généralement à zéro énergie, comme des machines, puisqu'ils fonctionnent autant que capteurs, contrôleurs et actionneurs sans nécessité d'énergie (Harry, 2016), grâce aux modifications de leurs propriétés physico-chimiques de leurs molécules, ou à leurs propriétés intrinsèques qui se manifestent par des changements de volume, de forme, de couleur, de viscosité, de fluidité,

de légèreté et de flexibilité. Lorsqu'ils sont stimulés par des signaux externes comme les photons de lumière, les variations de température, les substances chimiques, les forces du champ magnétique et les flux électriques, ils offrent une performance exceptionnelle et assurent un rendement énergétique optimal pour les bâtiments qu'ils ont incorporés. Cela permet de substituer les composants mécaniques ou électromécaniques, tout en diminuant les coûts et la maintenance (Fouad, 2012; Dewidar, Mohamed and Ashour, 2013; Matin, Eydgahi and Shyu, 2017; Matin and Eydgahi, 2019).

Ces matériaux sont présentés dans une grande gamme tels que : les thermo-bi métaux, les thermochromiques, les matériaux à mémoire de forme (SMM) comprenant les alliages à mémoire de forme (SMA) et les polymères à mémoire de forme (SMP).

Exemple :

- Bloom (terme anglais signifie : fleurir), conçue par Doris Kim Sung en novembre 2011, est une structure temporaire qui s'inspire du mécanisme d'ouverture des fleurs. Elle se compose de 414 panneaux empilés en forme de paraboloïde hyperbolique, conçus en thermo-bimétal (Hicham, 2016) (Figure 4.15). Elle joue le rôle d'un système d'ombrage et de ventilation, capable de gérer de manière autonome les fluctuations de température et d'ensoleillement, sans avoir besoin de commandes ou d'énergie externe (Malik, 2017).

Avec l'augmentation de la température, les surfaces réactives se courbent vers le haut, créant des ouvertures qui permettent à l'air chaud de s'échapper et à l'air frais de circuler. C'est aussi un mouvement qui favorise l'ombre et laisse passer une lumière diffuse. D'autre part, baisse de la température, la structure se referme naturellement, retrouvant sa forme d'origine. Grâce à cette dynamique adaptative, Bloom propose une solution novatrice pour diminuer la consommation d'énergie associée aux systèmes de refroidissement tout en contribuant à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain grâce à cette dynamique adaptative (Hicham, 2016; Malik, 2017).

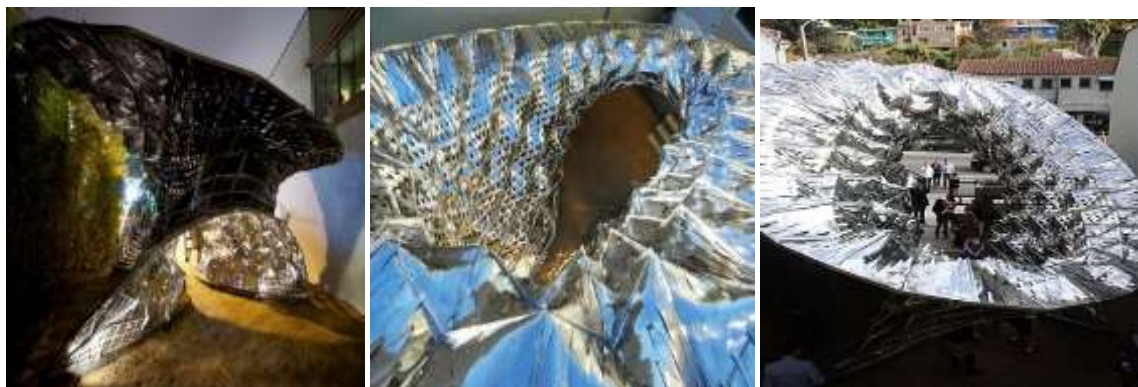


Figure 4.15. Bloom.
Source : Sung (2011).

4.3.5.2. Technologie active

Les enveloppes architecturales actives, fondées sur des systèmes technologiques spécifiques basés sur des capteurs, des systèmes de traitement et des actionneurs, permettent une adaptabilité et une réponse rapide aux changements environnementaux et aux conditions internes du bâtiment en temps réel grâce à une grande flexibilité. Ceci vise à maximiser le confort tout en réduisant la consommation d'énergie du bâtiment tout en améliorant ses caractéristiques esthétiques.

Cette technologie se manifeste à travers les trois types de technologies suivants :

- **Technologie mécanique :** cette technologie est la plus couramment utilisée et apparue dans les façades reposant sur un actionnement par moteur, considérée comme un héritage direct de la révolution industrielle (Öztoprak, 2018). Caractérisé par la mise en œuvre de composants mécaniques complexes, volumineux et interdépendants comme les poulies, les roues, les charnières, les rouleaux, les câbles et les engrenages. Dont les modifications de l'amplitude et de la direction grâce aux forces externes qui répondent aux exigences des usagers via des commandes manuelles, effectuées par le biais de mouvements de translation et/ou de rotation. L'inconvénient de ce type est l'augmentation de la vulnérabilité aux pannes et la nécessité de maintenance périodique (Matin and Eydgahi, 2019).

Exemple :

- Le projet Penumbra, situé à Phoenix, en Arizona, aux États-Unis (Figure 4.16), conçu en 2014 par l'architecte Tyler Courten, se distingue par des lames en bois suspendues. Leur actionnement repose sur une technologie mécanique utilisant un système de contrôle manuel composé de manivelles, d'engrenages et de rouages. Ce dispositif assure une protection solaire efficace, contribuant à l'amélioration du confort thermique (Matin, Eydgahi and Shyu, 2017).



Figure 4.16. Le projet Penumbra.
Source : Matin et al. (2017).

- **Technologie électromécanique** : cette technologie, fréquemment employée dans les façades adaptatives, représente une approche active de la conception. Grâce à la mise en place de technologies avancées et fiables, soutenues par une standardisation des composants, elle facilite un suivi précis. Cette stratégie présente des inconvénients en raison du poids des pièces mécaniques, qui ont une longévité restreinte de la complexité de leur rechange et du danger important de défaillance due à la fatigue des matériaux, avec une forte dépendance à l'énergie électrique, ce qui engendre une forte consommation d'énergie. Par conséquent, des dépenses importantes liées à la maintenance et aux réparations (Matin, Eydgahi and Shyu, 2017).

Exemple :

- Le bâtiment du siège social Q1 (Figure 4.17), caractérisé par un système d'ombrage en plumes de forme trapèze, triangle ou rectangle, est constitué d'environ 400 000 composants fixés sur 3 150 tiges mobiles en acier inoxydable et 1 280 composants motorisés en fonction de la position solaire. Ils peuvent être en position fermée, empêchant les rayons du soleil d'entrer dans les lieux internes tout en préservant la fraîcheur de l'intérieur, ou totalement ouverts pour favoriser une exposition solaire optimale. Ce dispositif vise à diminuer la nécessité d'éclairage électrique en permettant l'entrée de la lumière naturelle dans le bâtiment, minimisant de ce fait la nécessité de climatisation et de régulation thermique, garantissant des économies d'énergie (Matin, Eydgahi and Shyu, 2017).



Figure 4.17. Bâtiment du siège social Q1.
Source : Structurae (2022).

- **Technologie d'information** : cette technologie repose sur un mécanisme de contrôle décentralisé, présenté sous forme de panneaux interconnectés. Elle se base sur des capteurs locaux qui agissent en fonction des conditions environnementales locales au fil du temps, puis fournissent ces données aux microcontrôleurs pour le traitement et le codage des exécutions par les actionneurs. Donc, chaque composant a une connaissance de ses panneaux environnants et partage librement des données avec ses voisins. Ce mécanisme est utilisé

pour superviser les panneaux interconnectés, offrant des réponses distinctes à chaque panneau. Cependant, ce mécanisme fait face aux défaillances informatiques et aux dangers liés à la cybersécurité (Matin, Eydgahi and Shyu, 2017; Matin and Eydgahi, 2019).

Une façade intelligente basée sur l'informatique incorpore des technologies et une gestion automatisée fondées sur des modèles prédictifs, comme ceux utilisés en CVC, afin d'améliorer le confort intérieur tout en réduisant la consommation d'énergie (Romano *et al.*, 2018; Tabadkani *et al.*, 2021).

On présente ce dispositif sous forme de capteurs pour collecter les informations provenant de l'environnement externe et interne, tandis que des actionneurs permettent d'ajuster la position et l'état des composants de la façade en conséquence.

Cette technique englobe différentes stratégies d'actionnement citées ci-dessous :

- **Système d'actionnement hydraulique :** Fréquemment, les actionneurs hydrauliques incluent un piston installé dans un cylindre creux. Ils exploitent la force produite par une pression d'un fluide (habituellement de l'huile hydraulique) pour déplacer un objet externe lorsqu'une poussée inégale est imposée au piston. Cette action mécanique entraîne soit un mouvement linéaire (pour les vérins hydrauliques), soit un mouvement rotatif (pour les moteurs hydrauliques) (Harry, 2016).

Exemple :

- Le musée de Mercedes-Benz, qui fait référence à la structure de l'ADN (Figure 4.18), se distingue par un système d'actionnement hydraulique extrêmement avancé incorporé de façon esthétique et fonctionnelle. Il est perçu comme un composant clé de ce bâtiment emblématique capable de produire des forces importantes avec une précision remarquable, nécessaire pour déplacer et positionner les composants importants du musée. Cela garantit une performance durable sur long terme.



Figure 4.18. Le Musée de Mercedes-Benz.
Source : Mercedes (2024).

- **Système d'actionnement pneumatique** : dans le domaine des façades cinétiques, on a observé l'utilisation de l'actionnement pneumatique à base d'Ethylène Tetra Fluoro Ethylene (ETFE), qui est similaire aux actionneurs hydrauliques. À la différence que le gaz comprimé remplace le liquide pour produire la force (Harry, 2016). Il est défini comme un dispositif souple, doux, extensible et flexible qui se caractérise par sa transparence et sa résistance aux conditions météorologiques. Cela permet aux chambres d'air fermées de manière hermétique de pouvoir être gonflées ou dégonflées selon un principe de pression ou d'aspiration sous vide qui modifie les caractéristiques physiques globales du bâtiment. Grâce à leurs configurations spatiales, à leurs assemblages de composants et à leurs densités de teintes, cela crée des opportunités inédites pour les concepteurs (Harry, 2016; Öztoprak, 2018).

Exemple :

- Le bâtiment Media-TIC (Figure 4.19), construit à Barcelone par Enric Ruiz-Geli de Cloud 9 et terminé en 2011, se distingue par une peau gonflable fabriquée en ETFE, constituée de trois couches de plastique et disposant de deux chambres d'air qui peuvent être gonflées ou dégonflées selon la lumière changeante. La couche externe est transparente, tandis que les couches centrales et internes présentent un motif qui crée de l'ombre lorsqu'elles sont gonflées. Ces membranes se dilatent ou se contractent pour suivre de manière automatique la trajectoire solaire tout au long de la journée.



Figure 4.19 Media-TIC.
Source : Matin et al (2017).

Il est possible d'ajouter une autre catégorie, celle des enveloppes hybrides ou semi-actives qui reposent sur la combinaison entre la technologie passive et active pour bénéficier des avantages des deux catégories afin d'optimiser les performances et l'adaptabilité de la façade.

4.4. Différents systèmes de contrôle dans les enveloppes adaptatives cinétiques

L'objectif des enveloppes adaptatives cinétiques est d'optimiser la productivité et le bien-être des occupants, tout en réduisant les risques d'inconfort et en optimisant l'utilisation de l'énergie (Tabadkani *et al.*, 2020). Ces enveloppes sont basées sur des dispositifs de contrôle qui sont capables de gérer, commander et réguler le comportement d'autres dispositifs ou systèmes (Elkhayat, 2014). Pour une meilleure compréhension des diverses sortes de contrôle, on a mis au point une taxonomie qui classe ces systèmes en fonction de plusieurs critères de classement, notamment :

4.4.1. Mécanisme de fonctionnement

Dans cette catégorie, on trouve deux principaux types de contrôle automatique qui utilisent un algorithme de contrôle, soit en boucle ouverte, soit en boucle fermée (Tabadkani *et al.*, 2020).

4.4.1.1. Système de contrôle en boucle ouverte

Une façade adaptative dotée d'un système de contrôle en boucle ouverte repose uniquement sur les informations environnementales externes recueillies grâce à des capteurs extérieurs installés avec des seuils préétablis. Ce système de contrôle ne prend pas en compte les variations intérieures ni demandes des utilisateurs, et il ne dispose donc pas de mécanisme de retour d'information pour ajuster son comportement (Tabadkani *et al.*, 2020) (Figure 4.20).

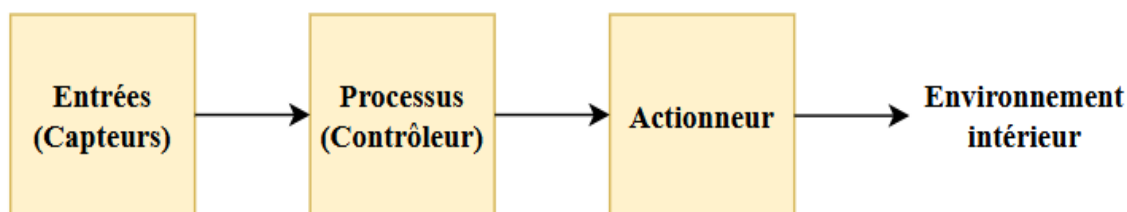


Figure 4.20. Système de contrôle en boucle ouverte.
Source : Tabadkani et al. (2020).

4.4.1.2. Système de contrôle en boucle fermée

À l'opposé du modèle de contrôle en boucle ouverte, le modèle en boucle fermée incorpore une boucle de rétroaction qui contrôle les variations environnementales internes et externes. Il s'adapte aux décisions des usagers pour assurer leur satisfaction tout en favorisant l'économie d'énergie. Ce type de contrôle, fondé sur un comportement adaptatif en temps réel, s'appuie sur des capteurs internes. Ces derniers reçoivent deux sortes de signaux : le premier, provenant d'un capteur de référence, collecte des données sur les conditions limites des variations environnementales ; tandis que le second, issu de la boucle de rétroaction, produit un signal mesuré en fonction de la sortie réelle. Ce mécanisme de

rétroaction permet à l'algorithme d'adapter le système en temps réel selon les interactions avec l'utilisateur (Tabadkani *et al.*, 2020) (Figure 4.21).

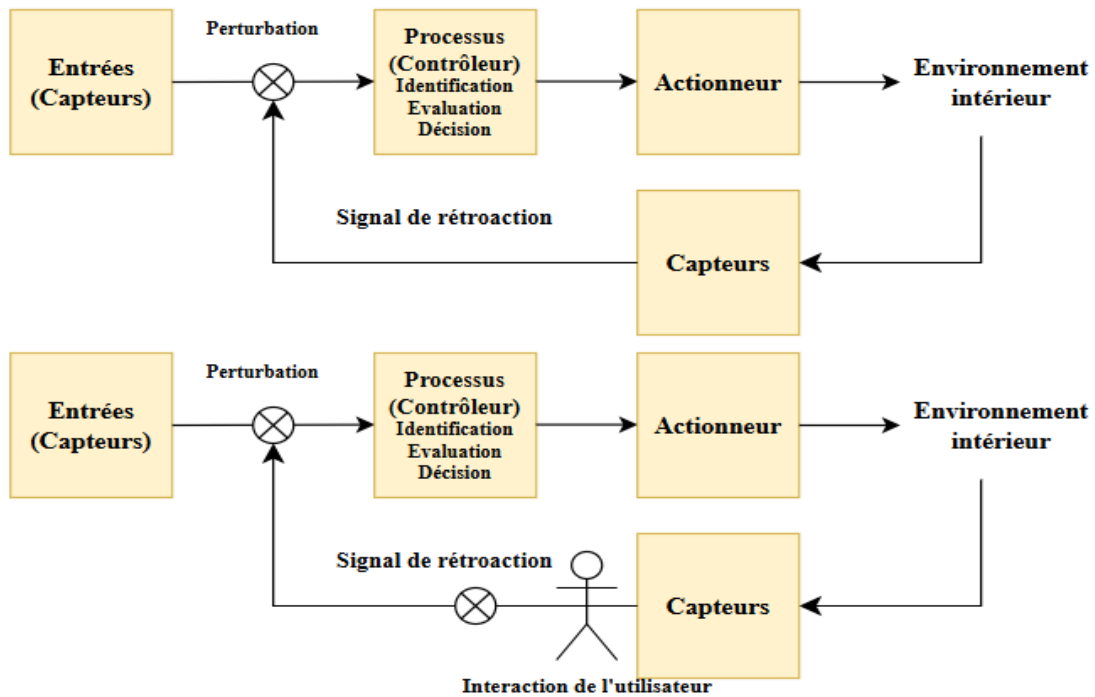


Figure 4.21. Système de contrôle en boucle fermée.
Source : Tabadkani et al. (2020).

4.4.2. Stratégie de fonctionnement

Dans le système de contrôle automatique des enveloppes adaptatives, on constate deux stratégies principales déclenchées par rapport aux conditions environnementales :

4.4.2.1. Contrôle intrinsèque

Cette stratégie de contrôle se définit comme une stratégie de contrôle « passif », « direct » ou « en boucle ouverte ». Ceci se traduit par une diminution du nombre de composants et une consommation d'énergie minimale, car cette stratégie ne permet pas d'interactions directes de l'utilisateur ni d'entrées externes. Ainsi, sa logique ne comporte pas de boucle de rétroaction (Tabadkani *et al.*, 2020).

Son mécanisme repose sur une décision immédiate et directe, à travers son comportement d'auto-ajustement automatique face aux facteurs environnementaux déclencheurs (Sandak *et al.*, 2019), tels que : la température, l'humidité relative, les précipitations, la vitesse et la direction des vents, le rayonnement solaire, la couverture nuageuse ou le niveau de CO₂. Cela est rendu possible grâce aux propriétés inhérentes des matériaux intelligents qui réagissent par changement de volume, de forme, de taille, de phase ou de couleur des composants, ainsi qu'ils se caractérisent par leur faible coût d'exploitation.

Ces actions servent à la régulation de certaines fonctionnalités et contribuent à l'amélioration de la performance de la façade (Tabadkani *et al.*, 2020, 2021; Alkhatib *et al.*, 2021).

4.4.2.2. Contrôle extrinsèque

Les façades adaptatives basées sur la stratégie de contrôle extrinsèque se présentent comme un contrôle dit « actif » ou « en boucle fermée ». Ce genre de contrôle offre aux bâtiments la possibilité de s'ajuster activement grâce à des capteurs externes qui mesurent des variables extérieures et à un système de prise de décision externe, agissant comme signal de rétroaction, tout en permettant à l'utilisateur d'intervenir dans son algorithme (Tabadkani *et al.*, 2020, 2021; Alkhatib *et al.*, 2021).

3.4.2.3. Contrôle intelligent

Le contrôle intelligent provient d'une enveloppe intelligente. Ce dispositif exploite les informations issues des actions et des scénarios antérieurs de façade adaptative, sans nécessité de programmation spécifique, pour un contrôle futur. Il existe trois principaux types de contrôle intelligent (Alkhatib *et al.*, 2021).

- **Contrôle intelligent basé sur des algorithmes génétiques** aussi connus sous le nom d'algorithmes évolutifs, qui utilise des algorithmes d'optimisation et de prise de décision métaheuristiques, inspirés des mécanismes de la sélection naturelle, de la reproduction, de la recombinaison, de la sélection et de la mutation, pour résoudre des problèmes complexes (Alkhatib *et al.*, 2021).

- **Contrôle intelligent basé sur les réseaux de neurones artificiels (ANN)** : dans le domaine de l'architecture, les réseaux neuronaux artificiels (ANN) sont utilisés pour prédire et optimiser les performances des façades adaptatives (Figure 4.22). Ces réseaux, souvent décrits comme une boîte noire, se composent d'une multitude de couches de neurones interconnectées, comprenant une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche finale. Ces neurones traitent et transmettent des informations à l'aide de fonctions d'activation, permettant au réseau d'apprendre et de s'adapter dynamiquement aux entrées externes (Alkhatib *et al.*, 2021).

- **Contrôle intelligent à logique floue (FLC)**, ce type de contrôle, fondé sur des ensembles flous utilisant des valeurs continues comprises entre 0 et 1, comprend trois phases : fuzzification, défuzzification et moteur d'inférence (Alkhatib *et al.*, 2021).

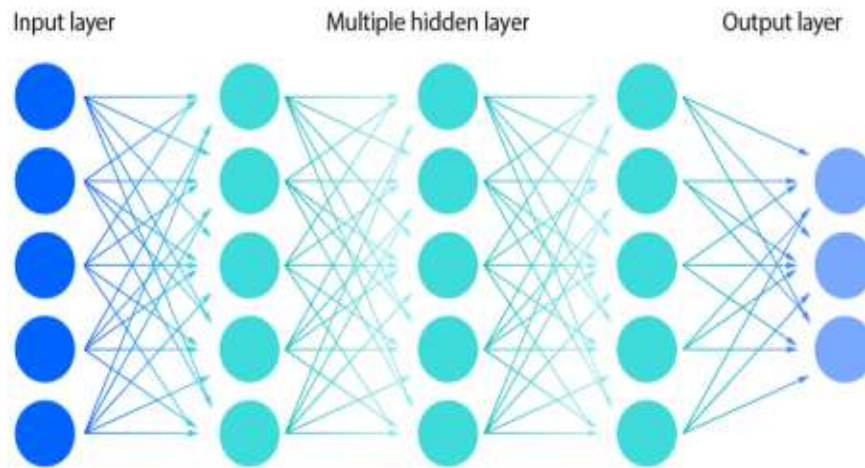


Figure 4.22. Réseaux de neurones artificiels (ANN).
Source : IBM (2024).

4.4.2.4. Contrôle hybride

Le contrôle hybride requiert fréquemment une quantité importante de données, puisqu'il allie un contrôle intelligent (contrôle avancé) et un contrôle classique, ou bien une combinaison de deux techniques de contrôle intelligent. Ce genre de contrôle sert à résoudre les problèmes rencontrés dans les façades adaptatives qui ne peuvent pas être résolus par un seul système de contrôle de façade (Alkhatib *et al.*, 2021).

4.4.3. Degré de centralisation

4.4.3.1. Contrôle centralisé

Il s'agit d'un système de contrôle complexe, lié à des groupes d'actionneurs contrôlés manuellement sans aucune entrée externe (Tabadkani *et al.*, 2021). Ce système offre la capacité d'interaction d'utilisateur, fonctionnant de manière réactive, notamment lorsque les capteurs déterminent les réactions des façades. Ce genre de contrôle s'appuie souvent sur l'intégration de l'intelligence artificielle pour optimiser la consommation d'énergie et automatiser le bâtiment en ce qui concerne l'éclairage, le chauffage et le refroidissement. De plus, il intègre divers systèmes tels que la sécurité contre les incendies et la protection des occupants. Cela se fait via un système d'automatisation des bâtiments (BAS) ou un système de gestion de bâtiment (BMS).

4.4.3.2. Contrôle décentralisé

Ce genre de régulation fait appel à des microcontrôleurs locaux pour déplacer chaque élément de façade séparément. Ces microcontrôleurs sont caractérisés par leurs réponses autonomes aux conditions environnementales locales, permettant ainsi une adaptation précise et localisée en fonction des conditions spécifiques de chaque façade. Chaque panneau effectue un calcul efficace des données environnementales, assurant ainsi une grande

réactivité et autonomie. Ce genre de contrôle se distingue aussi par sa simplicité d'échange entre les panneaux interconnectés, son prix des composants assez bas et une grande autonomie fonctionnelle dans le design des façades. Néanmoins, ce genre de contrôle comporte certains désavantages, tels que le danger des dysfonctionnements informatiques et les failles associées à la cybersécurité (Matin and Eydgahi, 2019; Tabadkani *et al.*, 2021).

4.4.4. Nature du contrôle

4.4.4.1. Contrôle passif

Le contrôle passif s'appuie sur des solutions matérielles ou architecturales qui ne nécessitent aucune intervention active, qu'elle soit de nature humaine ou automatisée (Matin and Eydgahi, 2019). Il utilise les caractéristiques des matériaux ou des dispositifs employés pour favoriser une adaptation naturelle de la façade aux conditions environnementales sans consommer d'énergie de fonctionnement (Fouad, 2012). Tel que l'emploi de brise-soleil fixes pour empêcher la lumière solaire directe.

4.4.4.2. Contrôle actif

Il se caractérise par la création de systèmes intelligents basés sur une méthode sophistiquée qui intègre des systèmes informatiques. Il permet une transformation du comportement structurel en réaction aux changements imprévisibles des conditions externes en temps réel. Ce système repose sur des capteurs pour réaliser des mesures exactes, tandis que les ordinateurs produisent les signaux numériques requis pour déclencher la force externe requise (Fouad, 2012). Comme un micro-ordinateur contrôle le moteur pour ajuster l'angle des persiennes, régulant ainsi la pénétration de la lumière et la chaleur.

4.4.4.3. Contrôle adaptatif

Le contrôle adaptatif peut aller de la sécurité incendie aux solutions de systèmes de sécurité, en passant par l'efficacité énergétique, rendront les bâtiments plus confortables, sûrs, productifs, efficaces et donc moins coûteux à exploiter, tout en minimisant les erreurs. Ces systèmes contribuent à l'instauration d'un dialogue de plus en plus satisfaisant entre l'espace et ses utilisateurs (Fouad, 2012).

4.4.5. Niveau d'intervention

4.4.5.1. Contrôle interne

Ce type de contrôle divise le système global en sous-systèmes plus petits. La prise de décision est alors attribuée à chaque sous-système, qui fonctionne de manière autonome pour gérer ses propres propriétés et interactions (Elkhayat, 2014).

4.4.5.2. Contrôle externe

Le contrôle externe fait référence à la capacité d'un système de fonctionner soit de façon autonome, soit sous l'influence d'une entité externe, comme des composants qui peuvent être déplacés ou activés manuellement (Elkhayat, 2014).

4.4.5.3. Système complexe

Ce système combine les caractéristiques de divers systèmes. Il peut prendre des décisions de manière autonome ou en s'appuyant sur des données ou des entrées externes (Elkhayat, 2014).

4.4.6. Manière d'intervention

4.4.6.1. Contrôle direct

Le contrôle direct désigne une réponse immédiate, activée ou désactivée, entre les usagers et le système d'information. Cette interaction se fait directement grâce à différentes ressources d'énergie, comme les moteurs électriques ou la force humaine. Elle repose sur un échange d'informations immédiat et localisé, permettant au système de fonctionner ou de s'arrêter selon les besoins (Fouad, 2012; Elkhayat, 2014).

4.4.6.2. Contrôle indirect

Ce genre de contrôle désigne que les décisions ne sont pas directement exécutées par l'actionneur, mais elles sont basées sur un système de surveillance en permanence des informations provenant des capteurs. Elles sont ensuite envoyées à un dispositif qui génère un mouvement en fonction des rétroactions des capteurs, affectant directement l'actionneur pour provoquer la réaction souhaitée (Fouad, 2012; Elkhayat, 2014).

Conclusion

Les progrès technologiques dans le domaine de la construction, en particulier en ingénierie structurelle, mécanique et matériaux, ainsi que les technologies d'information et de communication, ont une influence notable sur la conception des enveloppes adaptatives et cinétiques. Ces dernières se distinguent par leur capacité à s'adapter en temps réel aux variations des conditions intérieures et aux changements environnementaux extérieurs, ce qui conduit à une architecture plus durable et résiliente, permettant d'améliorer l'ambiance intérieure, l'efficacité énergétique et d'optimiser une gestion économique des constructions.

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'exposer les données essentielles pour une compréhension plus profonde de ces enveloppes grâce à une classification basée sur la taxonomie. Cette méthode facilite la compréhension des diverses méthodes et technologies

employées, tout en améliorant la compréhension de leur fonctionnement, de leurs réactions et de leurs dispositifs de contrôle.

Cette exploration nous a mis en évidence le potentiel considérable des matériaux intelligents pour la création de ces enveloppes. Ces matériaux, grâce à leurs avantages significatifs, constituent un atout concurrentiel pour concevoir des solutions novatrices et pérennes qui satisferont les exigences des utilisateurs. Ils offrent aussi la possibilité de créer des enveloppes performantes qui réagissent aux variations environnementales. Ces modifications satisfont des besoins fonctionnels, structurels précis, tout en préservant une consommation d'énergie réduite. De plus, ces solutions jouent un rôle bénéfique dans la durabilité écologique en diminuant les effets sur l'environnement.

CHAPITRE V
MURS RESPIRANTS

CHAPITRE V : MURS RESPIRANTS

Introduction

Le bâtiment est souvent perçu comme un abri destiné à protéger ses occupants des risques liés aux changements climatiques. En particulier, la hausse des températures de l'air intérieur. À cet égard, les murs respirants se présentent comme une technique novatrice qui s'inspire du biomimétisme. Ces murs, à l'image des êtres vivants, offrent au bâtiment la possibilité d'interagir avec son environnement en produisant des échanges gazeux adaptés aux variations climatiques.

Ce chapitre se focalise sur la présentation des murs respirants à travers plusieurs facettes, en mettant en évidence leur mécanisme, leur rôle dans le rafraîchissement passif, la régulation thermique, l'efficacité énergétique et leur potentiel pour développer des constructions plus durables et résistantes aux fluctuations environnementales.

5.1. Définition du mur respirant

La notion du mur respirant est basée sur une approche biologique et biomimétique, qui s'inspire du phénomène observé chez les organismes vivants afin de refroidir les espaces internes et d'améliorer le comportement thermique des façades traditionnelles et de créer des bâtiments capables d'interagir avec leur environnement (Gheznawy *et al.*, 2020). Pour comprendre le concept du mur respirant, il est avéré nécessaire de comprendre cette notion, à travers deux aspects : d'une part, biologique, et d'autre part, architectural.

5.1.1. Du point de vue biologique

Chez les organismes vivants, la respiration est un processus complexe involontaire (Dezube, 2023) qui implique des dynamiques physiques, chimiques et biochimiques. Elle est indispensable aux échanges gazeux et à la production d'énergie, qui sont indispensables à leur survie (May, 2005).

La respiration illustre bien l'interaction et l'échange de gaz entre un être vivant et son environnement. Ces échanges sont basés sur une série d'actions, notamment les mouvements qui permettent d'introduire de l'oxygène (O_2) du milieu ambiant à l'intérieur de l'organisme (inhalation) et d'évacuer l'air riche en dioxyde de carbone (CO_2) vers l'extérieur (exhalation), dont l'air se déplace de manière naturelle des zones à haute pression vers les zones à basse pression, ce qui lui permet d'entrer dans l'organisme, favorisant ainsi les activités métaboliques essentielles et le maintien de la température corporelle requise des organismes vivants (Rezek, 2015; RespirFil, 2023).

5.1.2. Du point de vue architectural

Le mur, en tant qu'élément architectural, joue un rôle crucial dans la gestion de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Sur cette base, le concept de murs respirants (en anglais : breathing walls) a été introduit pour la première fois en Allemagne en 1969 par le professeur Anton Schneider (IBEF, 2022) dans le domaine de la « Baubiologie » (Elghawaby, 2013). Ces murs ont ensuite été développés selon une approche biologique reposant sur l'inspiration du mécanisme de respiration de certains organismes naturels, tels que les poumons chez l'homme (Rezek, 2015). Permettant le déplacement de l'air de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment, favorisant un renouvellement de l'air intérieur via une ventilation naturelle grâce à une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, servant à réagir aux changements climatiques et à améliorer le comportement thermique des façades traditionnelles (Elghawaby, 2012), à satisfaire les besoins des occupants tout en diminuant leur dépendance aux systèmes mécaniques, ce qui entraîne des économies d'énergie et d'électricité (Gheznawy *et al.*, 2020).

Dans cette optique, les murs respirants situés dans les zones humides sont conçus pour offrir des performances thermiques optimales grâce à une régulation hygrométrique naturelle, tout en préservant leurs qualités isolantes (Elghawaby, 2013). En revanche, dans les climats chauds, ces murs sont envisagés comme un moyen de contribuer au refroidissement des espaces intérieurs. Ils permettent de réduire la température de l'air ainsi que celle des surfaces environnantes, tout en contrôlant le flux d'air à l'intérieur des espaces (Elghawaby, 2013; Gheznawy *et al.*, 2020).

5.2. Principes de fonctionnement des murs respirants

La conception et la réalisation de ces murs s'appuient sur la création d'un mécanisme de respiration tel que l'organisme vivant. Ces murs sont intégrés de manière essentielle dans la structure du bâtiment. Cela établit une relation plus importante entre le bâtiment et son environnement extérieur, influençant directement sur la santé des occupants et les performances globales du bâtiment. Cette approche joue un rôle clé dans la régulation d'humidité intérieure et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Cette notion se manifeste à travers deux concepts fondamentaux : la transmission de l'air et le transfert de l'eau (May, 2005; Gheznawy *et al.*, 2020).

5.2.1. Transmission de l'air

D'un point de vue anthropocentrique, l'air est fréquemment lié à la respiration, comme un processus fondamental pour la survie et symbole de la vitalité (Stavridou, 2015). Par conséquent, les murs respirants utilisent généralement la méthode passive de la ventilation naturelle comme outil et élément principal de la conception architecturale basée sur des stratégies structurelles et esthétiques (Angela, 2018), permettant l'apport d'air frais du périmètre extérieur du bâtiment vers les espaces intérieurs pour refroidir le bâtiment (Fauzi, Al-Athas and Rini, 2024).

L'objectif de ce mécanisme est de garantir une quantité suffisante d'oxygène dans l'air, de diminuer les niveaux de polluants et de contaminants et d'éliminer l'excès de chaleur. En utilisant des filtres HEPA conventionnels, il aide également à améliorer la qualité de l'air intérieur en filtrant plus de 99,9 % des particules présentes dans l'air. De cette manière, il favorise une meilleure qualité de l'air intérieur et réduit de manière sécuritaire le niveau global de pollution atmosphérique, en particulier dans les zones urbaines (Imbabi and Peacock, 2004; Gheznawy *et al.*, 2020).

L'utilisation d'une ventilation naturelle permet d'atteindre ces objectifs, ce qui rend le bâtiment habitable et confortable, favorisant ainsi une bonne santé et un environnement de vie plaisant en améliorant le bien-être des utilisateurs. Cela entraîne également un bâtiment économique en énergie, grâce à une réduction de la conductivité thermique des murs, tout en maintenant sa durabilité. Finalement, ce système joue également un rôle dans la préservation de l'environnement extérieur dans lequel le bâtiment est situé (Stavridou, 2015; Gheznawy *et al.*, 2020; Fauzi, Al-Athas and Rini, 2024).

5.2.2. Transfert de l'eau

Ce mécanisme repose sur la présence de pores à l'intérieur des murs (Rezek, 2015; Gheznawy *et al.*, 2020), qui permettent l'échange de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment à travers ses différentes couches. Ce procédé contribue à réguler l'humidité à l'intérieur, prévenant ainsi la formation de moisissures et améliorant la qualité de l'air intérieur. Cela favorise la préservation d'un environnement intérieur agréable, ce qui a un impact positif sur la santé des usagers et les performances thermiques du bâtiment (Gheznawy *et al.*, 2020).

À cet effet, il existe trois aspects essentiels et complémentaires qui déterminent le fonctionnement des murs respirants en ce qui concerne le transfert de l'eau. Ces éléments

cités ci-dessous offrent une solution efficace pour réguler l'humidité, assurer la durabilité des matériaux et garantir le confort des occupants (Gheznawy *et al.*, 2020) :

5.2.2.1. Perméabilité et diffusion de la vapeur

Elle fait référence à la capacité du mur à réguler passivement l'humidité intérieure. Grâce à cela, la vapeur d'eau peut passer entre les différentes couches du mur sans s'accumuler, ce qui évite la condensation. Cela favorise aussi l'amélioration de la qualité de l'air intérieur en prévenant l'accumulation d'humidité.

5.2.2.2. Hygroscopique

Elle correspond à la capacité des matériaux hygroscopiques d'absorber ou de libérer de l'humidité sous forme de vapeur en réponse aux changements des conditions de l'environnement. Cela favorise le maintien d'un équilibre hygrométrique à l'intérieur du bâtiment, ce qui améliore le confort des occupants.

5.2.2.3. Capillarité

Elle fait référence à la faculté des matériaux de transporter l'eau liquide à travers leurs pores, en transférant l'humidité des zones plus humides vers des zones plus sèches. Ce dispositif permet d'éviter la formation de moisissures et la détérioration des matériaux.

5.3. Composition des murs respirants

Le concept des murs respirants est perçu comme une technologie prometteuse pour diminuer les besoins énergétiques globaux des bâtiments (Alongi, Angelotti and Mazzarella, 2021). En général, ces murs sont composés de multicouche; dans une certaine mesure, chaque couche est perméable à l'air et est conçue pour être liée à un système de ventilation, afin de satisfaire les besoins de renouvellement d'air dans l'environnement intérieur (Larsen, Foged and Jensen, 2014). En outre, elles sont aussi perméables à la vapeur d'eau, tout en garantissant une isolation thermique suffisante, une protection contre les conditions météorologiques et une bonne qualité de l'air intérieur (Gheznawy *et al.*, 2020).

La Figure 5.1 illustre la composition du mur respirant créé par Craig et Grinham (2017) comprenant une brève explication de chaque couche :

5.3.1. Couche externe

Cette couche est sous forme d'un écran pare-pluie extérieur perforé, permettant de protéger la couche d'isolation de l'exposition aux interactions physiques et aux conditions externes agressives telles que les intempéries et les vents (Gheznawy *et al.*, 2020).

5.3.2. Couche intermédiaire (mur respirant)

Cette couche joue un rôle très important dans la performance d'un mur respirant. Elle est composée de matériaux poreux, tels que le bois, le béton, la laine de roche ou le verre, caractérisés par la présence de canaux d'air de taille millimétrique. Cette couche peut également intégrer un support d'isolation dynamique, optimisant ainsi son efficacité. Grâce à cette configuration, l'air peut circuler à travers toute la surface de manière contrôlée, tout en créant une barrière efficace contre les pertes ou les gains de chaleur (Gheznawy *et al.*, 2020).

Elle favorise aussi le déplacement de l'eau sous forme de vapeur, mais l'empêche de passer sous forme liquide, ce qui permet de réguler l'humidité relative (hygrométrie) de manière efficace. Ceci permet de prévenir l'apparition de moisissures, d'améliorer la qualité de l'air intérieur et de renforcer l'efficacité énergétique du bâtiment (Larsen, Foged and Jensen, 2014; Gheznawy *et al.*, 2020).

Cette configuration présente des avantages importants par rapport aux murs traditionnels dans des conditions de température et de pression similaires. Elle combine les fonctions de l'enveloppe du bâtiment et celles d'un système de ventilation. En effet, l'air frais est aspiré dans un espace chaud grâce à des variations de pression (Gheznawy *et al.*, 2020).

À cet égard, Hassan Fathy a mis en évidence ces murs conçus pour permettre la circulation de l'air à travers des matériaux organiques naturels comme les feuilles, les peaux d'animaux, le bois, les roseaux, et l'argile. Ces matériaux peuvent absorber l'humidité et rafraîchir l'intérieur par évaporation, ce qui entraîne une diminution importante de la température de l'air (Elghawaby, 2013).

5.3.3. Couche interne

Cette couche désigne la surface intérieure du mur, souvent constituée d'un panneau fluide. Elle est constituée par un matériau intérieur visible, poreux et perméable à l'air, qui fonctionnera également comme un isolant dynamique, tel que le béton. Ce matériau est conçu pour récupérer et stocker la chaleur en raison de sa haute conductivité et de sa masse thermique élevée. Permettant ainsi d'améliorer la performance thermique de l'enveloppe (Larsen, Foged and Jensen, 2014). Dans cette couche, il est recommandé d'éviter l'emploi de peintures époxy ou caoutchouc, car elles peuvent bloquer les pores du mur, entravant ainsi les trois moyens de transmission de l'humidité (Gheznawy *et al.*, 2020).

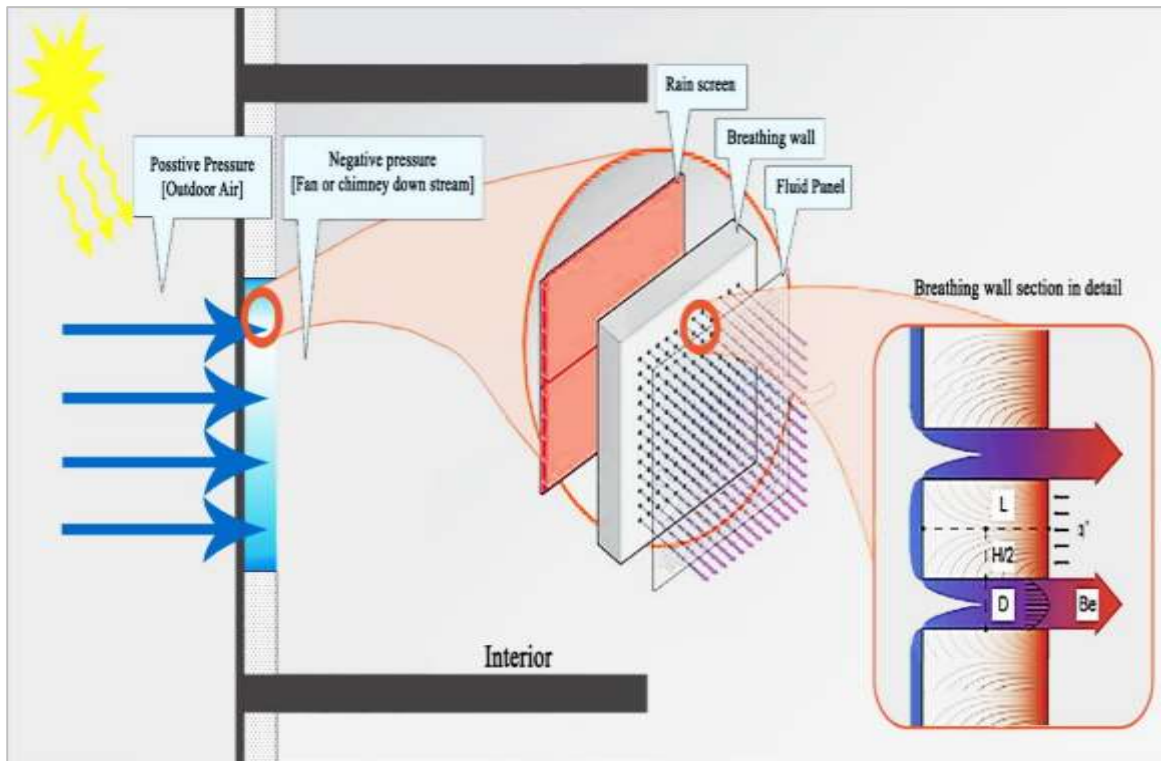


Figure 5.1. Différentes couches composant le mur respirant.
Source : Craig and Grinham (2017).

5.4. Avantages des murs respirants

Les murs qui respirent présentent de nombreux avantages significatifs. Voici quelques avantages essentiels détaillés ci-dessous :

5.4.1. Isolation thermique

Les murs respirants aident à maintenir la température intérieure requise en s'appuyant sur l'isolation thermique dynamique (Figure 5.2), qui repose sur un processus de transfert thermique provoqué par le passage de l'air à travers des canaux dans une direction opposée à la température extérieure. Cela permet de procurer à l'intérieur un air frais et filtré, sans recourir aux systèmes CVC traditionnels (Larsen, Foged and Jensen, 2014; Gheznawy *et al.*, 2020).

Cette performance dépend de l'augmentation de la vitesse de flux d'air provoquant une diminution de la valeur de U (coefficient de transmission thermique). En conséquence, les charges de chauffage et de refroidissement sont réduites, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale du bâtiment (Imbabi and Peacock, 2004; Larsen, Foged and Jensen, 2014; Felkner, Zoltan Nagy and Younglee Lee, 2021).

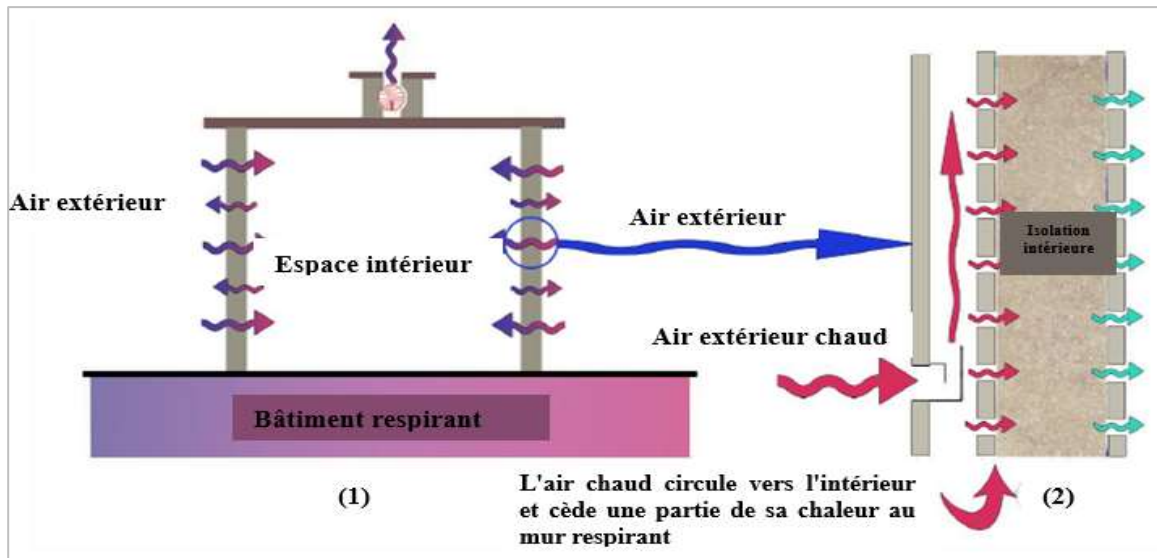


Figure 5.2. Débit de chaleur à travers : (1) : bâtiment respirant, (2) : mur respirant.
Source : Imbabi and Peacock (2004).

5.4.2. Ventilation naturelle

Dans les murs respirants, la porosité des matériaux favorise la circulation naturelle de l'air. Cela peut favoriser une ventilation naturelle. De cette manière, l'amélioration de la température intérieure et participent à la création d'une ambiance thermique confortable et dynamique dans les espaces intérieurs on réduit la dépendance aux systèmes mécaniques de ventilation et de climatisation (Elghawaby, 2013; Rezek, 2015; Gheznawy *et al.*, 2020).

5.4.3. Gestion et régulation de l'humidité

Les murs respirants permettent de gérer efficacement l'humidité en permettant à la vapeur d'eau de circuler à travers le mur, tout en empêchant l'infiltration de liquides. Ceci contribue à maintenir des niveaux d'humidité internes modérés, ce qui réduit le risque de condensation et de moisissures, servant à améliorer la qualité de l'air intérieur (Elghawaby, 2013; Gheznawy *et al.*, 2020).

5.4.4. Qualité de l'air

La structure des murs respirants favorise la circulation de l'air, et l'ajout de filtres empêche l'entrée de polluants dans le bâtiment, ce qui contribue à une amélioration de la qualité de l'air intérieur, permettant d'avoir une respiration saine pour les usagers (Imbabi and Peacock, 2004; Stavridou, 2015; Gheznawy *et al.*, 2020).

5.4.5. Amélioration de la performance thermique

Les murs respirants, grâce à leur structure poreuse, régulent la température intérieure en permettant un échange thermique modéré entre l'intérieur et l'extérieur. Ils agissent comme un tampon thermique, réduisant les fluctuations de température, ce qui peut

améliorer le confort thermique intérieur sans nécessiter de matériaux hautement isolants classiques (Elghawaby, 2012; Gheznawy *et al.*, 2020).

5.4.6. Confort thermique

L'objectif principal des murs respirants est de garantir le confort thermique. Ils réussissent grâce à leur capacité de maintenir une température constante, de réguler l'humidité, permettant d'améliorer la qualité de l'air intérieur, créant ainsi un environnement plus sain pour les occupants (Gheznawy *et al.*, 2020; Fauzi, Al-Athas and Rini, 2024).

5.4.7. Réduction des coûts énergétiques

Grâce à leur isolation dynamique et leur capacité d'améliorer la performance thermique et le confort thermique, les murs respirants permettent de diminuer les dépenses liées au chauffage et à la climatisation, ce qui entraîne une réduction des dépenses énergétiques à long terme (Imbabi and Peacock, 2004).

5.4.8. Durabilité

Les murs respirants peuvent être durables, grâce à l'emploi des matériaux naturels, durables et écologiques, contribuant à la pérennité de la structure. Ce qui peut améliorer la durabilité du bâtiment tout en réduisant son empreinte écologique (Gheznawy *et al.*, 2020).

5.5. Différents exemples de murs respirants

Au cours des dernières décennies, les progrès technologiques manifestés par l'apparition de techniques nouvelles, de matériaux innovants aux caractéristiques distinctives ont donné naissance à une nouvelle génération comprenant différentes formes de ces murs (enveloppes) pour créer des bâtiments qui peuvent respirer comme les êtres vivants et permettre de s'adapter aux changements environnementaux.

La section suivante propose une revue de la littérature qui expose différents exemples de murs respirants. Elle met en évidence les transformations des connaissances issues de la nature ayant été transformées en solutions architecturales. Ces solutions visent à améliorer le confort thermique intérieur en réduisant la température de l'air tout en minimisant la consommation énergétique. Cette analyse est structurée selon les étapes suivantes :

5.5.1. Technologie avancée (matériaux intelligents)

Cette technologie avancée est manifestée par l'exploitation des matériaux intelligents tels que :

5.5.1.1. Thermo-bimétal

Doris Kim Sung est une architecte et biologiste, professeure d'architecture à l'université de Californie du Sud (USC) et directrice du studio architecture DO|SU. Elle

s'intéresse à la convergence entre l'architecture et la biologie, en s'inspirant de la science du biomimétisme. Son approche explore comment l'architecture peut imiter les mécanismes de la nature en général et du corps humain en particulier. Son objectif principal est de concevoir des prototypes qui s'auto-ventilent, s'auto-ombragent, s'auto-structurent, en réponse aux changements de température, afin de créer des solutions architecturales durables et adaptables sans consommation d'énergie, en se basant sur un matériau intelligent comme le thermo-bimétal (Sung, 2021).

Le thermo-bimétal est composé de deux métaux manifestés sous forme de bandes qui sont fabriqués à partir de métaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents se déforme simplement lorsqu'elle est chauffée ou refroidie. Lorsque la surface devient chaude, les minces panneaux s'enroulent pour permettre à plus d'air de passer vers l'espace situé en dessous et lorsqu'il refroidit, ils se referment (Sung, 2011) (Figure 5.3).

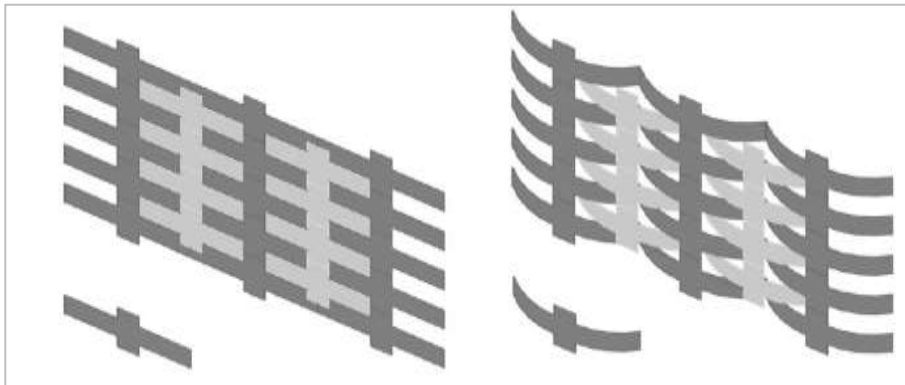


Figure 5.3. Mécanisme de fonctionnement des bandes thermobiméalliques.
Source : Sung (2011).

- En mars 2010, le Studio d'Architecture DO|SU dirigé par Sung se consacre à la création d'une œuvre nommée « Armoured Corset » (Figure 5.4) en tant qu'une peau auto-ventilée, tout comme les pores de peau humaine en utilisant le thermo-bimétal. Son mécanisme est basé sur la courbure de chaque pièce métallique (croix pliable), provoquant l'ouverture de la peau lorsque l'augmentation des températures extérieures ou intérieures, permet au bâtiment de se ventiler automatiquement ainsi à l'air chaud de s'échapper vers l'extérieur.

- En août 2012, Doris Kim Sung a présenté une œuvre intitulée Trachéole (en anglais Tracheolis), réalisée sous forme de bloc en thermo-bimétal, inspiré du système respiratoire des sauterelles qui se base sur un réseau trachéal complexe, comprenant de petits trous placés à des points stratégiques, déterminés comme des vannes de contrôle, s'appuyant sur le principe de Bernoulli (en dynamique des fluides). Ces vannes s'ouvrent à l'augmentation de

la température (Figure 5.5) et lorsque la température baisse, ces vannes se referment, dont l'air est emprisonné et sert à améliorer l'isolation thermique (Sung, 2012) (Figure 5.6). Par ailleurs, ce groupe a également produit d'autres travaux tels que l'Oculus en 2016 (Figure 5.7).

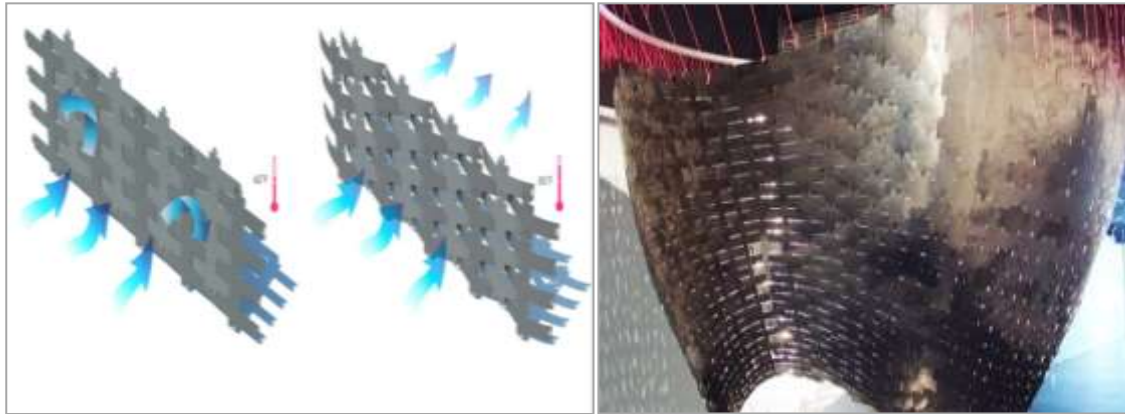


Figure 5.4. Armoured Corset.
Source : Sung (2010).

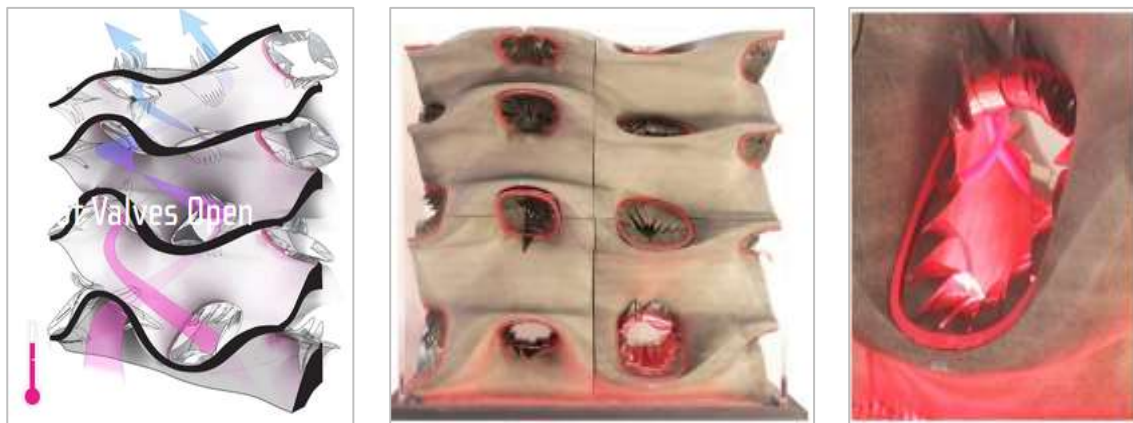


Figure 5.5. Trachéole à l'état des ouvertures ouvertes.
Source : Sung (2012).



Figure 5.6. Trachéole à l'état des ouvertures fermées.
Source : Sung (2012).



Figure 5.7. Oculus.
Source : Sung (2016).

5.5.1.2. Alliages à mémoire de forme

En 2007, dans le cadre de la création d'enveloppes respirantes, le groupe LIFT Architects, fondé par Andrew Payne, a développé une œuvre intitulée THE AIR FLOW(ER) (Figure 5.8). L'objectif de cette installation est de favoriser la ventilation naturelle, de réguler le flux d'air et de maintenir des températures intérieures agréables dans les bâtiments, sans utiliser l'énergie électrique.

Cette œuvre s'inspire du phénomène de thermonastie observé chez les fleurs de crocus jaune (Figure 5.9), cette œuvre reproduit le comportement de leurs pétales, constituées de deux couches de cellules : une cellule interne et une cellule externe. En réponse aux variations de température, ce mécanisme naturel produit une réaction cinétique qui se reflète dans le design de la structure. Les pétales se replient vers l'intérieur lorsque les températures sont basses, car la couche externe des cellules se dilate plus rapidement que la couche interne, ce qui entraîne la fermeture de la fleur. En revanche, plus les températures augmentent, plus les pétales s'ouvrent, plus la fleur s'ouvre.

Ce principe naturel a été exploité par le groupe LIFT Architects en utilisant un matériau intelligent appelé alliage à mémoire de forme (SMA), sous forme de fils conçus sur mesure. Grâce à leur super-élasticité et à leur capacité unique à réagir aux variations de température, ces fils jouent le rôle de capteurs et d'actionneurs autonomes. Ils ont une microstructure qui varie de la martensite (à basse température) à l'austénite (à haute température), ce qui leur permet de s'adapter aux changements climatiques.



Figure 5.8. Air Flow(er).
Source : Payne (2007).



Figure 5.9. Fleur de crocus jaune.
Source : Payne (2007).

Le prototype reflète ce concept est une boîte carrée en bois, avec un trou carré sur sa face supérieure comprenant quatre volets rigides réglables qui peuvent s'ouvrir et se fermer de manière passive. Un fil en alliage à mémoire de forme (SMA) relie chaque paire de panneaux opposés, qui assure l'ouverture et la fermeture du système (Al-Masrani *et al.*, 2018).

Quand les fils SMA chauffent au-delà d'un seuil de température spécifique (environ 26,66 °C), ils se rétrécissent, ce qui entraîne l'ouverture des panneaux et la circulation de l'air à l'intérieur de la boîte. En revanche, si la température baisse en dessous du seuil inférieur (environ 15,55 °C), les panneaux se referment afin de maintenir une température intérieure confortable. Les fils SMA ont la capacité de se contracter jusqu'à 8 % grâce à leur super-élasticité, ce qui garantit un fonctionnement fiable et répétitif du système (Figure 5.10).

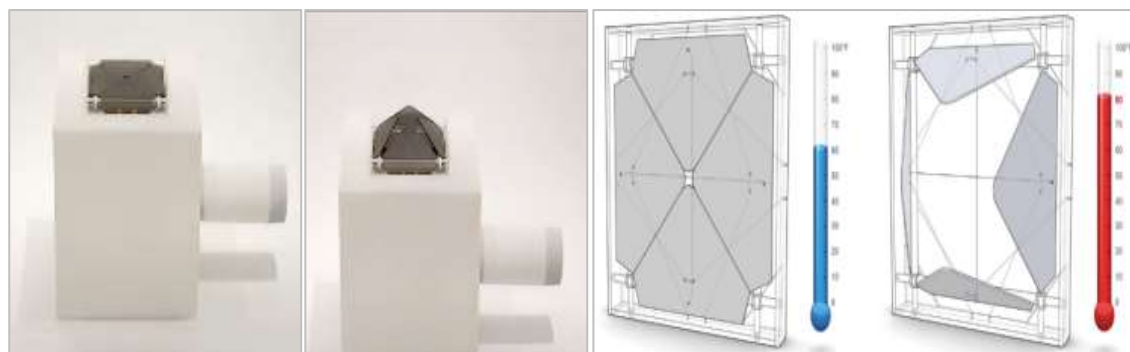


Figure 5.10. Mécanisme du fonctionnement d'air Flow (er).
Source : Payne (2007).

Cette création a été développée sous forme d'autres trois prototypes physiques (Figure 5.11) testés pour différentes applications dans le domaine de la construction. D'après les résultats, il a été prouvé que ces ouvertures permettent une ventilation naturelle dans les bâtiments sans avoir besoin d'énergie active. Cela entraîne non seulement une diminution

des dépenses liées à l'entretien et à l'exploitation, mais également une réduction considérable des besoins énergétiques liés aux systèmes de ventilation mécanique.

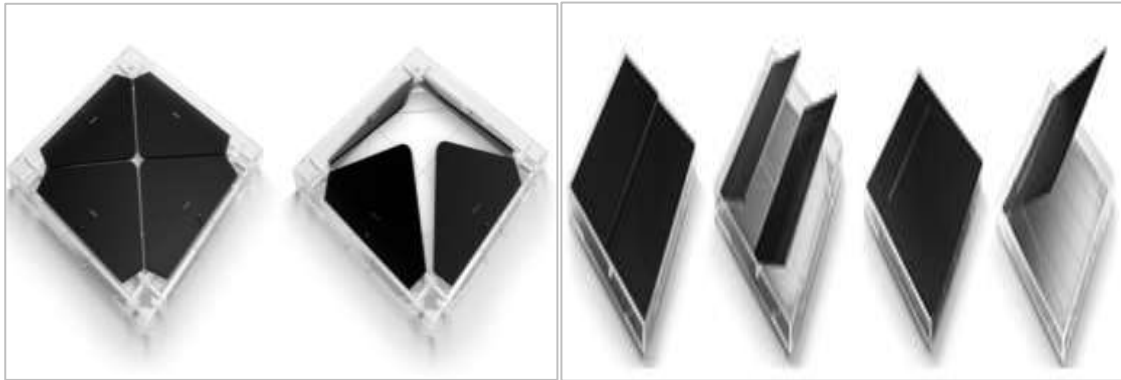


Figure 5.11. Prototypes d'Air Flow(er).
Source : Payne (2007).

Dans le but de concevoir une enveloppe de bâtiment capable de "respirer" en s'inspirant des principes d'adaptation biologique respiratoire, Scott Crawford a développé en 2010 une peau adaptative pour un bâtiment. Ce concept se présente comme une solution novatrice et alternative aux ventilateurs traditionnels pour la distribution de l'air et la ventilation naturelle. En s'inspirant du déplacement de l'air vers les poumons, permettant un changement thoracique par l'expansion et la contraction du diaphragme (Figure 5.12).

Ce dispositif reproduit le principe de son ouverture et de sa fermeture par une forme flexible. L'actionneur en alliage à mémoire de forme (SMA) est utilisé pour réguler l'ouverture et la fermeture, comme celui du diaphragme. En outre, il y a l'intégration de deux autres types de matériaux qui ont la particularité de fonctionner comme des charnières vivantes, ce qui apporte une souplesse et une adaptabilité au système. Les vérins pneumatiques sont intégrés dans cette conception et sont fixés à un moyeu externe de la structure du cadre spatial et au centre du diaphragme.

Selon les calculs préliminaires, l'utilisation de ce matériau intelligent permet de minimiser l'énergie nécessaire pour l'actionnement. En outre, ce système montre une efficacité énergétique de 2 à 4 fois supérieure à celle des grands ventilateurs industriels pour déplacer un volume d'air similaire.

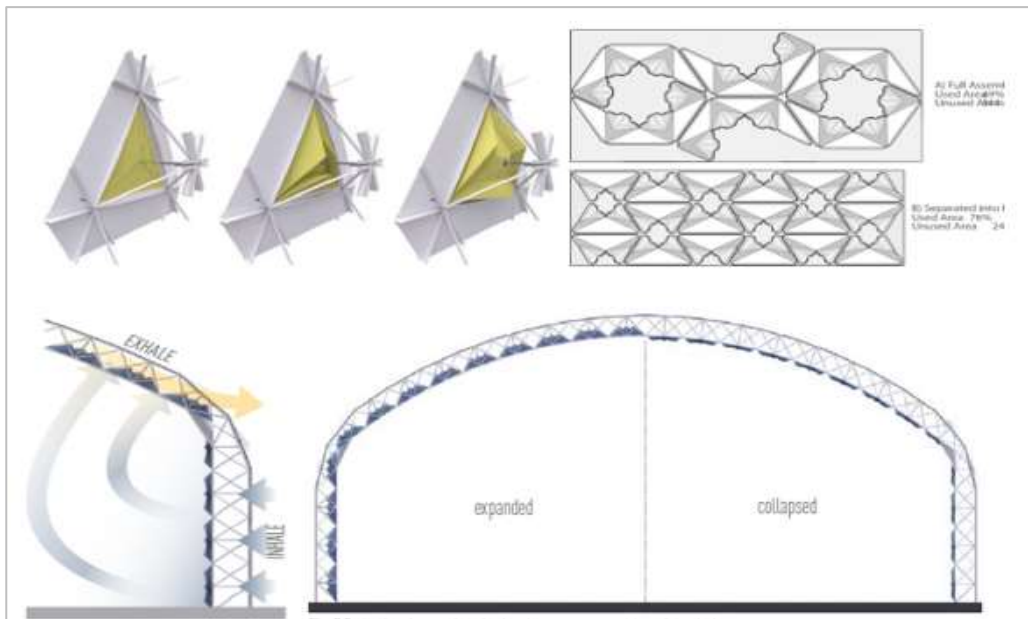


Figure 5.12. Principe de fonctionnement de l'enveloppe respirante conçue par Scott Crawford.
Source : Crawford (2010).

Mouna Rizek Jad Elsaid (en 2015) a exploré le concept de "Bâtiment respirant", s'inspirant du fonctionnement des poumons humains. Cette approche s'inscrit dans la continuité des travaux de Scott Crawford. Elle a mis en œuvre un concept similaire dans un immeuble du Caire (Égypte), une région caractérisée par un climat aride, afin d'ajuster l'architecture aux défis du changement climatique.

L'objectif est d'ajuster le bâtiment en fonction des scénarios de changement climatique prévisibles pour la région. L'auteur a proposé des stratégies complémentaires pour améliorer son comportement thermique. Dans un premier temps, le bâtiment est entouré d'une enveloppe extérieure. La fonction de cette enveloppe est double : apporter de l'ombre et former une cavité ombragée qui permet de diminuer la température de l'air qui pénètre dans les espaces intérieurs. En outre, l'augmentation de l'épaisseur des parois du bâtiment joue un rôle essentiel en réduisant les économies de chaleur grâce à l'effet de masse thermique.

Par la suite, une enveloppe respiratoire est appliquée sur la façade nord (Figure 5.13), qui s'inspire du fonctionnement des poumons humains. Ce système est fabriqué avec des matériaux économiques qui peuvent se dilater et se contracter. Les mouvements sont déclenchés par des capteurs qui repèrent les fluctuations du climat, ce qui permet de contrôler l'échange d'air. Cela contribue à une ventilation naturelle améliorée, à une augmentation du taux de renouvellement d'air et à une amélioration de la qualité de l'air dans les maisons.

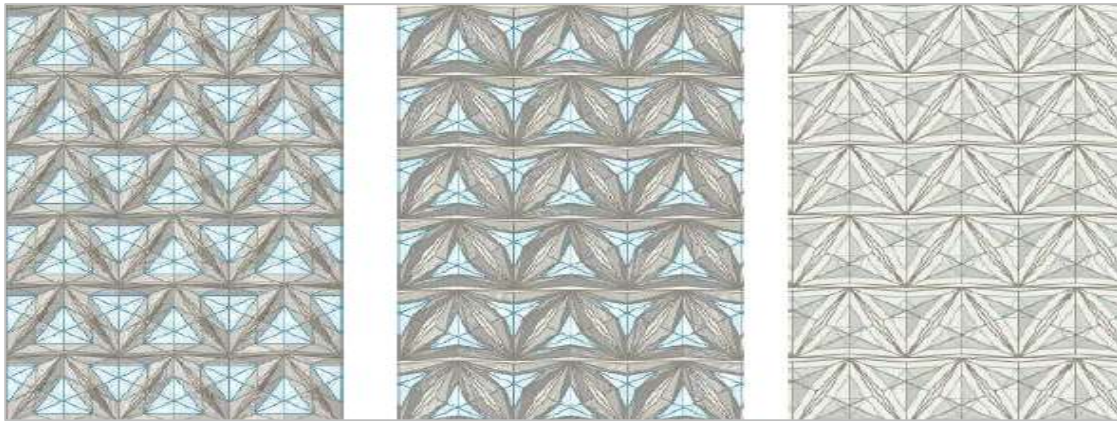


Figure 5.13. Gauche : Ouverture maximale de l'enveloppe (100%), Au centre : ouverte intermédiaire de l'enveloppe (50%), A droite : fermeture de l'enveloppe.
Source : Rezek (2015).

Enfin, le couloir principal, assimilé à la trachée dans le système respiratoire des êtres vivants, joue un rôle structurant dans la circulation de l'air. Où l'air frais est acheminé vers les espaces intérieurs par ce couloir, tandis que l'air chaud, riche en CO₂ et en polluants, est évacué soit par les fenêtres situées sur les façades sud, ouest et est, soit par un mouvement continu de l'enveloppe adaptative placée sur la façade nord (Figure 5.14).

Ce système complexe a prouvé son efficacité en préservant la qualité de l'air intérieur (air pur), en garantissant le refroidissement de l'air et en augmentant le taux de renouvellement grâce à une ventilation naturelle. Cela est accompli grâce à la maîtrise des taux d'ouverture de l'enveloppe et à la fréquence des mouvements de fermeture et d'ouverture.

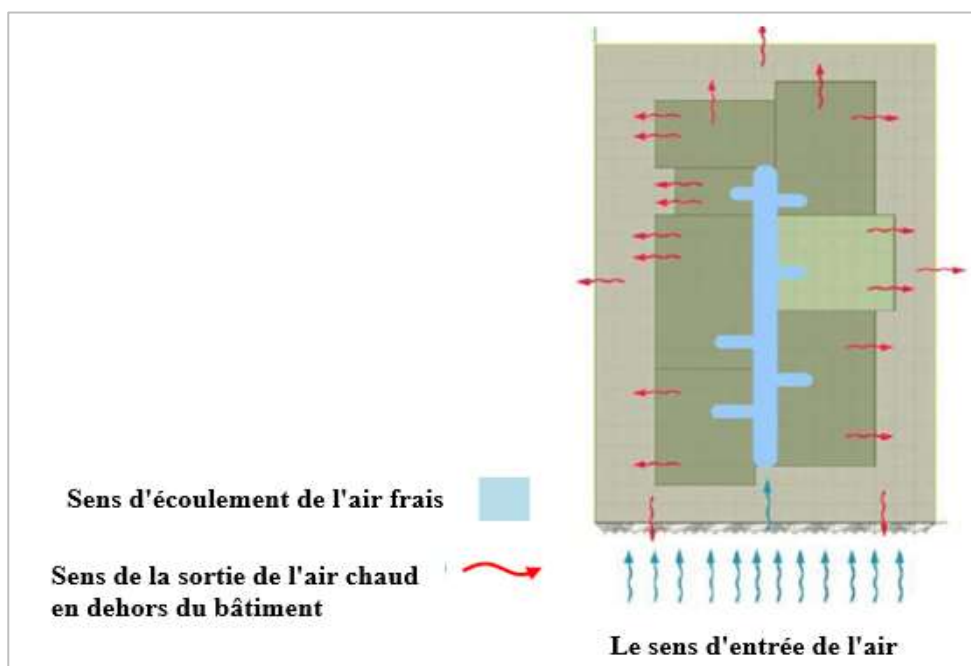


Figure 5.14. Cheminement du flux d'air vers les espaces du bâtiment.
Source : Rezek (2015).

5.5.1.3. Système pneumatique

Tobias Becker, en 2017, a créé une salle d'exposition en Allemagne intitulée "Breathing Skins". Ce projet occupe une superficie de 8,00m² et repose sur un concept innovant de façade respirante, qui fonctionne comme un système vivant (Figure 5.15).

Cette façade combine deux couches de polycarbonate transparentes et perforées, avec 140 muscles pneumatiques (Becker, 2017), des éléments mécaniques placés entre les couches de polycarbonate. Grâce à ces muscles pneumatiques, il est possible de contrôler les conditions externes telles que l'air et l'humidité, tout en influençant sur les conditions internes. On peut réguler l'air en utilisant des poches d'air en forme de ballon, placées à chaque extrémité de la façade, grâce aux ouvertures (entrée et sortie) présentes sur les deux surfaces murales (Felkner, Zoltan Nagy and Younglee Lee, 2021).

Le principe du mécanisme consiste à laisser l'air pressurisé entrer dans la façade par des petites ouvertures en tube. Les perforations sont ainsi ouvertes à l'air extérieur, ce qui entraîne une dilatation ou une contraction des muscles pneumatiques et des poches d'air. La façade se reconfigure en raison de cette interaction, s'adaptant en ouvrant ou en fermant ses pores en fonction des exigences thermiques et de ventilation de l'espace intérieur.

Ce système crée un effet de respiration, où la façade s'ajuste de manière constante aux changements climatiques. Il a pour fonction de contrôler la quantité d'air extérieur entrant, la vitesse de circulation de l'air, ainsi que la distribution de la chaleur et de l'humidité. Cette façade crée une harmonie et une dynamique entre l'environnement extérieur et les espaces intérieurs en optimisant la température et la qualité de l'air intérieur sans avoir recours à des systèmes mécaniques de climatisation (Baron, 2016; Felkner, Zoltan Nagy and Younglee Lee, 2021).



Figure 5.15. Breathing Skins conçue par Tobias Becker.
Source: Becker (2017).

Une autre peau pneumatique adaptative a été réalisée par des étudiants de l'Institut d'Architecture Avancée de Catalogne. Elle est inspirée du système respiratoire, basée sur un mur novateur qui utilise activement l'air pour réagir aux changements de lumière et de température, en utilisant un capteur de lumière. Quand le capteur détecte une forte intensité de rayonnement solaire, une vanne d'air agit, ce qui entraîne la libération d'air dans des ballons reliés par des tuyaux. Le gonflement et le dégonflement des ballons imitent l'inspiration et l'expiration (Felkner, Zoltan Nagy and Younglee Lee, 2021).

Cette façade adaptative permet de contrôler la perméabilité à la lumière et la température à l'intérieur, ce qui permet de stabiliser les conditions intérieures en fonction de l'environnement externe. Les ballons jouent un rôle essentiel en termes de couleur et de transparence, qui ont un impact sur la transmission visuelle et sont utilisés comme une protection solaire dynamique. Ce projet dépasse le concept de peau respirante en introduisant un système de rétroaction mécanique qui peut interagir activement avec l'environnement afin d'améliorer le confort thermique et lumineux à l'intérieur (Figure 5.16) (Felkner, Zoltan Nagy and Younglee Lee, 2021).

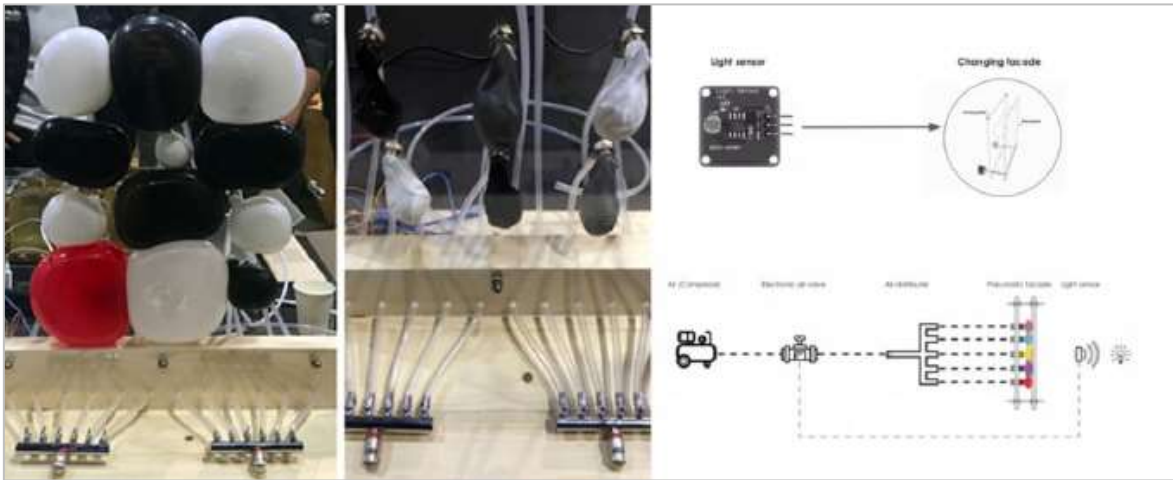


Figure 5.16. Enveloppe respirante générée par les étudiants de l'Institut d'Architecture Avancée de Catalogne. Source : IAAC (2019).

5.5.1.4. Matériaux piézoélectriques

En 2007, Lidia Badarnah et Ulrich Knaack ont développé une façade qui s'inspire du système respiratoire des êtres vivants, en particulier les poumons, afin de créer une ventilation naturelle intégrée à l'enveloppe du bâtiment. Ce système opère en régulant la pression de l'air, reproduisant les processus d'inhalation et d'expiration en fonction des exigences des usagers, en ce qui concerne la qualité et la quantité d'air entrant et sortant. La vitesse de déformation des éléments de la façade et l'augmentation de la surface d'échange

sont les facteurs qui influencent sur le taux d'échange d'air, ce qui permet d'optimiser la ventilation.

Le système est structuré en trois parties hiérarchiques : chambre ouverte, semi-ouverte et fermée, ce qui permet de créer une variation de pression d'air nécessaire pour son entrée et sa sortie. Dont la surface interne et externe de l'enveloppe augmente et se dilate lors l'application de la tension. Tandis que la suppression de tension élimine l'air de l'espace en dehors de la chambre pulmonaire à travers l'autre côté via une contraction (Figure 5.17).

Ce mécanisme est effectué grâce aux capteurs piézoélectriques installés sous la peau qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa, ce qui permet un contrôle précis du système. Ces capteurs ont une réaction distincte pour chaque zone de la peau, et les matériaux membranaires élastiques modifient leur forme en réponse aux signaux, ce qui permet d'ajuster la géométrie de la façade pour répondre aux variations de l'environnement.

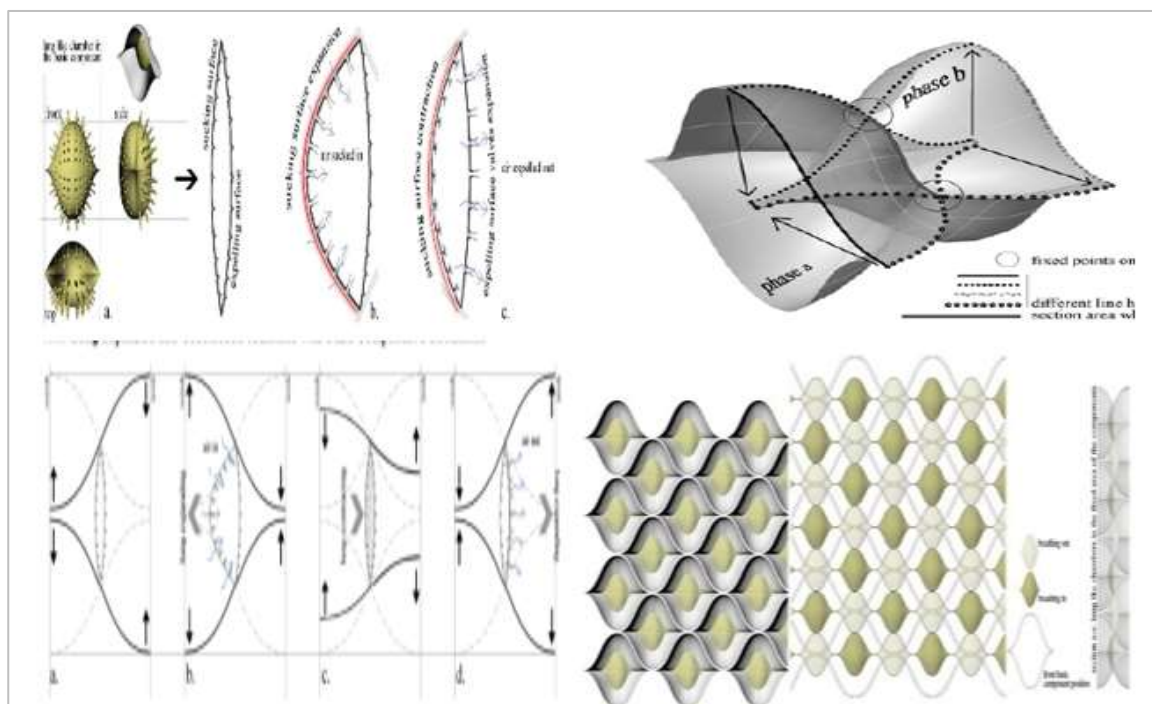


Figure 5.17. Composition de l'enveloppe respirante.
Source : Badarnah and Knaack (2007).

5.5.1.5. Matériaux composites

En 2018, Chrisoula Kapelonis a mis au point une approche novatrice pour créer des enveloppes architecturales qui peuvent respirer, comme le montre le prototype de peau réceptive (en anglais, receptive skins) qui s'appuie sur le principe que le bâtiment est une entité organique et vivante non mécanique ou numérique, qui communique avec les gens (Figure 5.18).

Cette peau modulable, qui peut ajuster sa transparence en fonction du rayonnement solaire, utilise des matériaux composites dynamiques qui intègrent des solutions chimiques et biologiques. Cette idée est arrivée au stade de prototype final, défini en tant que preuve de concept d'un mur respirant qui module l'environnement d'un espace intérieur via une interface pneumatique, définie comme une nouvelle interface pour la ventilation (Kapelonis, 2018a).

Trois couches principales composent le système : une couche supérieure en silicone souple avec une colonne vertébrale constituée de chambres à air, une couche inférieure rigide stabilisante et des pigments thermochromiques et phosphorescents réactifs à la chaleur et à la lumière. Une réaction biologique est initiée par la chaleur et la lumière, avec la présence de la levure, qui génère des gaz qui gonflent les chambres à air et ouvrent la façade pour permettre une ventilation naturelle. Les pigments deviennent clairs lorsque les conditions sont remplies, ce qui indique visuellement l'activation du système. La fonctionnalité de ce mur respirant repose sur l'utilisation de liquides à changement de phase et de matériaux réactifs et calmes afin d'ajuster de manière autonome la lumière, la ventilation et la température (Kapelonis, 2018a).

Cette technologie transforme les bâtiments en organismes vivants, capables de s'ajuster de manière dynamique à leur environnement et d'interagir de manière organique avec celui-ci, sans utiliser de systèmes mécaniques ou électroniques classiques (Kapelonis, 2018b).



Figure 5.18. Enveloppe respirante conçue selon des matériaux composites.
Source : Kapelonis (2018a).

5.5.2. Procédés

Lidia Badarnah et al. (2010) ont développé un système appelé « Stoma Brick ». Le but principal de ce projet est de développer un système de refroidissement par évaporation destiné aux enveloppes des bâtiments situés dans des régions à climats arides et secs. Cette œuvre allie différentes sources d'inspiration citées ci-dessous :

- Les cheveux autour des yeux les protègent contre les petites particules, ce qui inspire à créer un système qui empêche les poussières d'entrer dans le bâtiment.
- Le fonctionnement des stomates, qui contrôlent les ouvertures pour l'évaporation en fonction des variations de pression osmotique, constitue un modèle pour gérer l'échange de chaleur et d'humidité.
- Les pommes de pin ont la capacité de changer de forme en fonction des fluctuations de l'humidité relative, ce qui entraîne un mécanisme adaptatif permettant de réguler l'ouverture du système en fonction des conditions climatiques.
- La peau humaine possède la capacité de perdre de la chaleur latente, garantissant un refroidissement par évaporation.

Les sources d'inspirations naturelles dans le projet Stoma Brick sont interprétées architecturalement en utilisant une structure ossature qui combine différents éléments fonctionnels adaptés aux climats chauds et secs. Ce système est constitué de différentes couches (Figure 5.19) :

- **La brique stoma** est composée d'un matériau poreux qui permet la régulation thermique ; elle dispose d'une couche externe en forme de structure semblable aux poils qui filtre l'air entrant, en bloquant les particules, et d'un volet en placage responsable de l'ouverture et de la fermeture en fonction du gradient d'humidité, permettant ainsi un contrôle dynamique de l'air et de l'humidité. La couche interne spongieuse a pour fonction de retenir l'humidité et de favoriser l'évaporation de l'eau. De cette manière, elle permet un refroidissement par évaporation lorsque le système est en marche.
- **La monobrique** est essentielle pour garantir un cycle d'irrigation. Elle est connectée aux trous de la brique stoma, ce qui permet de maintenir le système d'irrigation en continu, garantissant ainsi l'humidification et la régulation de l'air.
- **La structure de support** en acier est responsable de la stabilité du système de refroidissement.
- **La couche interne**, constituée d'un filtre HEPA, sert à purifier l'air.

Lors des cycles d'irrigation, des gouttelettes d'eau s'écoulent sur le volet de placage. La déformation de ce dernier lorsqu'il est humidifié permet à l'air de pénétrer et de traverser la structure spongieuse. Ce processus humidifie l'air, le rendant plus agréable lorsqu'il atteint l'espace intérieur. Tandis que, lors des périodes de froid et de sécheresse, ce système joue le rôle d'une couche isolante, diminuant ainsi les pertes de chaleur.

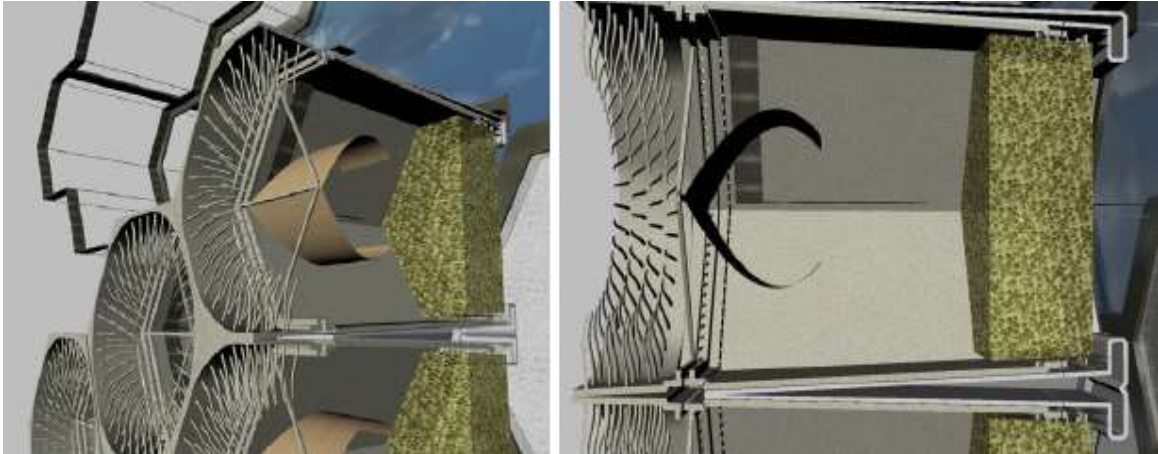


Figure 5.19. Stoma Brick.
Source: Badarnah et al. (2010).

Vu le climat désertique du Sinaï (Égypte), Mahmoud ELGHAWABY (2013) a pensé de créer un mur respirant inspiré des couches composant la peau naturelle, dont l'objectif est de créer une nouvelle façon de contrôler la ventilation naturelle, d'éviter les gains de chaleur, de perdre la surchauffe interne et de se protéger par une très bonne isolation. Dans le but d'atteindre ses objectifs, Elghawaby a interprété son procédé sous forme de trois couches (Figure 5.20) :

- **La couche externe** conçue en s'inspirant des couches d'isolation constatées dans les animaux désertiques et les plantes (peaux poilues, couche épaisse et cireuse). Elle est réalisée avec un matériau qui a la capacité d'absorber l'humidité (textiles naturels, argile, bois ou roseaux), avec des ouvertures qui empêchent et minimisent la lumière directe de pénétrer et contrôlent l'intensité des rayons solaires selon les besoins des usagers, tout en laissant passer le flux d'air.

- **La couche intermédiaire** se présente comme un réseau de conduits d'air comprenant des entrées d'air contrôlées, un dispositif de pulvérisation de l'eau et un réseau de conduits de ventilation destiné à refroidir par le biais de l'évaporation et de la conduction en permettant le passage du flux d'air en sous-sol. Cette stratégie est utilisée pour garantir une isolation thermique de l'extérieur, un refroidissement par évaporation et le contrôle des mouvements d'air via un réseau de gaines. Cela se fait soit par une ventilation directe grâce

aux liaisons directes entre l'extérieur et l'intérieur, ou indirectement lorsque le flux d'air traverse le sous-sol en contact avec la terre.

- **La couche interne** : se manifeste par des sorties contrôlées d'air situées sur le mur ou regroupées dans une grille de ventilation qui permettent de réguler le débit d'air pour son accès dans l'espace interne.

Cette idée était interprétée sur le terrain sous forme d'un prototype de dimensions de (1,00 x 1,00 x 1,00) m, dont chaque mètre carré de façade contient 28 bouches d'air pour la ventilation directe et 21 bouches d'air pour la ventilation indirecte. Les résultats ont montré que la différence entre les températures intérieures du cas réel et celle du cas développé a atteint un maximum de 5,6°C. Donc, cette création aide à améliorer les systèmes de refroidissement et de ventilation pour atteindre le confort thermique dans les bâtiments situés dans des climats chauds comme celui de Sinäi.

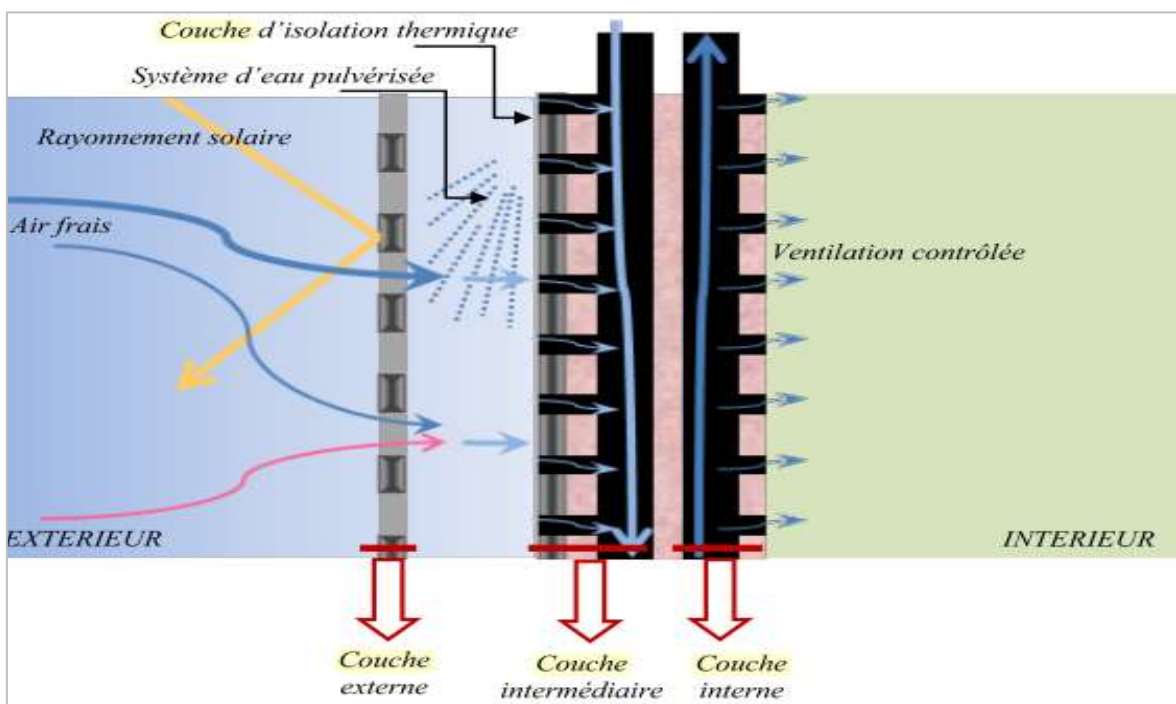


Figure 5.20. Mur respirant généré par Elghawaby.
Source : Elghawaby (2013).

Doaa Attia, en 2015, a présenté une solution biomimétique innovante manifestée sous forme d'une « **fenêtre respirante** » (Figure 5.21). Elle est composée d'une enveloppe de quatre tuyaux réunis en parallélogramme, de deux tuyaux verticaux et de deux autres tuyaux horizontaux, réalisés à partir d'un métal non hydratant et non altéré, présentée en tant que solution durable de ventilation naturelle, d'éco-aménagement intérieur, d'équilibre écologique en apportant un progrès social, culturel, environnemental et économique.

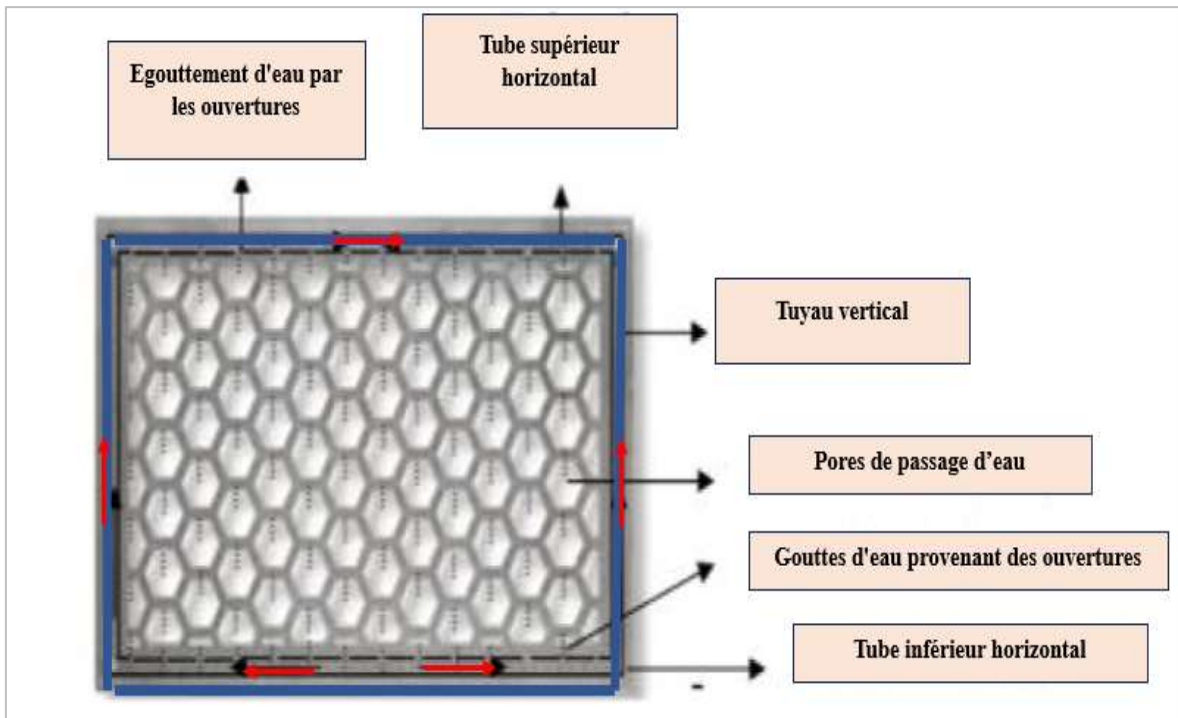

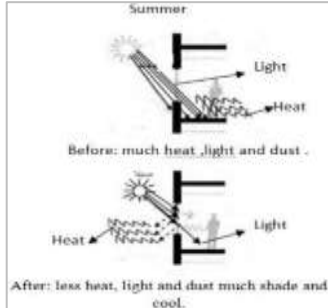
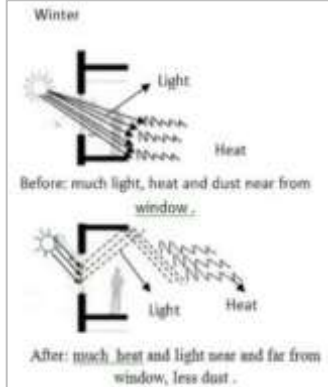



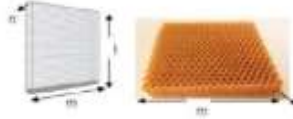



Figure 5.21. Fenêtre respirante.
Source : Doaa Attia (2015).

Cette fenêtre est inspirée de plusieurs sources d'inspiration soit au niveau morphologique ou physiologique et présente plusieurs avantages, effectuée selon deux stratégies celle d'été et d'hiver, Tableau 5.1 présente une récapitulation de l'idée de création de cette fenêtre.

Tableau 5.1. Genèse de l'idée de création de la fenêtre respirante. Source : élaboré par l'auteur à partir des données présentées par Attia (2015).

Source d'inspiration	Niveau d'inspiration	Motivation du choix	Mécanisme	Interprétation architecturale	Avantages
<p style="text-align: center;">Nez humain</p> 	<p>Physiologique : Le processus de la respiration est basé sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nez et ses narines extérieures ; • Voies nasales reliées aux muqueuses ; • Poils minuscules ; • Capillaires sanguins. 	<p>La capacité du nez de moduler l'air avant d'entrer dans le corps</p>	<p>À travers les deux stratégies suivantes :</p> <p>Stratégie d'été : Elle est basée sur l'hydratation de l'air à l'aide de muqueuses qui sécrètent une substance collante pour rafraîchir l'air chaud.</p>	<p>Moduler l'air atmosphérique avant d'entrer dans l'environnement intérieur.</p>	<p>Confort thermique et santé des occupants. Décoration intérieure.</p>
			<p>Stratégie d'hiver : Elle est basée sur un système capillaires sanguins servant à réchauffer l'air frais en hiver.</p>	<p>Refroidissement en été</p> 	<p>Réchauffement en hiver</p> 
			<p>Filtration de l'air atmosphérique avant de passer plus loin dans le système respiratoire en empêchant l'entrée de microparticules étrangères par l'intermédiaire des muqueuses et des cils.</p>	<p>Emploi de matériau permettant de filtrer l'air atmosphérique des microparticules étrangères.</p>	<p>L'environnement intérieur est désormais frais et pur.</p>

<p align="center">Cactus</p> 	<p>Morphologie : La forme des rainures de cactus couvertes d'épines.</p>	Protéger les cactus du soleil.	Minimiser les surfaces exposées au soleil.	Réduit le gain de chaleur.	<p>Utilisation des énergies renouvelables : soleil, vent.</p>
		Laisser l'air passer.	Fournir l'ombrage.	Augmente l'ombre autour et sur la fenêtre.	
		Refléter la lumière directe du soleil.	Aération.	Permettre au flux d'air de pénétrer.	
		Empêchant la poussière et les particules étrangères.	Réflexion et contrôle de la propagation et de la pénétration de la lumière.	Emploi de matériau réfléchissant.	
		Absorber le CO ₂ de l'air.	Filtrer.	Filtrer des particules étrangères.	
	<p>Physiologique : Ouverture/fermeture des stomates des cactus</p>	Refroidissement par évaporation.	Ouverture des stomates pendant la nuit pour minimiser la perte d'eau.	Intégration des pots de cactus placés dans des poches métalliques placées dans un rideau de feutre irrigué par goutte à goutte, servant à rafraîchir la façade extérieure.	 <p>Favorisant une conception écologique de l'environnement intérieur.</p>
Rétention de l'eau		L'eau sera réutilisée.	L'eau tombe du tuyau supérieur horizontal, dirigée des passages horizontaux hexagonaux vers le tuyau inférieur horizontal, vers les tuyaux verticaux, puis descend à nouveau.	Le feutre retient une quantité importante d'eau.	
<p>Nid d'abeille</p> 	<p>Morphologique : Forme hexagonale du nid d'abeille.</p>	La forme de la structure est intrinsèquement stable.	Utilisation minimale de matériaux naturels et poreux tels que le textile, l'argile ou les roseaux.	Façades extérieures et intérieures symétriques en forme de treillis hexagonal, Absorber la vapeur d'eau de l'air atmosphérique	 <p>Minimum de matériaux recyclés, d'énergie et de coût. Réduire la quantité de déchets.</p>
<p>Ours polaire</p> 	<p>Physiologique : Thermorégulation dans les climats froids.</p>	Sa fourrure.	Sa fourrure possède une capacité de garder son corps au chaud même dans des conditions polaires glaciales.	Ces passages sont constitués d'une fibre optique des rayons solaires venant de l'extérieur vers l'intérieur en matériau réfléchissant l'environnement.	Permettant une purification et un volume suffisant. Permettre à la lumière du jour et au flux d'air de le traverser.

Le Phalanx est un système complexe de revêtement, composé de différentes couches immobiles, créé par Askeland Eric et al. (2019). Ce système, conçu selon une approche biomimétique, est constitué de trois couches différentes, chacune étant inspirée de sources naturelles particulières. Il est destiné à être installé sur les murs extérieurs des bâtiments existants dans les zones urbaines côtières du Sud de la Californie (Figure 5.22).

Ce système vise à :

- Réduire les températures intérieures de manière passive sans avoir besoin d'électricité ;
- Dissiper la chaleur ;
- Optimiser le refroidissement passif ;
- Diminuer la dépendance à la climatisation ;
- Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments ;
- Économiser de l'argent ;
- Réduire l'empreinte écologique du bâtiment.

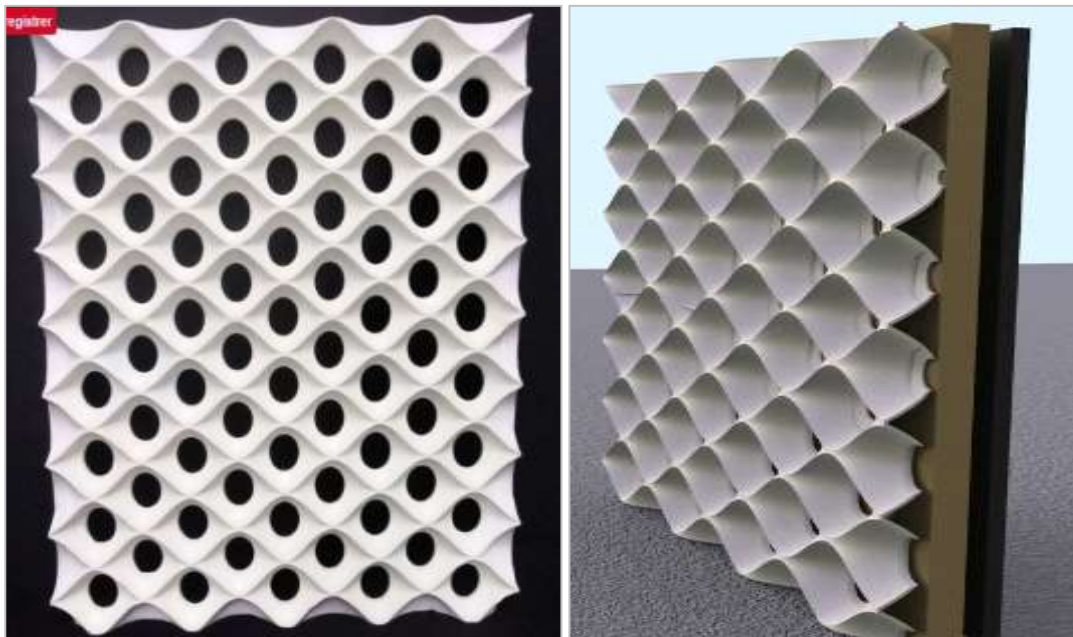

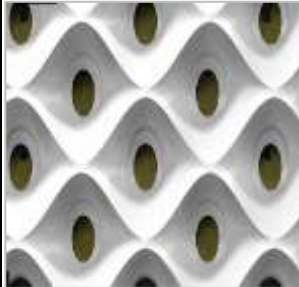


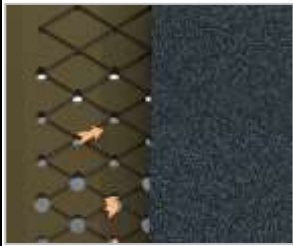
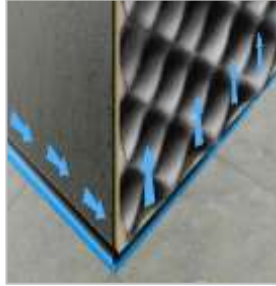



Figure 5.22. Le Phalanx.
Source : Askeland et al. (2019).

Le Tableau 5.2. Présente genèse d'idée de création de Phalanx inspiré de différentes sources naturelles.

Tableau 5.2. Genèse de l'idée de création du Phalanx. Source : élaboré par l'auteur à partir des données présentées par Askeland et al. (2019).

Couche	Source d'inspiration	Niveau d'inspiration	Mécanisme	Interprétation architecturale	Figure
Externe	Echinofossulocactus 	Morphologique : Les côtes ondulées du Echinofossulocactus	Sa capacité de dissiper et de refléter les rayons solaires.	Surface extérieure ondulée.	
	Fourmi argentée 	Morphologique : Les poils de la fourmi argentée du désert.	Ces fourmis ont un type de poils unique qui réfléchit la lumière 10 fois mieux que les fourmis ordinaires.	La couche extérieure avec une couleur blanche réfléchissante des rayons solaires.	
Intermédiaire	Colonies des termitières 	Morphologique : La présence des trous et conduits du monticule des termites des termites cathédrales	Le système de trous et de conduits du monticule des termites cathédrales permet à l'air chaud de s'échapper par le sommet tout en aspirant de l'air frais par les ouvertures inférieures, permettant une ventilation naturelle pour réguler la colonie, grâce aux variations de pression et de température entre l'intérieur et l'extérieur.	Lorsque l'air chaud pénètre dans le motif du trou d'entrée des premières couches, il se refroidit grâce à l'effet venturi qui dirige l'air chaud vers le haut et en dehors du système.	
Interne	Chameaux 	Physiologie : Respiration nasale	Les muqueuses humides des turbines nasales humidifient l'air chaud inhalé. Avant que l'air ne pénètre dans les poumons, ce processus favorise la réduction de la température du sang circulant dans les capillaires environnants grâce à un échange thermique efficace.	Le refroidissement par évaporation est assuré grâce à un tapis capillaire humide, dont sa partie inférieure recueille la rosée ainsi qu'aspire également l'eau grise collectée du drainage des bâtiments, ensuite l'eau remonte à travers ce tapis par capillarité et osmose.	
	Blé 	Physiologie : Mécanisme de la capillarité via le système d'osmose chez la plante de blé.	Les feuilles de blé utilisent une action capillaire pour attirer l'eau en elles-mêmes, lorsqu'elles se réchauffent, les feuilles se libèrent pour refroidir.		

En 2014, Abu Khadra et Chalfoun ont tenté d'améliorer les performances thermiques, de diminuer la consommation d'énergie et de créer un milieu de travail efficace en se basant sur le mécanisme thermorégulateur du corps humain. Leur étude s'est déroulée sur la façade sud d'un espace bureau de 152,40 m², situé à Tucson, en Arizona (climat chaud), qui se distingue par un système de refroidissement CVC mono-zone monobloc, sans possibilité d'avoir une ventilation naturelle.

Dans cette optique, la peau proposée combine différentes techniques : la ventilation naturelle, une façade double peau, une structure de la grille pour soutenir la peau externe et maintenir les dispositifs d'ombrage. De plus, un système de refroidissement par évaporation est également disponible sous forme de coussinets positionnés au sommet du système. Une petite pompe électrique alimente ces coussinets en eau, générant un refroidissement par courant descendant qui introduit de l'air frais dans l'espace interne via les fenêtres automatisées de la peau interne (Figure 5.23).

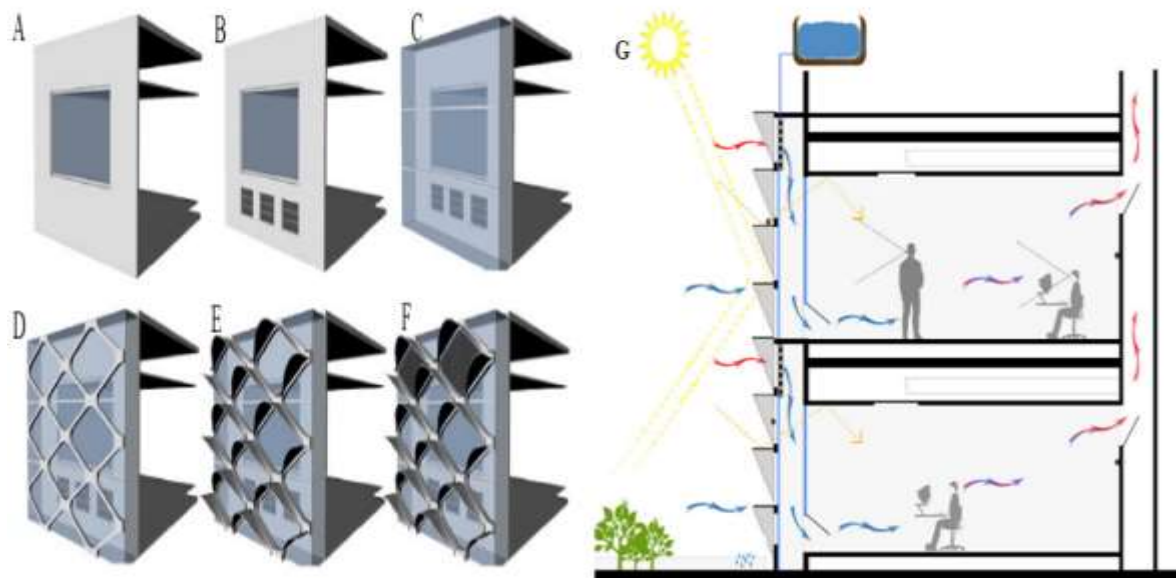


Figure 5.23. Processus de conception, (A) : cas réel, (B) : application de système de ventilation naturelle, (C) : création de la double peau, (D) : application du grillage de support, (E) : création de la protection solaire, (F) : application du système de refroidissement par évaporation, (G) : enveloppe finale.
Source: Abu Khadra and Chalfoun (2014).

La façade suggérée a prouvé son efficacité et ses performances grâce aux stratégies de refroidissement passif appliquées aux espaces de bureaux dans les régions arides chaudes. Ces stratégies servent à réduire la consommation d'énergie tout en favorisant le confort thermique et visuel. Par conséquent, la charge de refroidissement a été considérablement réduite de près de 70% tout au long de l'année, tandis que la charge de chauffage a légèrement augmenté pour les mois d'hiver.

Conclusion

Ce chapitre a présenté une revue systématique de la littérature du concept du mur respirant, désigné comme une solution biomimétique permettant d'effectuer des échanges gazeux de la même manière que celle des êtres vivants. Ces murs vont au-delà de l'approche traditionnelle de conception des murs.

La première partie a permis de fournir des explications afin de mieux appréhender le concept du mur respirant, basée sur deux concepts fondamentaux. D'une part, la transmission de l'air pour assurer une ventilation naturelle afin de fournir de l'air frais, de maintenir des niveaux adéquats d'oxygène et d'éliminer l'excès de chaleur. D'autre part, le transfert de l'eau permettant la perméabilité de la vapeur d'eau, améliore la régulation hygrothermique et la qualité de l'air intérieur, tout en favorisant le confort thermique, notamment dans les régions chaudes.

La deuxième partie a été consacrée à montrer les différentes configurations des murs respirants ou enveloppes respirantes, exécutés à l'aide de diverses techniques, notamment l'utilisation de nouvelles technologies, manifestée par l'emploi des matériaux intelligents ou bien sous forme de procédés qui permettent à l'air de passer à travers un circuit soumis à un mécanisme de refroidissement avant son entrée à l'intérieur du bâtiment.

Ce chapitre a fourni un support pour la conception de notre enveloppe adaptative, respirante. En exploitant les avancées technologiques des matériaux intelligents. Il a présenté des techniques adaptées qui visent à améliorer la température, l'humidité et la qualité de l'air en contrôlant les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Cela assure la préservation de la plage de confort, assure la sécurité thermique, améliore les performances énergétiques et diminue la pollution atmosphérique dans les zones urbaines.

CHAPITRE VI

INVESTIGATION IN SITU

CHAPITRE VI : INVESTIGATION IN SITU

« Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort » (Givoni, 1978).

Introduction

En Algérie, le secteur tertiaire, comprenant les bâtiments publics, est considéré comme l'un des secteurs les plus énergivores et sa consommation dépasse souvent les 500TEP/an (APRUE, 2018). Ces bâtiments sont distingués par le nombre de personnes qui passent de longues périodes de leur journée (de 7 à 8 heures par jour) dans des pièces surpeuplées, mal ventilées, où l'ambiance thermique reste inconfortable même avec des systèmes de climatisation mécanique. En outre, ces édifices présentent un déficit de conditions de santé, de sécurité, de confort et de bien-être pour les utilisateurs. Cela peut conduire à une augmentation du risque de syndrome des bâtiments malsains (SBM), ce qui peut avoir un impact négatif sur la motivation, la satisfaction et la productivité des usagers sur leur lieu de travail.

Ce chapitre présente une investigation in situ effectuée sur 03 jours consécutifs, du 24 au 26 juillet 2022, de 08h00 à 16h00. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une approche d'évaluation post-occupation (EPO), combinant des enquêtes quantitatives et qualitatives, afin d'évaluer l'ambiance thermique intérieure d'un bâtiment public, en l'occurrence un bâtiment municipal situé à Batna, une ville au climat semi-aride caractérisé par des étés chauds et caniculaires.

Le bâtiment étudié souffre de problèmes de surchauffe causés par un manque d'accès à la ventilation naturelle, exacerbés par une fréquentation importante du public. Afin de faire face à cette surchauffe, des recours vers des systèmes de climatisation mécanique sont employés, ce qui entraîne une grande consommation énergétique provoquant pollution atmosphérique et réchauffement climatique.

6.1. Description de la zone d'étude

6.1.1. Situation géographique

La ville de Batna (chef-lieu de wilaya) est historiquement désignée comme la capitale de la région des Aurès (massif montagneux). Elle se trouve au nord-est de l'Algérie, à 410 km au sud-est de la capitale Alger (CES-MED, 2015). Elle se situe à une latitude : 35° 33' 21.49" Nord et une longitude : 6° 10' 26.90" Est (Latitude, 2023) avec une altitude de 1048m.

La ville de Batna s'étend sur une superficie totale de 117,43 km² (Municipalité de Batna, 2023).

Batna est limitée par les communes suivantes : Tazoult au sud, Fesdis au nord, Ouyoun El Assafer à l'est, et Oued Chaâba à l'ouest (Figure 6.1).

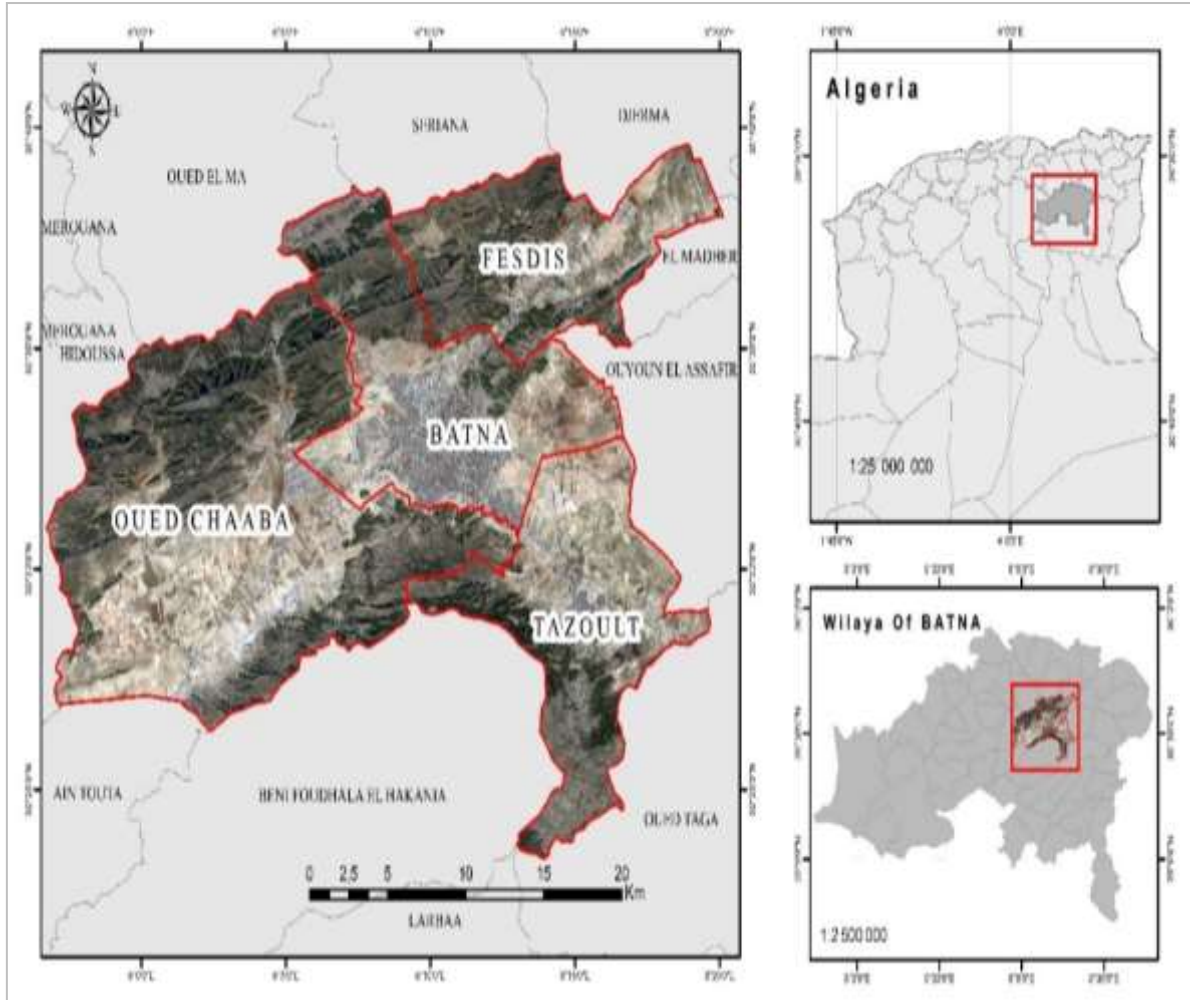


Figure 6.1. Situation géographique et limites de la ville de Batna.
Source : Fekkous et al. (2023).

6.1.2. Contexte climatique

La ville de Batna possède un climat semi-aride (zone C), présentant des caractéristiques continentales. Ce climat est défini par des étés très chauds, longs et très secs, et des hivers très froids (Denke, Hassar and Baradiy, 2014) avec la possibilité de chutes de neige. Ces données climatiques ont été visualisées par le plugin Ladybug, qui est un composant très utilisé dans Grasshopper et qui permet de traiter ces données à partir des fichiers météorologiques horaires téléchargés depuis le site EPWMap fournie par Ladybug Tools (Ladybug tools, 2023). Les données climatiques sont les suivantes :

6.1.2.1. Température de l'air

À travers la lecture des données climatiques en termes de température de l'air (Figure 6.2), qui ont été interprétées dans le Tableau 6.1. Il a été constaté que Batna se caractérise par une température moyenne annuelle de 15,50 °C. Le mois le plus chaud de l'année est le mois de juillet, avec des températures maximales atteignant des pics jusqu'à 41°C.

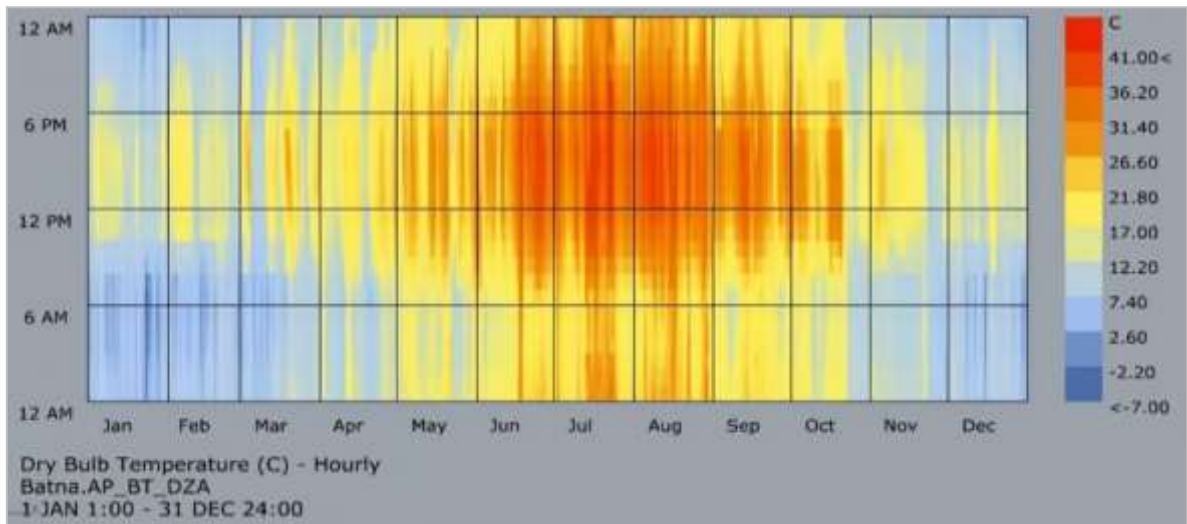


Figure 6.2. Température de l'air.
Source : Auteur (2022).

6.1.2.2. Humidité relative

Les taux d'humidité relative à Batna sont illustrés dans la Figure 6.3, qui est synthétisée dans le Tableau 6.1. Les basses valeurs sont observées pendant l'été, telles qu'elles sont mentionnées en juillet. Alors que les plus hautes valeurs sont enregistrées en hiver, au mois de janvier.

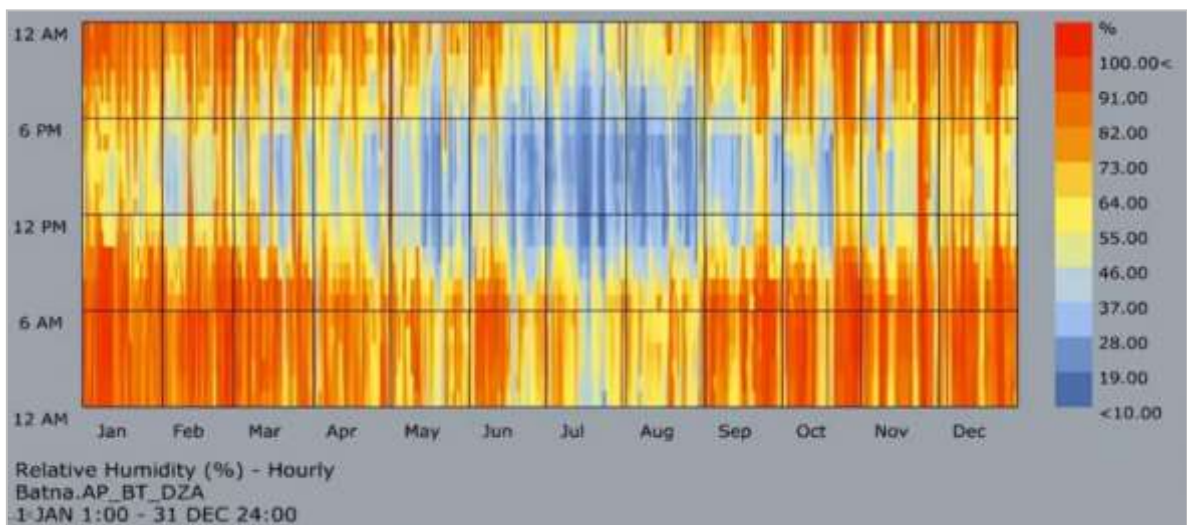


Figure 6.3. Humidité relative.
Source : Auteur (2022).

Tableau 6.1. Températures de l'air et humidité relative de Batna. Source : Auteur (2022).

Température de l'air (°C)		
Température minimale moyenne journalière	Température minimale moyenne mensuelle	Température minimale moyenne annuelle
2,89 en janvier	5,6 en janvier	10,44
Température maximale moyenne journalière	Température maximale moyenne mensuelle	Température maximale moyenne annuelle
32,75 en juillet	26,28 en juillet	20,28
Humidité relative (%)		
RH minimale moyenne journalière	RH minimale moyenne mensuelle	RH minimale moyenne annuelle
21,88 en juillet	21,88 en juillet	42,74
RH maximale moyenne journalière	RH maximale moyenne mensuelle	RH maximale moyenne annuelle
88,75 en décembre	75,35 en janvier	78,34

6.1.2.3. Vents dominants

Les vents dominants dans la région étudiée sont du sud-ouest et du nord-ouest tout au long de l'année. Les vents ont une vitesse moyenne annuelle de 3,39 m/s, avec une vitesse maximale moyenne mensuelle de 4,61 m/s au mois de mars (mois de la transition météorologique) et une vitesse minimale moyenne mensuelle de 2,04 m/s en janvier.

La saison estivale, de juin à septembre, est marquée par des vents soufflant de nord-est, avec une vitesse moyenne saisonnière de 3,83 m/s. Par contre, en hiver, les vents dominants viennent du sud-ouest, à une vitesse moyenne de 3,16 m/s (Figure 6.4).

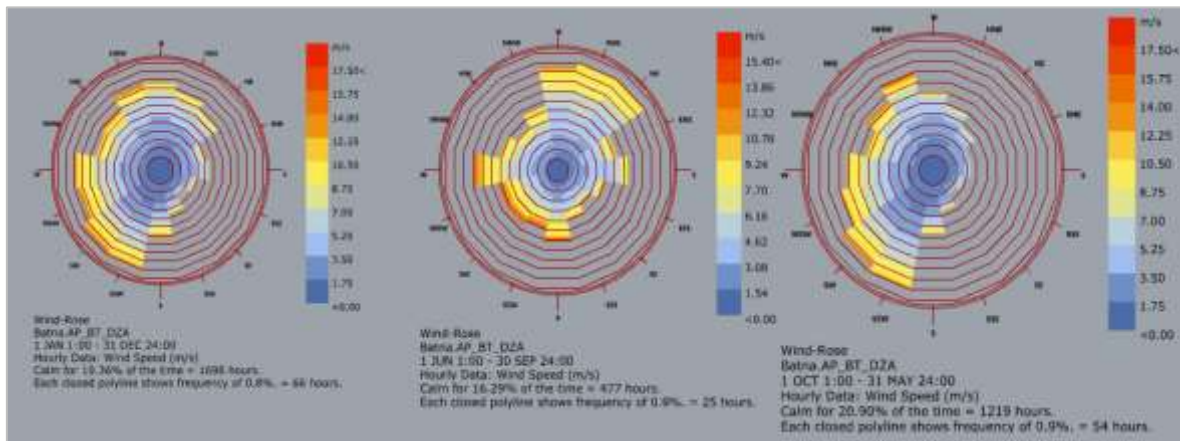


Figure 6.4. Rose des vents.
Source : Auteur (2022).

6.1.2.4. Insolation

La situation géographique de la ville de Batna lui permet de bénéficier d'ensoleillement très intense d'environ 3381,16 heures tout au long de l'année (Climate Data, 2021). Dont le rayonnement moyen mensuel minimal est égal à 166,88 Wh/m² en décembre et un autre maximal atteignant une valeur de l'ordre de 322,92 Wh/m² en juillet (Figure 6.5).

À propos du rayonnement horizontal global, la valeur minimale moyenne mensuelle est enregistrée pendant le mois de décembre, atteignant une valeur de $102,82 \text{ Wh/m}^2$, tandis que la valeur maximale moyenne mensuelle est d'ordre de $310,10 \text{ Wh/m}^2$ pendant le mois de juillet, et une valeur moyenne annuelle de $211,04 \text{ Wh/m}^2$.

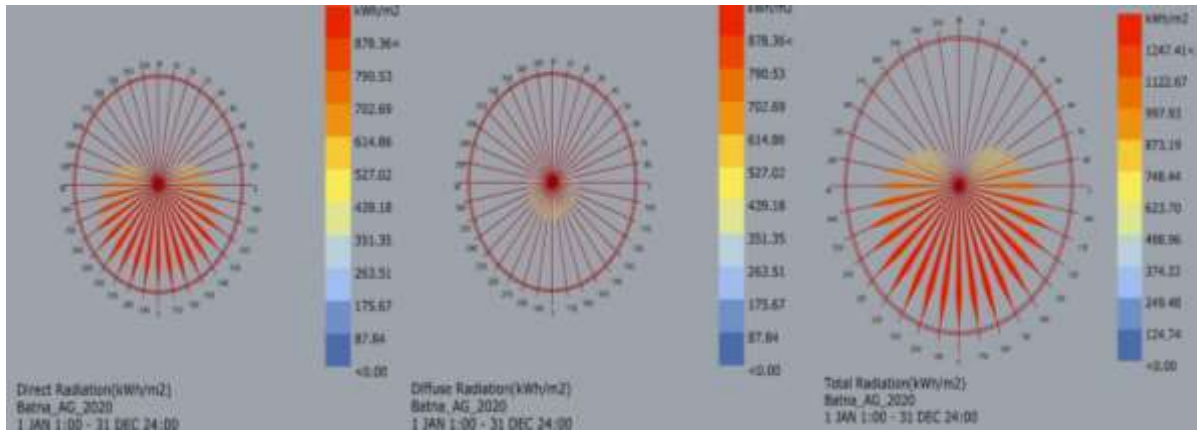


Figure 6.5. À gauche : radiation directe, au centre : radiation diffuse, à droite : radiation totale.
Source : Auteur (2022).

6.1.2.5. Précipitations

Les précipitations sont donc faibles et totalisent $26,25 \text{ mm/an}$. Les précipitations du mois de juillet, qui est le moins pluvieux, s'élèvent à 5 mm , tandis que les mois les plus pluvieux s'étalent à partir des mois de janvier, d'avril, de mai et de septembre avec des précipitations qui s'élèvent à 35 mm (Figure 6.6).

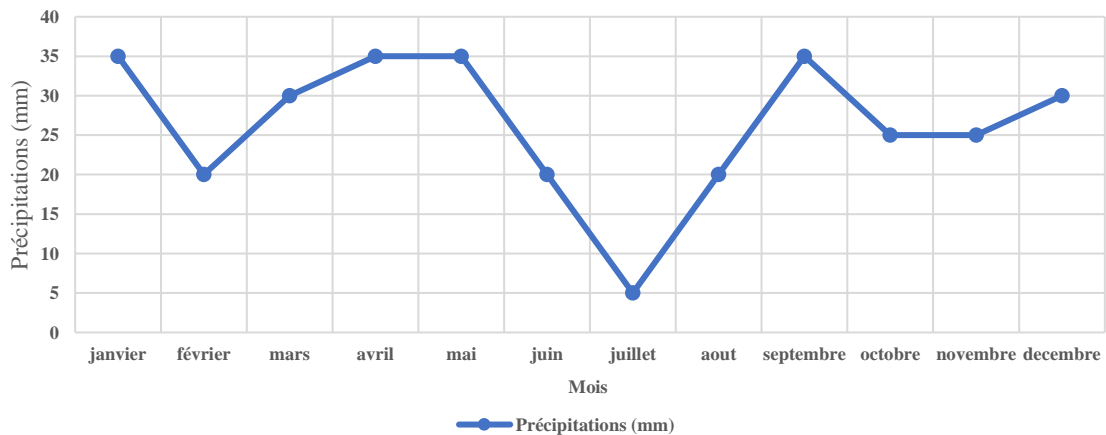


Figure 6.6. Précipitations annuelles à Batna.
Source : Climats (2020).

D'après tout ce qui a été cité précédemment, on peut conclure que Batna est définie par trois périodes différentes (Figure 6.7) :

- **La période chaude** se manifeste par une saison sèche qui s'étale sur 4 mois ; depuis le mois de juin jusqu'au mois de septembre, lorsque les températures de l'air dépassent 27°C . Dans cette région, le mois de juillet est considéré comme le mois le plus chaud. Avec une

température maximale de 41°C et une température moyenne journalière atteignant son maximum 32,75°C. De plus, le taux d'humidité relative moyen mensuel minimal est d'ordre 21.88 en juillet pendant le même mois.

- **La période froide** se manifeste de novembre à avril, incluant les mois de décembre, janvier, février et mars. Ce dernier est particulièrement marqué par une vitesse maximale des vents de 4,61 m/s. Le mois de janvier est considéré comme le plus froid, avec une température minimale moyenne journalière de 2,89°C et une température minimale moyenne mensuelle de 5,6°C. De plus, il y a eu des précipitations maximales de 35 mm et une humidité relative maximale mensuelle de 75,35%.

- **La période modérée** englobe les mois de mai et d'octobre, caractérisée par des températures maximales moyennes mensuelles de 22,55°C et de 21,05°C respectivement, et un taux d'humidité relative moyen mensuel dont l'ordre atteint de 51,78 et de 66,12% dans cet ordre.

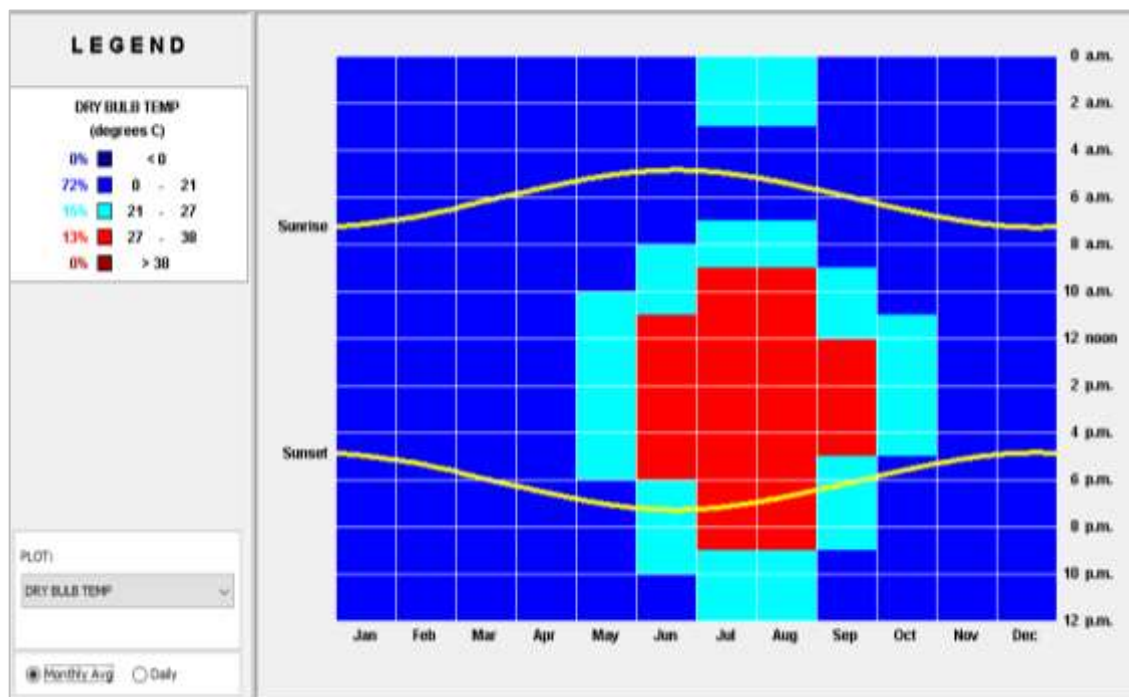


Figure 6.7. Différentes périodes thermiques à Batna.
Source : Auteur (2022).

6.1.2.6. Analyse bioclimatique de la ville de Batna

Lors de la phase conceptuelle en architecture bioclimatique, il est essentiel que les architectes soient conscients du climat de la région où ils envisagent de construire, tels que la température de l'air, l'humidité relative, l'insolation et le régime des vents. Afin de garantir une adaptabilité entre le bâtiment et son environnement, favorisant le confort, la sensation de bien-être et effectuant un compromis entre les besoins estivaux et hivernaux.

Pour cette raison, une analyse bioclimatique de Batna a été effectuée en utilisant le programme informatique graphique Climate Consultant 6.0 en fonction des données climatiques présentées en format EPW suivant ASHRAE Standard 55-2010 Adaptive Comfort Model.

Cette étude offre des informations détaillées et précises sur le climat local. Plus précisément, en examinant attentivement les résultats présentés sur le diagramme psychrométrique (Figure 6.8). Il est évident que la période de confort thermique ne représente que 14,1 % de l'année, ce qui représente 1237 heures de la demande annuelle de confort. Le Tableau 6.2 présente différentes stratégies passives et actives servant à accroître les heures de confort.

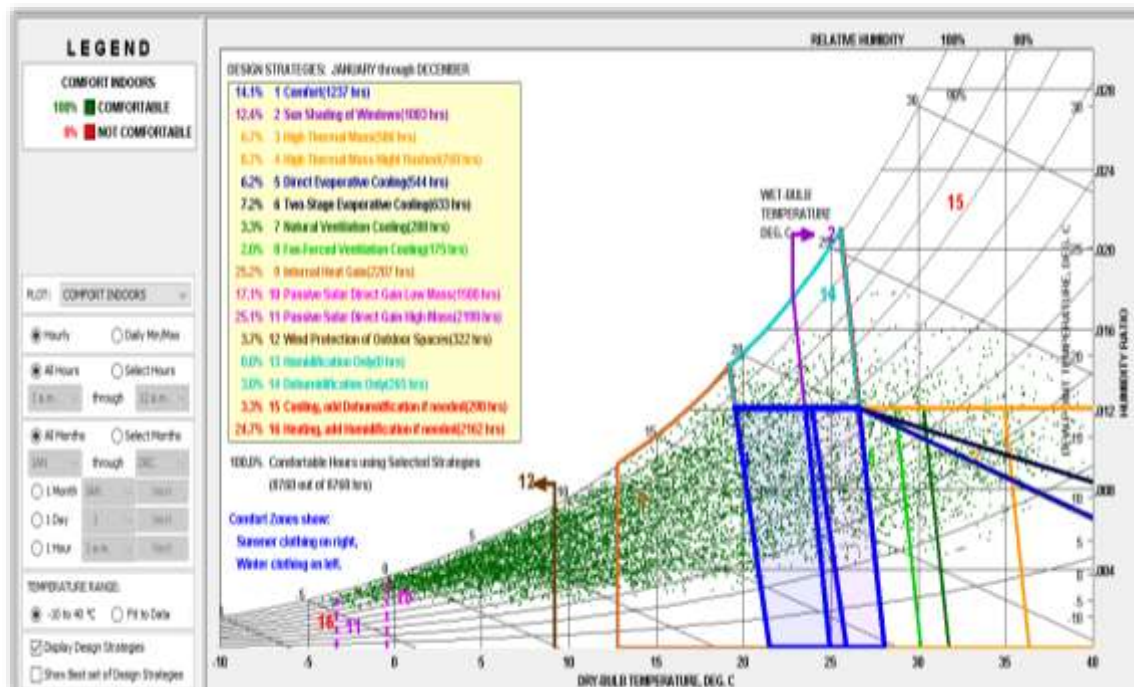


Figure 6.8. Diagramme psychrométrique de Batna.
Source : Auteur (2022).

Le climat semi-aride de la région d'étude rend difficile l'atteinte d'un confort thermique optimal tout au long de l'année, en particulier durant la période chaude. Toutefois, afin d'accroître le nombre d'heures de confort de plus 832 heures (équivalent de 9,5 % de confort supplémentaire) et de réduire la consommation énergétique pendant l'été, il est prévu d'utiliser des techniques passives pour améliorer l'ambiance thermique intérieure sans que les systèmes de refroidissement actifs soient trop utilisés.

Pour atteindre ces objectifs, les stratégies de refroidissement les plus adaptées ont été sélectionnées : le refroidissement par évaporation pour humidifier l'air et la ventilation naturelle pour renouveler l'air dans les espaces intérieurs.

Tableau 6.2. Résultats de l'analyse bioclimatique de Batna. Source : Auteur (2022).

Stratégie d'hiver			Stratégie d'été		
Besoins	Pourcentage	Durée	Besoins	Pourcentage	Durée
Gain de chaleur interne	25.2%	2207h	La protection solaire des fenêtres	12.4%	1083 h
Gain solaire passif direct à faible masse	17.1%	1500h	Masse thermique élevée	6.7%	586h
Gain solaire passif direct à masse élevée	25.1%	2 198h	Chasse nocturne à masse thermique élevée	8.7%	760h
Protection des espaces extérieurs contre le vent	3.7%	322h	Refroidissement par évaporation directe	6.2%	544h
Déshumidification uniquement	3.0%	265h	Refroidissement par évaporation en deux étapes	7.2%	633h
Refroidissement, ajout de la déshumidification si nécessaire	3.3%	290h	Ventilation naturelle	3.3%	288h
Chauffage ajouter de l'humidification si nécessaire	24.7%	2162h	Refroidissement par ventilation forcée	2.0%	175h

6.1.3. Contexte démographique, administratif et énergétique

Selon le recensement de l'année 2022, la ville de Batna est caractérisée par un taux d'urbanisation rapide, dont la population atteint 289702 habitants avec un taux d'accroissement démographique de 1,7% et une densité urbaine importante, égale à 2467habitant/km² (Municipalité de Batna, 2023).

À l'image de toutes les villes algériennes, la ville de Batna comporte un nombre important de bâtiments publics municipaux désignés comme un patrimoine communal, classés comme des biens de la commune de Batna, qui couvrent divers secteurs tels que l'administration, le commerce, l'éducation, la culture, le loisir et la santé, présentant des services pour répondre aux besoins des usagers.

Ces bâtiments sont caractérisés par leur transparence, dont leur conception basée uniquement sur l'esthétique de la façade, ignorant leur capacité à s'adapter au climat local, provoquant des apports de chaleur internes conduisant à une augmentation des températures intérieures au-delà des niveaux de confort thermique, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'ergonomie et le bien-être intérieur des occupants.

Afin de faire face à cette situation, des systèmes de climatisation sont installés sur leurs façades afin d'améliorer l'ambiance thermique interne et la perception du bien-être des utilisateurs pendant la saison estivale (Figure 6.9), ce qui a un impact négatif sur l'aspect esthétique et la lecture architecturale du bâtiment, ainsi que provoquant des émissions de fluides frigorigènes chimiques nocifs dans l'atmosphère, entraînant une augmentation de la chaleur et du CO₂ dans la ville, ce qui contribue directement

à l'effet d'îlot de chaleur urbain et contribue ainsi directement au réchauffement climatique (Meirone, 2022).



Figure 6.9. Bâtiments publics municipaux (Groupement administratif sis à Z'mala, à Batna).
Source : Auteur (2022).

Ces installations provoquent aussi une hausse de la consommation énergétique des bâtiments communaux s'élevant à 2 300 MWh/an, traduite par une facture passant de 1400000 DA en 2014 (CES-MED, 2015) à 5140000 DA en 2022, avec une augmentation des dépenses atteignant 467500 DA/an. Par conséquent, la direction des finances de la municipalité de Batna a déclaré que cette dépense aura un impact négatif sur le budget de la commune (Municipalité de Batna, 2023).

Ces bâtiments communaux font partie du patrimoine communal de Batna qui s’inscrivent dans la catégorie des bâtiments tertiaires, où la mairie de Batna est responsable du paiement de leur facture énergétique (Tableau 6.3).

Tableau 6.3. Dépense de l'énergie soumise à la charge de la mairie de Batna. Source : Auteur (2023).

N°	Types de consommateur	Montant de facture en DA		Taux de dépense en DA / an
		En 2014	En 2022	
1	Les bâtiments communaux	1 400 000,00	5 140 000,00	467 500,00
2	Ecoles primaires	10 000 000,00	25 116 735,00	1 889 591,88
3	Les mosquées	1 3000 000,00	29 368 962,00	2 046 120,25
4	L'éclairage public	45 000 000,00	139 244 280,00	11 780 535,00
5	Total	69 402 014,00	198 871 999,00	16 183 747,13

En 2015, la commune de Batna était lauréate du projet CES-MED, qui est un programme permettant de soutenir les efforts des pays du sud de la méditerranée pour favoriser le développement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables au cœur des politiques énergétique et économique. À l'horizon 2030, il est prévu de diminuer la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre en réduisant notamment la facture de consommation énergétique et en réalisant des économies de gaz et d'électricité dans les bâtiments publics, les écoles et les mosquées sur le territoire de la commune de 20%.

6.2. Présentation du cas d'étude

La présente étude a porté sur des bâtiments communaux appartenant au patrimoine communal de la commune de Batna. Le cas d'étude sélectionné est mené plus précisément sur un bâtiment public municipal, désigné comme une annexe administrative de la cité Amirouche. Cette annexe est conçue en 2014 et orientée au sud. Ce bâtiment est destiné à l'accueil du public et à offrir aux citoyens des services de prestation des papiers d'état civil afin de garantir une décentralisation des services.

Cet équipement public fait partie d'un groupement administratif sous la forme d'un secteur urbain de la cité Amirouche (Figure 6.10). Il est implanté dans une zone urbaine à caractère résidentiel. Ce secteur urbain est composé des espaces suivants : (1) une annexe administrative (cas d'étude), (2) le siège du secteur urbain, (3) le parking auto et (4) un magasin et espace technique.

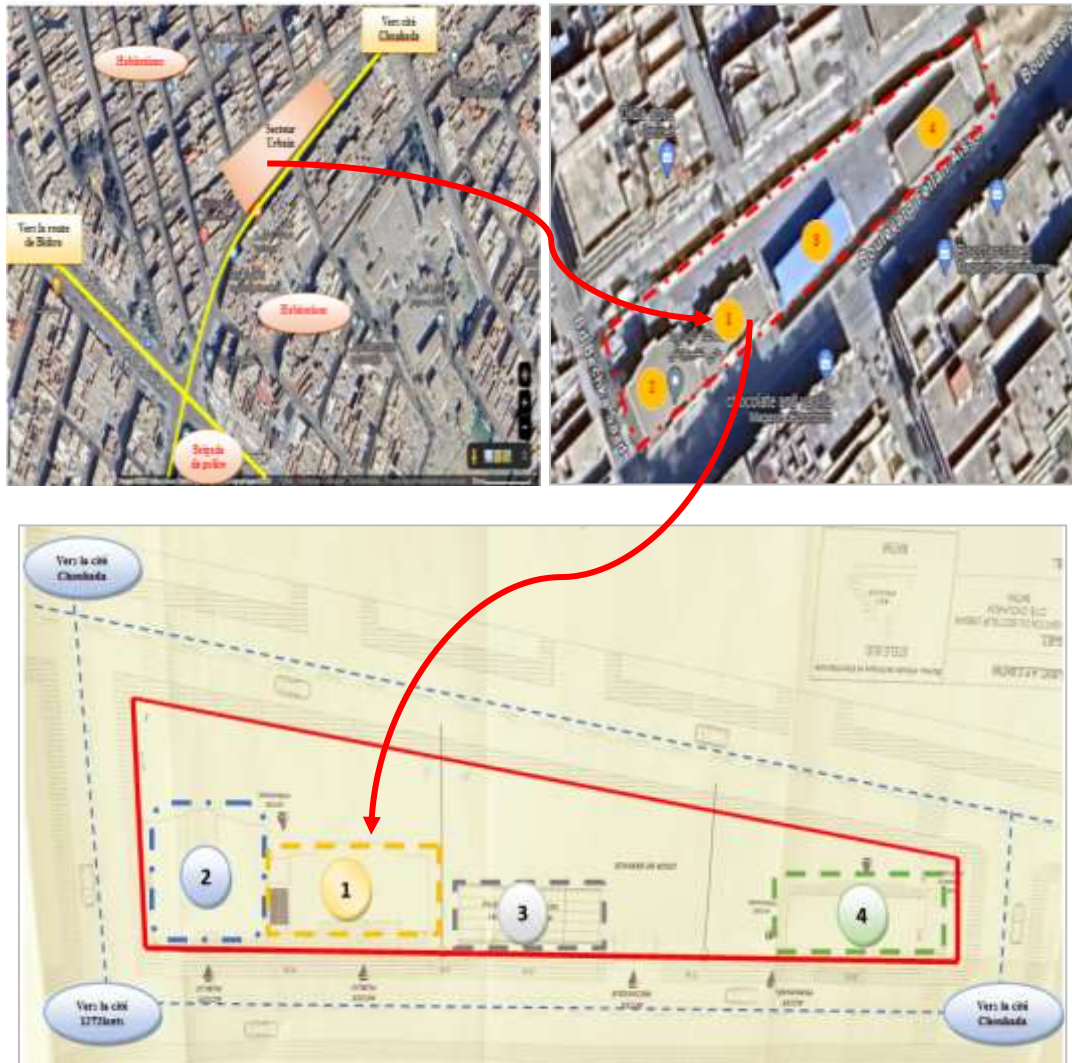


Figure 6.10. Composition du secteur urbain : (1) : Annexe administrative, (2) : Siège du secteur urbain, (3) : Parking auto, (4) : Magasin et espace technique.
Source : BET (2014).

Les informations et les données concernant cette annexe administrative ont été recueillies à partir de trois sources : les documents, les autorités locales et les visites et observations in situ qui sont présentées dans le Tableau 6.4 et la Figure 6.11.

Tableau 6.4. Fiche technique de cas d'étude. Source : Auteur (2022).

N°	Désignation	Description
01	Topographie de l'assiette	Terrain plat
02	Forme de l'assiette	Trapézoïdale
03	Surface de l'assiette	1 985.28 m ²
04	Accessibilité	Au sud : le boulevard Aissa FELLAH, menant vers le centre-ville ; A l'ouest : la voie secondaire Saad BECHKA, menant vers la cité Chouhada ; et au nord : une voie tertiaire.
05	Repères	À proximité de la brigade de police 5 ^{ème} et CEM Chikh El Tahar Messoudène (Elboustene) et le centre d'imagerie et de diagnostic sanitaire Elmoustakbal.
06	Environnement immédiat	Habitations individuelles de R+1 jusqu'au R+3.
07	Composition et hauteur	Bâtiment (1) : annexe administrative (RDC) ; Bâtiment (2) : secteur urbain (R+1) ; Bâtiment (3) : parking couvert pour les véhicules ; Bâtiment (4) : magasins et espace technique (RDC).



Figure 6.11. (a) : Secteur urbain de la cité Amirouche, (b) : Annexe administrative.
Source : BET (2014).

Ce bâtiment public est conçu selon un système portique en poteau-poutre (système traditionnel) ; il est composé de trois blocs juxtaposés (Figure 6.12). Le bloc central (B1) représente le hall d'accueil et l'espace guichet et les deux blocs latéraux, l'un est réservé au bureau du chef d'annexe (B2) et l'autre à l'espace sanitaire (B3) (Tableau 6.5). Ce bâtiment possède une touche de modernisation, marquée par l'utilisation de grands panneaux de vitrage (voir annexe B) qui donnent une attirance et une transparence au projet (Figure 6.13). Cet édifice fonctionne 5 jours successifs de la semaine de 08h00 à 16h00. La période de 12h00 à 13h00 est réservée à la pause déjeuner, donc le bâtiment sera vide et fermé (Tableau 6.6).



Figure 6.12. Annexe administrative de la cité Amirouche.
Source : Auteur (2022).



Figure 6.13. Perspectives de l'annexe : à gauche : façade sud, à droite : façade nord.
Source : BET (2014).

Tableau 6.5. Description du cas d'étude. Source : Auteur (2022).

	Descriptions		Valeur de U [W m ⁻² K ⁻¹]
Superficie du bloc B1	93.38 m ²	Superficie totale = 152,28 m ²	/
Superficie du bloc B2	29.45 m ²		
Superficie du bloc B3	29.45 m ²		
Mur extérieur	Épaisseur = 0,34 m	(0,02 m de plâtre) + (0,1 m de brique creuse) + (0,05 m lame d'air) + (0,15 m de brique creuse) + (0,02 de ciment).	0,95
	Couleur de la peinture : Beige.		
Mur intérieur	Épaisseur = 0,14 m	(0,02 m de plâtre) + (0,1 m de brique creuse) + (0,02 m de plâtre).	3,10
	Couleur de peinture	Le soubassement, de 1,20 m de hauteur, est peint en gris et le reste du mur est peint en blanc.	
Etage	Seulement le rez-de-chaussée RDC		5,63
Couleur et type de revêtement de sol	Carrelage d'une couleur marron 40X40cm.		
Toiture	Dalle en corps creux	Épaisseur = 0,16+0,04 m	4,13
Fenêtres	Simple vitrage,		5,68
CVC	Chauffage central est éteint pendant l'été ; Pas d'aération ; Climatisation éteinte lors de l'investigation in situ, comprenant : 01 unité dans le hall d'accueil, 02 unités dans l'espace guichet et 01 unité dans le bureau du chef d'annexe (B2).		
Eclairage artificiel	Plafonniers électriques de 60X60 (20 unités en B1 et 03 unités en B2) et lampes étanches (03 unités en B3).		
Equipements	En B1 : 04 ordinateurs, 04 imprimantes, 04 petits panneaux d'affichage et un grand écran d'affichage.		

Tableau 6.6. Occupation et horaires. Source : Auteur (2022).

Horaires des jours	5 jours par semaine (du dimanche jusqu'au jeudi).
Heures d'ouverture	La première tranche est de 08h00 à 12h00 ; La deuxième tranche est de 13h00 à 16h00.
Heure du déjeuner	A partir de 12h00 à 13h00 ;
Occupants	Environs 150-200 citoyens/jour + 06 personnes du personnel du bâtiment administratif ; Sexe : masculin et féminin ; Vêtements : Légers avec des couleurs claires ; Position : citoyens dans le hall d'accueil, personnel dans l'espace guichets et en B2 et B3.

Selon le recensement de la population de l'année 2022, cet immeuble est situé dans un quartier résidentiel peuplé de 48 984 habitants (Municipalité de Batna, 2023). Par conséquent, ce bâtiment est caractérisé par une fréquentation publique assez élevée, qui permet aux citoyens d'obtenir leurs papiers nécessaires. De plus, la présence d'une grande surface vitrée (Figure 6.14) avec un plus grand pourcentage de fenêtres non ouvrantes (Tableau 6.7) et l'absence de la possibilité d'accès à la ventilation naturelle, notamment dans le bloc (B1), ont conduit à l'usage excessif de la climatisation tout au long de la période de l'exploitation du bâtiment. De ce fait, la consommation d'électricité a été très prononcée en été.



Figure 6.14. Fenestration de l'annexe : (a) : fenêtres d'espace guichet, (b): fenêtres du hall d'accueil, (c): ouverture maximale des fenêtres du hall d'accueil, (d) : fenêtre du bureau chef d'annexe.
Source : Auteur (2022).

Tableau 6.7. Détails des façades. Source : Auteur (2022).

Blocs	Façade sud			Façade nord		
	Pourcentage de plein	Pourcentage d'ouverture de la fenêtre	Pourcentage de fenêtre non ouvrante	Pourcentage de plein	Pourcentage d'ouverture de la fenêtre	Pourcentage de fenêtre non ouvrante
B1	50.28%	8.19%	41.53%	52.46%	0.70%	46.84%
B2	70.67%	7.33%	22%	70.67%	7.33%	22%
B3	91.89%	2.70%	5.41%	70.67%	7.33%	22%

6.3. Déroulement de la campagne de mesure

6.3.1. Positionnement des points de mesure et matériels utilisés

Les mesures expérimentales de la présente étude ont été enregistrées pendant 5 jours consécutifs, du 24 au 28 juillet 2022 (le mois le plus chaud), à travers différents points de mesure répartis dans les blocs B1, B2 et B3 du bâtiment, de 08h00 à 16h00.

La collecte des données des paramètres physiques liés au confort thermique (Tableau 6.8) se fait à travers 11 points de mesure soigneusement sélectionnés, qui sont répartis horizontalement sur 5 axes. Le premier axe (axe 1) passe au milieu du bloc B1 et les deux autres axes (axe 2 et axe 3) sont positionnés de part et d'autre de l'axe central (axe1), dont l'axe 4 passe au milieu du bloc B2 et l'axe 5 passe au milieu du bloc B3, comme le démontre la Figure 6.15. Ces mesures sont prises à une hauteur de 1,1 mètre selon ASHRAE-55-2010, en utilisant les instruments de mesure comme illustré à la Figure 6.16, dont leur fonction et emplacement sont indiqués dans le Tableau 6.9.

Tableau 6.8. Paramètres physiques liés au confort thermique à étudier. Source : Auteur (2022).

Paramètres étudiés	À l'extérieur	À l'intérieur
	Température de l'air extérieur (°C)	Température de l'air intérieur (°C)
	Température surfacique extérieure (°C)	Température surfacique intérieure (°C)
	Humidité relative extérieure (%)	Humidité relative (%)
	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de l'air intérieur (m/s)

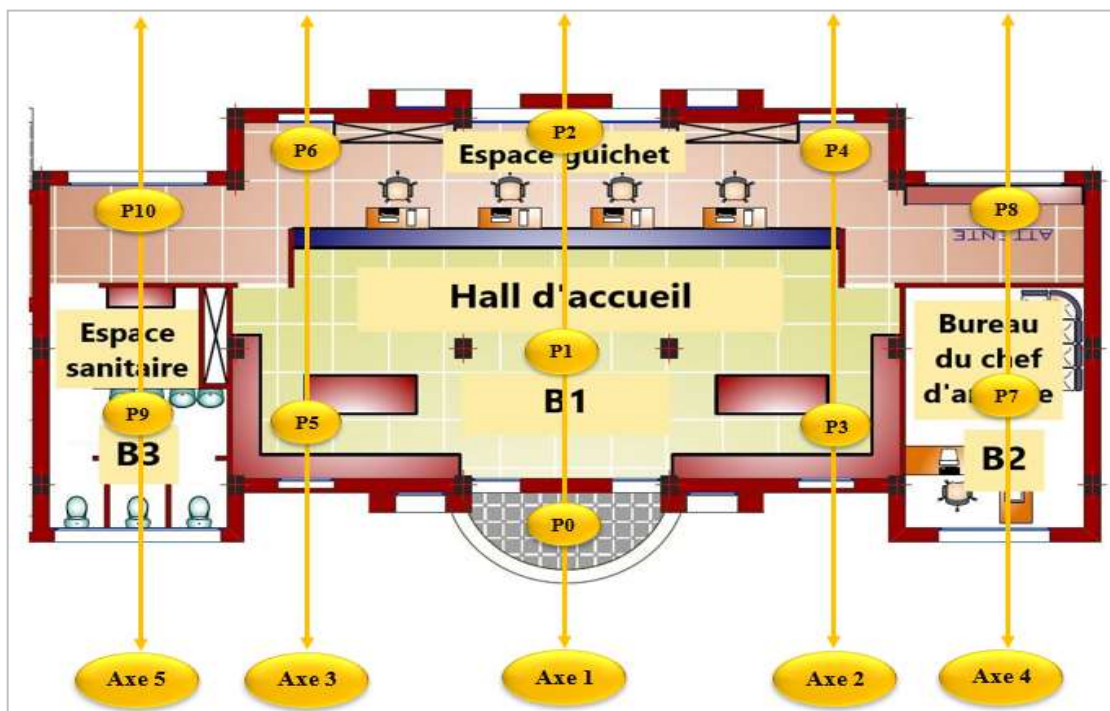


Figure 6.15. Position des points de mesure sur les axes horizontaux. Source : Auteur (2022).

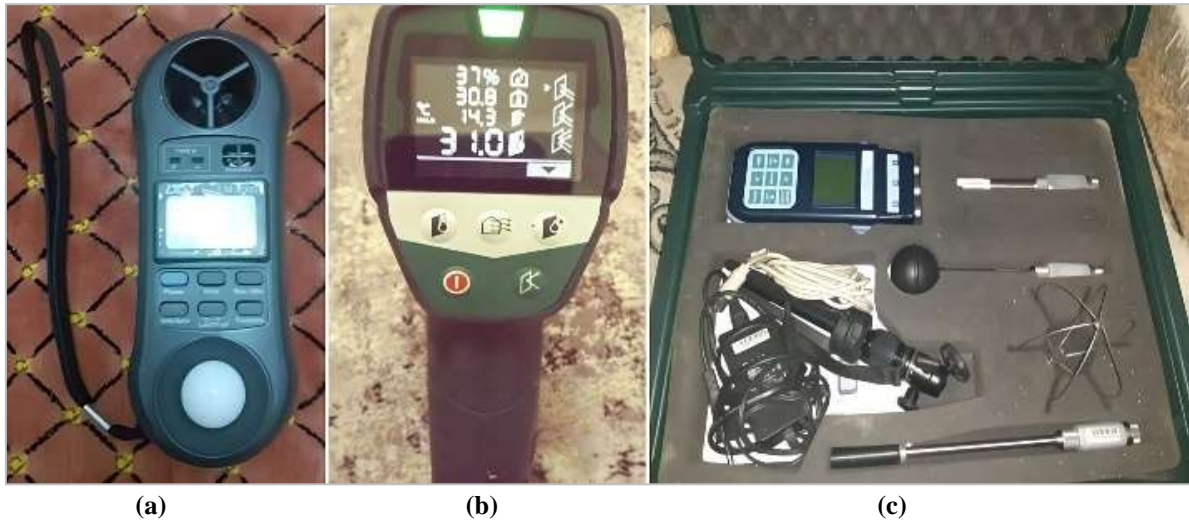


Figure 6.16. Instruments de mesure utilisés.
Source : Auteur (2022).

Tableau 6.9. Fonction et positionnement de l'instrument de mesure. Source : Auteur (2022).

N°	Désignation de l'outil	Fonction (mesure)	Position
(a)	Anémomètre LT Lutron LM-8000	Température de l'air extérieur (°C) Humidité relative extérieure (%) Vitesse du vent (m/s)	Esplanade : P0 (à l'extérieur)
(b)	Pistolet Bosch : Détecteur Thermo-hygromètre PTD1	Température de l'air intérieur (°C) Température surfacique intérieure (°C) Température surfacique extérieure (°C) Humidité relative intérieure (%)	Hall d'accueil : P3, P5 Espace guichet : P2, P4, P6. Bureau de chef de l'annexe : P7, P8 Espace sanitaire : P9, P10
(c)	Station intérieure Delta OHM	Température de l'air intérieur (°C) Humidité relative intérieure (%) Vitesse de l'air (m/s)	Hall d'accueil : P1.

6.3.2. Stratégie d'évaluation de l'ambiance thermique interne

Cette recherche repose sur une approche d'évaluation post-occupation en termes d'analyser l'ambiance thermique intérieure de l'annexe administrative sise à la cité Amirouche (Batna) pendant la période estivale chaude, manifestée au mois de juillet (mois le plus chaud), effectuée à travers deux stratégies d'enquêtes menées simultanément.

6.3.2.1. Première stratégie : c'est une **enquête quantitative et objective** utilisant une investigation in situ dans cette annexe. Cette opération est basée sur la collecte et l'analyse de données quantitatives relatives aux paramètres physiques liés au confort, obtenues de 08h00 à 16h00 pendant les 5 jours qui se suivent (du 24 au 28 juillet), mais on a choisi de présenter dans cette thèse que 3 jours, du 24 au 26 juillet 2022, à travers deux scénarios différents (Tableau 6.10). Cette enquête est suivie d'une évaluation des résultats recueillis concernant deux indices fondamentaux qui sont : le PMV-PPD issus de l'appareil de mesure Delta OHM suivant la norme ISO 7730 : 2006 standards, qui a été placé dans le point P1 situé au centre du hall d'accueil, en tant que l'espace le plus fréquenté dans cette annexe.

Ces indices sont relatifs au niveau vestimentaire moyen des usagers (vêtements saisonniers), dans notre cas, qui est égal à 0,40 Clo (Mansouri, Sriti and Guedouh, 2022) et le taux métabolique de l'ordre de 1,4 correspond à l'activité dans les bureaux selon ASHRAE 55-2010.

Tableau 6.10. Différents scénarios de la campagne de mesure. Source : Auteur (2022).

La journée	Le scénario
24 juillet 2022	Prise de mesures sans climatisation.
25 juillet 2022	Prise de mesures sans climatisation.
26 juillet 2022	Prise de mesures avec l'activation des climatiseurs

6.3.2.2. Deuxième stratégie : c'est **une enquête qualitative et subjective**, consacrée à l'interprétation des résultats des questionnaires distribués aux citoyens de différents âges qui sont positionnés à différents points pendant différentes heures ainsi qu'aux personnels de l'annexe. Dans le but d'évaluer leurs opinions, sentiments et sensations en matière de confort thermique.

Ces questionnaires ont été rédigés en deux langues (arabe et française) sous forme de questions simples, courtes, directes, précises et fermées qui sont familières à l'ensemble des répondants et qui sont élaborées selon l'échelle de ASHRAE 55-2010. Dont la première partie est consacrée à présenter des informations relatives à l'interrogé. Tandis que la dernière question est ouverte, permettant aux usagers une certaine liberté d'expression de leurs points de vue envers leurs sensations thermiques et leur permettant des propositions s'ils le veulent. La collecte des questionnaires a été faite pendant le même jour, puis on a mis en relation ces données recueillies avec les résultats objectifs obtenus.

6.4. Résultats d'investigation in situ

6.4.1. Résultats de l'enquête quantitative et objective

6.4.1.1. Évaluation de l'ambiance thermique intérieure via des paramètres physiques

Cette partie est consacrée à l'évaluation de l'ambiance thermique intérieure via l'analyse des données issues de l'investigation in situ, effectuée à travers 3 jours de prise de mesure et portant sur les paramètres physiques liés au confort thermique :

La journée du 24 juillet 2022

Cette journée est caractérisée par un ciel clair avec une température moyenne journalière de 28,96°C et une humidité relative de l'ordre de 29,38% (voir annexe B).

Température de l'air

De la lecture des graphes figurant dans la Figure 6.17.a, il a été constaté que les températures extérieures ont connu des variations progressives, allant d'un minimum de 29,4°C jusqu'à un maximum de 32,8 °C. Dont la température de l'air ambiant s'est manifestée en 3 périodes thermiques présentées comme suit :

- **La première période** se distingue durant la période matinale qui s'étale de 08h00 à 12h00, dont les profils de la température ambiante sont au-dessus de la température extérieure ainsi que supérieurs à la plage de confort, où elle dépasse les 29 °C. Ces valeurs élevées de la température ambiante sont enregistrées dans le bloc B1, notamment celles situées dans le hall d'accueil (P1, P3 et P5), dont les valeurs maximales varient entre 34,1°C, enregistrée en P5, et 33,9°C et 33,5°C prises dans les points P3 et P1 respectivement à 12h00. En revanche, les valeurs enregistrées à travers les axes 4 et 5 sont inférieures à celles des axes 1, 2 et 3, vu la surface des fenêtres et le flux de fréquentation, puisque ce sont des espaces privés.

- **La deuxième période** s'étale entre 12h00 et 14h00, qui se caractérise par une diminution de la fréquentation des citoyens, provoquant une baisse de la température de l'air, accompagnée du fait que le personnel de l'annexe éteint l'éclairage artificiel pour minimiser l'apport de chaleur interne. La température maximale est enregistrée au point P1, atteignant une valeur de 32,4 °C et 32,1 °C dans les points P3 et P5.

- **La troisième période** se détermine de 14h00 à 16h00, se caractérise par une augmentation du flux de fréquentation du public dont le pic est enregistré dans le point P5 avec une valeur de 34,9°C à 15h00, 34,3°C pour le point P3 et 33°C dans le point P1. Cette hausse considérable de la température ambiante, conduisant à des situations thermiques insupportables, est bien prononcée dans le hall d'accueil, marquée par les points P1, P3 et P5. Étant donné que les ouvertures de la façade sud ont une surface plus importante que celles de la façade nord, elles permettent une effusivité et une diffusivité élevées des rayonnements solaires à l'intérieur (Khadraoui, 2019). De plus, le flux de fréquentation de publics et leur regroupement dans les coins (P3 et P5) en attendant leurs papiers relatifs aux inscriptions des bacheliers et de dossiers de la bourse de chômage vu le rapprochement de l'annexe de la direction de l'ANEM.

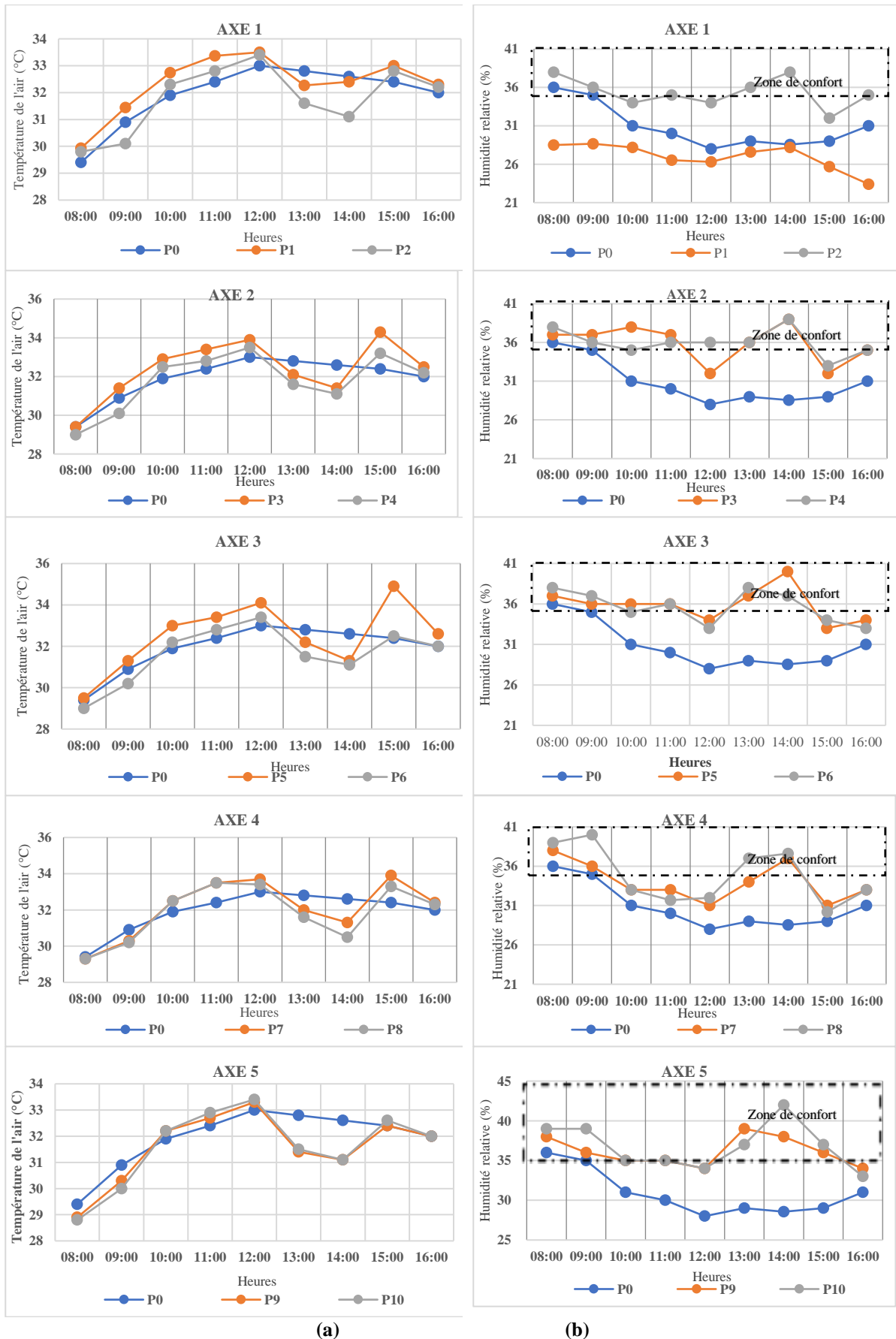
Humidité relative

Les valeurs d'humidité relative enregistrées pendant cette journée sont illustrées dans la Figure 6.17.b. Il a été constaté que les données enregistrées au point P1 se caractérisent par des valeurs minimales dont la valeur maximale atteint un pourcentage de 28,67 % à 09h00 et une valeur minimale de l'ordre de 23,40 % à 16h00.

À propos des valeurs enregistrées sur les axes 2 et 3, il a été constaté que la période qui s'étale entre 08h00 à 14h00 se trouve sur la limite inférieure de la plage de confort, y compris une chute à 12h00 avec une valeur minimale de l'ordre de 32 % qui est enregistrée dans le point P3. En revanche, la période entre 14h00 et 15h00 se caractérise par une diminution des valeurs d'humidité, où elle atteint son minimum à 15h00 avec une valeur de l'ordre de 25,68 % en P1, puis la tranche horaire qui s'étale entre 15h00 jusqu'à 16h00 se caractérise par une hausse légère avec une valeur de 35 % à P4 à 16h00.

À propos de l'axe 4 : les valeurs de P7 et P8 sont en dehors de la zone de confort, sauf que la première tranche de la journée, qui s'étale entre 08h00 et 09h00, est caractérisée par une valeur maximale atteignant 40 % enregistrée au point P8, et celle de 14h00 est de l'ordre de 37,6 % et 37 % aux points P8 et P7 respectivement. En revanche, l'axe 5 marqué par les points P9 et P10 se trouve dans la plage de confort durant la tranche horaire qui s'étale entre 08h00 jusqu'à 15h00. Ceci est justifié puisque c'est un espace humide privé qui se caractérise par une fréquentation minimale.

Ces niveaux bas d'humidité relative peuvent assécher les muqueuses des voies respiratoires, provoquer des irritations et des maux de gorge et de la fatigue, et provoquer une gêne par le dessèchement des yeux, de la peau, une accumulation d'électricité statique et affecte négativement le fonctionnement de certains équipements de bureaux tels que les imprimantes et les ordinateurs (CCOHS, 2024).



(a) (b)
Figure 6.17. Résultats du 24/07/2022, (a) : Température de l'air, (b) : Humidité relative.
 Source : Auteur (2022).

Vitesse de l'air

Les mesures de la vitesse de l'air intérieur sont effectuées via l'appareil delta OHM, positionné dans le point P1, dont les valeurs obtenues varient entre une valeur minimale de 0 m/s enregistrée à 12h00 et une valeur maximale égale à 0,09 m/s enregistrée à 16h00 (Figure 6.18). On peut conclure qu'il n'y a pas de courants d'air dans ce bâtiment.

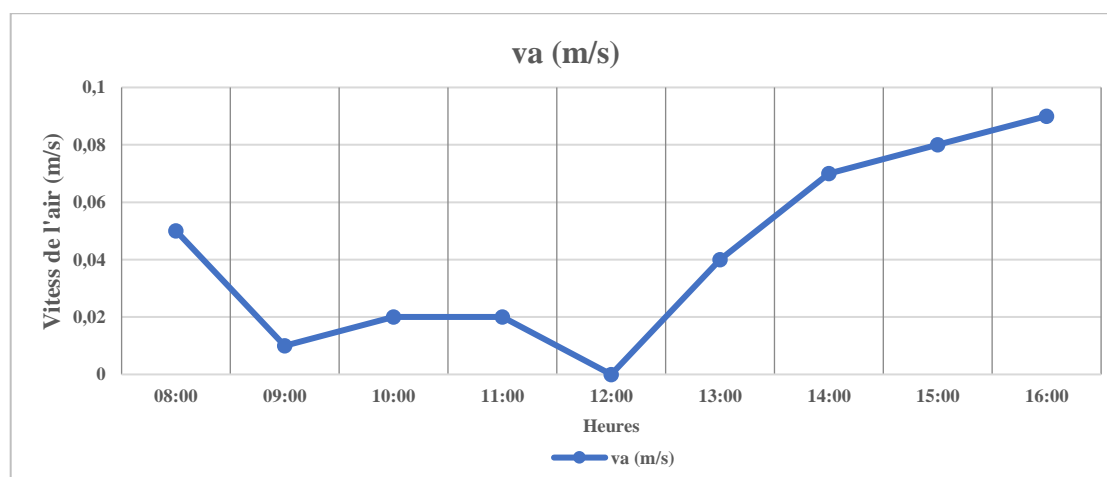


Figure 6.18. Vitesse de l'air de la journée 24/07/2022.
Source : Auteur (2022).

Cette stagnation d'air est due à l'absence de ventilation provoque le manque d'air frais, influant par la suite sur la qualité de l'air intérieur. Ceci peut entraîner une accumulation de polluants provenant de l'intérieur, provoquant le syndrome du bâtiment malsain (SBM), affectant la productivité à l'intérieur de ces espaces (Figure 6. 19).



Figure 6.19. Effet de l'absence de la ventilation.
Source : Air and Me (2024).

La journée du 25 juillet 2022

Cette journée est considérée comme la journée la plus chaude de cette période. Elle est caractérisée par un ciel clair, avec une température moyenne journalière égale à 29,21°C et une humidité relative de 30,34% (voir annexe B).

Température de l'air

La Figure 6. 20.a présente les résultats de l'investigation in situ au cours de cette journée en ce qui concerne la température de l'air. En examinant les graphiques illustrant les valeurs enregistrées dans les différents points de mesure situés sur les cinq axes. Les résultats indiquent des valeurs en dehors de la plage de confort mesurée qui a été déterminée entre [24,11°C - 28,11°C] (voir annexe B).

Ces profils se manifestent par une augmentation progressive des valeurs de température dès le début de la prise de mesure. Il a été constaté que les graphiques représentant les points P1, P3 et P5 situés dans le hall d'accueil indiquent des valeurs plus élevées, définies par un pic atteignant 33,80 °C en P1 et P3, et 33,90 °C en P5 à 15h00. En revanche, les valeurs minimales sont enregistrées dans l'espace guichet avec des valeurs atteignant 29°C enregistrées en P2 et P4, et 28,90°C en P6 à 08h00. Les valeurs enregistrées dans les axes 4 et 5 sont caractérisées par des valeurs maximales enregistrées au point P8 atteignant une valeur de 33,7°C à 15h00 et une valeur minimale de 28,80°C enregistrée au point P10 à 08h00.

Globalement, le point P1 représente des valeurs maximales par rapport aux autres points, caractérisées par une amplitude de 4,17°C et une moyenne de 32,53°C. Il est important de mentionner qu'une baisse de température a été constatée lorsque le bâtiment était hors service pour la pause déjeuner entre 12h00 et 13h00.

Humidité relative

En lisant les graphiques représentant les valeurs d'humidité relative à travers les différents points de mesure illustrés dans la Figure 6.20.b, on a observé que la matinée se trouve dans la zone de confort déterminée entre [35% - 65%]. Tandis que la période de l'après-midi en sorte. Donc, le graphique de l'axe 1 représente des valeurs minimales par rapport aux autres courbes, oscillant entre 20,40 % et 31,30 % avec une amplitude de 10,90%. De plus, les courbes représentant les axes 2 et 3 montrent des valeurs minimales qui se situent en dehors de la zone de confort, en particulier dans les points P3 et P5 durant la période d'après-midi, à l'exception de celles enregistrées à 11h00 et qui ont atteint les valeurs de 40% et 39% en P3 et P5 respectivement. Alors que les courbes représentant les points P2, P4 et P6 maintiennent le même chemin avec des valeurs quasiment similaires, la valeur maximale qui atteint 37% est enregistrée en P2 et 38 % en P4 et P6 à 11h00. Les axes 4 et 5 sont caractérisés par des valeurs maximales de l'ordre de 37% à 11h00 en P7 et minimales de 29% à 16h00 en P9.

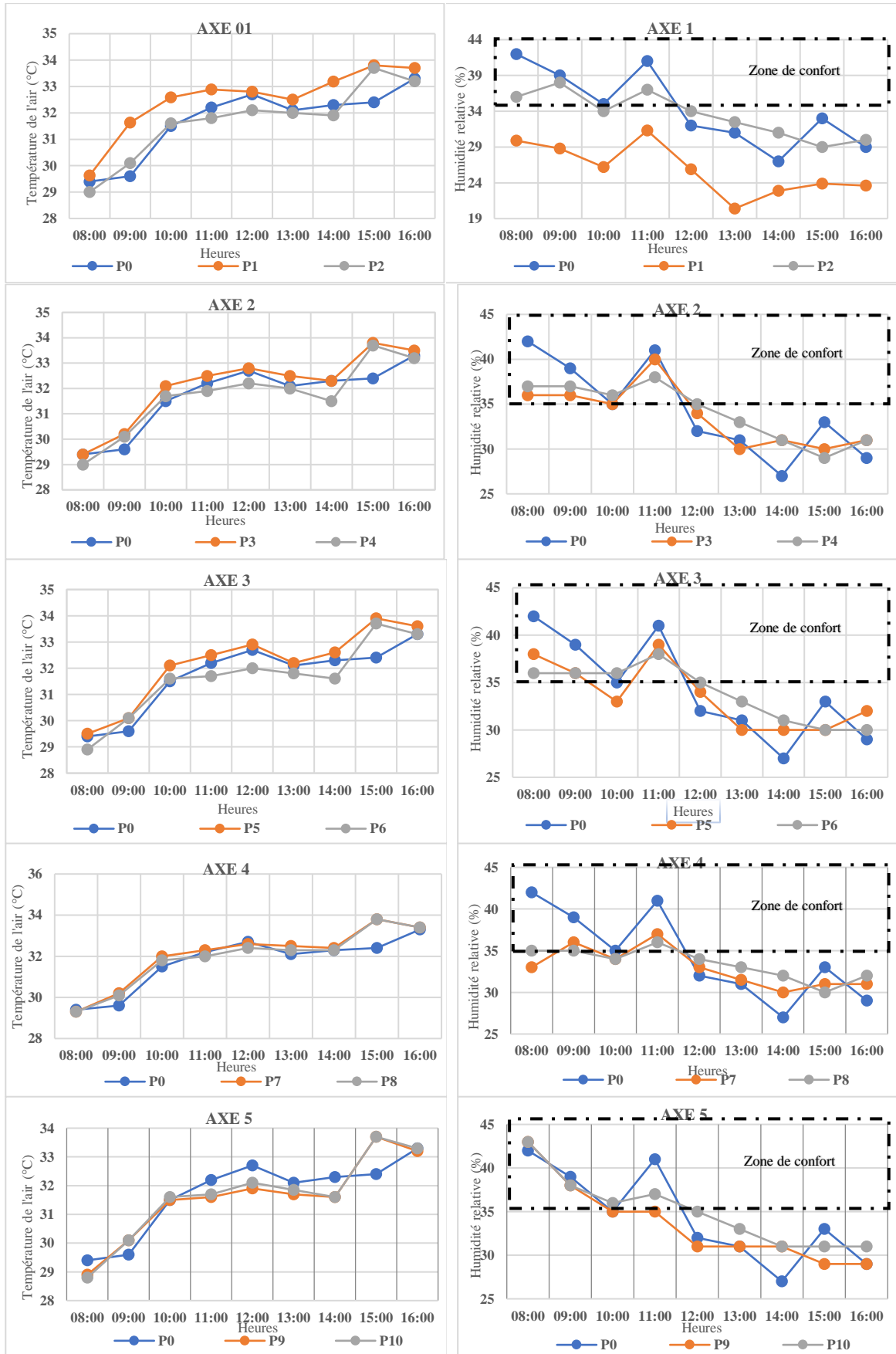


Figure 6.20. Résultats du 25/07/2022 : (a) : Température de l'air, (b) : Humidité relative.
Source : Auteur (2022).

Vitesse de l'air

Les courants d'air sont absents pendant cette journée, ce qui se traduit par des vitesses d'air faibles. La vitesse minimale atteinte est de 0 m/s à 12h00 et 16h00, tandis que la vitesse maximale est de 0,05 m/s, enregistrée à 13h00 (Figure 6.21).

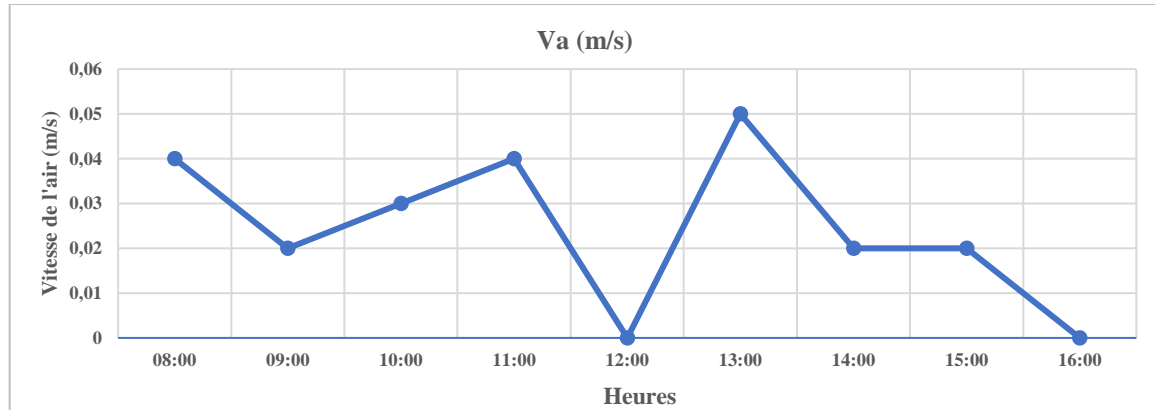


Figure 6.21. Vitesse de l'air de la journée 25/07/2022.
Source : Auteur (2022).

Les résultats des mesures effectuées au cours de cette journée ont révélé que les valeurs de température de l'air et l'humidité relative se trouvent en dehors de la zone de confort. Ils présentent une corrélation inverse entre ces deux paramètres, de sorte que les augmentations de température s'accompagnent de diminutions de l'humidité relative interne (Fekkous and Bouchahm, 2017), ce qui entraîne une surchauffe interne qui rend l'espace inconfortable, ce qui a un impact négatif sur le bien-être et le confort thermique des utilisateurs.

Ce phénomène est dû à plusieurs facteurs, tels que le type et le taux très élevé de surfaces vitrées extérieures qui affectent des apports solaires incidents, l'inertie thermique du bâtiment, l'apport de chaleur interne dégagée en raison de l'utilisation d'éclairage artificiel et l'emploi des appareils électriques internes pendant de longues heures (de 8 heures/jour) (Nait, 2011; Khadraoui, 2019). De plus, une autre cause majeure est l'absence d'accès à la ventilation, en raison de l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres des façades sud et nord, ce qui coïncide avec une forte fréquentation du public.

Afin de résoudre ces problèmes, il est recommandé de faire un recours vers une ventilation naturelle comme moyen de refroidissement pour créer un environnement naturel sain et atteindre des niveaux de confort thermique acceptables (Elghawaby, 2010, 2013).

La journée du 26 juillet 2022

Cette journée est marquée par un ciel clair (journée ensoleillée) avec une température moyenne journalière de 29,71°C et une humidité relative de l'ordre de 13,66% (voir annexe B). Dans le cadre d'effectuer le scénario 2 (Tableau 6.11), la prise de mesures durant cette

journée est manifestée par la mise en marche des climatiseurs, qui sont répartis dans divers endroits, comme le montre la Figure 6.22.

Tableau 6.11. Calendrier de la mise en marche des climatiseurs. Source : Auteur (2022).

Position des climatiseurs	La durée de leur mise en marche
P4, P6 et P7	De 08h00 à 16h00
P5	De 13h00 à 16h00

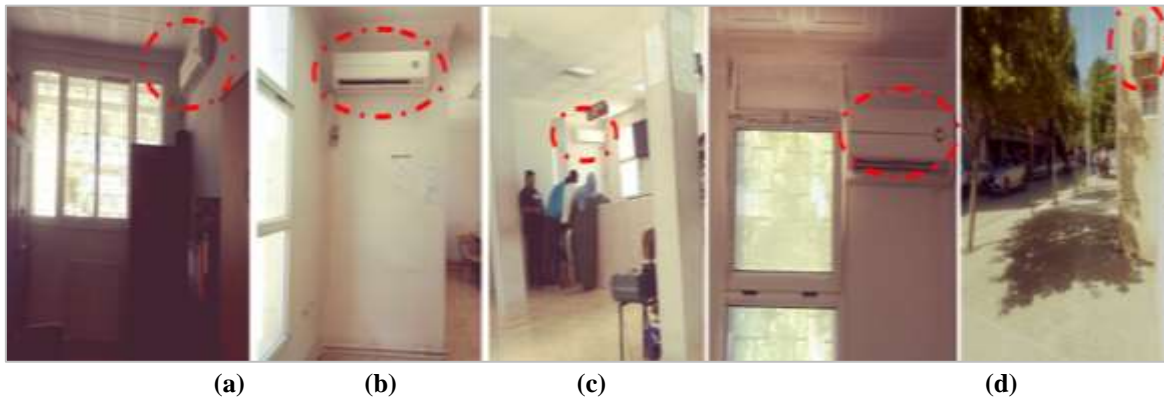


Figure 6.22: Emplacement des climatiseurs dans l'annexe administrative, (a): P7, (b): P4, (c): P6 et (d): P5. Source : Auteur (2022).

Température de l'air : la Figure 6.23.a illustre les résultats de la température de l'air durant cette journée. Les graphiques représentant les valeurs enregistrées dans les points de mesure qui se trouvent dans le bloc B1, notamment dans l'espace hall d'accueil (P1, P3 et P5), se trouvent en dehors de la zone de confort et au-dessus de la courbe de la température de l'air extérieur et même celle de l'espace guichet, malgré l'activation de la climatisation. Les valeurs maximales enregistrées à 14h00 sont de l'ordre de 34,1°C, 33,9°C et 33,60°C enregistrées dans P5, P3 et P1 respectivement. L'espace guichet est manifesté par des températures similaires, avec un écart maximal de température atteignant 1°C entre les points P1 et P2 enregistré à 10h00. À propos, les valeurs enregistrées aux points situés sur les axes 4 et 5 se rapprochent de celles de l'extérieur. Les valeurs maximales sont enregistrées dans les points P7 et P9 à 14h00 avec des valeurs de 33,8°C et 33,5°C respectivement et des valeurs minimales de 30,1°C au point P10.

Humidité relative : la Figure 6.23.b présente les résultats d'humidité relative. Il a été constaté que quasiment les valeurs enregistrées sont toutes en dehors de la zone de confort, dont la valeur minimale est enregistrée dans le point P1 est de l'ordre de 17,10% et P7 avec une valeur de 28% à 15h00 et une valeur maximale atteignant 39% à 08h00 en P9. Ceci est justifié par le fait que la climatisation agissant comme déshumidificateur (Leboué, 2021). Donc, malgré l'activation de la climatisation, les résultats indiquent une surchauffe interne. Cela s'explique par l'apport thermique interne et externe et le manque de la ventilation naturelle.

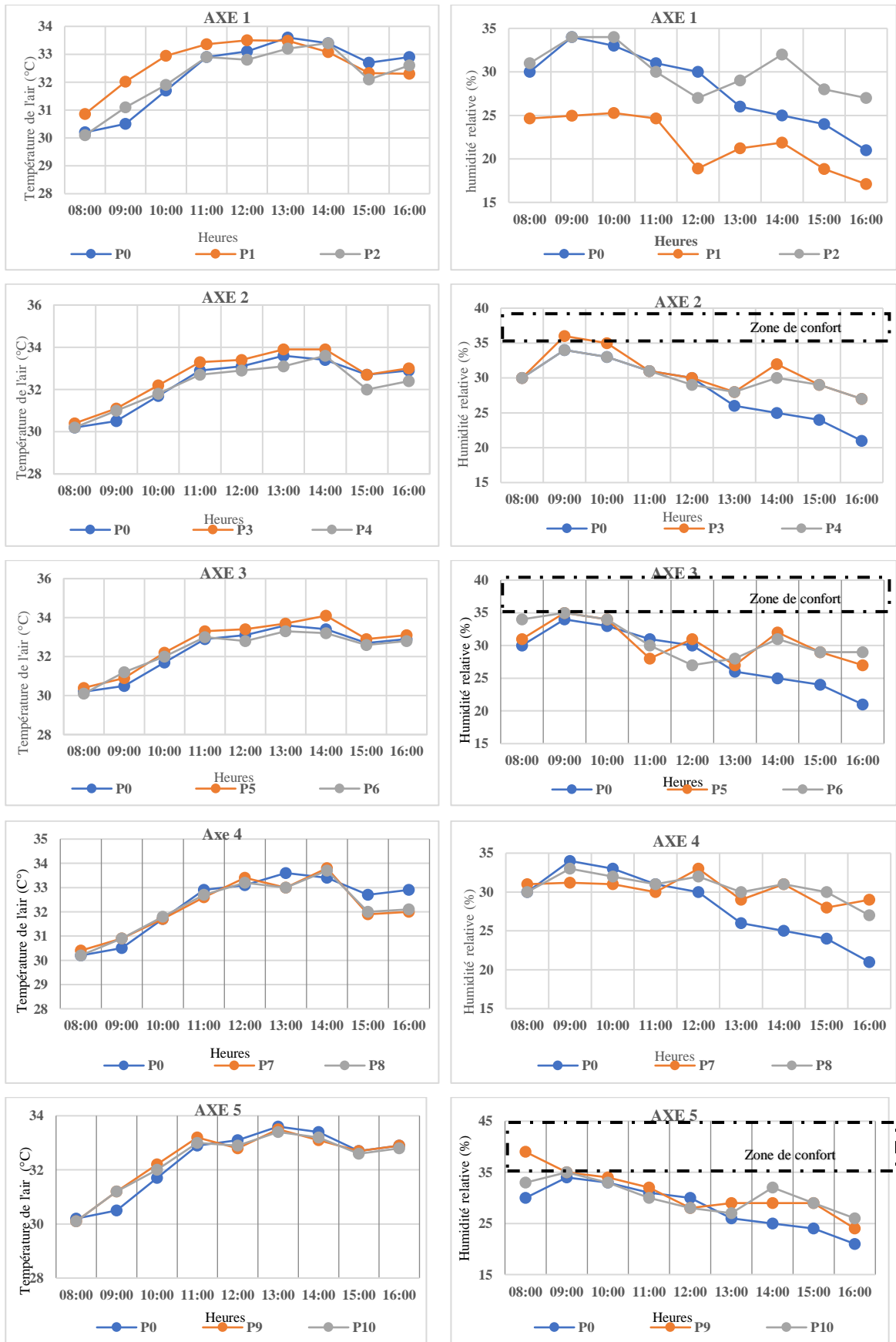


Figure 6.23. Résultats du 26/07/2022 : (a) : Température de l'air, (2) : Humidité relative.
Source : Auteur (2022).

Vitesse de l'air

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de renouvellement d'air, avec des valeurs allant de 0,03 m/s à 0,04 m/s, avec une valeur minimale de 0,01 m/s enregistrée à 16h00 (Figure 6.24).

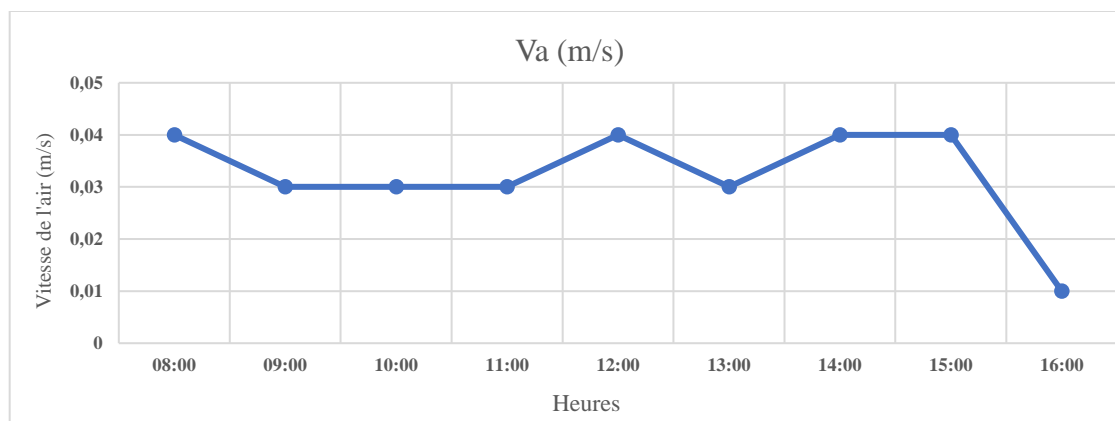


Figure 6.24. Vitesse de l'air de la journée 26/07/2022.
Source : Auteur (2022).

5.4.1.2. Évaluation de l'ambiance thermique intérieure via les indices PMV et PPD


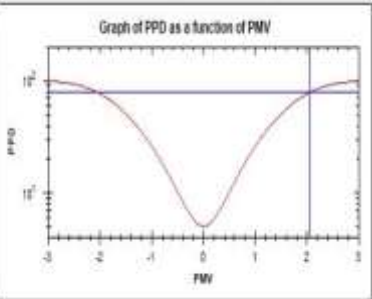

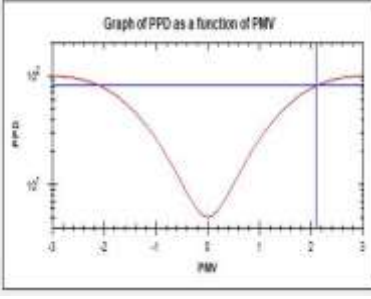

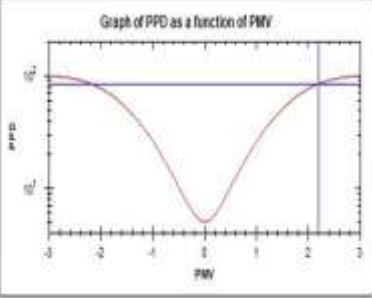

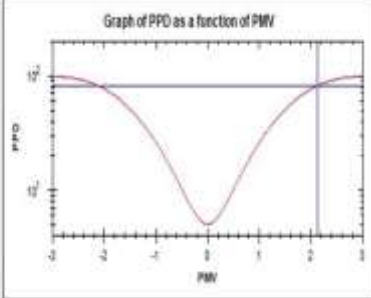

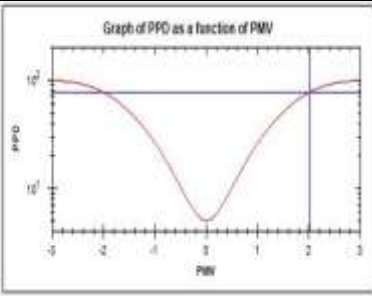

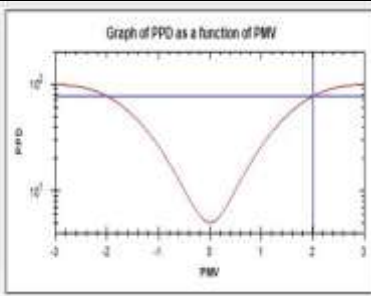
L'appareil Delta OHM, basé sur la norme ISO 7730 :2006 standards, est installé dans le hall d'accueil et sert à indiquer d'autres indicateurs permettant d'évaluer l'ambiance thermique intérieure, présentés sous forme d'indices PMV-PPD, consacrés à évaluer la satisfaction des occupants dans un espace en termes de confort thermique.

Le Tableau 6.12 présente les résultats de ces indices enregistrés durant les trois jours d'expérimentation conformément à l'ordre de passage.

D'une part, les résultats obtenus lors de la matinée montrent une variabilité pour le PMV_1 de +2,03 ; +2,19 et +1,99 ; ce qui correspond à un PPD_1 de 77,07%, 83,54% et 75,52%. D'autre part, durant l'après-midi, avec des PMV_2 de +2,1 ; +2,12 et +2,01 ; cela entraîne un PPD_2 de 81% ; 81,08% et 76,44%.

Ces valeurs obtenues indiquent des hausses considérables de température, qui se trouvent en dehors de la zone de confort durant la période d'investigation dans cette annexe. Donc, il est évident que la majorité des occupants perçoivent une ambiance thermique chaude et inconfortable, ce qui entraîne une sensation d'insatisfaction. Cette perception est amplifiée par le rayonnement solaire à travers les grandes surfaces vitrées, combiné à l'absence d'accès à la ventilation et à la forte fréquentation des citoyens, qui amplifie la sensation de surchauffe. Cette situation met en évidence l'importance de mettre en place une réhabilitation thermique afin d'améliorer les conditions thermiques intérieures.

Tableau 6.12. Résultats des indices de confort thermique PMV-PPD des 3 jours. Source : Auteur (2022).

Jour	08h00- 12h00		13h00-16h00	
	PMV ₁ = 2,03 et PPD ₁ = 77,07%		PMV ₂ = 2,1 et PPD ₂ :81%	
1 ^{ère} journée :24/07/2022				
	PMV ₁ = 2,19 et PPD ₁ = 83,54%		PMV ₂ = 2,12 et PPD ₂ = 81,08%	
2 ^{ème} journée : 25/07/2022				
	PMV ₁ = 1,99 et PPD ₁ = 75,52%		PMV ₁ = 2,01 et PPD ₁ = 76,44%	
3 ^{ème} journée :26/07/2022				

6.4.2. Résultats de l'enquête qualitative et subjective

En vue d'approfondir et de consolider notre investigation scientifique, une analyse qualitative et subjective est effectuée lors de la prise de mesures des paramètres physiques liés au confort thermique, afin d'analyser la perception du bien-être lié au confort thermique en examinant les résultats des questionnaires distribués aux occupants de l'annexe administrative.

6.4.2.1. Évaluation de l'ambiance thermique intérieure à travers des paramètres subjectifs

Ces paramètres subjectifs sont interprétés sous forme de questionnaires élaborés selon l'échelle d'ASHRAE pour évaluer la perception des usagers pendant une période caniculaire correspondant au mois le plus chaud de la région (voir annexe B). Donc, 150 questionnaires ont été distribués aux individus trouvés dans l'annexe, qu'ils soient citoyens ou employés, placés dans les différents endroits de l'annexe. Après avoir collecté et traité les questionnaires, nous avons obtenu seulement 120 questionnaires qui sont fiables pour l'analyse, dont 30 questionnaires ont été annulés car ils sont incomplets ou mal remplis (Tableau 6.13).

Tableau 6.13. Informations des personnes interrogées. Source : Auteur (2022).

Paramètres	Informations
Nombre des personnes interrogées	120 personnes
Âge	Moyenne de 33 ans
Sexe	Hommes et femmes
Nature	Varie entre (Citoyens/personnels)
Niveau éducatif	Varie (tous les niveaux)
Habillement	Léger avec des couleurs claires
Arrivée	A pieds, via bus ou véhicule personnel
Heure de réponse au questionnaire	Différentes heures de 08h 00 à 16h00
Durée de présence dans l'annexe	Variée
Position	Hall d'accueil / guichet

Suite à l'analyse des données provenant des questionnaires, les résultats des opinions subjectives concernant la perception des occupants sont présentés sous forme de graphiques à colonnes superposées comme suit :

Evaluation de la perception de la température de l'air

La Figure 6.25 présente les résultats des opinions subjectives concernant la perception de la température de l'air ambiant. Elle montre que la majorité des personnes interrogées ont ressenti un malaise et une situation désagréable causée par des températures élevées de l'air. Cela se traduit par des pourcentages élevés de 20% à 30% qui indiquent une sensation thermique très chaude, tandis que de 35% à 40% représentent une perception

chaude. Où la 2^{ème} journée révèle le pourcentage le plus élevé. De plus, on observe une situation neutre et acceptable (Ni chaud ni froid) avec un taux maximal de 15% lors de la troisième journée, marquée par l'activation de la climatisation.

À cet effet, 25% et 32,5% de l'ensemble des personnes interrogées ont considéré leur situation thermique dans cet édifice comme très inacceptable, 42,5% comme inacceptable et 30% comme légèrement acceptable. Ceci indique que la plupart des usagers sont insatisfaits vis-à-vis des ambiances thermiques pendant les 03 jours d'expérimentation.

Cette sensation est liée à la grande surface vitrée, à l'apport de chaleur externe (Tahri, 2018), à l'absence de la ventilation naturelle, à l'inertie thermique du bâtiment, à l'apport de chaleur interne par l'utilisation d'éclairage artificiel et d'équipements électriques ; tout cela s'accompagne d'une fréquentation élevée du public et de leur taux métabolique élevé.

Ces facteurs provoquent des hausses de température, ce qui se manifeste par une surchauffe interne, où les températures dépassent la plage de confort, surtout pendant l'après-midi, ce qui rend l'annexe extrêmement inconfortable. Cela a un effet néfaste sur le fonctionnement de l'annexe et entraîne une utilisation excessive de la climatisation mécanique, ce qui entraîne une consommation électrique considérable.

Face à cette situation critique, les usagers ont exprimé leur désir d'obtenir une ambiance thermique plus appropriée en favorisant beaucoup plus de fraîcheur pour la 2^{ème} journée (30%), plus de fraîcheur pour la 1^{ière} journée et 2^{ème} journée (37,5%), un peu plus froid à l'intérieur de l'annexe pour la 3^{ème} journée (37,5%).

Dans cette perspective, et dans le but d'obtenir une situation thermique favorable, les personnes interrogées ont voté pour une solution appropriée afin de faire face à l'inconfort. Les résultats indiquent un pourcentage élevé reflétant la préférence des occupants de rester proches des climatiseurs, avec un pourcentage maximal qui varie entre 35 %, 45 % et 50 % pour la 2^{ème}, 1^{ière}, et 3^{ème} journée, et des pourcentages de l'ordre de 25%, 27,5 % et 42,5 % pour une solution de rester proches de la porte d'entrée caractérisée par la présence d'un arbre qui donne de l'ombre sur l'esplanade d'accès. Tandis que le reste des occupants préfère rester proche de la fenêtre ouverte ou dans l'espace d'attente.

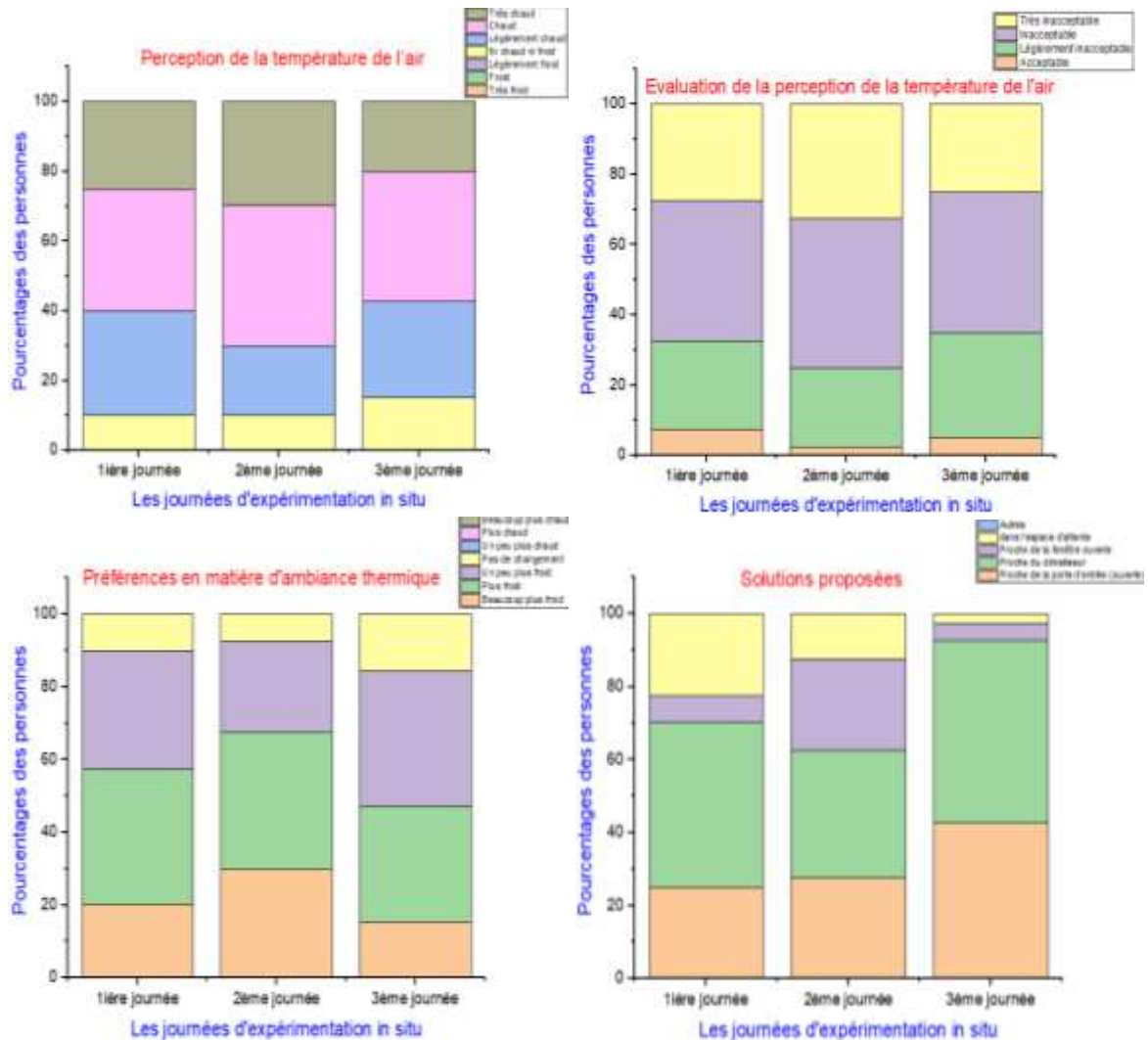


Figure 6.25. Résultats d'évaluation de la perception de la température de l'air. Source : Auteur (2022).

Evaluation de la perception d'humidité

Les résultats des opinions subjectives concernant la perception d'humidité sont exposés dans la Figure 6.26.

Les répondants ont donné un taux élevé de votes dans les catégories d'une perception légèrement sèche, avec des pourcentages de 27,5% ; 37,5% et 40% selon l'ordre de succession des jours. Toutefois, la seconde catégorie se situe dans la catégorie neutre (ni sec ni humide) avec un pourcentage maximal enregistré pendant la 1^{ère} journée de 42,5%, tandis que les autres sont classés dans la catégorie de perception sèche de 35% en 2^{ème} journée et très sèche de 2,5% en 3^{ème} journée. Cette dernière est causée par l'utilisation de la climatisation, qui a un effet négatif sur la diminution de l'humidité à l'intérieur de l'espace.

Les occupants estiment que cette situation est légèrement inacceptable, avec un pourcentage élevé de 45% lors de la 3^{ème} journée et un pourcentage variant entre 37,5% et 40%, ce qui indique que les occupants se sentaient à l'aise et acceptaient mieux la variation

des niveaux d'humidité, reflétant une sensation acceptable durant la 1^{ère} et 2^{ème} journée. Dans cette optique, ils ont suggéré d'opter pour une ambiance un peu plus humide avec un pourcentage maximal de l'ordre de 55%, 52,5% et 50% en 3^{ème}, 2^{ème}, et 1^{ère} journée.

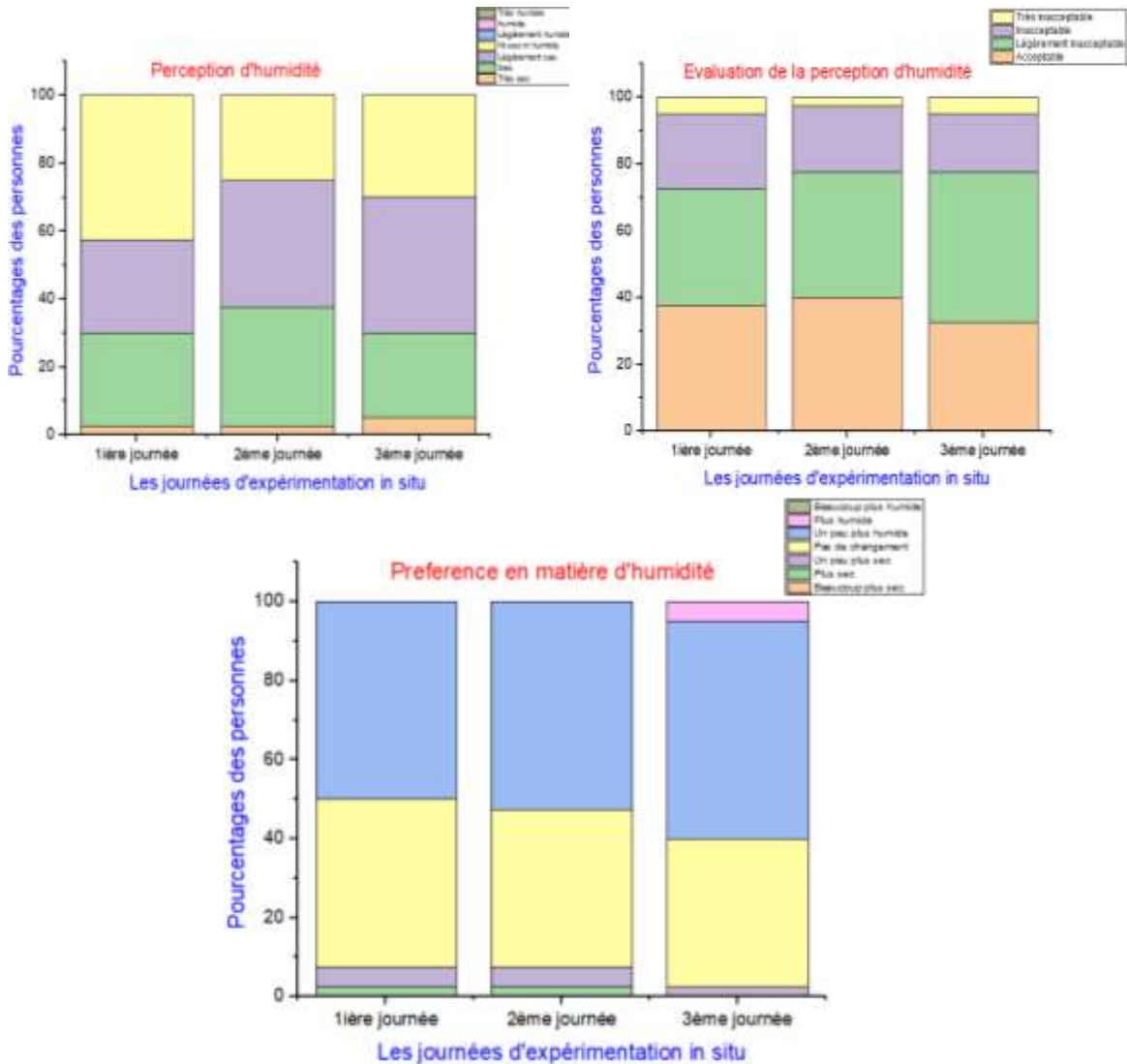


Figure 6.26. Résultats d'évaluation de la perception d'humidité.
Source : Auteur (2022).

Evaluation de la perception de vitesse de l'air

Les graphiques de la Figure 6.27, présentent les résultats des réponses subjectives en matière de sensation de vitesse de l'air.

La majorité des personnes interrogées indiquent que la vitesse de l'air à l'intérieur de cette annexe durant la période de prise de mesures, est un air calme exprimé par des pourcentages variants entre 40% - 45%. En deuxième place, on trouve les personnes qui indiquent que c'est un air léger 30% -35% et en dernière position, le considèrent comme un air moyen 22.5% -30%. Ceci est justifié par le manque de ventilation entre les deux façades, la présence des citoyens en grand nombre avec une moyenne de plus de 25 personnes/heure.

Devant cette situation, ils ont jugé qu'elle était inacceptable et ont exprimé leur opinion à travers des pourcentages de 30%, 32,5% et 45%, avec une légère inacceptabilité de 30% pour les 3 jours. Pour apporter des améliorations, les occupants ont suggéré d'ajouter un peu plus de mouvements d'air, avec des pourcentages de votes variant entre 25% et 45%, et plus de mouvements de 10% à 30%.

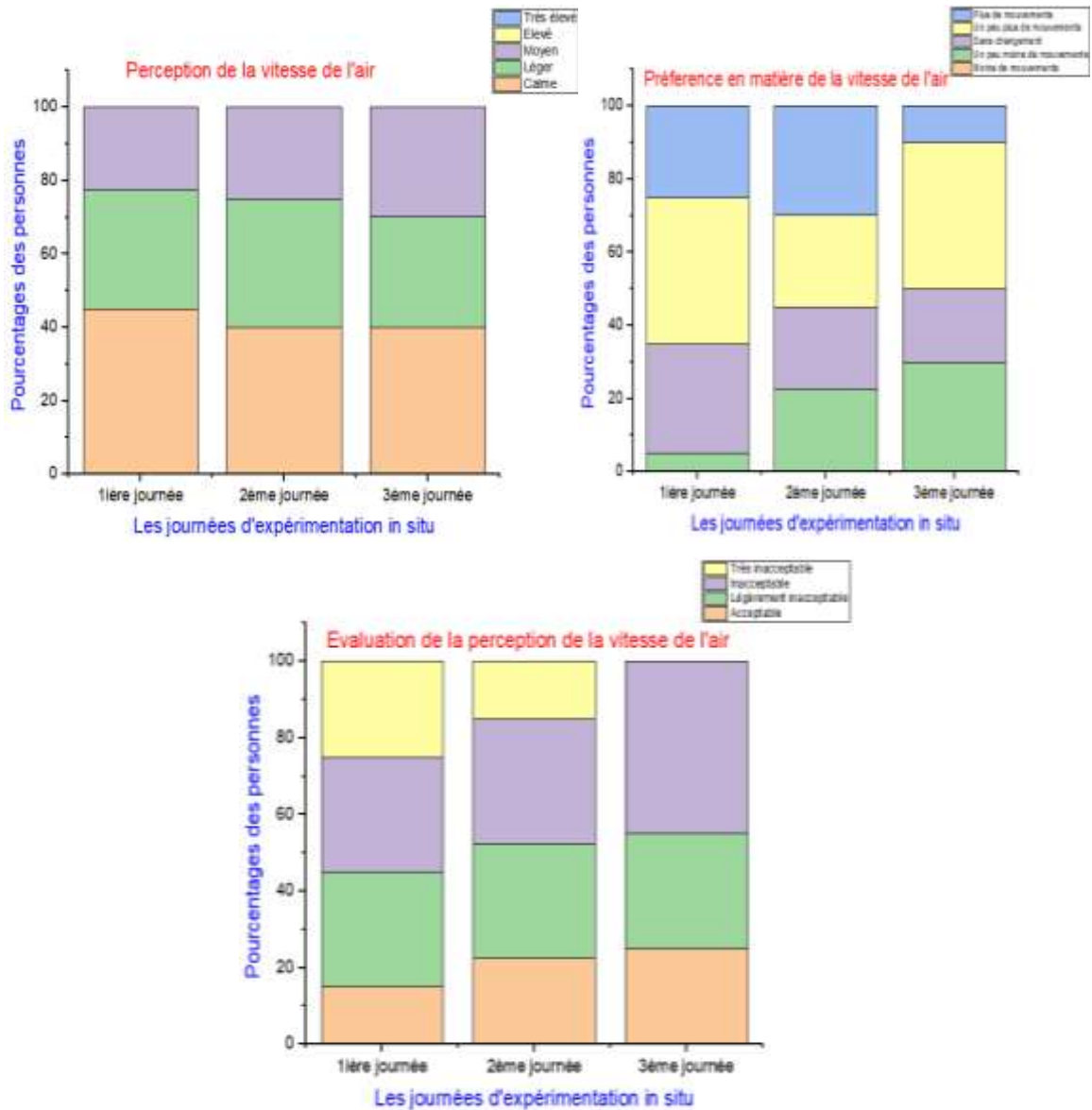


Figure 6.27. Résultats d'évaluation de la perception de la vitesse de l'air.
Source : Auteur (2022).

Evaluation de la perception d'ensoleillement

Quasiment des occupants : 50%, 55% et 75% pour la 3^{ème}, 2^{ème} et 1^{ère} journée, indiquant que l'ensoleillement, défini par la pénétration des rayons solaires à l'intérieur, présente une source gênante aux occupants lorsqu'ils attendent la prestation de leurs papiers. Ceci, selon eux, provoque un effet de serre à l'intérieur avec un pourcentage de 40% - 60% et un apport solaire direct entre 36% - 60%. Ce qui poussent souvent les occupants à sortir à

l'extérieur de l'annexe pour profiter de l'ombre de l'arbre situé à l'entrée de l'annexe (Figure 6.28).

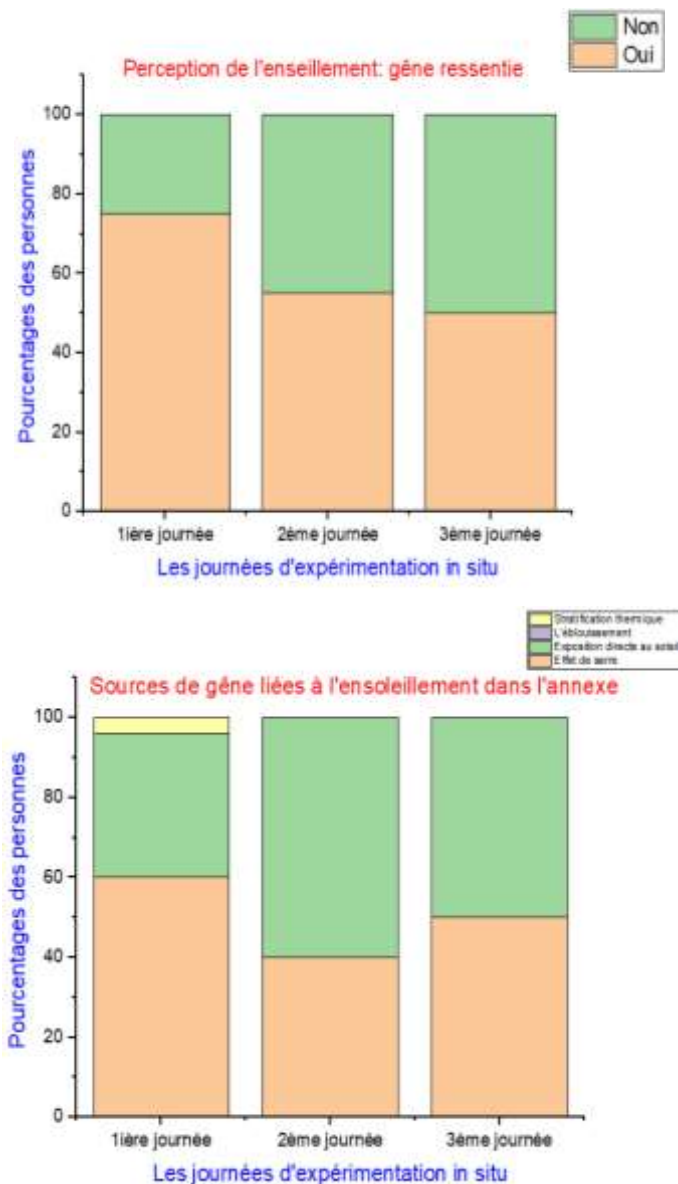


Figure 6. 28. Résultats d'évaluation de la perception d'enseillement.
Source : Auteur (2022).

Dans le but de répondre aux besoins des usagers, on a mis parmi les éléments du questionnaire une question ouverte pour exprimer leurs situations souhaitées et donner des suggestions pour changer leurs environnements thermiques afin d'avoir une ambiance thermique interne adéquate. Les propositions sont les suivantes :

- Rester proches des climatiseurs ou des impostes ouvertes et de la porte d'entrée afin d'avoir de l'air frais ;
- L'ajout d'autres climatiseurs de grande capacité avec un bon positionnement dans des endroits bien précis ;

- Favoriser une ventilation naturelle transversale via la capacité d'ouvrir plus de fenêtres.

On a observé que les utilisateurs qui ont une réflexion axée sur l'utilisation des moyens électriques énergivores qui ont un effet rapide sur le rafraîchissement de l'espace intérieur ne prennent pas en compte leur impact négatif sur la santé et sur l'environnement et ne pensent pas à utiliser d'autres méthodes moins énergivores, durables et respectueuses de l'environnement.

Conclusion

Le présent chapitre a mené à une évaluation post-occupation des performances thermiques d'une annexe administrative située dans la ville de Batna (climat semi-aride), déterminée comme un bâtiment municipal faisant partie du patrimoine communal. Elle est caractérisée par une grande surface vitrée et le manque d'accès à la ventilation naturelle.

Cette évaluation repose sur une investigation in situ, effectuée pendant trois jours successifs durant le mois de juillet considéré comme le mois le plus chaud de l'année durant la tranche horaire 08h00 à 16h00, comprenant une forte fréquentation publique.

À cet égard, ce chapitre est basé sur deux types d'enquête, d'une part, une enquête quantitative et objective sous forme d'une campagne de mesures des paramètres physiques liés au confort thermique à différents points répartis le long de 5 axes répartis à travers les blocs : B1, B2 et B3. Et d'autre part, une enquête qualitative et subjective effectuée via des questionnaires élaborés selon l'échelle ASHRAE pour évaluer subjectivement la sensation des usagers. Les principaux résultats sont résumés comme suit :

- Une augmentation de la température de l'air intérieur qui sort en dehors de la zone de confort durant la période de fonctionnement du bâtiment, en particulier celle de l'après-midi.
- En conséquence, une surchauffe intérieure rend l'espace inconfortable, ce qui a un impact négatif sur la perception du bien-être, l'ergonomie et le déroulement de l'activité administrative et provoque une utilisation excessive de la climatisation mécanique entraînant une consommation électrique très élevée.

Pour faire face à cette situation, le chapitre suivant sert à présenter une réhabilitation thermique de cette annexe, via une enveloppe adaptative. Afin d'augmenter les heures du confort thermique intérieur, en améliorant l'ambiance thermique interne en favorisant moins de consommation d'énergie, durable et sans empreinte environnementale.

CHAPITRE VII
AMELIORATION DE
L'AMBIANCE
THERMIQUE INTERNE

CHAPITRE VII : AMELIORATION DE L'AMBIANCE THERMIQUE INTERNE

« La maîtrise de l'énergie n'est pas un médicament que l'on prend en période de crise, de maladie, mais une hygiène qui permet de rester en bonne santé » Pierre Radanne (Ex-directeur d'ADEME)

Introduction

Le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'énergie en Algérie, particulièrement pendant la période estivale, où les systèmes de climatisation mécanique utilisent la moitié de cette énergie (Hadjadj, 2017) pour satisfaire les besoins croissants de refroidissement et de confort des occupants. Les bâtiments publics situés en zones chaudes, qui sont très fréquentés par le public, sont particulièrement touchés par cette situation, ce qui entraîne une consommation énergétique élevée, ainsi que des coûts de fonctionnement et des factures considérables.

Ce problème a été clairement mis en évidence dans le chapitre précédent dédié à l'investigation in situ, à travers les données issues d'une part de l'enquête quantitative et objective, et d'autre part de l'enquête qualitative et subjective, effectuées dans l'annexe administrative de la cité Amirouche, à Batna. Les résultats obtenus montrent un énorme gain de chaleur interne, une surchauffe et un effet de serre, ce qui entraîne une situation thermique inconfortable et une insatisfaction des utilisateurs tout au long de la durée de fonctionnement de ce bâtiment.

Dans ce contexte critique et pour faire face aux problèmes mentionnés précédemment, ce chapitre vise à réhabiliter thermiquement ce bâtiment, en le transformant en un bâtiment respirant grâce à une enveloppe adaptative. Elle découle de la transformation des solutions naturelles observées dans la nature en solutions techniques, car la nature est donnée comme une source d'inspiration riche de solutions efficaces, les organismes vivants ayant surmonté des défis similaires au cours de 3,8 milliards d'années.

Grâce à cette enveloppe, une ventilation naturelle est favorisée afin d'obtenir une ambiance saine et un niveau de confort thermique acceptable, tout en évitant le syndrome du bâtiment malsain qui se manifeste dans les bâtiments climatisés et mal ventilés. À cet égard, ce chapitre sera organisé en deux parties principales. Le premier volet consiste à présenter le processus de conception de cette enveloppe adaptative, tandis que l'autre volet vise à évaluer l'impact de cette enveloppe sur l'ambiance thermique interne, la perception du confort thermique et le bien-être.

VOLET 1

PROCESSUS DE CONCEPTION

DE L'ENVELOPPE ADAPTATIVE

VOLET 1 : PROCESSUS DE CONCEPTION DE L'ENVELOPPE ADAPTATIVE

قال الله تعالى: ﴿وَأَوْحَىٰ رَبُّكَ إِلَى النَّحْلِ أَنِ اتَّخِذِي مِنَ الْجِبَالِ بُيُوتًا وَمِنَ الشَّجَرِ وَمِمَّا يَعْرِشُونَ (68) ثُمَّ كُلِي مِن كُلِّ الثَّمَرَاتِ فَاسْلُكِي سُبُلَ رَبِّكِ ذُلُلًا يَخْرُجُ مِنْ بَطُونِهَا شَرَابٌ مُّخْتَلِفٌ أَلْوَانُهُ فِيهِ شِفَاءٌ لِلنَّاسِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِّقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ (69)﴾. سورة النحل.

Préambule

Dans ce volet, nous aborderons le processus de conception architecturale biomimétique considéré comme un outil de conception alternative qui s'inspire des différentes techniques d'adaptation naturelles observées chez les abeilles, que ce soit au niveau physiologique, morphologique ou comportemental. Nous nous inspirerons également de l'architecture vernaculaire Auréssienne, en particulier de celle de la vallée de l'Oued Abdi. Cette enveloppe repose sur l'emploi de la technologie avancée dans le domaine des matériaux de construction, permettant de produire le comportement cinétique adaptatif de l'enveloppe en réponse aux variations de température.

7.1. Processus de conception de l'enveloppe adaptative

Notre enveloppe adaptative sera générée comme un dispositif complexe et son processus de génération repose sur une approche biomimétique directe utilisant de la technique descendante (Top/Down) (Figure 7.1). Celle-ci s'appuie sur un apprentissage approfondi et des recherches menées dans la nature, à travers une série d'enquêtes et d'explorations d'analogies naturelles, dans le but de trouver des solutions naturelles adaptées à des problèmes architecturaux similaires. Cette technique descendante permet une mise en œuvre des solutions techniques plus rapide en comparaison avec la technique ascendante (Bottom-Up), comprenant les étapes suivantes :

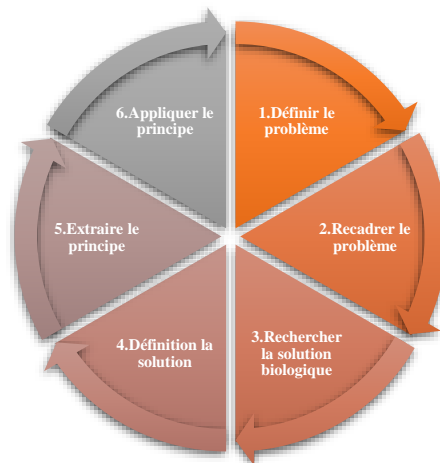


Figure 7.1. Processus de conception de l'enveloppe selon la technique descendante.
Source : Al-Obaidi et al. (2017).

7.1.1. Définir et recadrer le problème

L'annexe administrative de la cité Amirouche sise à Batna, caractérisée par un climat semi-aride, souffre d'une surchauffe interne provoquant l'inconfort thermique et une sensation d'insatisfaction durant la période estivale (voir chapitre VI).

7.1.2. Rechercher et définir la solution biologique

Apis Mellifera est le nom des abeilles mellifères occidentales ou européennes, dont *Apis* signifie « *abeille* » en latin et *mellifera* signifie « *portant du miel* » (Jarimi, Tapia-Brito and Riff, 2020). Il s'agit d'insectes extrêmement eusociaux qui ont connu une évolution au Néolithique il y a environ 70 millions d'années (Mathis and Tarpy, 2007) (Figure 7.2).

En général, l'abeille désigne le plus petit des animaux domestiques (Deroth and D'Allaire, 1980), mais elle présente des mécanismes de survie qui se manifestent par leurs divers systèmes d'adaptation : physiologiques, morphologiques et comportementaux. De magnifiques exemples d'imitation permettent de contribuer à améliorer les performances thermiques des bâtiments en diminuant l'énergie requise pour le refroidissement et en améliorant la ventilation naturelle. Dans cette optique, notre objectif était de convertir cette richesse biologique en solutions techniques architecturales fonctionnelles, selon les étapes suivantes :



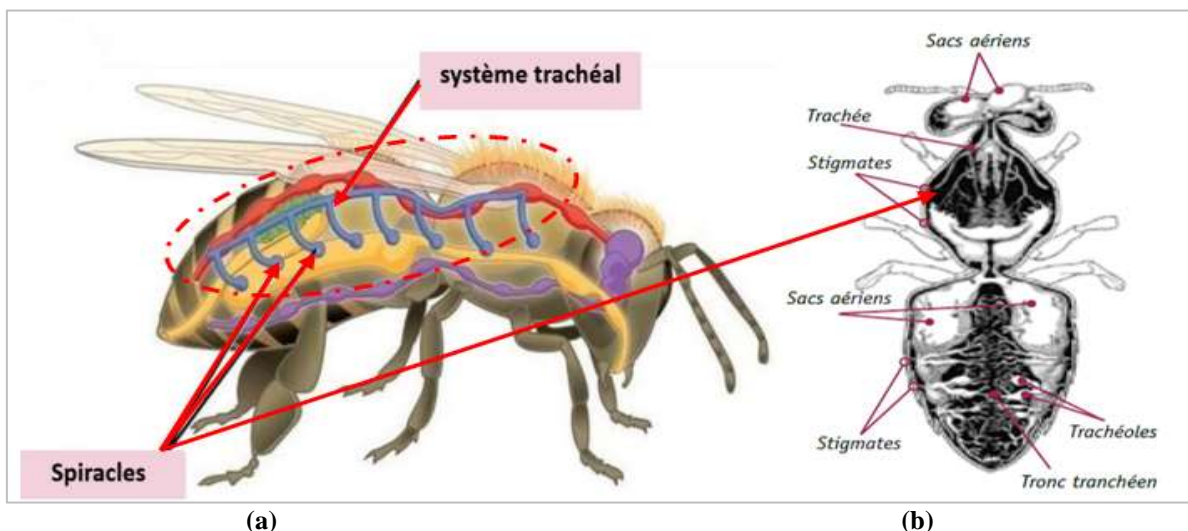
Figure 7.2. Abeilles mellifères « *Apis Mellifera* ». Source : LARIVIERE (2019).

7.1.2.1. Inspiration de l'adaptation physiologique

Lors de cette étape, nous nous concentrons sur l'appareil respiratoire des abeilles, constitué d'un système de trachées organisé en ramifications (Deroth and D'Allaire, 1980) (Figure 7.3.a), notamment sur le mécanisme de fonctionnement des *spiracles* appelés aussi *stigmates* (Figure 7.3.b), qui sont 10 paires d'orifices présentes sur la peau des abeilles (3 paires sur le thorax et 7 paires sur l'abdomen). Ils se distinguent par une distribution

symétrique qui permet de réguler les échanges gazeux, favorisant l'entrée d'O₂, la sortie de CO₂ et de réduire la perte d'eau (Fayet, 2014).

Ces spiracles sont dotés d'une valve reliée à un muscle, permettant ainsi l'ouverture et la fermeture de l'orifice. Chaque spiracle s'ouvre sur une sorte de chambre appelée *atrium*, qui est munie de poils pour filtrer l'air entrant (Fayet, 2014). Chez les abeilles domestiques, le flux d'air passe par un mécanisme, de la partie postérieure vers la partie antérieure (Bailey, 1954; Heinrich, McHenry and Bradley, 2013), signifiant que l'air est inhalé via les stigmates abdominaux (entrée) et expiré via les stigmates thoraciques (sortie) les stigmates abdominaux sont ouverts pendant l'inhalation, permettant à l'air d'entrer et les stigmates thoraciques sont ouverts pendant l'exhalation permettant à l'air de sortir, créant un flux d'air dans un mécanisme d'ouverture/fermeture (Figure 7.3).



Source: (a): OpenEd CUNT (2007), (b): Fayet (2014).

7.1.2.2. Inspiration de l'adaptation morphologique

Après avoir identifié la source d'inspiration et dans le but de donner une forme géométrique aux spiracles, nous avons choisi de rester dans le contexte du monde des abeilles. À cet effet, nous nous sommes inspirés de la forme hexagonale des ruches (nids) fabriquées en cire naturelle. Cette forme offre la possibilité de minimiser la quantité de matériaux de construction tout en optimisant la capacité de stockage par unité, à la différence des autres formes géométriques comme les cellules triangulaires et carrées, qui se distinguent par une circonférence totale plus élevée, ce qui entraîne également une demande accrue de matériau de construction par unité. En outre, les cellules de forme circulaire, pentagonale ou octogonale laissent un espace entre les cellules inutilisé, ce qui entraîne un gaspillage de matériaux de construction (Mathis and Tarpy, 2007) (Figure 7.4).

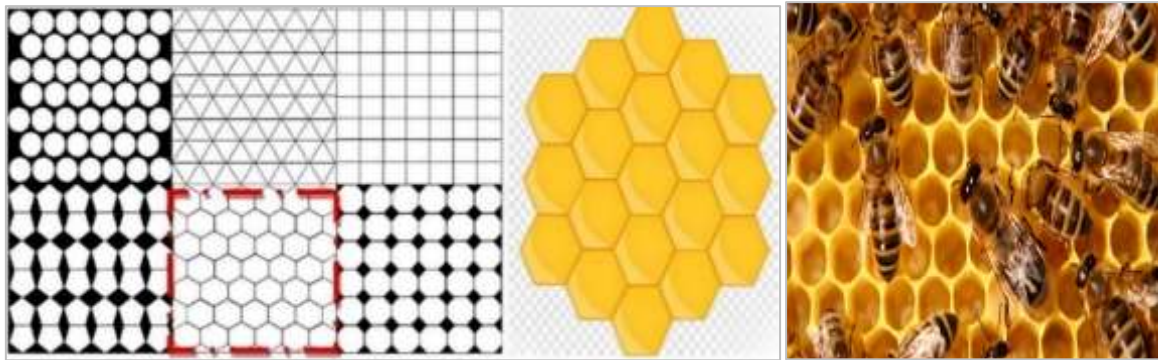


Figure 7.4. Forme hexagonale des ruches d'abeilles comparée à d'autres formes.
Source : Mathis and Tarcy (2007).

L'étape suivante est consacrée à donner plus de détails à notre enveloppe. Cela se fait à travers un retour à l'architecture vernaculaire Aurésienne (la maison Chaoui) notamment celle de la vallée de l'Oued Abdi (wilaya de Batna), caractérisée par une variété de méthodes de construction et l'emploi de matériaux respectueux de l'environnement (Boudjadja and Benhalilou, 2022).

Nous avons concentré notre inspiration sur les ouvertures caractérisées par des spécificités essentiellement liées au microclimat de chaque Dechra. Ces ouvertures sont placées en haut des murs et servent bien plus à l'aération qu'à l'éclairage et à l'ouverture sur l'extérieur (Adjali, 1986). Dans ce contexte, les ouvertures en forme hexagonale divisée émettent un dédoublement des rayons solaires avec le maintien d'un taux de luminosité important et raffiné, ainsi qu'une bonne ventilation (Tiffrent, 2016) (Figure 7.5).

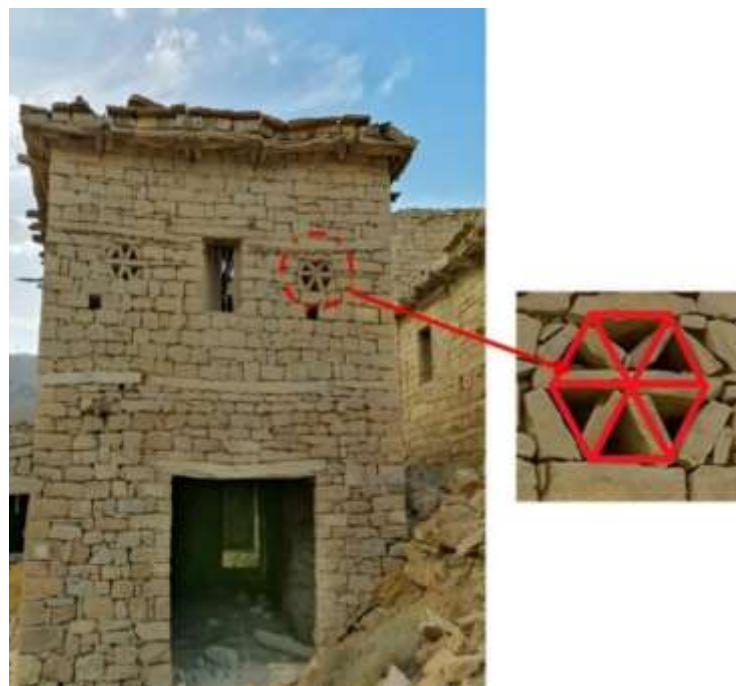


Figure 7.5. Ouvertures de la maison chaoui de la vallée de l'Oued Abdi.
Source : Auteur (2022).

7.1.2.3. Inspiration de l'adaptation comportementale

Les abeilles font preuve d'excellentes stratégies de thermorégulation de leurs ruches, notamment de la zone centrale du couvain, qui doit être maintenue à une température moyenne optimale de 35°C, alors que les températures extérieures varient de 3,7°C à 30,7°C (Human, Nicolson and Dietemann, 2006). Par conséquent, elles contrôlent fortement la température de leurs nids et elles le font avec une précision extraordinaire (Mathis and Tarpy, 2007) en créant un mécanisme de ventilation permettant d'évacuer l'air chaud et vicié en dehors de la ruche pour l'échanger avec de l'air frais de l'extérieur afin d'éviter la surchauffe, de contrôler l'humidité, d'assurer une meilleure qualité de l'air et de réduire la concentration de CO₂ (Jarimi, Tapia-Brito and Riff, 2020). Cela se manifeste dans les deux stratégies suivantes :

- **La première stratégie est le bouclier thermique** basé sur le positionnement des abeilles entre le rayon à couvain et le mur extérieur comme un écran thermique pour capter la chaleur pénétrée à travers les murs et protéger leur couvain de l'excès de chaleur ; puis elles volent vers une zone plus fraîche de la ruche pour dissiper la chaleur absorbée ou stockée dans leur face ventrale de leur corps (Bermejo-Busto *et al.*, 2016) (Figure 7.6).

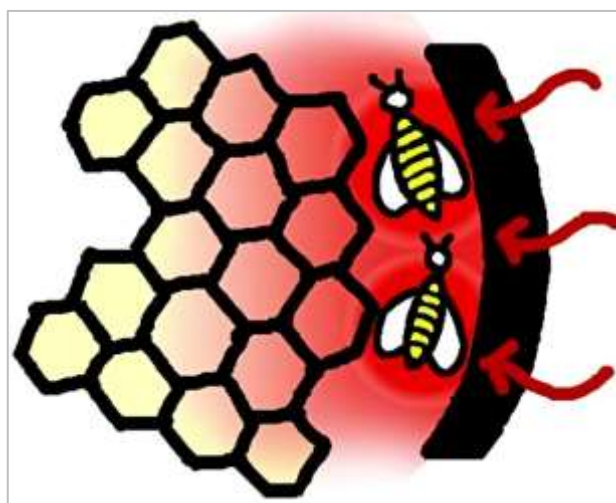


Figure 7.6. Stratégie du bouclier thermique.
Source : Bermejo-Busto *et al.* (2016).

- **La deuxième stratégie est le refroidissement par évaporation** ou le refroidissement marais, qui répondait à un besoin d'eau supplémentaire pour refroidir les ruches et réduire la température interne du nid à couvain et la nutrition des abeilles immatures. À cet effet, certaines abeilles ouvrières crachent l'eau qu'elles transportent ou viennent de collecter pour la pulvériser dans la ruche (Figure 7.7.a), en évacuant l'eau par le haut à travers un vomissement provoquant une évaporation de l'eau et créant activement de

l'air frais et humide qui circule dans la ruche assurant son refroidissement. Cette technique s'appuie sur la reconnaissance instinctive des abeilles que l'air frais tombe par le haut sous le couvercle de la ruche (Mathis and Tarpay, 2007; Bermejo-Busto *et al.*, 2016; Jarimi, Tapiabrito and Riff, 2020) (Figure 7.7.b).

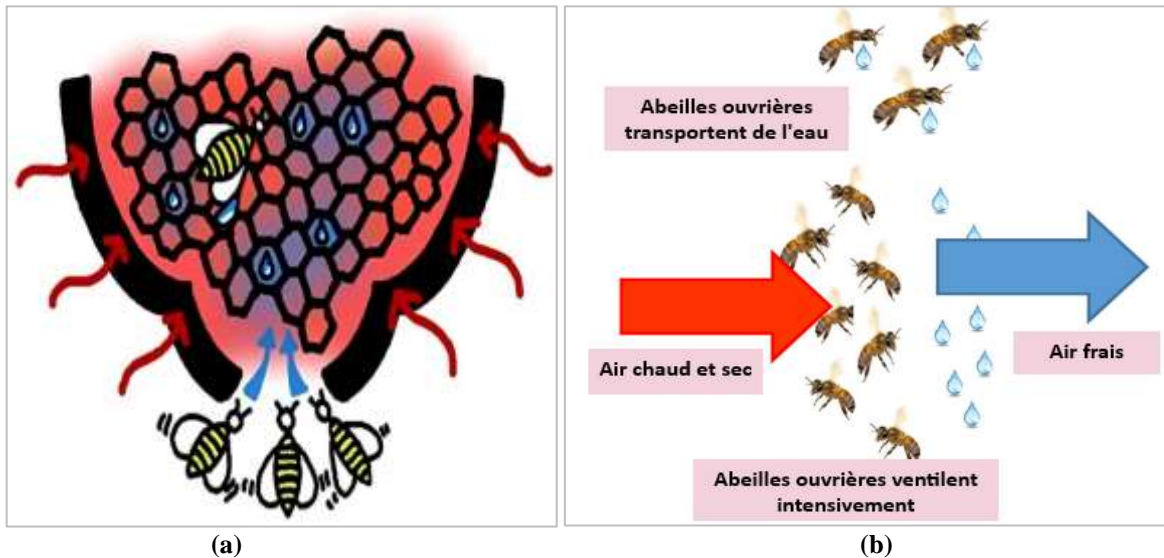


Figure 7.7. (a): Stratégie de refroidissement par évaporation, (b): l'action de l'évacuation de l'eau par le haut.
Source : (a) : Bermejo-Busto et al. (2016), (b) : Jarimi et al. (2020).

À travers l'apprentissage des différents mécanismes de survie observés dans le monde des abeilles mellifères qui ont été développés depuis des millions d'années, notamment leur capacité d'assurer une régulation thermique interne pour faire face aux fluctuations des conditions environnementales. Où chaque individu peut répondre aux stimuli externes et internes en adoptant une réponse appropriée dans son voisinage immédiat, grâce à une technique appelée « contrôle décentralisé ». De plus, il a également été constaté que l'utilisation de matériaux de construction efficaces qui sont intrinsèquement propres et réduisent le risque de maladie permet la gestion des ressources énergétiques. Ceci, en guise de conclusion, indique que ces méthodes peuvent être utilisées dans le domaine de la construction pour créer et permettre d'obtenir des bâtiments adaptatifs, autonomes, durables et respectueux de l'environnement (Mathis and Tarpay, 2007).

7.1.3. Extraire le principe

Dans le but de transférer ces stratégies de survie observées chez les abeilles en solution technique. Cette étape est consacrée à la détermination du mécanisme de fonctionnement, en particulier à la sélection du matériau intelligent adéquat permettant la création d'une conception dynamique sous forme d'une enveloppe adaptative et respirante caractérisée par un système d'ouverture/fermeture similaire à celui des spiracles.

7.1.3.1. Choix du type de matériau adéquat

À cet égard, l'adoption d'une technologie de pointe suscite un intérêt croissant. Cela se manifeste par l'utilisation des matériaux intelligents en tant que capteurs/actionneurs autonomes intégrés dans l'enveloppe du bâtiment et caractérisés par leur changement de forme lorsqu'ils sont affectés par un stimulus tel que la température pour assurer la déformation et la cinétique de l'enveloppe (voir annexe C). Ces matériaux ont la capacité de remplacer des éléments durs des systèmes mécaniques classiques, ce qui permet de diminuer les dépenses d'entretien et d'énergie nécessaires pour leur fonctionnement automatique (Vazquez, 2021). Dans ce sens, nous avons utilisé un matériau intelligent thermosensible avec un effet de mémoire de forme qui repose sur ses propriétés intrinsèques et qui s'appelle les alliages à mémoire de forme (SMA) de type « Nitinol », composé de nickel-titane (NiTi) sous forme de fils précontraints (Figure 7.8).



Figure 7.8. Alliage à mémoire de forme (NiTi).
Source : Auteur (2022).

Les SMA sont employés depuis longtemps dans les secteurs de l'automobile, du textile, de la lunetterie, de l'aéronautique et du biomédical : stents médicaux, agrafes, appareils orthodontiques, fils de guidage des systèmes de diagnostic ou thérapeutiques, dispositifs de fixation orthopédiques (Meddour, 2007; Jordan and Rocher, 2010; Vercesi *et al.*, 2020) (Figure 7.9).



Figure 7.9. Alliage à mémoire de forme pour : (a) : Stents médicaux, (b) : Appareils orthodontiques.
Source: (a): Bhakta (2022), (b): Jordan and Rocher (2010).

L'intérêt de sélectionner ce type de matériaux pour la création de notre enveloppe réside dans leur capacité à réagir de manière autonome et adaptative aux stimuli externes tels que la température de l'air ou le rayonnement solaire, ce qui entraîne une variation des longueurs des fils. L'exécution de ce phénomène ne requiert aucun équipement informatique, ce qui les rend à l'abri des pannes informatiques ou des attaques de virus et de pirates cybernétiques. Cependant, cela peut être attribué à son élasticité qui lui permet de réaliser des millions de cycles sans nécessiter l'activation de l'énergie électrique ou d'autres sources d'énergie (Decker and Zarzycki, 2014). On utilise ce matériau dans le domaine de l'architecture afin de concevoir une enveloppe flexible et performante (Yi *et al.*, 2020).

7.1.3.2. Caractéristiques

Le type NiTi, composé de (~50% Ni, ~50% Ti), est défini comme le modèle le plus célèbre et le plus utilisé (Meddour, 2007; Jordan and Rocher, 2010; Fiorito *et al.*, 2016). Il est caractérisé par :

- Super-élasticité et effet de mémoire de forme et une capacité d'amortissement élevée ;
- Déformation réversible jusqu'à 8 % sans subir de déformation permanente ;
- Rapidité de réponse et multifonctionnalité en tant que capteur, contrôleur et actionneur ;
- Actionnement silencieux ;
- Poids ultra-faible qui offre plus de fiabilité dans l'utilisation ;
- Résistance à la corrosion et aux intempéries par rapport aux alliages à base de Cu et à base de Fe ;
- Résistance à la fatigue ;
- Propriétés de biocompatibilité signifient la possibilité d'usage biomédical ;
- Durabilité et longévité fonctionnelle ;

- Economie d'énergie à travers des systèmes adaptatifs, peut contribuer de manière significative à une efficacité énergétique.

À ces avantages s'ajoute un inconvénient suivant : c'est le coût élevé à cause de la difficulté d'usinage.

7.1.3.3. Principes de fonctionnement

Le Nitinol (NiTi) fonctionne grâce à l'effet de mémoire de forme, qui consiste en une transformation réversible de sa microstructure. Il s'agit d'un phénomène qui s'appuie sur la super-élasticité et la capacité du matériau à reprendre sa forme initiale (mémorisée) après une déformation due à un changement de température. Le passage réversible entre les phases martensitique et austénitique du NiTi permet cette transformation, ce qui permet au matériau de retrouver sa configuration initiale lorsque la température change (Fiorito *et al.*, 2016; Yi *et al.*, 2020). Afin de mieux comprendre ces deux étapes (Formentini and Lenci, 2018), une brève description est présentée ci-dessous :

- **La phase martensite (M)** se forme lorsque l'alliage est refroidi au-dessous de la température spécifique appelée température de début de martensite (M_s) ; la transformation sera complète à la température de fin de martensite (M_f). Dans cette phase, l'alliage adopte une structure cristalline déformée et prend une forme tétragone ou orthorhombique, contrairement à la phase austénitique.

- **La phase austénite (A)** se forme lorsque l'alliage est chauffé au-dessus de la température appelée température de début d'austénite (A_s), la transformation étant complète à la température de fin d'austénite (A_f). Dans cette phase, l'alliage adopte une structure cristalline ordonnée et rigide, généralement cuboïdale ou cubique, ce qui lui confère une grande stabilité.

Les deux phases de déformation et de transformation se traduisent par les températures spéciales suivantes (Fiorito *et al.*, 2016) (Figure 7.10).

M_s : Température de début de martensite ;

M_f : Température de fin de martensite ;

A_s : Température de début d'austénite ;

A_f : Température de fin d'austénite.

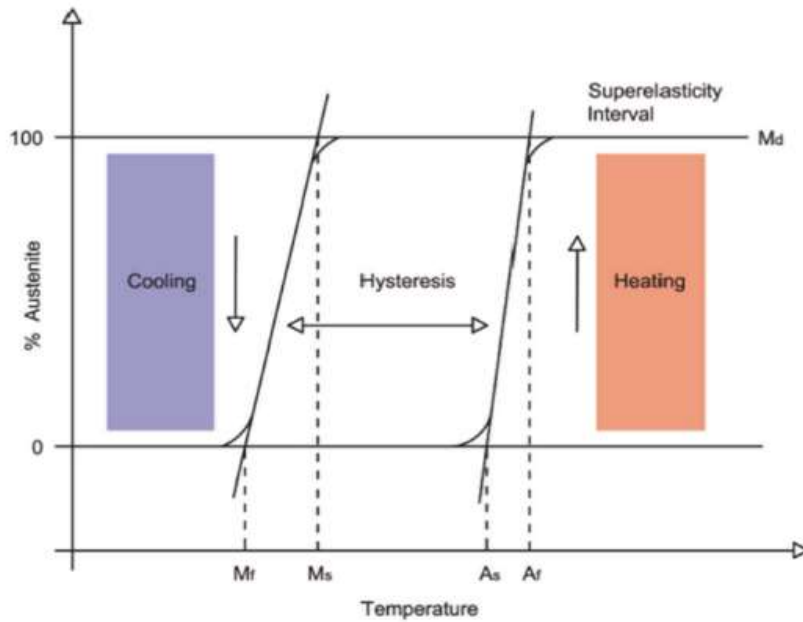


Figure 7.10. Effet de mémoire de forme de SMA.

Source : Formentini and Lenci (2018).

Ce mécanisme offre une flexibilité, une légèreté aux bâtiments réactifs, ce qui devrait leur permettre de fonctionner sans avoir besoin d'une alimentation externe.

7.1.4. Application du principe

Cette phase est consacrée à la traduction des principes naturels en solutions architecturales, manifestée par l'application de la leçon tirée des abeilles et de leurs mécanismes de survie, comprenant l'emploi d'un matériau intelligent pour la création d'une enveloppe adaptative, appliquée à notre cas d'étude.

Cette enveloppe est présentée à l'aide du programme intégré Rhinoceros/Grasshopper, qui est un logiciel de modélisation paramétrique déterminé comme modélisation algorithmique (Figure 7.11), dont :

- **Rhinocéros** : souvent appelé simplement Rhino, est un logiciel de conception et de modélisation 3D développé par Robert McNeel & Associates. Il repose sur la méthode mathématique NURBS, qui offre une grande précision dans la représentation des surfaces lisses, de formes libres, et de courbes, contrairement aux systèmes basés sur le maillage polygonal (Sheikh and Kensek, 2011; Sharaidin, 2014).

- **Grasshopper** : est un plug-in pour Rhino, créé par David Rutten chez Robert McNeel & Associates. Son objectif est de simplifier la programmation visuelle paramétrique, présentant une interface de script visuel et un éditeur d'algorithmes graphiques. Il permet aux utilisateurs de créer des algorithmes visuels pour générer et manipuler des formes 3D de la géométrie d'une manière paramétrique et offre un niveau de

flexibilité qui n'est pas atteint par les outils 3D traditionnels. Il offre aussi une méthode intuitive et souple pour la conception de paramètres et d'algorithmes (Sheikh and Kensek, 2011; Sharaidin, 2014; Farid *et al.*, 2022).



Figure 7.11. Logos de Rhinoceros et Grasshopper.
Source : Rhino3d (2023).

Tout d'abord, on a essayé de concevoir une enveloppe adaptative composée de 14 cellules hexagonales extérieures placées sur la façade sud et de 5 cellules sur la façade nord du bloc B1 ainsi que de 4 cellules sur la façade sud et de 1 cellule sur la façade nord des blocs B2 et B3. Chaque unité occupe une superficie de 1,50 m² et chaque cellule est constituée de six panneaux de film dans un cadre hexagonal fixés par des cordons élastiques. Six éléments tubulaires permettent la rotation du panneau. Chaque panneau opposé est connecté par un fil SMA qui fonctionne comme un capteur/actionneur indépendant inspiré du modèle Airflow (er) généré par LIFT Architects en 2007 (Payne, 2007).

Pour cela, notre idée est développée en utilisant Rhino 6 et Grasshopper 066 (Figure 7.12). Donc, notre enveloppe est présentée comme un système complexe. Ces mécanismes sont traduits comme suit :

- **Les cellules appliquées à la façade sud (couche 1)** s'inspirent du système de fonctionnement des spiracles abdominaux des abeilles (ouverture/fermeture) lors de l'inhalation permettant l'entrée de l'air riche en O₂, ayant une forme géométrique hexagonale telle que celles des ruches des abeilles et les ouvertures de l'architecture vernaculaire Aurésienne (maison Chaoui) de la vallée de l'Oued Abdi (Figure 7.13). Elles sont constituées de films triangulaires ou de caoutchouc de silicone translucide activées par des fils SMA comme capteurs/actionneurs autonomes permettant l'ouverture/fermeture de cette couche externe en entrant l'air à l'intérieur (entrée d'air).

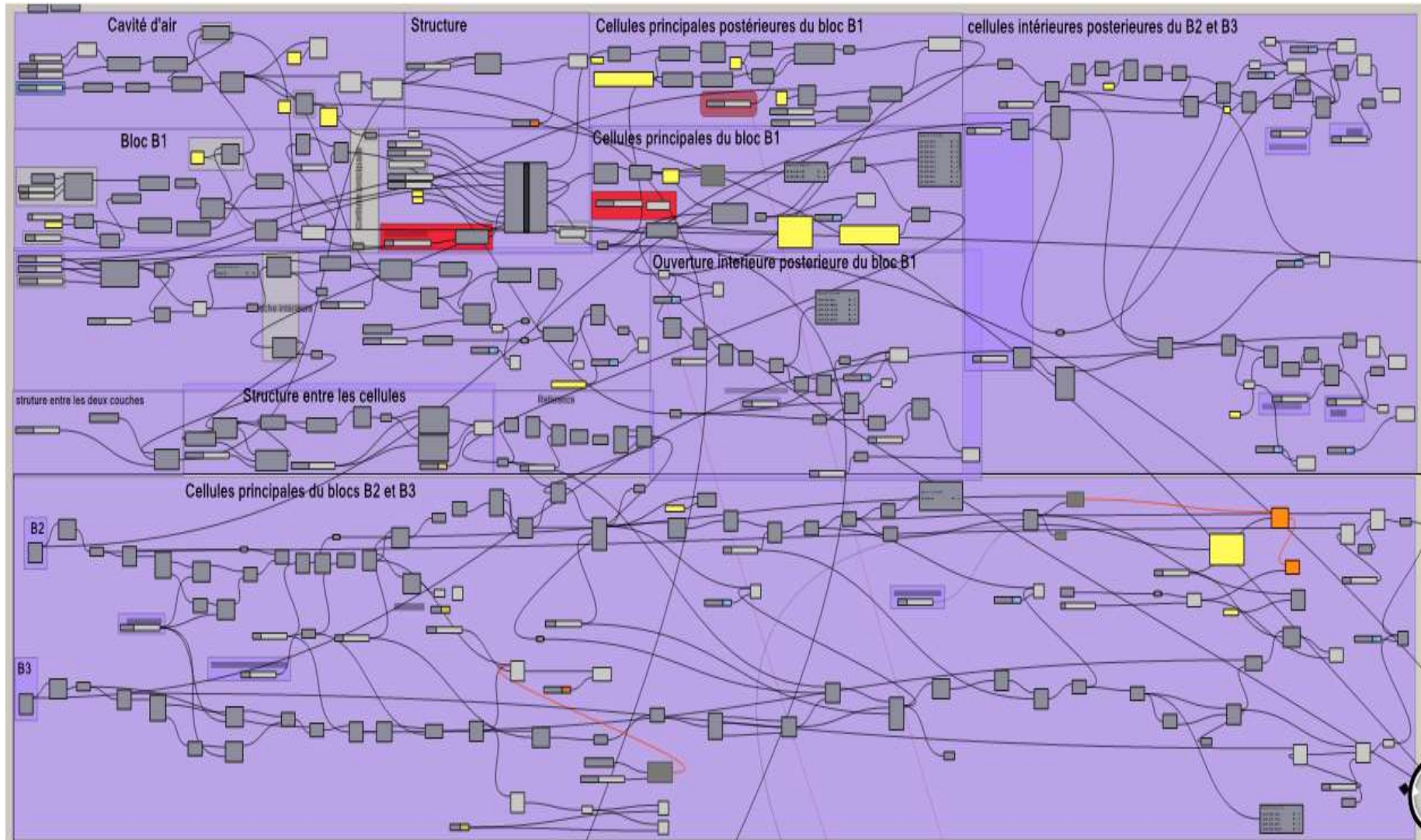


Figure 7.12. Script algorithmique généré pour la modélisation paramétrique du cas d'étude.
Source : Auteur (2023).

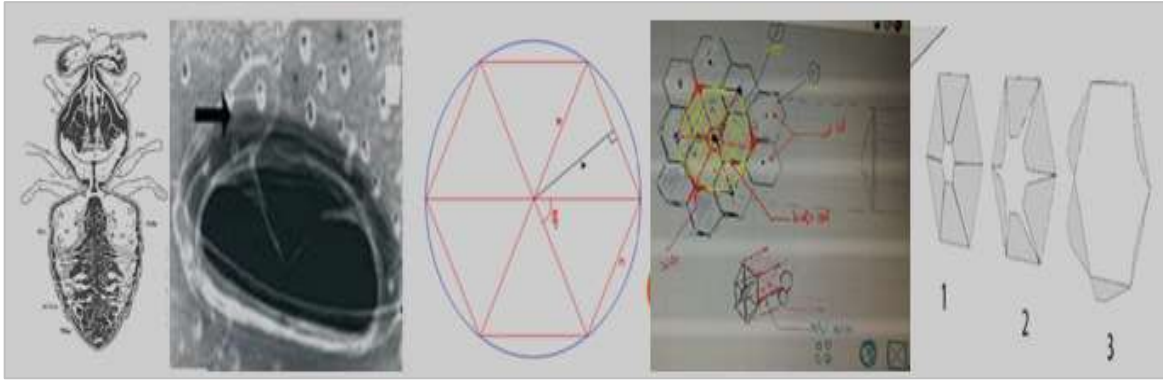


Figure 7.13. Genèse de l'idée.
Source : Auteur (2023).

Lorsque ces cellules sont soumises au rayonnement solaire direct, les fils atteignent une température supérieure à la température ambiante, dont la température d'activation est de 35°C - 40°C. Cela provoque la contraction des fils et leur retour à leur forme originale (phase austénitique) (Fiorito *et al.*, 2016), entraînant l'ouverture des cellules provoquant l'entrée d'air. Cependant, lorsque la température descend en dessous de 20°C (Formentini and Lenci, 2018), les fils des actionneurs SMA se dilatent (phase martensitique) (Payne, 2007) et ramènent doucement les cellules hexagonales vers leur position fermée grâce à leur rigidité sans utiliser d'énergie électrique (Figure 7.14).

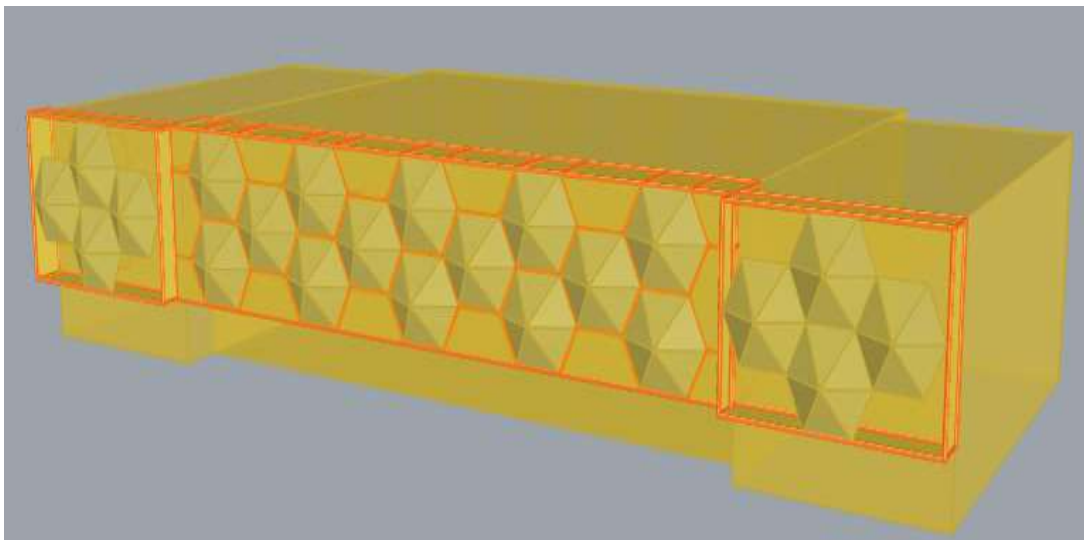


Figure 7.14. Cellules appliquées à la façade sud.
Source : Auteur (2023).

- **L'espace intermédiaire** est conçu sous forme d'une cavité d'air de 1,00 m de largeur pour le bloc B1 et de 0,60 m de largeur pour les blocs B2 et B3, car l'augmentation de la largeur de la cavité peut améliorer les performances thermiques et les températures de surface interne. En revanche, la diminution de sa largeur augmente les gains de chaleur et accroît le coefficient de transfert thermique (ElGhazi, Hamza and Dade-Robertson, 2018). Cette zone

est à la fois une zone tampon et une zone de liaison entre l'intérieur et l'extérieur (Abu Khadra and Chalfoun, 2014) désignée comme un espace pour effectuer une isolation thermique sur sa face extérieure, qui sert à refroidir l'air avant son entrée dans l'espace intérieur .

Cet espace est inspiré à travers deux sources : l'une étant le système de **bouclier thermique** généré par les abeilles pour empêcher la transmission de chaleur vers l'intérieur pour protéger le couvain, et l'autre étant le **refroidissement par évaporation** effectué par un système d'aspersion d'eau par les abeilles pour assurer la thermorégulation du nid du couvain. Ceci est assumé via un système de refroidissement par courant descendant pulvérisant des gouttes d'eau depuis sa partie supérieure, en tant qu'un moyen efficace pour réduire la température en évitant la chaleur extrême permettant d'améliorer les niveaux de confort thermique des bâtiments situés dans une zone chaude (Kang and Strand, 2018). Dont la partie inférieure de cet espace est équipée d'un réservoir de collecte et de récupération d'eau soumis à un circuit fermé entraîné par une pompe d'accélération (Abdullah, Bin Said and Ossen, 2019) alimentée par une source électrique issue d'un panneau photovoltaïque placé sur le toit orienté vers le sud. En conséquence, l'air sec qui entre est humidifié et refroidi lorsqu'il atteint l'espace intérieur (Badarnah, Nachman Farchi and Knaack, 2010).

- **L'ouverture intérieure (couche 2)** est située sur le mur intérieur, ayant la même forme que les cellules sud, mais avec la moitié de leur superficie ($\frac{1}{2} Sc$). Ils sont équipés de filtres pour empêcher les contaminants et les particules en suspension dans l'air de pénétrer dans la pièce (Kalantar and Borhani, 2017). Cette différence de section transversale entre les ouvertures de la couche externe et interne provoque une augmentation de la vitesse de l'air par l'effet de Venturi et le principe de Bernoulli (en augmentant le rapport entrée/sortie) (Farimani, 2014), permettant le passage de l'air à travers une enveloppe respiratoire.

- **Espace intérieur** dans lequel se déroulent les différentes activités administratives. L'air est aspiré dans le bâtiment en raison des différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur, dans lesquelles l'air se déplace des espaces à haute pression vers les espaces à basse pression, comme lors du processus d'inhalation et d'exhalation chez la plupart des organismes vivants (Elghawaby, 2013). C'était le même cas de la respiration chez les abeilles.

- **Les cellules appliquées à la façade nord** sont créées et placées dans la partie supérieure du mur, qui ont été inspirées de la même manière que celles de la façade sud dans leur forme, mais leur fonctionnement est basé sur le mécanisme d'ouverture/fermeture des

spiracles thoraciques des abeilles lors de l'exhalation permettant l'évacuation de l'air riche en CO₂.

Ces ouvertures s'ouvrent automatiquement lorsque l'espace intérieur est chauffé au-dessus du seuil de la température de confort (26°C) pour évacuer l'air chaud vicié de l'intérieur vers l'extérieur, déterminées comme sorties d'air (sortie d'air), en assurant une ventilation transversale d'une manière autonome. Cependant, une fois que l'espace intérieur refroidit au-delà de son seuil de température inférieur (15°C), les composants sont fermés pour maintenir la température appropriée et optimale (Payne, 2007) (Figure 7.15).

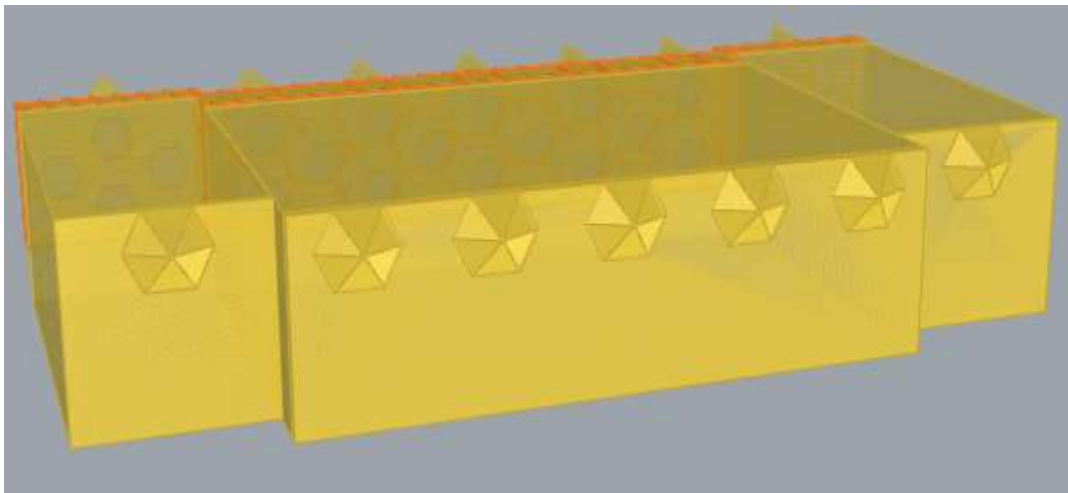


Figure 7.15. Cellules appliquées à la façade nord.
Source : Auteur (2023).

Le guide Bio-Tech : Ventilation naturelle et mécanique (ICEB, 2012) recommande que la profondeur du bâtiment doive être inférieure à 5 fois la hauteur sous plafond afin d'atteindre une meilleure ventilation transversale (Figure 7.16.a). Ceci est bien respecté dans notre cas d'étude après réhabilitation thermique, manifesté par l'application des enveloppes adaptatives sur la façade nord et sud des trois blocs ($9 < 5 \times 3,5 = 17,5$) (Figure 7.16.b).

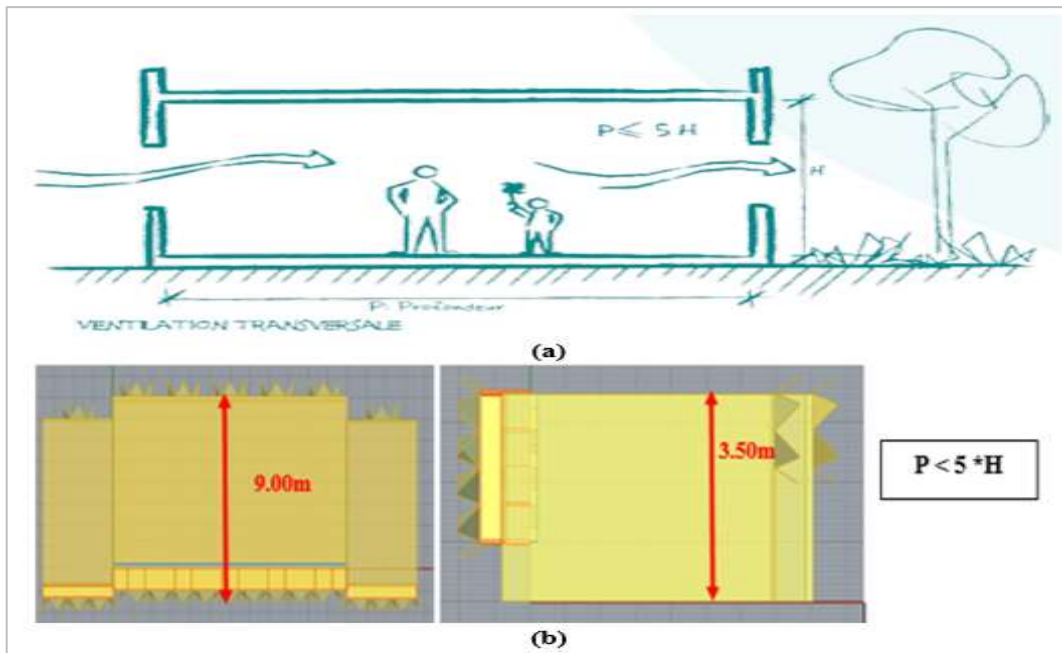


Figure 7.16. (a) : loi pour une ventilation transversale performante, (b) : dimensions de cas d'étude après application de l'enveloppe.

Source : (a) : ICEB (2012), (b) : Auteur (2023).

Synthèse

Dans ce volet, nous exposons la démarche suivie pour créer une enveloppe adaptative, qui repose sur une transition progressive entre les étapes de la technique directe Top/Down. Cette enveloppe, qui s'inspire du monde des abeilles, utilise leurs méthodes de survie et de thermorégulation, qui sont exprimées à travers différentes stratégies d'adaptation physiologiques, morphologiques et comportementales. De plus, on a ajouté un cachet régional en s'inspirant de la forme des ouvertures supérieures de l'architecture vernaculaire de l'habitat chaoui, en particulier de celle de la vallée de l'Oued Abdi.

L'enveloppe obtenue a été appliquée sur les façades nord et sud, en utilisant le logiciel paramétrique Rhinoceros-Grasshopper. La façade sud est composée de deux couches séparées par une cavité d'air comprenant un système de refroidissement par évaporation à courant descendant pour rafraîchir l'air avant qu'il n'entre dans le bâtiment. Dont, le comportement adaptatif cinétique de cette enveloppe est effectué en fonction des fluctuations de température, grâce à l'utilisation des alliages à mémoire de forme (NiTi), responsables de l'ouverture et de la fermeture de l'enveloppe. En conséquence, une ventilation naturelle transversale est créée, ce qui favorise le renouvellement de l'air.

Dans la même optique, le volet suivant repose sur une simulation énergétique qui vise à évaluer la performance, de l'enveloppe appliquée sur l'annexe administrative (post-réhabilitation thermique) et son impact sur le confort thermique, la perception du bien-être et la consommation d'énergie.

VOLET 2

ÉVALUATION DE LA

PERFORMANCE DE L'ENVELOPPE

ADAPTATIVE

VOLET 2 : ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ENVELOPPE ADAPTATIVE

Préambule

Ce deuxième volet est consacré à l'évaluation de la performance de l'enveloppe adaptative générée dans le volet précédent, qui s'appuie sur l'exploitation de la nouvelle technologie manifestée par l'intégration d'un matériau intelligent, permettant d'effectuer des réponses autonomes.

Cette évaluation s'appuie sur une simulation énergétique pour évaluer l'ambiance thermique intérieure lors de la journée estivale du 25 juillet pendant la tranche horaire qui s'étale de 08h00 à 16h00, qui correspond à la période d'occupation de l'annexe administrative. Cette simulation est effectuée à travers deux scénarios distincts : l'un correspond à une simulation du cas d'étude dans son état réel (pré-réhabilitation thermique), pour avoir des données qu'on ne peut pas faire lors de l'investigation in situ, et l'autre est une simulation de l'annexe en question après l'application de l'enveloppe (post-réhabilitation thermique), dans le but de tester la fiabilité et la performance de l'enveloppe proposée en matière de confort thermique et de perception des usagers de leur bien-être vis-à-vis des conditions climatiques locales.

7.2. Démarche de la simulation énergétique

La simulation numérique énergétique est effectuée durant une journée estivale, elle est basée sur un système de boîte noire comprenant les étapes suivantes (Hanafy, 2023) (Figure 6.17):

7.2.1. Les entrées (Inputs) : en fournissant les informations requises sous forme d'entrées concernant la géométrie du bâtiment, les conditions météorologiques, la période de simulation et toutes autres informations nécessaires.

7.2.2. Création d'un algorithme (Making Algorithm) : désigne la création des algorithmes requis pour reproduire les simulations.

7.2.3. Gestion des données (Data management) : dans cette phase, le logiciel sert à organiser, traiter et analyser les données et les informations fournies. Il s'agit d'une succession de calculs qui ne sont pas visibles par l'utilisateur.

7.2.4. Les sorties (Outputs) : cette étape offre la possibilité de représenter visuellement les résultats obtenus, que ce soit sous forme de graphiques, de cartes thermiques, de tableaux ou d'autres formes de représentation.

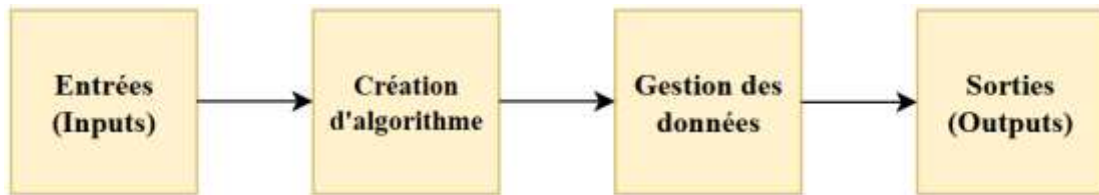


Figure 7.17. Démarche de la simulation énergétique.
Source : Hanafy (2023).

7.3. Logiciels de la simulation énergétique utilisés

Le script de la géométrie du cas d'étude défini dans **Grasshopper** et présenté de manière paramétrique et visualisé en 3D dans l'interface **Rhino**, a été connecté aux différents plugins d'analyse qui sont **Ladybug (LD) Ver 0.0.69** et **Honeybee (HB) Ver 0.0.66** du **07 juillet 2020** (Figure 7.18), responsables d'effectuer une simulation énergétique. Chacun des plugins est prévu pour faire une tâche différente. D'une part, le **LD** est destiné à faire une analyse climatique et environnementale, et d'autre part, le **HB** est déterminé comme un outil puissant permettant de faciliter la création, la gestion, l'analyse et d'optimiser la performance énergétique et le confort environnemental des bâtiments. Ce plugin n'est pas autonome, mais en collaboration avec des moteurs de simulation tels qu'EnergyPlus (outil open source).

Honeybee et **EnergyPlus** forment une plateforme solide et efficace pour la modélisation énergétique des bâtiments (EMB) et permettent d'évaluer avec précision le confort thermique des bâtiments, grâce à leur capacité à réaliser des calculs thermiques complexes et des simulations énergétiques fiables.

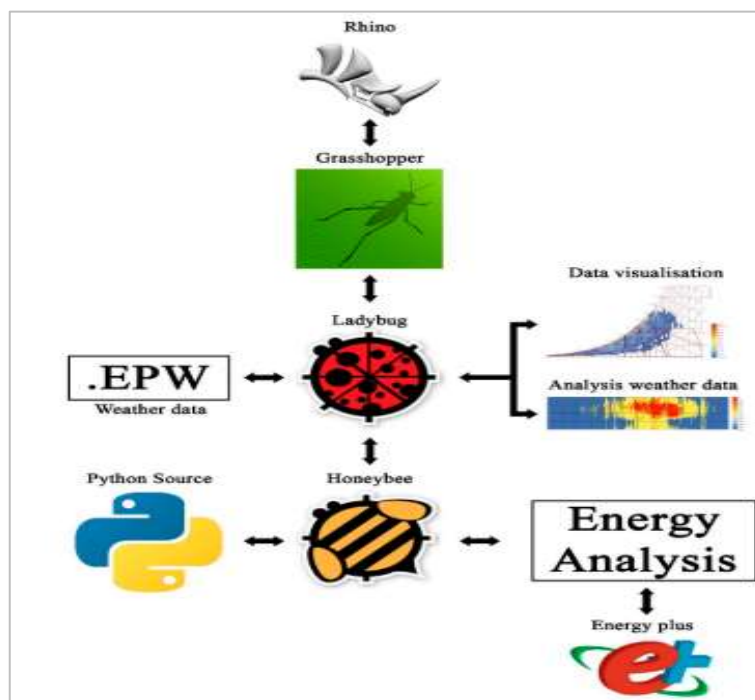


Figure 7.18. Logiciels utilisés pour la modélisation et la simulation.
Source : Arfaei and Hançer (2019).

7.4. Scénarios

La structure de la simulation énergétique présentée dans la section suivante s'appuie sur ces deux scénarios suivants :

- **Le scénario 1** consiste à faire une évaluation de l'ambiance thermique intérieure de l'annexe administrative dans son état réel sans application de l'enveloppe adaptative (**pré-réhabilitation thermique**). Cette section consiste à effectuer une analyse solaire, à déterminer les charges de refroidissement et à évaluer la sensation thermique perçue par les occupants.

- **Le scénario 2** est consacré à faire une évaluation thermique et énergétique du cas d'étude après l'application de l'enveloppe adaptative (**post-réhabilitation thermique**) inspirée des différents modes de survie observés chez les abeilles (voir volet 1). En mettant l'accent sur l'analyse du confort thermique à travers ses différents paramètres et indices, à travers diverses présentations.

7.5. Les étapes de la simulation énergétique

Les différentes étapes de la simulation énergétique effectuées dans cette étude varient en fonction du scénario sélectionné, comprenant une partie fixe et une partie variable.

7.5.1. Les entrées (Inputs)

La distinction entre les deux scénarios est exprimée au niveau des entrées des données de chaque cas, dont on trouve :

7.5.1.1. La partie fixe

Cette partie désigne que certains éléments du processus de simulation énergétique restent constants dans les deux scénarios qui sont :

- **Création de la géométrie** : le cas d'étude est composé de 3 blocs juxtaposés, défini en trois zones : la zone 01, 02 et 03 reflétant le hall d'accueil avec l'espace guichet (B1), le bureau du chef d'annexe (B2) et l'espace sanitaire (B3) respectivement, y compris la détermination de leurs caractéristiques.

- **Définition des charges internes** : cette phase est réservée à définir les sources de chaleur intérieure relatives au programme et à l'activité qui s'y déroulent dans le bâtiment ainsi qu'avec les équipements et l'éclairage utilisés.

- **Déterminer les données climatiques de la région** à travers un fichier météorologique contenant les données horaires des conditions environnementales extérieures de la région d'étude. Ce fichier est fourni par Ladybug Tools, sous forme d'une

extension EPW. Ces données sont présentées par le plugin Ladybug qui permet de visualiser ces données (pour plus de détails et d'informations, voir le chapitre VI).

- **Indication de la période de simulation** : dans ce chapitre, nous avons essayé de concentrer notre simulation sur la journée estivale du 25 juillet (le mois le plus chaud dans la région), pendant une période qui s'émerge entre 08h00 et 16h00, considérée comme la période de fonctionnement des équipements administratifs et publics en Algérie.

- **Insertion des paramètres de la simulation énergétique** : cette étape repose sur la détermination du terrain autour du bâtiment (cas d'étude) en tant que zone urbaine dans une ville et l'inclusion des exigences concernant les résultats de la simulation, notamment qu'ils soient horaires pour pouvoir les comparer aux résultats de l'investigation in situ.

7.5.1.2. La partie variable

Elle fait référence aux étapes qui se trouvent dans le second scénario (2^{ème} scénario) mais qui ne sont pas présentes dans le premier scénario (1^{ier} scénario). Ces éléments permettent de décrire l'enveloppe adaptative et de comprendre son comportement (Figure 7.19), comme illustré ci-dessous :

- **Création de la géométrie** : la géométrie de 2^{ème} scénario est conçue comme celle du 1^{ier} scénario, en conservant les trois zones, mais avec une distinction notable dans la mise en application de l'enveloppe adaptative sur les façades nord et sud.

- **Ventilation naturelle** : ce scénario se distingue par la mise en place d'une ventilation naturelle grâce à l'intégration des normes de confort thermique suggérées par APRUE. En été dans notre zone d'étude, il est nécessaire que la température ambiante soit comprise entre [24°C-27°C].

- **Déterminer la position du soleil** : étant donné que l'enveloppe adaptative développée est une enveloppe thermosensible. Donc, il est essentiel d'intégrer la trajectoire solaire pour juger de son efficacité (Figure 7.20).

- **Déterminer les calendriers** : cette étape désigne les informations selon lesquelles la façade effectue un comportement cinétique, s'appuyant sur le changement de la température de l'air et le rayonnement solaire reçu par la façade sur laquelle le système est appliqué.

- **Contexte** : comprenant les éléments dynamiques de l'enveloppe qu'elles doivent fonctionner selon le calendrier élaboré.

7.5.2. Gestion des données (Data management)

Cette étape est dédiée à l'organisation et à la gestion des données d'entrée nécessaires pour que la simulation puisse être exécutée correctement.

7.5.3. Les sorties (Outputs)

Dans cette phase, on est arrivé à la visualisation des résultats obtenus présentés en différentes présentations permettant de faciliter la compréhension et l'interprétation.

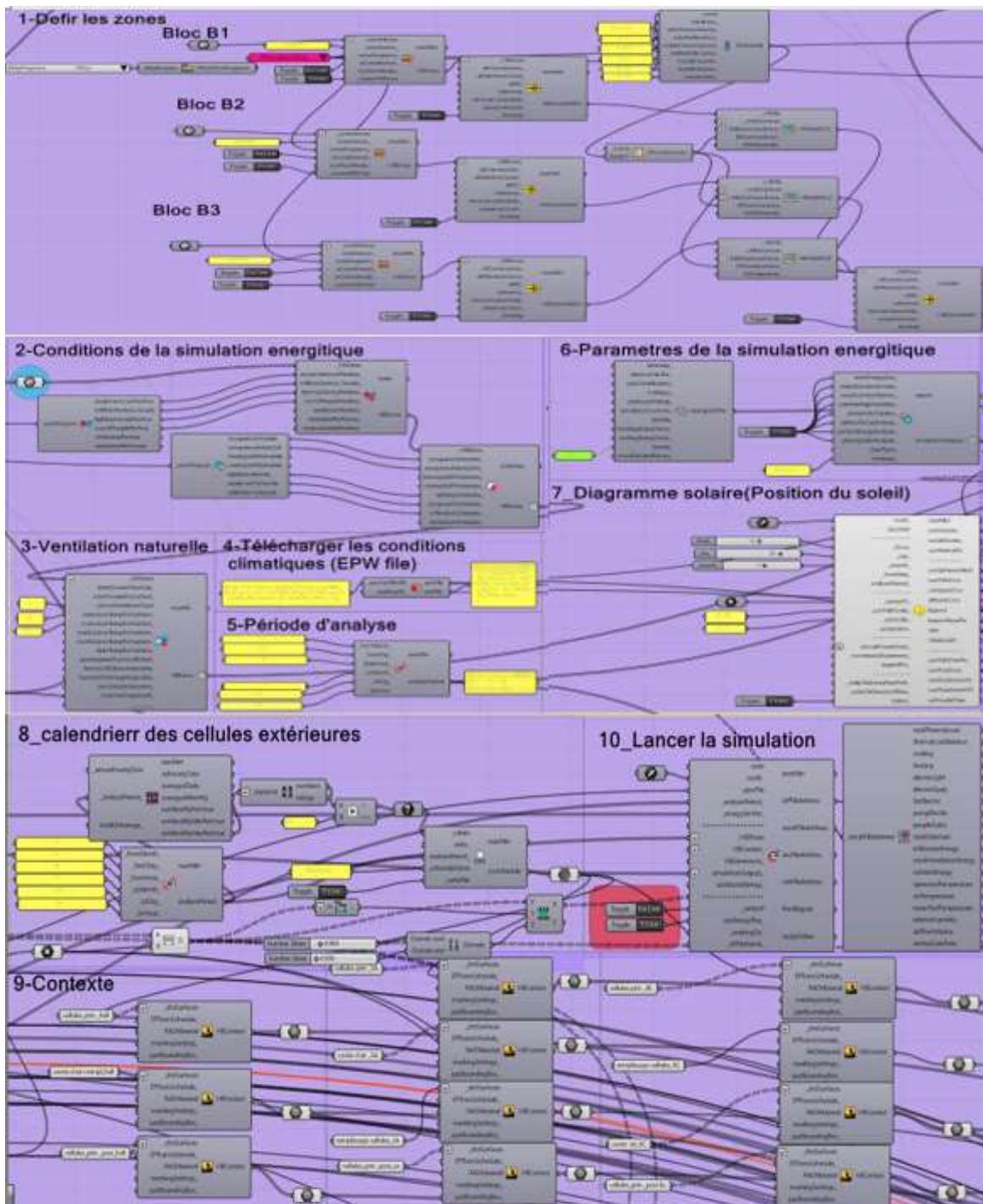


Figure 7.19. Etapes de la simulation énergétique selon le scénario 2.

Source : Auteur (2023).

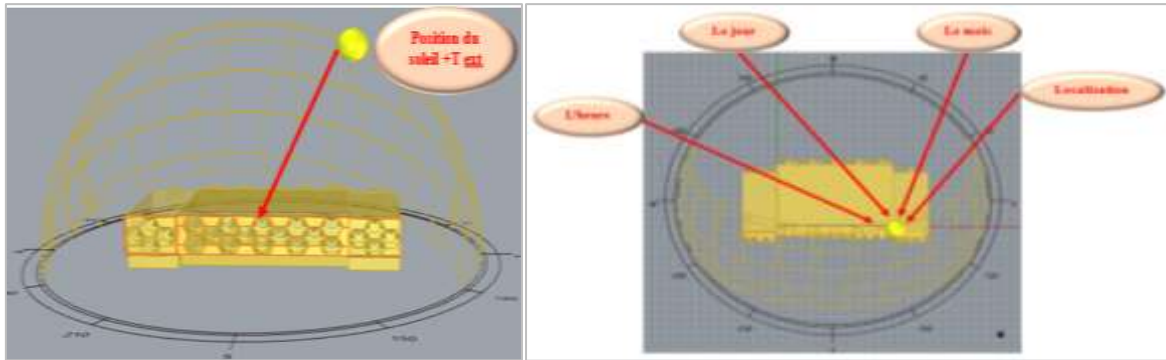


Figure 7.20. Indicateurs agissant sur le comportement de l'enveloppe adaptative.
Source : Auteur (2023).

7.6. Analyse et discussions des résultats de la simulation

7.6.1. Analyse et discussions des résultats du scénario 1 (pré-réhabilitation thermique)

Dans le but d'approfondir l'analyse effectuée lors de l'expérimentation. Une simulation numérique du cas d'étude dans son état initial (cas réel) est effectuée pendant la journée du 25 juillet (Figure 7.21) (voir annexe C).

Cette section nous permet d'effectuer des analyses qu'on ne peut faire pendant l'investigation in situ, comprenant la détermination le rayonnement solaire incident en particulier lors de son fonctionnement (08h00-16h00) ainsi que les charges de refroidissement et les températures effectives permettant de mieux comprendre l'ambiance thermique dans ce bâtiment public pendant cette journée.

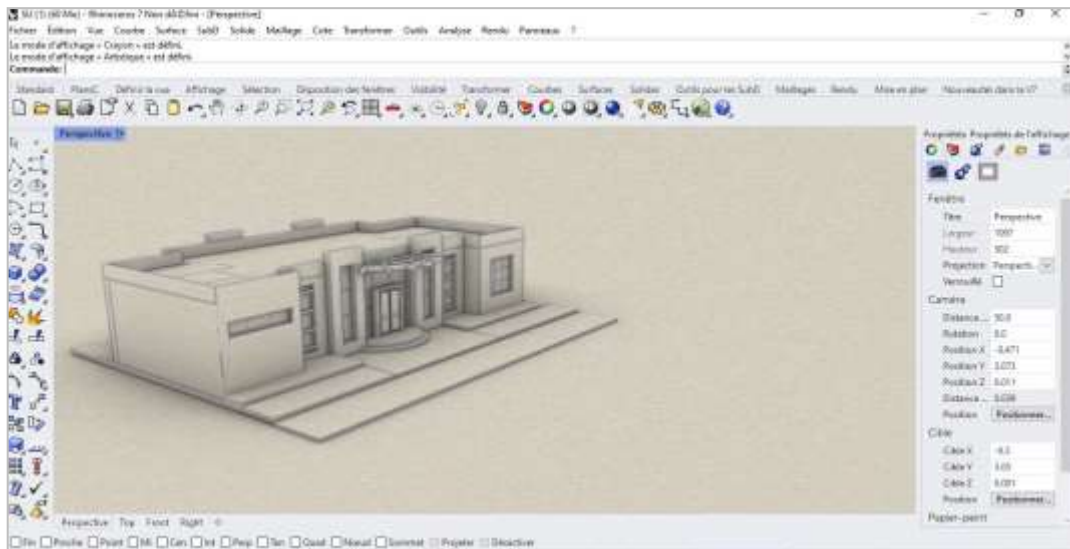


Figure 7.21. Le cas d'étude dans son état réel.
Source : Auteur (2023).

7.6.1.1. Analyse solaire

Le bâtiment public en question se situe dans une région caractérisée par un rayonnement solaire intense, du fait que le bâtiment, lors de la journée du 25 juillet, est

soumis aux radiations solaires directes intenses, dont les valeurs de rayonnement total tombant sur l'ensemble de la géométrie atteignent une valeur importante de l'ordre de **7.82Kwh/m²** pendant 14 heures d'ensoleillement, correspondant à une journée très ensoleillée, dont le toit devient complètement très exposé au soleil (Figure 7.22), de plus, les trois façades exposées Sud, Est et Ouest.

Ceci revient aux caractéristiques formelles et matérielles de l'enveloppe, qui jouent un rôle crucial pour faire face à la surchauffe estivale, notamment les façades entièrement vitrées, dégagées, sans protections solaires exposées aux rayons solaires et au toit plat qui reçoit une grande quantité de rayonnement solaire, ce qui constitue la principale raison de la surchauffe estivale dans diverses zones climatiques, en particulier celles présentant des climats chauds et secs (Nait, 2011; Amraoui, 2021). Ce gain va influencer négativement sur l'ambiance thermique intérieure et provoquer par la suite l'utilisation de la climatisation mécanique pour améliorer le confort thermique interne.

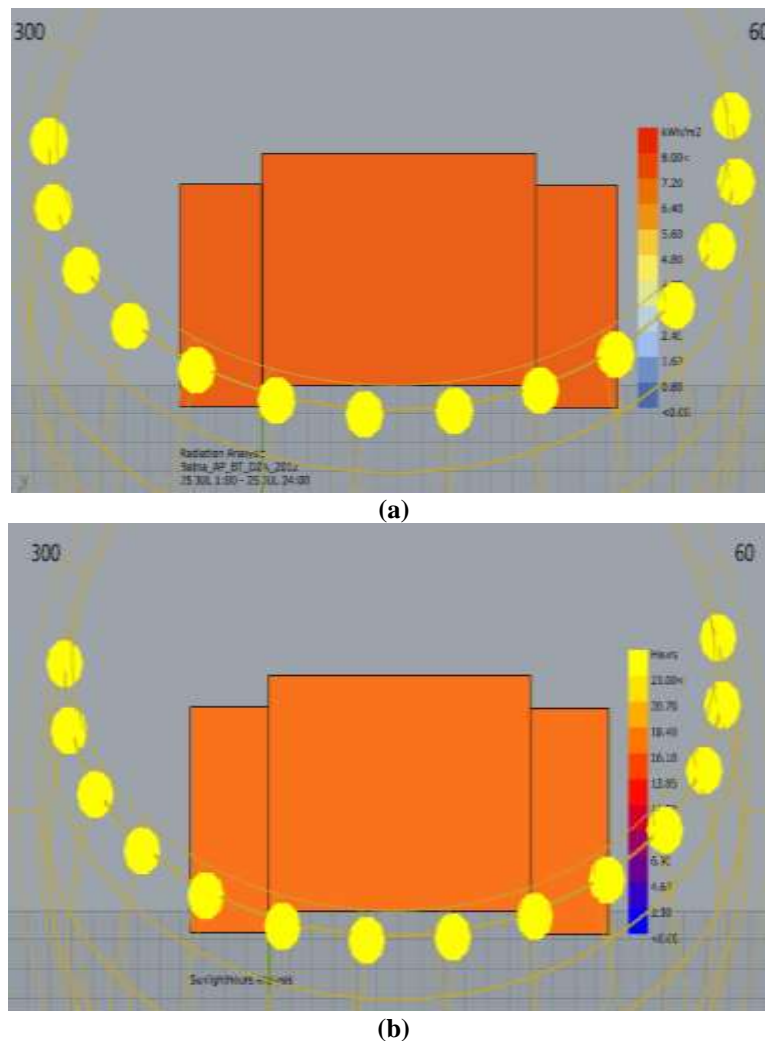


Figure 7. 22. Résultats d'analyse solaire du scénario 1 : (a) : Rayonnement solaire incident, (b) : analyse des heures d'ensoleillement.
Source : Auteur (2023).

7.6.1.2. Température de l'air

Les résultats de la simulation présentent des températures qui se trouvent en dehors de la plage de confort, indiquant une surchauffe interne conformément à la synthèse constatée lors de l'expérimentation. Dont le pic atteint une valeur de 39,12°C, 35,97°C et 34,21°C à 16h00 dans les zones 01 ,02 et 03 respectivement (Figure 7.23). Ces températures élevées s'expliquent par la grande surface vitrée permettant l'augmentation de l'apport solaire à l'intérieur (Khadraoui, 2019).

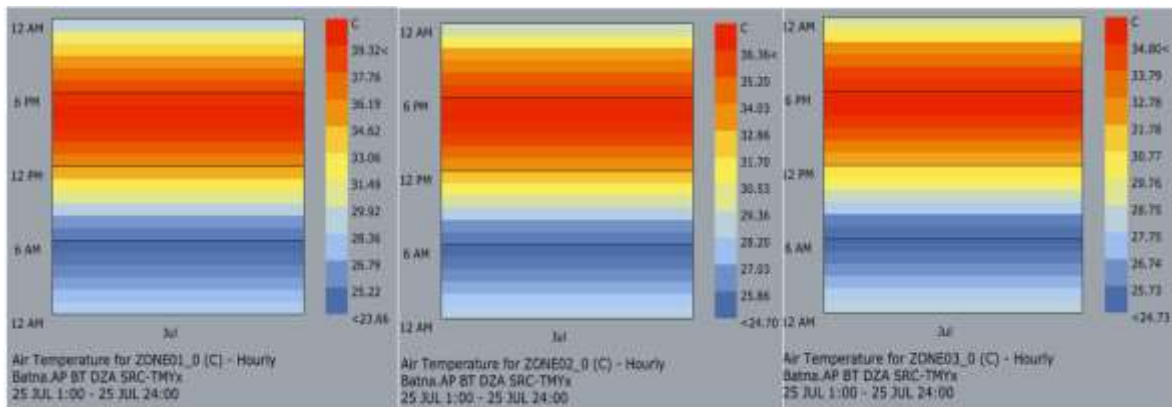


Figure 7.23. Température de l'air issue de la simulation numérique (scénario 1).
Source : Auteur (2023).

7.6.1.3. Charges du refroidissement

Lors de l'investigation in situ effectuée durant la 3^{ème} journée, caractérisée par la mise en marche de la climatisation, dans le but d'atteindre une température confortable à l'intérieur du bâtiment durant les heures de fonctionnement (08h00 -16h00). En revanche, il n'a été constaté aucune amélioration de l'ambiance thermique intérieure par rapport aux autres journées non climatisées.

Devant cette situation, il est important de connaître les indicateurs des besoins en énergie de ce bâtiment. Ceci nous a conduits à calculer les charges du refroidissement durant la même période de fonctionnement. Les résultats de la journée du 25 juillet indiquent une charge de refroidissement atteignant **45,26kWh** (Figure 7.24).

Ceci montre que ce système de climatisation est sollicité de manière significative, ce qui provoque une forte consommation énergétique qui peut signaler une inefficacité énergétique. Cette forte consommation énergétique est due à l'augmentation de ces charges ainsi qu'à la situation du bâtiment dans un environnement marqué par des températures extérieures intenses et un fort rayonnement solaire, provoquant l'augmentation de l'absorption des façades, notamment celle orientée au sud ; par conséquent, des gains

thermiques internes et externes, ce qui implique que le bâtiment doit évacuer cette quantité considérable de chaleur.

Dans cette optique, (Hamza, 2008) indique que la façade à peau unique est responsable de jusqu'à 45 % des charges de refroidissement des immeubles de bureaux dans les zones chaudes et arides.

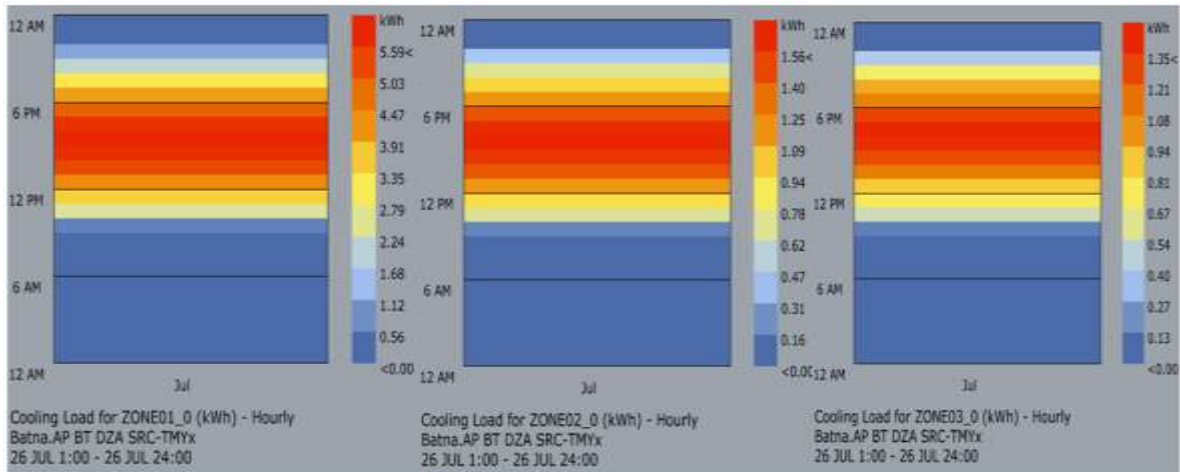


Figure 7.24. Charges de refroidissement de la journée 25 juillet.
Source : Auteur (2023).

7.6.1.4. Température effective

La température effective dans un bâtiment est un indicateur de confort thermique. Elle correspond aux perceptions physiologiques du corps humain d'une personne vis-à-vis du chaud ou du froid dans un environnement donné. Cette température sert à évaluer empiriquement les conditions intérieures grâce à une combinaison de facteurs tels que la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air (Termium Plus, 2023).

La section suivante est consacrée à présenter une évaluation de l'ambiance thermique intérieure à travers l'analyse de la sensation thermique ressentie par les usagers dans les mêmes zones de l'annexe administrative pendant les mêmes périodes, dont le métabolisme (Mo) est égal à **1,4** et un habillement (clo) est léger durant la période estivale, qui est de l'ordre de **0,4**.

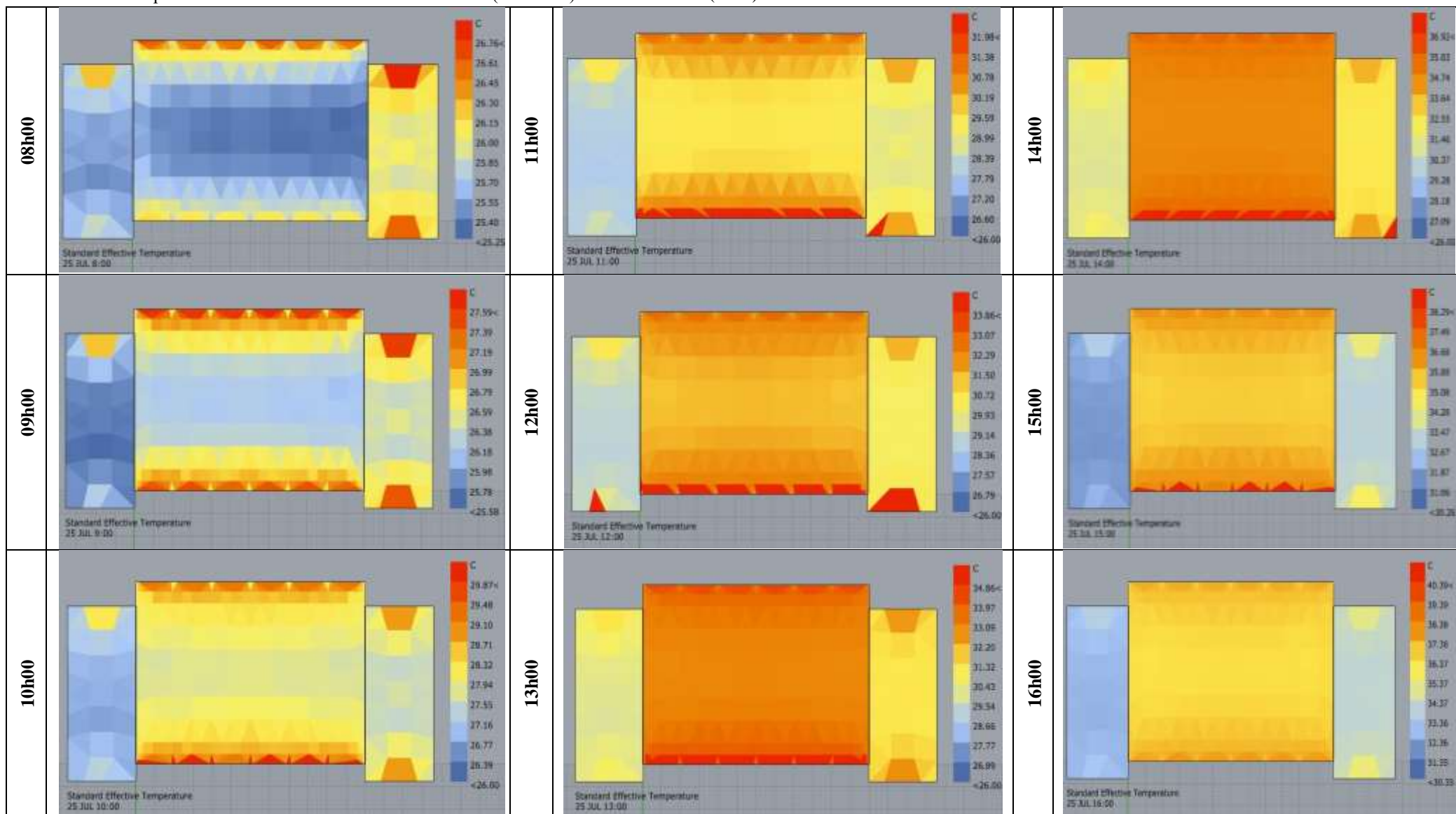
Les résultats de la température effective de cette journée sont affichés sur le Tableau 7.1. La lecture des résultats obtenus, indique que la zone de surchauffe se localise à proximité des ouvertures qui sont placées sur la façade sud et nord. Il a été constaté aussi que la zone 01, définie par une largeur de 8,00 m, permet d'avoir une zone intermédiaire moins surchauffée que les zones limitrophes.

À propos, la zone 02 est caractérisée par une ambiance thermique presque homogène, sauf que deux zones de surchauffe sont situées auprès des ouvertures. Tandis que la zone 03 est caractérisée par des valeurs de température inférieures à celles enregistrées dans les deux autres zones précédentes. Ceci revient aux dimensions de l'ouverture de la façade sud présentée sous forme d'imposte d'une surface de 1,08 m² placée à une hauteur de 2,00 m. Mais d'ordre général, toutes les 03 zones sont situées en dehors de la zone de confort.

Synthèse

La simulation énergétique du cas d'étude dans son état réel indique que le bâtiment bénéficie d'un taux d'irradiations solaires intense pendant toute la journée, à cause du vitrage utilisé, en particulier de sa position et du taux de transparence et de son ratio très élevé, ce qui provoque une surchauffe interne et une sensation d'inconfort nécessitant l'exploitation des systèmes de climatisation, provoquant l'augmentation des charges de refroidissement journalières et saisonnières, par conséquent, provoquant une consommation énergétique excessive.

Tableau 7.1. Température effective de l'annexe administrative (scénario1). Source : Auteur (2023).

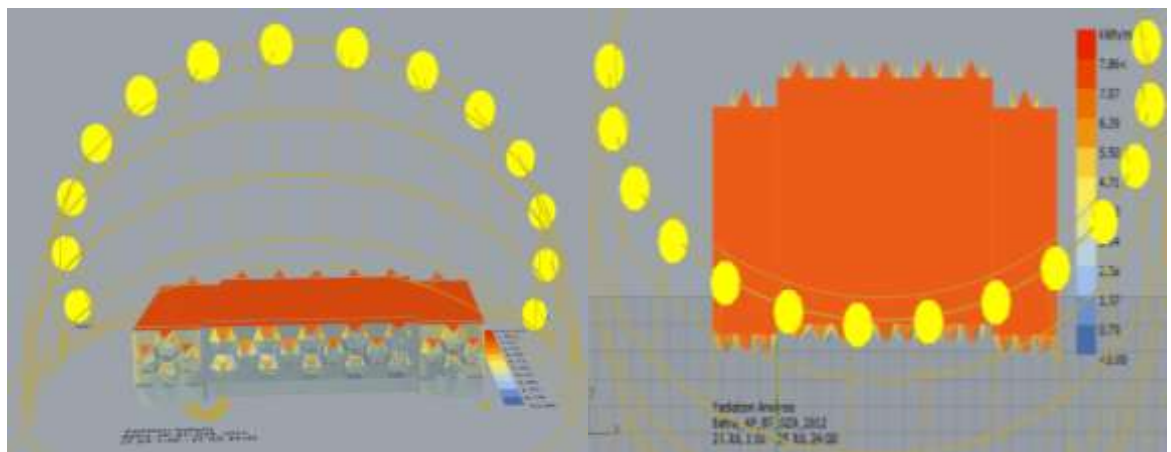


7.6.2. Analyse et discussions des résultats du scénario 2(post-réhabilitation thermique)

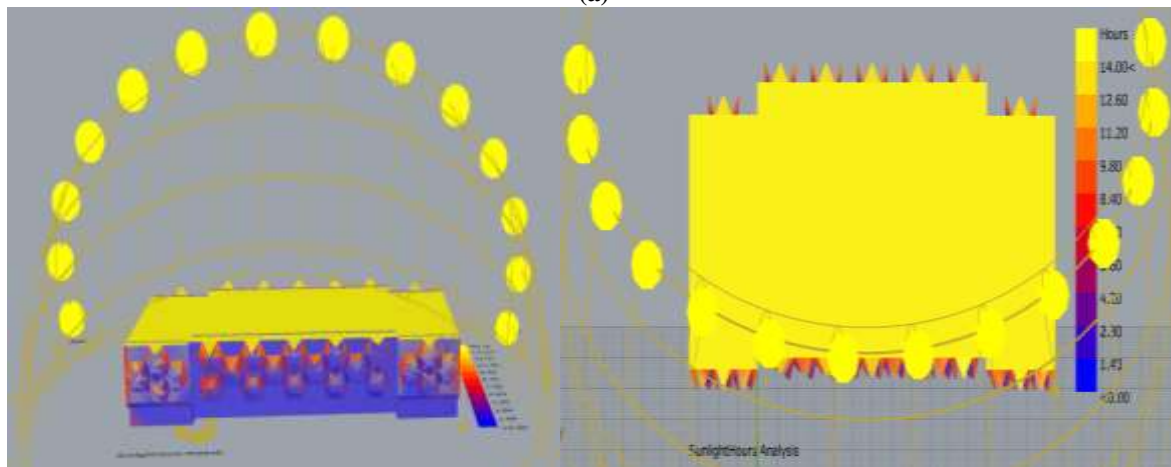
Cette partie se concentre sur l'évaluation de l'ambiance thermique et la perception du bien-être des usagers dans ce bâtiment public après l'application de l'enveloppe adaptative générée dans le premier volet de ce chapitre, dans le but d'évaluer son efficacité notamment dans notre région caractérisée par un climat semi-aride. En se fondant sur une série d'analyses de différents paramètres et indices liés au confort thermique qui sont (voir annexe C) :

7.6.2.1. Analyse solaire

Pendant cette journée, cette nouvelle configuration bénéficie d'une exposition au soleil, permettant de recevoir une quantité d'irradiation solaire atteignant une valeur de **7,64kWh/m²** durant 14 heures d'ensoleillement (Figure 7.25). Le toit et les façades continuent de recevoir une quantité importante de rayonnement solaire direct. Ces valeurs des radiations permettent d'être un stimulus pour l'activation des fils de SMA, responsables de l'ouverture des cellules extérieures afin de faciliter l'entrée de l'air dans l'annexe.



(a)



(b)

Figure 7.25. Analyse solaire du scénario 2 : (a) : Rayonnement solaire incident, (b) : analyse des heures d'ensoleillement.

Source : Auteur (2023).

7.6.2.2. Température de l'air

À travers l'analyse des résultats de l'investigation in situ, il a été révélé que le point P1 du bloc B1, P7 du bloc B2 et P9 du bloc B3 présentent des valeurs critiques qui se situent en dehors de la plage de confort. Par conséquent, une comparaison a été effectuée entre les valeurs enregistrées aux points P0 (température extérieure mesurée), P1, P7, P9 issus de l'expérimentation et celles obtenues par la simulation énergétique, dans le but d'évaluer la fiabilité de l'enveloppe appliquée sur les trois blocs.

À cet égard, la Figure 7.26.a présente des graphiques indiquant les variations de la température de l'air au cours de cette journée.

À propos du bloc B1 : il est démontré que la courbe représentant les valeurs expérimentales du P1 suit la même allure que celle de l'extérieur, mais avec des valeurs plus élevées allant de 29,63°C à 33,80°C. Cependant, ces deux courbes se situent en dehors de la zone de confort durant toute la période d'exploitation de ce bloc. Ceci est dû au gain de chaleur interne et à cause de l'absence d'accès à la ventilation provoquant une surchauffe interne tout au long de la période de prise de mesures. Alors que la courbe montrant la température de l'air issue de la simulation énergétique après l'application de l'enveloppe adaptative, caractérisée par l'ouverture des cellules extérieures de la façade nord à 11h lorsque la température intérieure dépasse la température neutre de 26 °C. Elle présente une diminution spectaculaire des valeurs de température caractérisées par des valeurs appropriées oscillant entre 23,15°C et 27,61°C qui se situent dans la plage de confort de 08h00 à 12h00, et en même temps, elles sont bien inférieures à celles prises lors de l'expérimentation in situ se manifestant par un écart maximal atteignant une valeur maximale de 7,59 °C marquée à 10h00 et un écart minimal de 1,63 °C enregistré à 16h00. Ce qui est significatif et important dans la performance énergétique du bâtiment.

Concernant les deux blocs B2 et B3 : les trois profils des températures constatés dans les deux blocs prennent la même allure que celle constatée dans le bloc B1, où les courbes de la température mesurée suivent la même allure que celle de l'extérieur, mais avec des valeurs plus élevées allant de 29,30 °C à 33,80 °C en P7 et de 28,90 °C à 33,70 °C en P9 durant la tranche horaire qui s'étale entre 08h00 et 16h00. Tandis que concernant la courbe qui représente les résultats de la simulation énergétique, il a été constaté une diminution remarquable de la température interne, d'une part : dans le bloc B2, où la température ambiante varie entre 23,75 °C et 31,97 °C, Avec un écart maximal par rapport à la valeur mesurée atteignant une valeur de 6,65 °C à 10h00 et minimal de l'ordre de 1,43 °C à 16 h00.

D'autre part, le bloc B3 est caractérisé par une variation de la température ambiante s'étale entre 23,79 °C et 31,88 °C, Présentant un écart maximal de 6,15°C par rapport à la valeur mesurée à 10h00 et minimal de 1,32 °C à 16 h00.

7.6.2.3. Humidité relative

En ce qui concerne les valeurs d'humidité relative au cours de la même journée illustrées par les graphes présentés dans la Figure 7.26.b. À propos du bloc B1 : on a constaté que la courbe représentant les valeurs mesurées du cas réel suit le diagramme d'extérieur, mais avec des valeurs inférieures oscillant entre 20,40% à 13h00 et un maximum de 31,30% à 11h00 qui sont en dehors de la plage de confort déterminée par APRUE [35%-65%]. Cependant, le graphique représentant les résultats de la simulation énergétique est supérieur et parallèle à ceux de l'extérieur et de l'expérimentation, où les valeurs se situent dans la plage de confort pendant toute la période de fonctionnement qui s'étale entre 08h00 et 16h00. Cette courbe de simulation est caractérisée par une valeur minimale de 45,43% à 13h00 et une valeur maximale de 55,40 % à 08 h00. L'écart minimum a été enregistré entre les valeurs réelles de l'investigation in situ et celle de la simulation, atteignant une valeur de 19,21 % à 11h00, et l'autre maximum a atteint une valeur de 25,50 % à 08h00.

Pour les blocs B2 et B3, il a été constaté que les valeurs d'humidité relative mesurées à l'intérieur des deux blocs ainsi qu'à l'extérieur se situent en dehors de la zone de confort, en particulier durant la période de l'après-midi. Dont la valeur minimale est de l'ordre de 31% enregistrée dans le point P7 du bloc B2 et de 29% dans le point P9 du bloc B3, enregistrées à 15h00 et 16h00. En revanche, les valeurs obtenues via la simulation énergétique se situent dans la plage de confort pour les deux blocs durant la tranche horaire qui s'étale entre 08h00 -16h00, Dont la valeur maximale constatée dans la zone 02 (Bloc B2) est de l'ordre de 54,35% à 08h00 et une valeur minimale est de l'ordre de 46,27% enregistrée à 13h00 dans la zone 03 (Bloc B3).

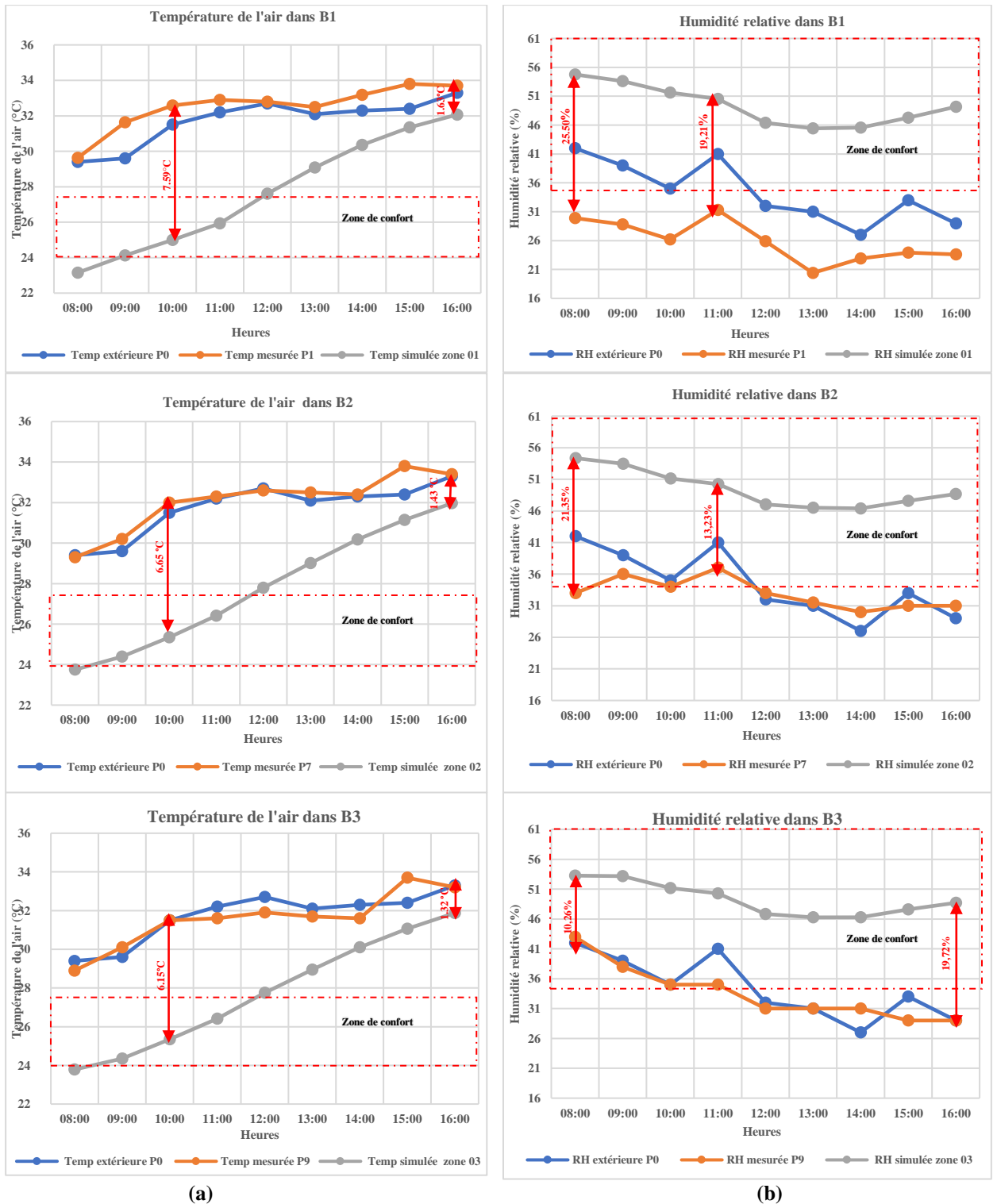


Figure 7.26. (a) : Valeurs de température de l'air, (b) : Valeurs d'humidité relative.
Source : Auteur (2023).

La Figure 7.27 montre les écarts de température : **l'histogramme A** présente l'écart entre la température ambiante mesurée du cas réel dans le point P1 situé dans le bloc B1 et celle de l'extérieur présentées, dont la différence maximale atteint une valeur de 2,04 °C à 09 h00 et une valeur minimale atteint une valeur de 0,1 °C à 12 h00. Ce rapprochement entre les températures internes et externes est justifié par la surchauffe et le gain thermique interne.

Tandis que l'**histogramme B** présente les écarts entre la température simulée et la température extérieure prise lors de l'investigation in situ, dont il a été constaté que les valeurs issues de la simulation sont inférieures à celles de l'extérieur, avec un écart maximal atteignant $-6,50\text{ °C}$ à 10h00 et un écart minimal atteignant $-1,05\text{ °C}$ à 15h00. L'**histogramme C** représente les écarts de température de l'air simulée et celle mesurée qui révèle un écart maximal atteignant $-7,59\text{ °C}$ enregistré à 10 h00 et un écart minimal atteignant une valeur de $-1,63\text{ °C}$ à 16h00. Ceci est justifié par le biais d'un rafraichissement passif effectué grâce à une ventilation naturelle, permettant de résoudre non seulement le problème de l'inconfort lié à la surchauffe interne, mais créé également une ambiance confortable et saine (Elghawaby, 2013). Donc la fiabilité de cette enveloppe est prouvée en matière d'apport de l'air frais et échappement de l'air chaud vers l'extérieur qui influe par la suite sur la réduction de la température de l'air intérieur et assurer des meilleures conditions et une bonne ergonomie de travail.

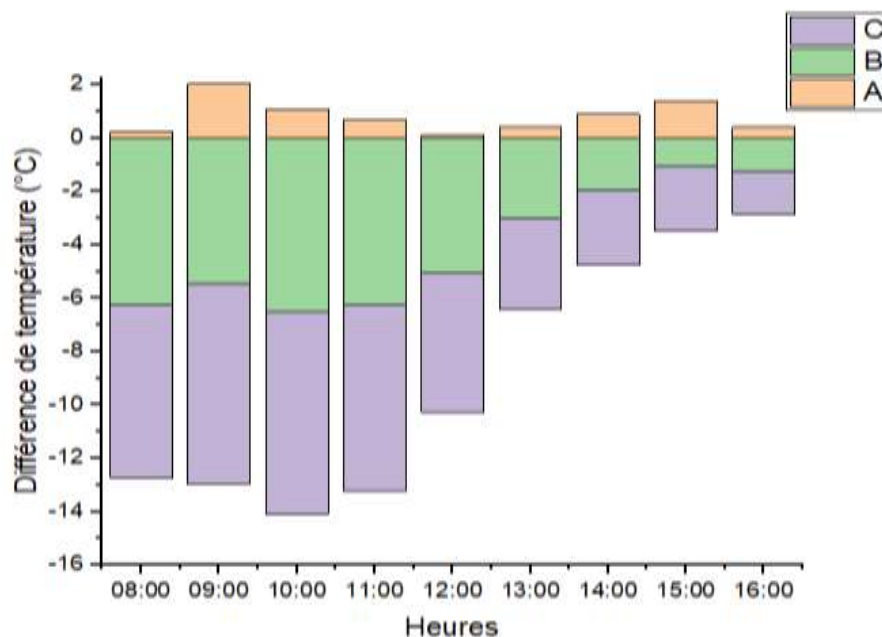


Figure 7. 27. Ecarts de température.
Source : Auteur (2023).

Cela peut s'expliquer par le fait que les valeurs d'humidité relative augmentent en fonction de la baisse de température (Fekkous and Bouchahm, 2017) en raison de la pulvérisation de l'eau qui absorbe la chaleur du flux d'air entrant et réduit la température de l'air, ce qui réduit la consommation d'énergie mieux que les systèmes de refroidissement mécaniques. Cela correspond à l'idée de Jomehzadeh et al. (2017) qui ont rapporté que l'augmentation de l'humidité de l'air améliore le confort thermique des occupants dans les climats secs où un mur respirant fonctionne par un gradient de pression intérieur-extérieur

qui permet à l'air de migrer lentement à travers les murs de la pression la plus élevée à la pression la plus basse. Comme celui constaté chez les êtres vivants (Elghawaby, 2013).

Une analyse approfondie vise à mieux comprendre la sensation thermique perçue par les usagers après la réhabilitation thermique réalisée grâce à l'application de cette enveloppe adaptative, en s'appuyant sur l'étude de la température effective, du PMV et du PPD.

7.6.2.4. Température effective

La partie suivante aborde une analyse des résultats de la température effective, en comparant les valeurs obtenues à différentes hauteurs (1,10 m, 2,10 m et 3,10 m) à travers des cartes thermiques. Cette analyse permet d'analyser les variations de température liées à la hauteur et au temps. Pour identifier possiblement le phénomène de la stratification thermique et vérifier la cohérence des températures en hauteur.

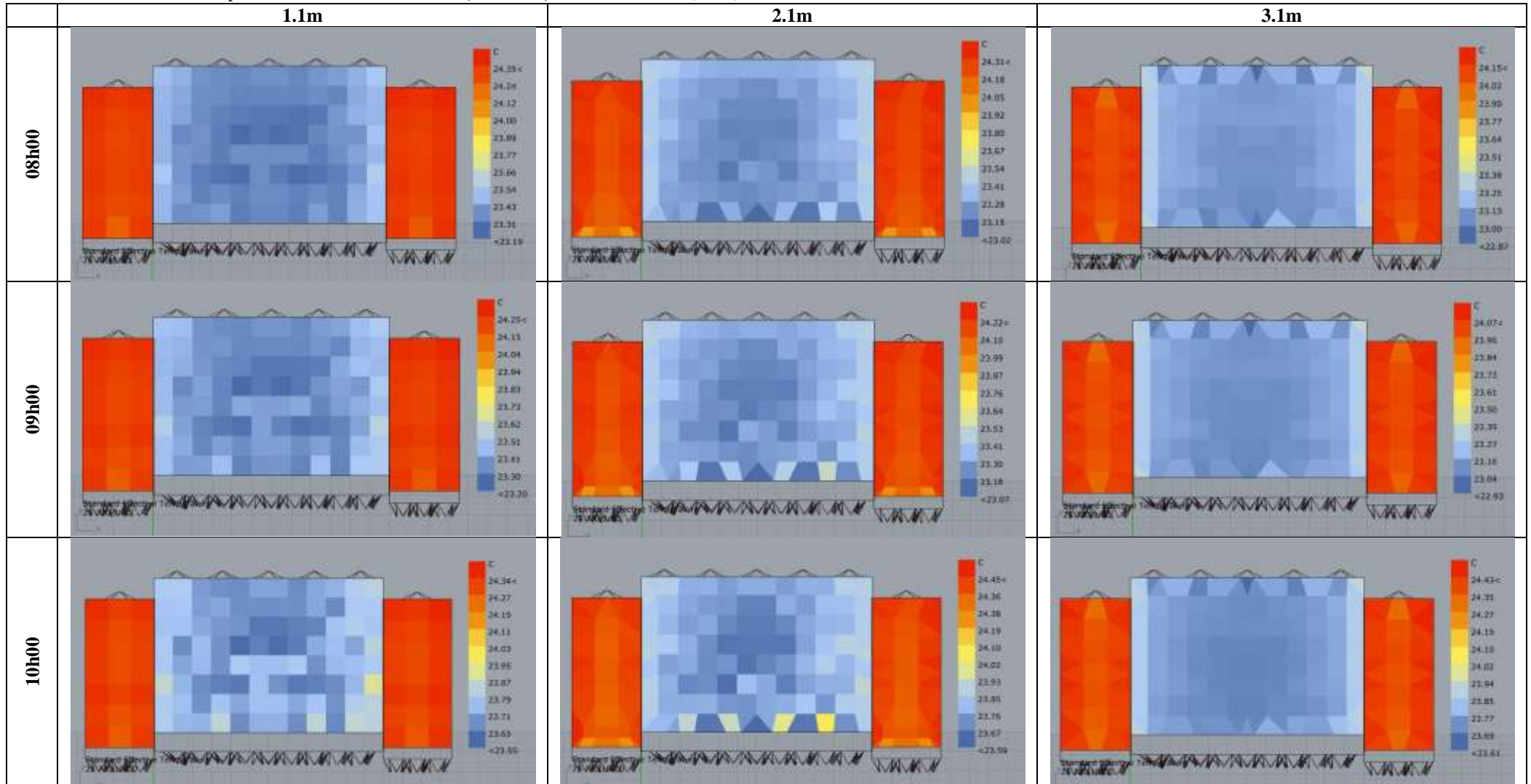
Cette différence entre les hauteurs permet d'analyser la température effective en fonction des différentes situations des occupants vis-à-vis d'eux-mêmes et de l'emplacement des ouvertures placées sur les deux façades, dont :

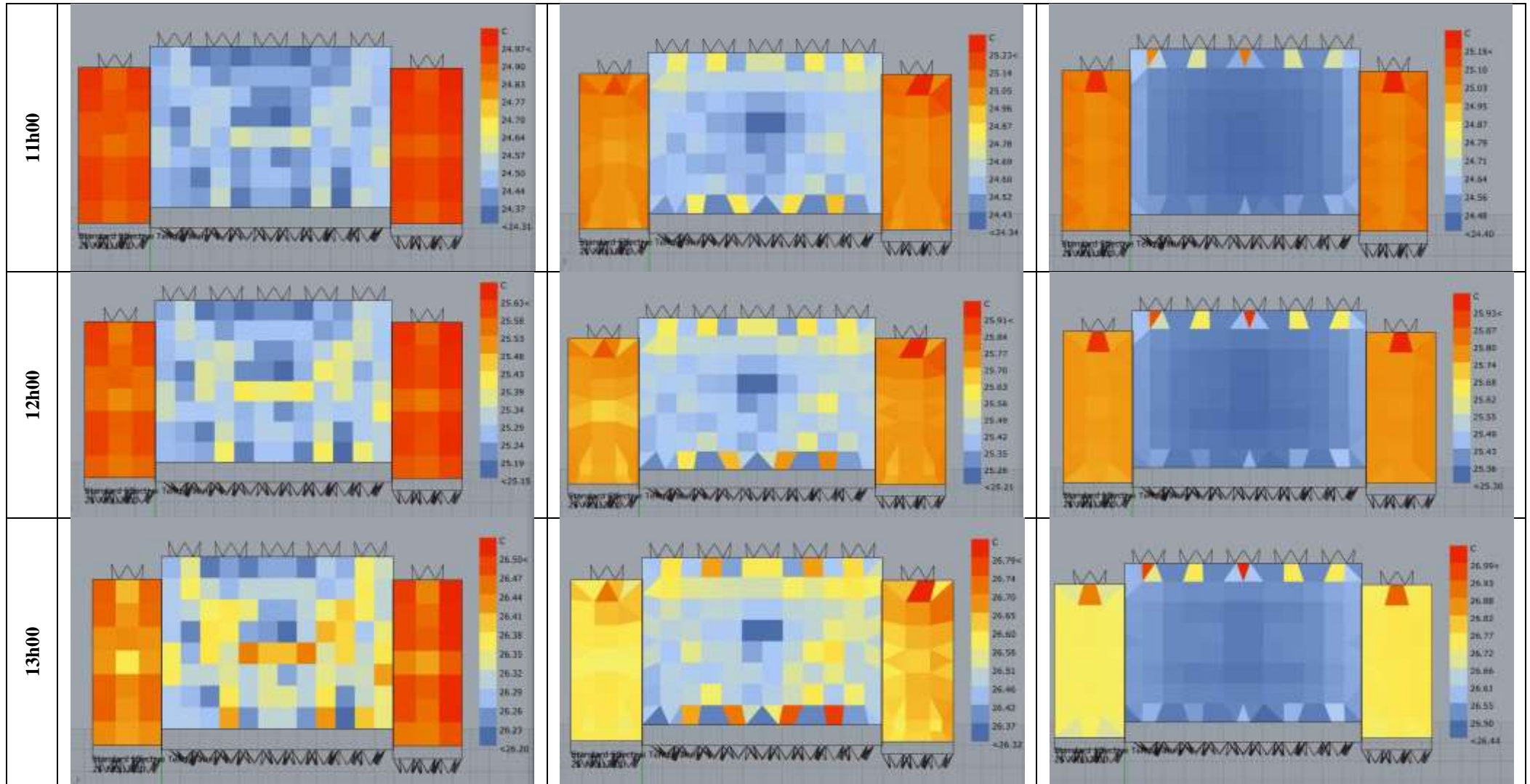
- **Hauteur de 1,10 m** : l'analyse à cette hauteur est cruciale, car elle représente une hauteur où on a pris les mesures expérimentales lors de l'investigation in situ recommandée par ASHRAE 55, ainsi qu'elle représente une hauteur typique à laquelle se trouve la zone occupée par les usagers debout et indique aussi le niveau de la tête chez une personne assise (Martinet and Meyer, 1999).
- **Hauteur de 2,10 m** : cette hauteur représente un niveau au-dessus de la tête d'un usager debout et en même temps désigne l'axe horizontal passant sur la partie inférieure des ouvertures de la deuxième rangée placées sur la façade sud.
- **Hauteur de 3,10 m** : désigne un niveau supérieur de l'espace intérieur du cas d'étude proche du plafond ; de plus, il fait référence à l'axe horizontal passant sur la partie supérieure des ouvertures de la dernière rangée situées sur la façade sud et nord.

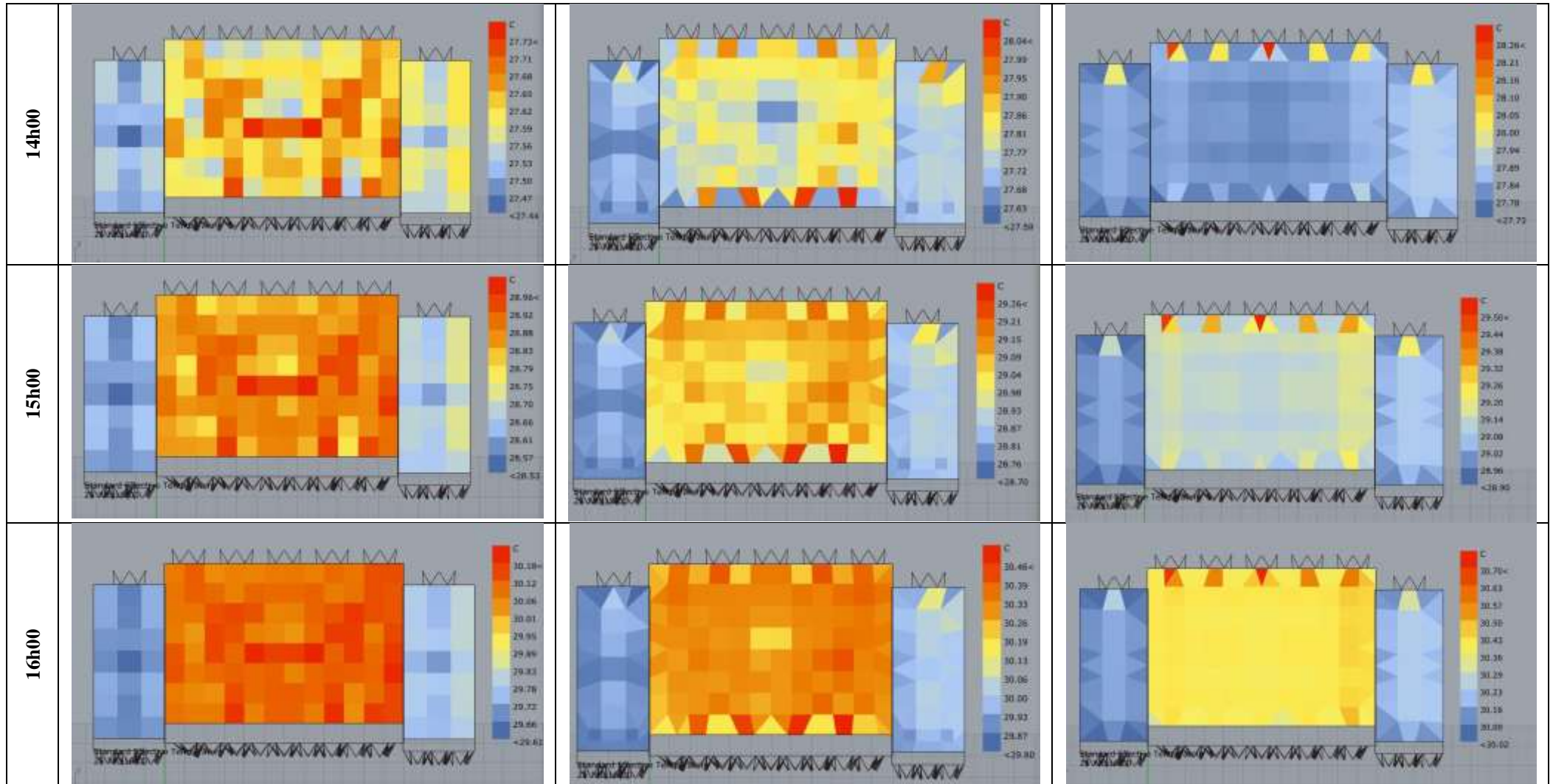
À cet égard, le Tableau 7.2 présente les résultats acquis en termes de température effective, présentés à travers les différentes hauteurs 1,10 m, 2,10 m et 3,10 m.

On a observé que la température effective constatée dans les zones 01, 02 et 03 à travers diverses hauteurs pendant l'intervalle horaire de 08h00 à 13h00 est en zone de confort déterminée par $[24^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}]$, dont la période de 14h00 à 16h00 se caractérise par une hausse de température atteignant un maximum de l'ordre de $30,42^{\circ}\text{C}$; $30,29^{\circ}\text{C}$ et $30,15^{\circ}\text{C}$ en zone 01, 02 et 03 à une hauteur de 3,10 m à 16h00.

Tableau 7.2. Température effective de l'annexe (scénario2). Source : Auteur (2023).







Dans le but d'approfondir l'analyse via des profils verticaux des gradients thermiques de température présentés dans la Figure 7.28. Les résultats recueillis, d'une manière générale, correspondent à un gradient vertical faible et stagnant, avec une amplitude verticale atteignant son maximum à 16h00, reflétant une valeur de $0,36^{\circ}\text{C}$ constatée en zone 01 à 16h00. Tandis que l'écart minimal est enregistré dans les zones 02 et 03, atteignant une valeur de $-0,12^{\circ}\text{C}$ à 09h00.

À cet effet, les résultats acquis se caractérisent par une répartition **homogène de la température du bas vers le haut** à travers les différentes zones composant l'annexe. Ceci est justifié par la norme **ISO 7730 : 2005 et ASHRAE standard 55**, indiquant que la variation de température entre la tête et la cheville qui ne dépasse pas **3°C est acceptable**. Ce qui signifie qu'il n'y a aucune stagnation de l'air chaud dans la partie supérieure et ni stratification thermique, grâce à une très bonne répartition de l'air à toutes hauteurs garantie grâce à une ventilation transversale effectuée par la présence des ouvertures sur deux façades opposées, celle du nord et du sud, ainsi qu'à une isolation thermique effectuée par une cavité d'air équipée par un système de refroidissement de l'air, permettant d'éviter les gains solaires.

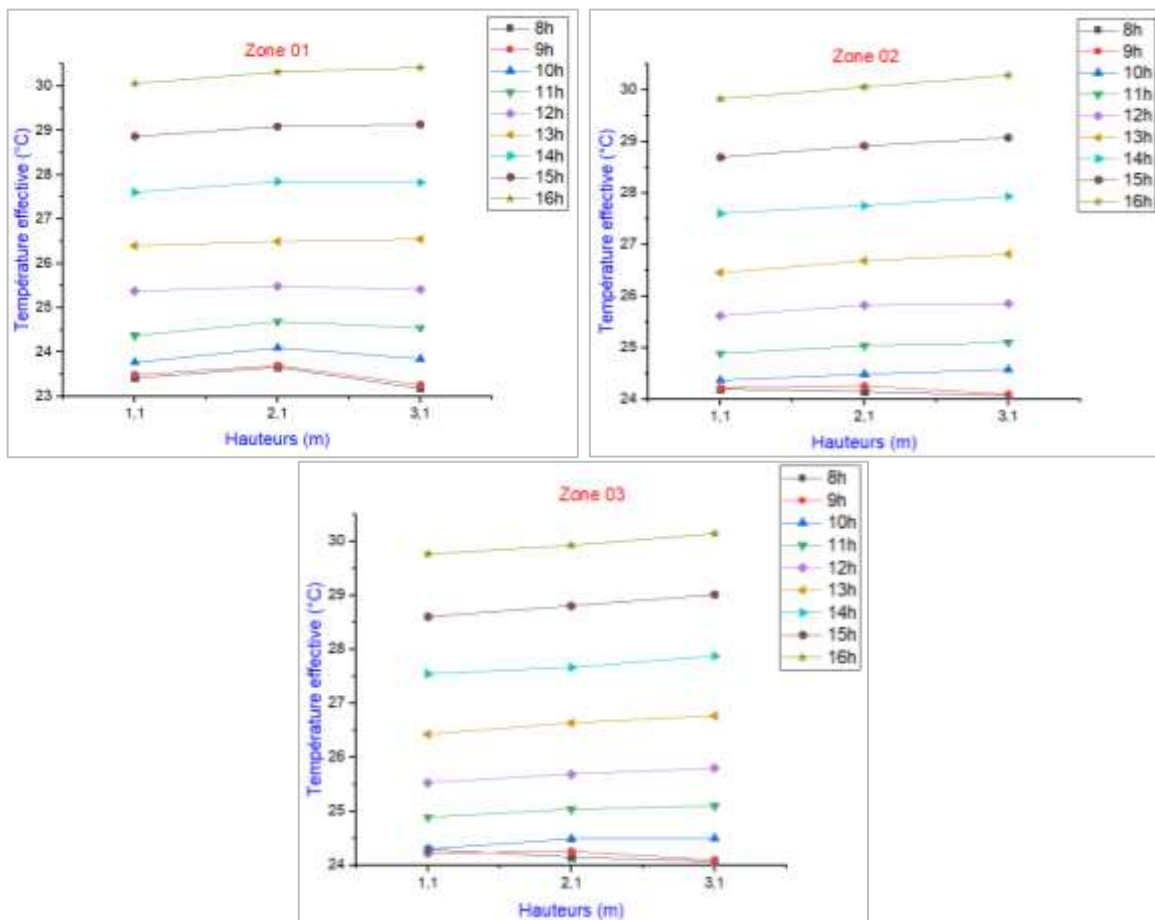


Figure 7.28. Gradient vertical de température.
Source : Auteur (2023).

7.6.2.5. Vote moyen prédit PMV

Dans le but d'évaluer le confort thermique ressenti par les occupants lors de la phase post-réhabilitation au fil du temps, une analyse a été faite de l'indice PMV. Les résultats obtenus sont indiqués dans la Figure 7.29.

L'analyse des résultats obtenus issus des 3 zones composant le cas d'étude nous a permis de les répartir en trois catégories de sensations essentielles qui sont :

- **Sensation thermique légèrement fraîche (-0,29 à +0,15)** : est sentie pendant la période de 08h00 à 10h00. Il a été constaté que les valeurs minimales durant cette tranche horaire sont enregistrées dans la zone 01, dont la valeur la plus basse, enregistrée à 08h00 atteignant -0,29, comprenant une sensation neutre à 09h00 avec une valeur minimale de l'ordre de -0,18 à -0,02. Ces valeurs indiquent que les trois zones sont confortables.
- **Sensation thermique légèrement chaude (+0,27 à +0,99)** qui s'étale entre 11h00 et 13h00. Dont la valeur maximale et minimale sont enregistrées dans la zone 01, variant entre +0,27 jusqu'au +0,99. Cette sensation est acceptable en raison de l'habillement léger et de l'absence d'activité physique.
- **Sensation thermique chaude (+1,27 à +1,90)**, marquée de 14h00 à 16h00, où il a été constaté que la zone 01 se caractérise par des valeurs plus élevées arrivant à 1,9 à 16h00, tandis que les valeurs minimales sont enregistrées dans les zones 03 et 02, caractérisées par des valeurs de +1,27 et +1,29 respectivement. Ce qui présente une perception de chaleur légèrement ressentie, reflétant une sensation d'inconfort modéré.

Globalement, à travers la lecture de l'évolution de la sensation thermique des usagers présentée dans le Tableau 7.3. D'ordre général, on constate une distribution homogène et qu'il n'y a pas de zone extrêmement chaude déterminée par des valeurs de PMV similaires au fil du temps, dont la période de 08h00 -13h00 est déterminée comme un environnement thermique confortable avec des sensations thermiques neutres à légèrement chaudes. En revanche, l'intervalle entre 14h00 et 16h00 est défini par une sensation thermique chaude, qui peut être inconfortablement modérée et légèrement ressentie. Mais cette situation peut être tolérable et non gênante.

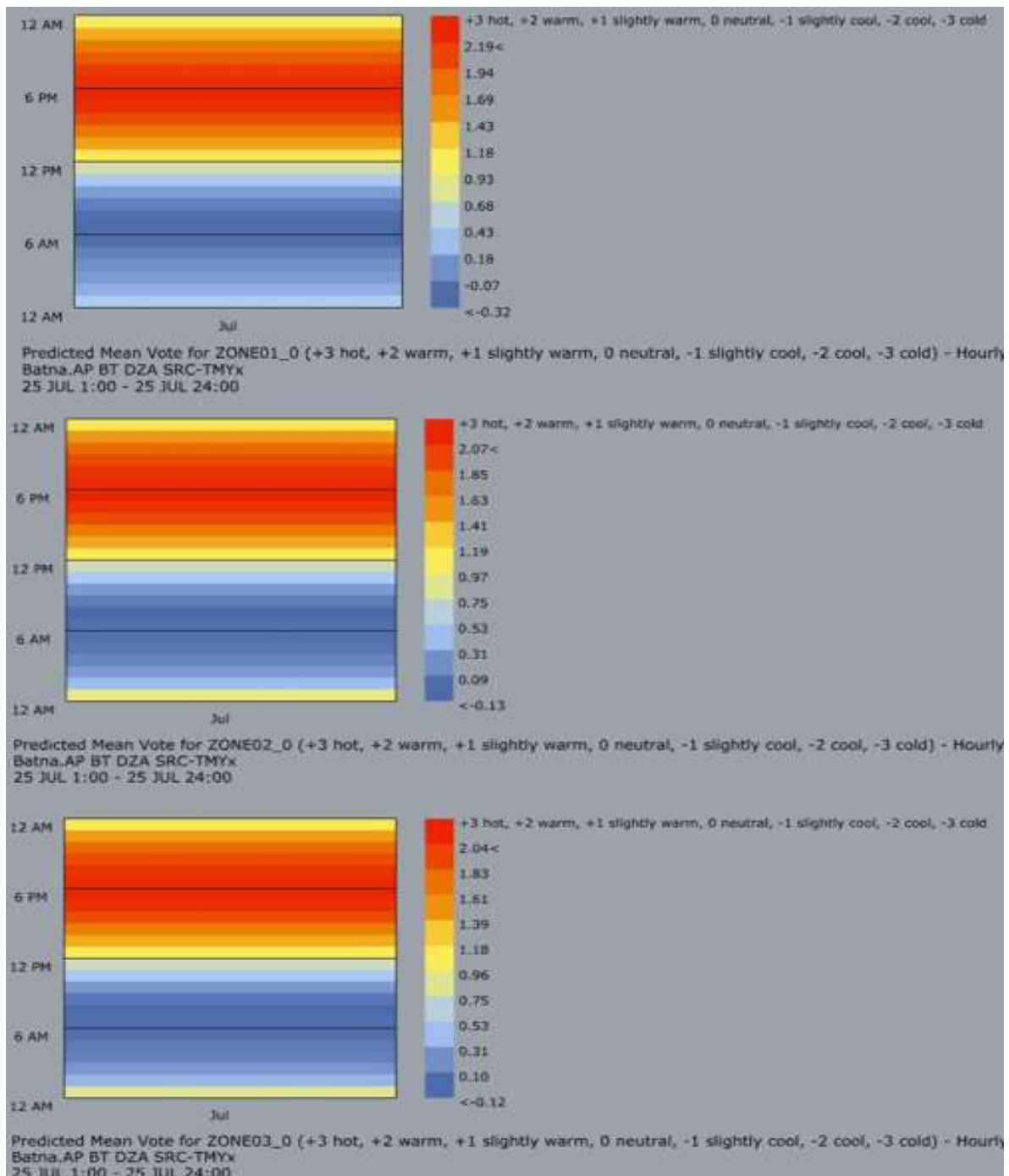


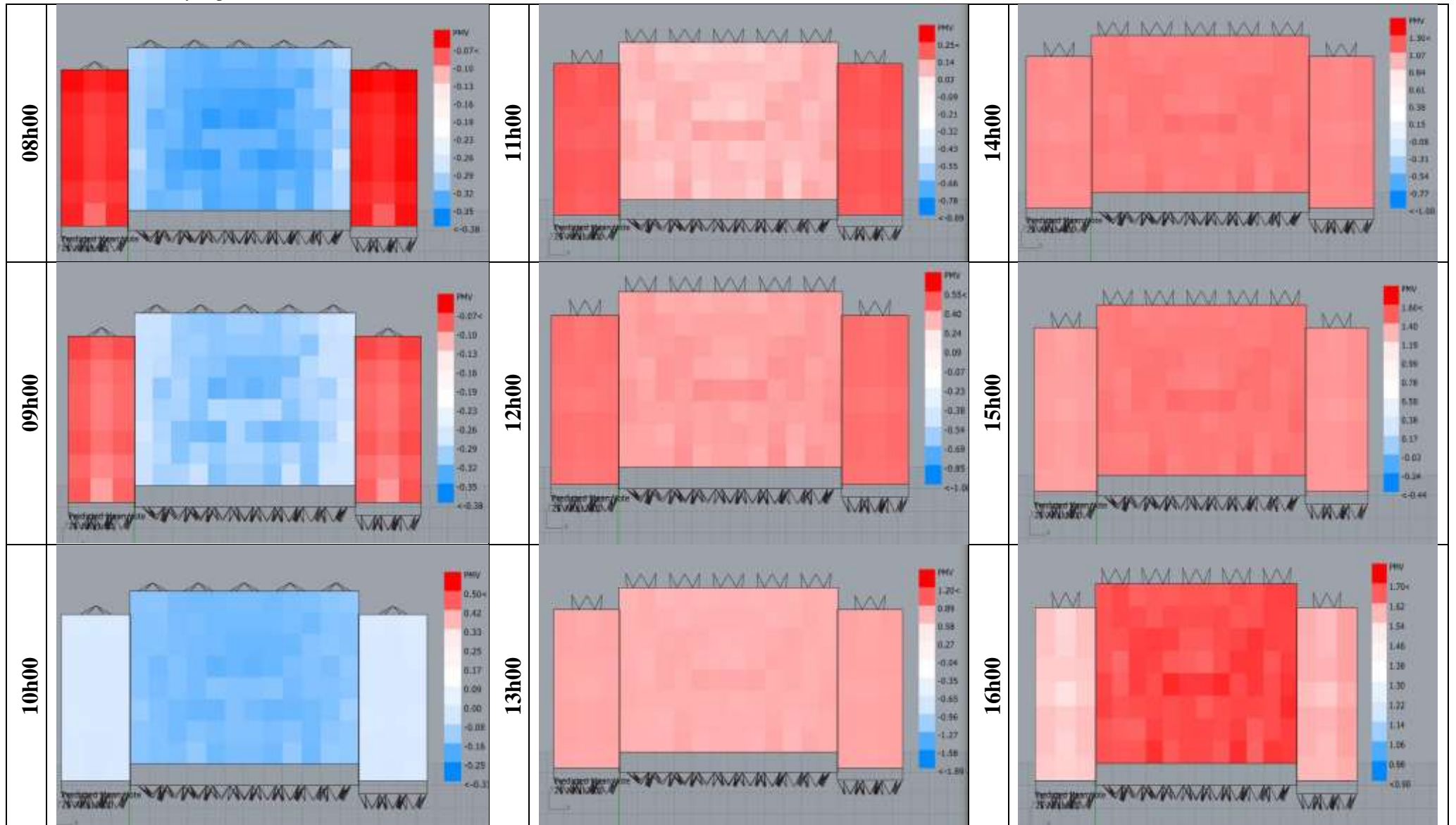
Figure 7.29. PMV du scénario 2.

Source : Auteur (2023).

7.6.2.6. Pourcentage prévu d'insatisfaction PPD

La Figure 7.30 présente les résultats du PPD, permettant de quantifier le pourcentage de personnes insatisfaites vis-à-vis du confort thermique intérieur, déterminé en fonction de l'indice PMV. Cette figure se distingue par deux taux qui sont :

Tableau 7.3. Vote moyen prédit PMV. Source : Auteur (2023).



- **De 08h00 jusqu'à 10h00** : cette tranche horaire se caractérise par des PPD faibles, qui varient entre 5% et 6,78%. Ceci désigne une zone où la plupart des occupants trouvent le confort thermique adéquat en raison des températures acceptables durant cette période.
- **De 11h00 jusqu'à 13h00** : indique une hausse des PPD avec des pourcentages variants entre 6,51% et 25,52%, reflétant une situation légèrement inconfortable.
- **De 14h00 jusqu'à 16h00** : ce qui signifie des pourcentages élevés de personnes insatisfaites atteignant un maximum de 71,93% dans la zone 01 et de 66,94% et 65,77% à 16h00 dans les zones 02 et 03 respectivement. Signifiant l'insatisfaction thermique des usagers due à la hausse des températures par rapport à celles de la matinée.

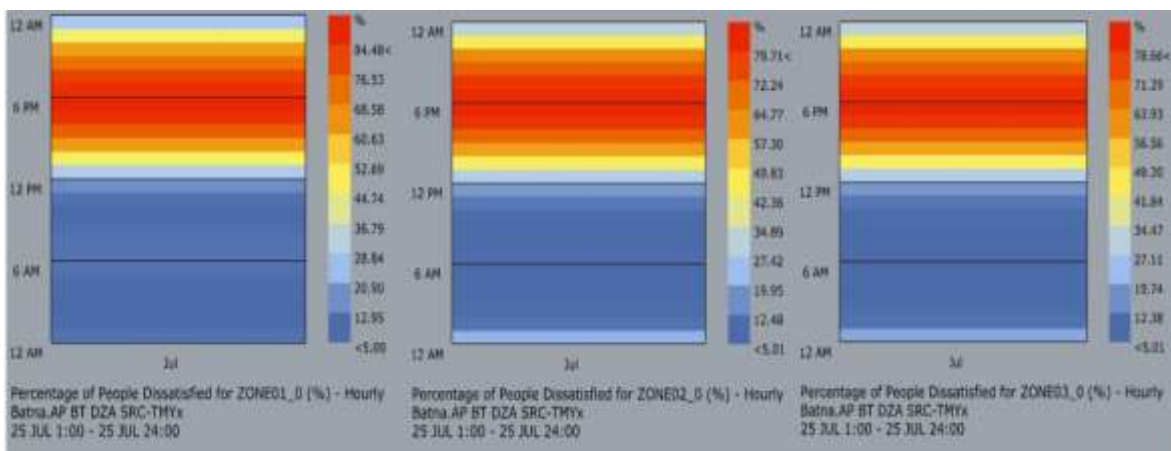


Figure 7.30. PPD du scénario 2.
Source : Auteur (2023).

À travers la comparaison entre les résultats obtenus en matière des différents indices du confort thermique, on constate une amélioration de l'ambiance thermique intérieure à travers les différentes zones composant l'annexe administrative, notamment au long de la partie matinale. Tandis que la période de l'après-midi se caractérise par une surchauffe qui est tolérable.

Synthèse

On peut conclure que la réhabilitation thermique qui a fait l'objet de cette étude permet d'avoir un abaissement important de la température de l'air pendant la période matinale qui s'étale entre 08h00 et 12h00, située dans la zone de confort. Tandis que la période de l'après-midi, qui s'étale entre 13h00 et 16h00, est en dehors de la zone de confort, qui se caractérise par des valeurs de températures basses par rapport à celles enregistrées lors de l'investigation in situ et à celles prises à l'extérieur. De plus, les résultats du PMV-PPD montrent un allongement de la période de satisfaction thermique, atteignant 5 heures par jour durant la tranche horaire de 08h00 à 13h00, ce qui correspond à 62,5% au confort de la durée

d'occupation de l'annexe. Ceci est dû à l'effet d'application de cette enveloppe. Par conséquent, une réduction des heures d'inconfort en 3 heures par jour, équivalant à 37,5% de la durée d'occupation, mais ce pourcentage représente une ambiance thermique tolérable et non gênante pour exercer les activités administratives et entraînant une diminution de la consommation d'énergie destinée à la climatisation.

Conclusion

Ce dernier chapitre a été structuré en deux volets, :

Le premier volet est consacré à la présentation du processus suivi pour générer une enveloppe adaptative thermosensible inspirée des différents systèmes de survie du monde des abeilles et de leurs différentes stratégies de survie et d'adaptation. Cette enveloppe est développée d'une manière passive selon la technique Top/Down, caractérisée par l'intégration d'alliages à mémoire de forme SMA (NiTi) comptant comme capteurs/actionneurs autonomes chargés de l'ouverture et de la fermeture. Elle est appliquée aux façades nord et sud. Cette dernière est conçue sous forme de deux couches séparées par une cavité d'air dotée d'un système de pulvérisation de gouttes d'eau à courant descendant pour refroidir l'air avant son entrée dans le bâtiment.

Le deuxième volet est une simulation énergétique consacrée à évaluer le comportement thermique de cette annexe soumise aux conditions d'un climat semi-aride lors de la journée du 25 juillet durant la tranche horaire de 08h00 à 16h00, modélisée à l'aide du logiciel algorithmique Rhinoceros/Grasshopper, puis soumise à une simulation énergétique à l'aide des plugins Ladybug et Honeybee avec leurs logiciels intégrés, notamment EnergyPlus.

Ce volet est composé de deux parties essentielles : l'une est consacrée à une simulation énergétique du cas réel (pré-réhabilitation thermique) défini en tant que scénario 1, permettant d'acquérir plus d'informations sur le bâtiment qui sont difficiles à obtenir pendant l'investigation in situ, et l'autre, celle effectuée après l'application de l'enveloppe adaptative (post-réhabilitation thermique) défini en tant que scénario 2, dans le but d'évaluer la performance et la fiabilité de cette enveloppe sur le confort thermique et la perception du bien-être.

Les résultats de la simulation énergétique en ce qui concerne le premier scénario confirment les résultats obtenus lors de l'expérimentation in situ, manifestés par une augmentation de la température de l'air intérieur qui devient en dehors de la zone de confort pendant toute la période de son fonctionnement. De ce fait, la surchauffe intérieure rend

l'espace inconfortable, ce qui a un impact négatif sur la conduite de l'activité administrative et provoque une surutilisation de la climatisation mécanique conduisant à une consommation électrique très élevée.

Tandis que ceux issus du deuxième scénario montrent une amélioration significative des conditions de confort thermique, identifiée par une réduction spectaculaire des valeurs de températures de l'air intérieur par rapport à celles mesurées, qui atteint une amplitude maximale de 7,59 °C et appartiennent à la plage de confort pendant la tranche horaire de 08h00 à 12h00. Pendant toute la période de fonctionnement, les valeurs d'humidité relative se situent dans la plage de confort. Par conséquent, une amélioration de l'environnement thermique intérieur en expulsant l'excès de chaleur vers l'extérieur grâce au rafraîchissement passif via une ventilation transversale offre une efficacité thermique et énergétique et permet de créer une sensation et une satisfaction thermiques optimales pour des usagers qui influent positivement sur la création d'un environnement de travail productif et conduisent à minimiser les heures d'inconfort, ainsi que désignée comme une méthode passive pouvant constituer une alternative à la climatisation traditionnelle, donc à réduire la consommation énergétique et à minimiser l'empreinte écologique du bâtiment sur l'environnement.

CHAPITRE VIII
CONCLUSION
GENERALE

CHAPITRE VIII : CONCLUSION GENERALE

Le réchauffement climatique, principalement provoqué par les émissions de gaz à effet de serre, cause l'augmentation de la température de la planète, provoquant l'emploi excessif des systèmes de climatisation dans les bâtiments, par conséquent, une hausse de la consommation énergétique. De manière paradoxale, la pandémie du COVID-19 a mis en lumière la nécessité vitale d'assurer un confort thermique intérieur, sans propagation de polluants atmosphériques, s'appuyant sur la ventilation naturelle sans le recours à la climatisation mécanique, notamment dans les espaces partagés et fréquentés par le public.

À cet effet, les exigences de confort dans les bâtiments ne cessent d'augmenter et se sont imposées comme un défi primordial dans la conception des bâtiments, notamment ceux destinés à recevoir un grand public, en particulier dans les régions caractérisées par un climat chaud et aride, où la dépendance à l'énergie électrique pour assurer la mise en marche des climatiseurs est importante. Cette consommation est fortement liée à l'enveloppe architecturale, car elle est souvent mal adaptée aux particularités climatiques et environnementales de la zone.

Afin de faire face à ce défi, les architectes se tournent vers le génie de la nature afin d'imiter les mécanismes biologiques développés depuis des milliards d'années pour créer des stratégies bénéfiques, passives et peu énergivores. Cette approche contribue à optimiser la performance du bâtiment tout en satisfaisant les exigences des usagers et en harmonisant le bâtiment avec son milieu. En conséquence, une nouvelle génération d'enveloppes de bâtiments est née, incorporant des matériaux intelligents qui peuvent réagir aux changements des conditions climatiques. Ces enveloppes adaptatives contribuent à la ventilation naturelle, diminuent la pollution de l'air interne et améliorent l'efficacité énergétique. Cela permet d'établir des lieux intérieurs sains et pérennes tout en optimisant le bien-être des résidents.

La présente recherche doctorale s'inscrit dans le cadre de la thématique de l'architecture biomimétique, qui est classée comme une démarche innovante dans le domaine de la construction et une approche alternative à l'architecture standard conventionnelle qui sert à réduire la facture énergétique due à l'utilisation excessive des systèmes de la climatisation mécanique. Ceci est effectué à travers une tentative de création d'une enveloppe adaptative inspirée de la nature servant à promouvoir un confort thermique et à surmonter le problème de la surchauffe interne via un rafraîchissement passif effectué par une ventilation naturelle dans l'annexe administrative de la cité Amirouche sise à Batna,

caractérisée par un climat semi-aride, tout en concevant le bâtiment en adéquation avec son environnement climatique.

Le processus mis en œuvre dans cette recherche s'est articulé autour de deux grandes sections :

- **Une section théorique** qui contient les quatre premiers chapitres (du chapitre II jusqu'au chapitre V), destinée à découvrir et à approfondir le thème dans ses différents aspects à travers des définitions, des explications, des classifications, des méthodes synthétiques, ainsi que des exemples et des illustrations.

- **Une section pratique**, qui englobe les deux derniers chapitres (du chapitre VI jusqu'au chapitre VII), met l'accent sur la mise en application du sujet d'étude via deux méthodes de recherche : l'investigation in situ et la simulation énergétique.

Ces deux sections sont parachevées par une introduction générale et une conclusion générale.

Vu que les références biomimétiques sont souvent rares, surtout dans le secteur de l'architecture, le deuxième chapitre met en évidence les **diverses stratégies d'adaptation constatées dans la nature**. Cette dernière, désignée comme laboratoire d'expérimentations immense, compte environ 15 millions d'espèces dans sa biosphère. Elle est caractérisée par des systèmes biologiques d'une grande efficacité fonctionnelle qui maintiennent une durabilité et une coexistence harmonieuse avec leur environnement au fil des milliards d'années.

Ces données d'adaptation et de survie observées chez la faune, la flore et l'être humain, qu'elles soient physiologiques, morphologiques ou comportementales, ont été réunies pour constituer une taxonomie qui est présentée sous forme d'un tableau explicatif et récapitulatif. Ce travail vise à convertir ces savoirs biologiques en solutions techniques pour une innovation biomimétique dans le secteur de la construction.

Ce tableau est défini comme un guide et un outil d'aide pour les architectes, concepteurs ou chercheurs. Il présente des lignes directrices pour faciliter la traduction de ces stratégies et mécanismes dans la construction des futurs bâtiments afin qu'ils soient réactifs, qui se modifient au fil du temps afin de répondre aux conditions externes et internes tout en améliorant le confort thermique, tout en garantissant une durabilité.

Le troisième chapitre est défini comme un support théorique et un socle d'informations relatif à la présentation de l'approche du **biomimétisme** responsable du transfert de la richesse biologique en solutions architecturales pour répondre aux exigences humaines et environnementales. Pour une meilleure compréhension, on a appuyé sur des

éclaircissements présentés à travers des définitions, ses différents éléments le composant, sa théorie, ses principes, y compris un passage sur son évolution à travers l'histoire depuis la préhistoire jusqu'à nos jours comprenant des illustrations, sans oublier qu'on a mis l'accent sur les différents niveaux d'imitation, soit au niveau d'organisme, de comportement et l'écosystème des systèmes biologiques et techniques employés pour effectuer cette imitation, soit celle basée sur un problème (descendante) ou celle basée sur une solution (ascendante).

Ces dernières décennies se caractérisent par une avancée technologique notable, notamment dans le domaine de la construction, ce qui a donné naissance à un nouveau concept : **les enveloppes adaptatives**, abordées dans le quatrième chapitre. Sa première partie est consacrée à présenter un vocabulaire spécifique, sous forme de différents termes qui peuvent se chevaucher et être utilisés de manière interchangeable, qui sont destinés à décrire et à faciliter la distinction de ces enveloppes. Puis, pour approfondir la compréhension de ces enveloppes émergentes, une classification est mise en place selon différents critères en termes de leur fonction principale, mode de transformation, mode de réponse, niveau de transformation. En dernier lieu, on a mis l'accent sur les divers systèmes de contrôles de ces enveloppes, qui sont classés à travers leur mécanisme et leur stratégie de fonctionnement, leur degré de centralisation, leur nature de contrôle, leur niveau d'intervention et leur manière d'intervention, dans le but général de répondre aux besoins tant intérieurs qu'extérieurs.

Après avoir eu un aperçu sur les enveloppes adaptatives, on se focalise sur une notion plus détaillée destinée à assurer un confort thermique optimal dans les régions chaudes, basée sur la transmission de l'air et le transfert de l'eau, qui est celle des **murs respirants**, sujet du cinquième chapitre, en tant que solution biomimétique permettant d'effectuer des échanges gazeux dans le bâtiment de la même manière que celle des êtres vivants, servant à aller au-delà de l'approche de conception des murs traditionnels. Ceci est renforcé par un panorama des exemples manifestants par l'exploitation de la technologie de pointe.

La partie théorique mentionnée précédemment nous a offert la possibilité d'accumuler des connaissances en matière de notion des enveloppes adaptatives et respirantes, qui favorisent une intégration harmonieuse des bâtiments à leur environnement climatique. Ces solutions contribuent à réduire la surchauffe interne grâce à la réduction de la température ambiante, tout en diminuant la consommation énergétique.

Dans le même contexte, l'annexe administrative de la cité Amirouche située dans la ville de Batna (climat semi-aride) est déterminée comme un bâtiment public municipal faisant partie du patrimoine communal. Elle est caractérisée par une grande surface vitrée comprenant un pourcentage très élevé des ouvertures non ouvrantes. Par conséquent, le manque d'accès à la ventilation naturelle, accompagné d'une forte fréquentation du public. Provoquant une forte consommation énergétique. À cet effet, le sixième chapitre est consacré à effectuer une **investigation in situ** qui s'est avérée nécessaire, s'inscrivant dans le cadre d'une évaluation post-occupation pour comprendre son comportement thermique.

Cette investigation est effectuée à travers 3 jours successifs du 24 au 26 juillet 2022 (mois le plus chaud), selon deux types d'enquêtes, d'une part, une **enquête quantitative et objective**, basée sur une campagne de mesures des paramètres physiques liés au confort thermique à travers les trois blocs composant l'annexe. Et **d'autre part, une enquête qualitative et subjective** effectuée via des questionnaires élaborés selon l'échelle ASHRAE pour évaluer subjectivement la sensation des occupants.

Les résultats obtenus révèlent une augmentation de la température ambiante atteignant 34,9°C et une humidité relative aboutissant à un niveau bas de l'ordre de 17,10%, situant en dehors de la zone de confort durant la période de fonctionnement du bâtiment qui s'étale de 08h00 à 16h00, en particulier celle de l'après-midi, où il a été constaté aussi l'absence des courants d'air impliquant une stagnation d'air due à l'absence de ventilation, qui induit le manque d'air frais. De plus, des valeurs de PMV s'élèvent entre +2,01 et +2,19 et de PPD varie entre 77,07% à 83,54%, ce qui indique une ambiance thermique chaude. De plus, les interrogés expriment une sensation d'insatisfaction vis-à-vis du confort thermique à l'intérieur de cette annexe.

Ces résultats indiquent une surchauffe intérieure qui rend l'espace inconfortable, influençant ainsi le ressenti des utilisateurs en termes de bien-être et de confort thermique à cause de la grande surface du vitrage, de l'inertie du bâtiment, de l'apport de chaleur interne dû à l'utilisation d'éclairage artificiel et d'appareils électriques internes, et d'une autre cause très importante qui est l'absence d'accès à la ventilation, due principalement à l'impossibilité d'ouvrir les fenêtres des façades sud et nord, ce qui coïncide avec une forte fréquentation du public. Ce qui a causé un impact négatif sur le déroulement de l'activité administrative et provoque une utilisation excessive de la climatisation mécanique, entraînant une consommation électrique très élevée.

Cette situation met en évidence l'importance de mettre en place une réhabilitation thermique afin **d'améliorer l'ambiance thermique intérieure**. Ce qui a été l'objet du septième chapitre.

Ce dernier chapitre est structuré en deux volets principaux, le premier se dédiant à la présentation du processus utilisé pour générer une enveloppe adaptative thermosensible, inspirée des diverses stratégies d'adaptation et de survie constatées dans le monde des abeilles. Ce système est conçu de façon passive en suivant la technique descendante Top/Down, qui se distingue par l'incorporation d'alliages à mémoire SMA (NiTi) en tant que capteur et actionneur autonome chargé de l'ouverture et de la fermeture de l'enveloppe en fonction des changements de températures. Cette enveloppe est appliquée sur la façade nord et sud. Celle du sud est conçue sous forme de deux couches séparées par une cavité d'air, équipée d'un dispositif de pulvérisation d'eau à courant descendant pour refroidir l'air avant son entrée dans le bâtiment.

Le second volet est une simulation énergétique destinée à examiner le comportement thermique de cette annexe administrative exposée aux conditions d'un climat semi-aride durant la journée du 25 juillet, pendant la période de 08h00 à 16h00. Elle a été modélisée grâce au logiciel algorithmique **Rhinoceros/Grasshopper**, et ensuite soumise à une simulation énergétique via les plugins **Ladybug** et **Honeybee** et leurs logiciels intégrés, notamment **EnergyPlus**.

Ce volet comprend deux éléments essentiels : le premier est dédié à une simulation énergétique du cas réel (**pré-réhabilitation thermique**), appelé scénario 1, qui permet d'obtenir des détails sur le bâtiment qui ont été difficiles à obtenir lors de l'investigation in situ. Le second est effectué suite à l'application de l'enveloppe adaptative (**post-réhabilitation thermique**), appelée scénario 2, dans le but d'évaluer la performance et la fiabilité de cette enveloppe en matière de confort thermique et de perception du bien-être.

Les résultats de la simulation énergétique pour le premier scénario confirment les observations faites lors de l'expérimentation in situ, manifestées par une hausse de la température ambiante qui se situe en dehors de la zone de confort tout au long de la durée du fonctionnement de ce bâtiment. Par conséquent, la chaleur excessive à l'intérieur devient source d'inconfort, affectant négativement sur l'activité administrative et l'ergonomie et engendrant une surexploitation de climatisation mécanique qui entraîne une forte consommation d'électricité.

Alors que ceux provenant du second scénario (**post-réhabilitation thermique**) révèlent une amélioration significative des conditions de confort thermique, marquée par une

diminution remarquable des températures internes se situant dans la zone de confort durant les heures de 8h00 à 12h00, dont l'écart maximal atteint une valeur de 7,59 °C. Cependant, les valeurs d'humidité relative se trouvent dans la zone de confort pendant toute la durée de fonctionnement de l'annexe. Tandis que la période de l'après-midi, qui s'étale entre 13h00 et 16h00, est en dehors de la zone de confort, qui se caractérise par des valeurs de températures basses par rapport à celles prises lors de l'investigation in situ et à celles enregistrées à l'extérieur. De plus, les résultats du PMV-PPD montrent un allongement de la plage de satisfaction thermique durant la tranche horaire de 08h00 à 13h00.

En conséquence, une amélioration de l'environnement thermique intérieur en expulsant l'excès de chaleur vers l'extérieur grâce au renouvellement de l'air par le biais d'une ventilation transversale. Ceci permettant d'avoir un gain de 5 heures de confort par jour, permettant d'aller jusqu'au 62,5% de la durée de fonctionnement de l'annexe est au confort. Provoquant une réduction des heures d'inconfort en 3 heures par jour représentant 37,5% du temps de fonctionnement, mais ce pourcentage représente une ambiance thermique tolérable et non gênante pour les occupants.

Cette amélioration de l'ambiance thermique intérieure offre une efficacité thermique accrue et réduit la consommation d'énergie dédiée à la climatisation, favorisant ainsi le sentiment de satisfaction thermique des occupants et contribuant positivement à la création d'un environnement de travail productif. En tant que solution passive, elle constitue une solution alternative à la climatisation conventionnelle, permettant de diminuer la consommation d'énergie tout en réduisant l'impact écologique du bâtiment sur l'environnement.

Recommandations

Les avantages retenus par cette enveloppe, qui sont très bénéfiques et remarquables, n'empêchent pas de signaler qu'il n'a pas été possible de mettre l'annexe dans la plage de confort durant toute sa durée de fonctionnement. Donc, il est recommandé d'employer cette enveloppe avec d'autres stratégies et techniques architecturales passives complémentaires afin d'atteindre un niveau optimal de confort thermique, notamment en période estivale. Donc, il est recommandé :

- L'utilisation des surfaces extérieures de couleur claire, dotées d'une forte réflectance solaire et d'une émittance thermique très élevée, afin de réduire l'absorption de chaleur.
- L'emploi d'une stratégie de verdissement intégrée, soit via une toiture végétalisée ou un mur végétal accompagné de la présence de plantes d'intérieur.

Défis et limites de la recherche

Dans le cadre de la mise en œuvre de ce genre d'enveloppe adaptative, divers défis ont été présentés, tels que :

- **Dépenses d'achat** : les alliages à mémoire de forme SMA sont définis par des couts d'achat élevés. Donc, la concrétisation et la fabrication de ce genre d'enveloppe à échelle réelle en dehors de l'échelle théorique sont un peu coûteuses.
- **Complexité d'installation** : L'installation de ce genre d'enveloppe à grande échelle nécessite encore une enquête plus approfondie et des développements supplémentaires et la présence de mains-d'œuvre qualifiées.

Difficultés de recherche

La recherche s'appuie sur la sélection d'une stratégie appropriée inspirée de la nature pour créer une solution architecturale novatrice et biomimétique pour résoudre le problème posé dans le bâtiment en question, nécessitant une perspective plus large et la présence d'une **plateforme numérique qui intègre des principes biologiques** pour faciliter l'apprentissage.

Ce type de recherche nécessite une **collaboration interdisciplinaire** entre les biologistes, écologistes, thermiciens, mathématiciens, informaticiens, scientifiques des matériaux et physiciens pour **gagner du temps** et **faciliter la tâche** pour assurer la réussite de la transition de l'aspect biologique vers une solution technique architecturale permettant la création de solutions hautement résilientes, performantes et fiables.

Lors de l'utilisation des logiciels algorithmiques **Rhinoceros & Grasshopper** pour la modélisation de la proposition et **Ladybug & Honeybee** pour la simulation énergétique dans le but de valider l'enveloppe proposée, on a confronté plusieurs difficultés en raison de la taille du cas d'étude, de la complexité de l'enveloppe proposée, de la rigidité de ces logiciels, ce qui a nécessité beaucoup de temps pour se familiariser et maîtriser leur utilisation.

Perspectives de la recherche

Les résultats obtenus dans la présente recherche peuvent ouvrir la voie vers de nombreuses perspectives définies comme futurs axes de recherche à travers les niveaux suivants :

Au niveau d'ambiance

Cette recherche s'intéresse uniquement à étudier l'impact de l'enveloppe proposée sur l'ambiance et la sensation thermique interne, alors que son effet sur l'ambiance lumineuse et sonore n'a pas été pris en compte, ce qui peut être des pistes pour des recherches à l'avenir.

Au niveau du matériau utilisé

Le choix des matériaux adéquats ayant un impact sur la performance thermique dans le bâtiment en question. À cet effet, l'étude de l'ambiance thermique intérieure après la combinaison d'emplois des SMA ou d'un autre type de matériaux intelligents et des matériaux à changement de phase (MCP) sera une nouvelle piste de recherche (inertie thermique).

Au niveau technique

Vu les fluctuations de température entre le jour et la nuit dans cette région d'étude et pour plus de performance thermique dans ce bâtiment, l'exploitation de la technique de la ventilation nocturne avec le comportement diurne de l'enveloppe adaptative proposée sera comme perspective d'une nouvelle recherche.

Au niveau géométrique

Grâce au potentiel présenté par l'emploi des alliages à mémoire de forme, il est possible d'utiliser une géométrie différente, comme celle basée sur l'origami, pour examiner son comportement face aux variations des conditions externes.

Au niveau de l'aire d'influence

Étudier et évaluer l'effet de cette enveloppe adaptative à l'échelle urbaine, en particulier sur la réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain et des émissions de gaz à effet de serre.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Abdullah, A., Bin Said, I. and Ossen, D.R. (2019), A sustainable bio-inspired cooling unit for hot arid regions: Integrated evaporative cooling system in wind tower. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 161, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114201>.
- Abdullah, A.R., Said, B.I. and Ossen, D.R. (2018), Cooling strategies in the biological systems and termite mound: The potential of emulating them to sustainable architecture and bionic engineering. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, pp. 8127–8141.
- Abu Khadra, A. and Chalfoun, N. (2014), Development of an integrated passive cooling façade technology for office buildings in hot arid regions. *Energy Production and Management in the 21st Century*, Vol. 1, pp. 521–534. Available at : <https://doi.org/10.2495/EQ140501>.
- Académie Nantes (2023), Les cactus peuvent-ils survivre à l'aridité extrême ? , available at: <https://tpecactus-clemenceau.jimdofree.com/structure/epiderme/> (accessed: 12 December 2023).
- Adjali, S. (1986), Habitat traditionnel dans les Aurès : le cas de la vallée de l'Oued Abdi. *Annuaire de l'Afrique du Nord*, Tome XXV, pp. 272–280. Disponible à : <https://asadlis-amazigh.com/fr/wp-content/uploads/livres/Habitat%20traditionnel%20dans%20les%20Aures.pdf> .
- Aelenei, D., Aelenei, L. and Vieira, C.P. (2016), Adaptive façade : concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, Vol. 91, pp. 269–275. Disponible à : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218>.
- Air and Me (2024), *Syndrome du Bâtiment Malsain (SBM) : définition & solutions*, *Air and Me Le Blog*, available at: https://airandme.fr/blog/analyse-et-purification-de-lair/le-syndrome-du-batiment-malsain-sbm/?kwkuniv=P4DA4256054B100-ccp4da4256054b1f1-MWMwMjdpMW03cjRnbA%3D%3D&utm_source=affiliation&utm_campaign=netaff (accessed: 11 November 2022).
- Al-Masrani, S.M. *et al.* (2018), Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: challenges and future trends, *Solar Energy*, Vol. 170, pp. 849–872. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047> .
- Al-Obaidi, K.M. *et al.* (2017), Biomimetic building skins: An adaptive approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, pp. 1472–1491. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028> .
- Alamy (2012), Acacia avec une racine, Alamy images, available at: <https://alamyimages.fr/acacia-avec-une-racine-image64550755.html> (accessed: 13 September 2024).
- Alkhatib, H. *et al.* (2021), Deployment and control of adaptive building facades for energy generation, thermal insulation, ventilation and daylighting: A review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 185, p. 1-15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116331> .
- Alongi, A., Angelotti, A. and Mazzarella, L. (2021), A numerical model to simulate the dynamic performance of Breathing Walls, *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 14, pp. 1–31. Available at: <https://doi.org/10.1080/19401493.2020.1868578> .
- Altaf, S.N. (2012), Bio-Mimicry of snail. *Mini project*, Abdul razzak kalsekar polytechnic, department of civil engineering, pp. 1-58.
- Aly, Z., Ibrahim, A. and Abdelmohsen, S. (2021), Augmenting passive actuation of hygromorphic skins in desert climates learning from thorny devil lizard skins, *ASCAAD*, pp. 264–278.
- Al Amin, F. and Taleb, H. (2016), Biomimicry approach to achieving thermal comfort in a hot climate, *Proceedings of SBE16 Dubai*. Dubai, pp. 1–8.

- Amraoui, K. (2021), *Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides : Cas des bâtiments résidentiels*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider_Biskra.pp.1-147.
- Angela (2018), Why 'breathing architecture' is key to healthcare facility design, Space for health, available at: <https://spaceforhealth.com.au/medical-design-and-innovation/why-breathing-architecture-is-key-to-healthcare-facility-design/> (accessed: 12 July 2023).
- APRUE (2018), L'audit énergétique dans le bâtiment, l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie, available at: <https://aprue.org.dz/index.php/fr/prestations/formations?view=article&id=117:formation-d-auditeurs-energetiques-dans-le-batiment&catid=23:formations> (accessed: 25 April 2019).
- APRUE (2017), *Consommation énergétique finale de l'Algérie -Chiffres clés :Année 2017,Aprue*.
- Aquaportail (2023), Respiration, available at: <https://aquaportail.com/dictionnaire/definition/1195/respiration> (accessed: 11 October 2023).
- Ardabili, N.G. (2020), *Parametric design and simulation of a smart façade for hot and humid climates using biomimetics, pcms and smas: a case study in iran*. Middle east technical University.pp. 1-149.
- Arfaei, A. and Hançer, P. (2019), Effect of the built environment on natural ventilation in a historical environment: Case of the walled city of Famagusta, *Sustainability*, Vol. 11. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11216043> .
- ASHRAE Standard 55 (2010), *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Available at: <https://ashrae.org> .
- Askeland, E., Gonzalez, A., Enslow, T., Guerra, O. and Mateo, J. (2019), Phalanx Biomimic Heat Insulated Facades, available at: <https://askelanddesign.com/blog/2016/3/7/gratitude-w56fj>. (accessed: 19 October 2023).
- AskNature (2016), Shell protects from heat snails and slugs, available at: <https://asknature.org/strategy/shell-protects-from-heat/> (accessed: 10 October 2023).
- AskNature (2019), Réflecteur de chaleur sur le toit inspiré des fourmis sahariennes et des pangolins Conception de toit réfléchissant, available at: <https://asknature.org/fr/d%27innovation/tuiles-réfléchissantes-inspirées-des-fourmis-sahariennes-et-des-pangolins/> (accessed: 12 October 2023).
- ATinternet (2024), Responsive, available at: <https://atinternet.com/glossaire/responsive/> (accessed: 17 February 2024).
- Attia, D. (2015), Biomimicry in eco – sustainable interior design: natural ventilation approach, *International Design Journal*, Vol 5, pp. 291–299. Available at: <https://doi.org/10.21608/idj.2015.101371> .
- Aujardin (2024), Maïs, available at: <https://aujardin.info/plantes/mais.php> (accessed: 12 December 2023).
- Awadalla, R. (2023), Biomimicry as an innovation behavior in architecture and interior design, *Journal of Design Sciences and Applied Arts*, Vol. 4, pp. 81–92. Available at: <https://doi.org/10.21608/jdsaa.2022.148131.1202>.
- Aziz, M.S. and El Sherif, A.Y. (2016), Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, pp. 707–714. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.015>.
- Bacquaert, P. (2022), Trucs et astuces pour lutter contre la transpiration, Institut de recherche du bien-être de la médecine et du sport santé, available at: <https://irbms.com/trucs-astuces-pour-lutter-contre-la-transpiration/> (accessed: 15 July 2022).
- Badarnah, L. (2017), Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation, *Buildings*, Vol. 7. Available at:

<https://doi.org/10.3390/buildings7020040> .

- Badarnah, L. (2012), *Towards the living envelope Biomimetics for building envelope adaptation*, TU Delft University. Zutphen, The Netherlands: Wöhrmann Print Service B.V. Available at: https://repository.tudelft.nl/file/File_dbecf09a-5385-40c5-b699-7c13bb7c126f?preview=1 .
- Badarnah, L. and Kadri, U. (2014), A methodology for the generation of biomimetic design concepts, *Architectural Science Review*, Vol. 58, pp. 120–133. Available at: <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>.
- Badarnah, L. and Knaack, U. (2007), Bio-Inspired ventilating system for building envelopes, *International Conference of 21st Century on Building Stock Activation*, ed. Y. Kitsutaka Tokyo, pp. 431–438. Available at: http://tmu-arch.sakura.ne.jp/pdf/26_proc_bsa_e/Proceedings_pdf/431-438%20058SS_B4-5.pdf.
- Badarnah, L., Nachman Farchi, Y. and Knaack, U. (2010), Solutions from nature for building envelope thermoregulation, *Proc. of the fifth Design & Nature Conf.: Comparing Design and Nature with Science and Engineering Carpi A & Brebbia CA eds (Southampton: WITpress)*, Vol. 138, pp. 251–262. Available at: <https://doi.org/10.2495/DN100221> .
- Bailey, L. (1954), The respiratory currents in the tracheal system of the adult honey-bee, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 31, pp. 589–593. Available at: <https://doi.org/10.1242/jeb.31.4.589>.
- Ballanger, F. and Chaverou, É. (2022), À Pékin, le stade du ‘Nid d’oiseau’ : sport, art et propagande, Ostadium, available at: <https://radiofrance.fr/franceculture/a-pek-in-le-stade-du-nid-d-oiseau-sport-art-et-propagande-3398505> (accessed: 20 February 2022).
- Baron, L. (2016), Thermal biomimicry in architecture reflexions on a thermal newly emerging process, Budapest University of technology and economics, Architectural research for exchange students, Department of building energetics and service system, pp. 1-44.
- Barozzi, M. *et al.* (2016), The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture, *Procedia Engineering*, Vol. 155, pp. 275–284. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>.
- Barthe, Y. (2010), Le syndrome du bâtiment malsain : un problème de santé mentale?, *Le concours médical*, Vol. 132, pp. 1–10.
- Bechtel, V. (2021), *Biomimétisme appliqué en architecture Je t ’ aime , moi non plus*. Ecole polytechnique, Paris.
- Becker, T. (2017), Breathing Skins, Parametric house, available at: <https://parametrichouse.com/breathing-skins/> (accessed: 15 March 2023).
- Belaredj, I. and Chebab, B. (2023), *Architecture biomimétique comme stratégie d ’ amélioration de la performance énergétique : Cas d ’ un bâtiment fortement vitré à Jijel*, mémoire de master, Université Mohamed Seddik Benyahia Jijel, pp. 1-98. Available at: <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/handle/123456789/13709> .
- Benyus, J.M. (1997), *Biomimicry Innovation Inspired by Nature*, HarperCollins e-books. London, W6 8JB, UK: HarperCollins Publishers Ltd. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781351279086-26>.
- Bermejo-Busto, J. *et al.* (2016), Improvement of a peltier hvac system integrated into building envelopes implementing beehive strategies: A theory-based approach, *Dyna (Spain)*, Vol. 91, pp. 507–511. Available at: <https://doi.org/10.6036/7865>.
- Bhakta, N. (2022), What is a Medical Device Stent?, ProPlate, available at: <https://proplate.com/what-is-a-medical-device-stent/> (accessed: 12 March 2022).
- Biomimétisme (2016), Biomimétisme: design et architecture, available at: <https://biomimetismetpemaimo.wordpress.com/le-design/> (accessed: 12 January 2024).
- Biomimicry3.8 (2017), *Biomimétisme DesignLens un guide visuel*. Edited by B. 3.8. Missoula. Available at:

<https://static1.squarespace.com/static/59d81f72b7411cdef9af3e92/t/5a0f5aa5c83025a390edb5b5/1510955691044/DesignLens+Franc%CC%A7aise+Biomimicry38+g1.1.pdf>.

- Bioxegy (2022), Innovation by nature, available at: <https://bioxegy.com/post/le-biomimétisme-toute-une-histoire> (accessed: 27 January 2022).
- Blacha, M. and Bots, A. (no date), *Nature 's experiences for building technology*. Eindhoven, Netherlands.
- Boudjadja, R. and Benhalilou, K. (2022), Conceptual modeling of environmental devices of a vernacular house with a patio, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, Vol. 14, pp. 267–274. Available at: <https://iotpe.com/IJTPE/IJTPE-2022/IJTPE-Issue51-Vol14-No2-Jun2022/33-IJTPE-Issue51-Vol14-No2-Jun2022-pp267-274.pdf>.
- Brayer, M.-A. (2019), *Focus sur le biomimétisme exposition : « La Fabrique du vivant » au centre Pompidou*. Paris. Available at: https://paris-valdeseine.archi.fr/fileadmin/mediatheque/document/Centre_de_ressources/bibliotheque_documentation/2019-04-12_Bibliographie_Fabrique_du_Vivant_-_Biomimetisme.pdf.
- Cadoni, G. (2012), *Les systèmes de rafraîchissement passifs dans l'architecture contemporaine et la conception bioclimatique du bâtiment*. Thèse de doctorat en architecteure, Ecole nationale supérieur d'architecture de Marseille, pp.1-507.
- Cathersides, A. and Viles, H. (2004), Le lierre, une plante verte en hiver, la gazette des plantes, available at: <https://lagazettedesplantes.com/2016/01/22/a-laffiche-cette-semaine-le-lierre-une-plante-verte-en-hiver/> (accessed: 30 January 2023).
- Caue-martinique (2018), Le syndrome du bâtiment malsain, available at: <https://caue-martinique.com/le-syndrome-du-batiment-malsain/> (accessed: 10 December 2018).
- CCHST (2024), Ergonomie, Centre Canadien d'hygiène et de sécurité de travail, available at: <https://cchst.ca/oshanswers/ergonomics> (accessed: 18 February 2024).
- CCOHS (2024), Thermal comfort for office work, Candian centre for occupation heath and safety, available at: https://ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/thermal_comfort.html (accessed: 26 July 2024).
- CES-MED (2015), *Plan d'action en faveur de l'énergie durable (PAED) Algérie Commune de Batna*. Batna. Available at: [https://climamed.eu/wp-content/uploads/files/Algeria-Municipality-of-Batna-Sustainable-Energy-Action-Plan-\(SEAP-in-French\).pdf](https://climamed.eu/wp-content/uploads/files/Algeria-Municipality-of-Batna-Sustainable-Energy-Action-Plan-(SEAP-in-French).pdf).
- Charkas, M.N. (2019), Towards environmentally responsive architecture: a framework for biomimic design of building's skin, *JES. Journal of Engineering Sciences*, Vol. 47, pp. 371–388. Available at: <https://doi.org/10.21608/jesaun.2019.115486>.
- Chayaamor-Heil, N., Guéna, F. and Hannachi-Belkadi, N. (2018), *Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils*. Open Editi, *Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère*. Open Editi. Edited by M. de la Culture. France: Les cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère. Available at: <https://doi.org/10.4000/craup.309>.
- Chayaamor-Heil, N. and Laracuenta, N. (2018), Bio-inspired passive kinetic solar shading device for a responsive architectural envelope, *13th conference on advanced building skins, 1-2 October 2018, Bern, Switzerland.*, pp. 1–15.
- Cilento, K. (2012), Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas, available at: <https://archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas> (accessed: 17 January 2024).
- Clempeyron (2017), Quand l'architecture imite la nature, histoire de l'art AI2, available at: <https://histoiredelartai2.wordpress.com/2017/02/10/quand-larchitecture-imite-la-nature/> (Accessed: 12 October 2019).
- Clendaniel, M. (2012), A self-cooling desert dwelling, inspired by the lowly snail, Fast Company, available at: <https://fastcompany.com/90181998/a-self-cooling-desert-dwelling-inspired-by-the-lowly-snail> (accessed: 10 October 2023).

- Climate Data (2021), Climat Batna (Algérie), available at: <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/batna/batna-3686/> (accessed: 12 May 2022).
- Climats (2020), Climat - Batna (Algerie), Climats et voyages, available at: <https://climatsetvoyages.com/climat/algerie/batna> (accessed: 12 May 2022).
- Clinique des plantes (2023), Nématode des tiges et des bulbes, available at: <https://cliniquedesplantes.fr/fiches/le-nematodes-des-tiges-et-des-bulbes> (accessed: 31 January 2023).
- CNRTL (2024), Enveloppe, Ortolang, available at: <https://cnrtl.fr/definition/enveloppe> (accessed: 1 January 2024).
- Craig, S. and Grinham, J. (2017), Breathing walls: the design of porous materials for heat exchange and decentralized ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 149, pp. 246–259. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.036>.
- Crawford, S. (2010), *A Breathing Building Skin: Designing with the Concepts of Biological Adaptation*, University of Washington. Master of Science in Design Computing. Available at: http://cumincad.scix.net/data/works/att/acadia10_211.content.pdf.
- Dali, K. (2017), *APRUE -Eco-construction et Efficacité énergétique en Algérie*. Berlin. Available at: https://german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Praesentationen/2017/170808-iv-algerien-kamel-dali-fra.pdf?_blob=publicationFile&v=4.
- DaSilva Lima, E.C. *et al.* (2023), Shape, function and sound – the biological limits of biomimicry and its analogies, *Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, pp. 115–132. Available at: <https://doi.org/10.18682/cdc.vi190.9534>.
- Decker, M. and Zarzycki, A. (2014), Designing resilient buildings with emergent materials, *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, Vol. 2, pp. 179–184. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2014.2.179>.
- Déco (2019), Comment planter et cultiver l'érable? available at: <https://deco.fr/jardin-jardinage/arbre/erable> (accessed: 12 March 2023).
- Découvrir le Français (2022), bâtiment public, Tv5monde: Dictionnaire, available at: <https://langue-francaise.tv5monde.com/decouvrir/dictionnaire/b/batiment%20public> (Accessed: 15 May 2022).
- Defleurenfleur (2022), Espèces-Variétés-Agaves, available at: <https://defleurenfleur.com/blog/especes-varietes-agaves/> (accessed: 12 December 2023).
- Dela Ghesquière, N. (2024), Les stratégies de survie de la gazelle dama en milieux arides, Nectar du Net, available at: https://nectardunet.com/30564/les-strategies-de-survie-de-la-gazelle-dama-en-milieux-arides/?utm_source=chatgpt.com (Accessed: 10 July 2024).
- Delbreil-bergès, M. (2015), *Le biomimétisme en architecture : analyse d'une démarche en pleine émergence*. Mémoire master1, ENSA de Toulouse, pp.1-53.
- Deluzarche, C. (2020), Migration animale : les mammifères terrestres qui parcourent les plus longues distances, Futura, available at: <https://futura-sciences.com/planete/questions-reponses/animaux-migration-animale-mammiferes-terrestres-parcourent-plus-longues-distances-14523/> (accessed: 8 October 2020).
- Demey, J. (2022), Comment le corps humain s'adaptera aux chaleurs extrêmes, available at: <https://lejdd.fr/Societe/comment-le-corps-humain-sadaptera-aux-chaleurs-extremes-4123665> (accessed: 17 July 2022).
- Denke, A., Hassar, S.M.. and Baradiy, S. (2014), *Guide pour une construction Eco-énergétique en Algérie*, Deutche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Alger. Available at: https://academia.edu/34739223/Guide_Construction_Eco_énergétique_APRUE_GIZ
- Denz, P.R. *et al.* (2021), Smart textile sun shading development of functional adaptex prototypes,

- Journal of Facade Design and Engineering*, Vol. 9, pp. 101–116. Available at: <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5539>.
- Deroth, L. and D'Allaire, S. (1980), La respiration et la circulation chez l'abeille, *l'abeille*, pp. 1–2. Available at: https://agrireseau.net/apiculture/Documents/la_respiration_et_la_circulation_chez_l'abeille.pdf.
- Després, L. (2022), L'adaptation des organismes a leur environnement, available At: <https://Encyclopedie-Environnement.Org/Vivant/Adaptation-Organismes-Environnement/> (accessed: 26 December 2022).
- Dewidar, K.M., Mohamed, N.M. and Ashour, Y.S. (2013), Living skins: a new concept of self active building envelope regulating systems, *SB13 Dubai*, pp. 1–8. Available at: https://irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC26849.pdf.
- Dezube, R. (2023), Contrôle de la respiration, Le manuel MSD version au grand public, available at: <https://msdmanuals.com/fr/accueil/troubles-pulmonaires-et-des-voies-aeriennes/biologie-des-poumons-et-des-voies-respiratoires/contrôle-de-la-respiration> (accessed: 25 January 2023).
- Direction de l'information légale et administrative (2022), Qu'est-ce qu'un établissement recevant du public (ERP)?, *Entreprendre*, available at: <https://entreprendre.service-public.fr/vosdroits/F32351#:~:text=Les%20%C3%A9tablissements%20recevant%20du%20public,libre%2C%20restreint%20ou%20sur%20invitation> (accessed: 15 May 2022).
- Duval, A. (2017), Le pavillon de la république fédérale d'Allemagne, *lire onf*, available at: <https://blogue.onf.ca/blogue/2017/09/29/photos-pavillons-expo-67/> (accessed: 15 January 2024).
- El-Dabaa, R.A.B. (2016), *The use of kinetic facades in enhancing daylight performance for office buildings*, *rab academy for science, technology and maritime transport*. master of science in architecture engineering and environmental design. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36431.59041>.
- El-Rahman, S.M.A. et al. (2020), Biomimicry inspired adaptive building envelope in hot climate, *Journal of Engineering Research*, Vol. 166, pp. A1–A17. Available at: <https://doi.org/10.21608/erj.2020.135274>.
- EIDin, N.N., Abdou, A. and ElGawad, I.A. (2016), Biomimetic potentials for building envelope adaptation in Egypt, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 34, pp. 375–386. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.033>.
- Elghawaby, M. (2010), Biomimicry: a new approach to enhance the efficiency of natural ventilation systems in hot climate, in *International Seminar Architectonics Network, Architecture and Research*. Barcelona, pp. 1–10. Available at: <https://semanticscholar.org/paper/Biomimicry-%3A-A-New-Approach-to-Enhance-the-of-in-Mahmoud/204b2efe8f55ff439e1586be90a6ca0c6a5d9193>.
- Elghawaby, M. (2012), Breathing façades: a new concept to create dynamic thermal ambiances in buildings located in hot climates, in *2nd International Congress on Ambiances*. Montreal, pp. 215–220. Available at: <https://shs.hal.science/halshs-00745048%0Ahttps://shs.hal.science/halshs-00745048/document>.
- Elghawaby, M. (2013), *Vers un confort thermique grâce à des concepts d' enveloppes de bâtiments , inspirés de la nature: Le mur respirant comme un exemple biomimétique approprié aux bâtiments en zones chaudes .*, Thèse de doctorat. Université Aix-Marseille ,École doctorale 355 «Espaces, cultures et sociétés».pp. 1-288. Available at: https://publication.cpas-egypt.com/journal_article/vers-un-confort-thermique-grace-a-des-concepts-denveloppes-de-batiments-inspires-de-la-nature-le-mur-respirant-comme-un-exemple-biomimetique-approprie-aux-batiments-en-zones-chaudes/.
- ElGhazi, Y., Hamza, N. and Dade-Robertson, M. (2018), Modelling and simulation of integrated

- responsive solar-shading with double skin facades in hot arid climates, in I.B.S. association (ed.) *4th Building Simulation and Optimization*. Cambridge, UK: International building simulation association, pp. 467–474.
- Elhalabiah, H. (2021), تكيف النباتات في الصحراء, Mawdoo3, available at: https://mawdoo3.com/تكيف_النباتات_في_الصحراء (accessed: 30 November 2021).
- Elkhayat, Y.O. (2014), Interactive movement in kinetic architecture, *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering*, Vol. 42, pp. 816–845.
- Elmoudjahid (2022), Les grands savants de l’Islam : Abbas Ibn Firnas, l’inventeur du premier «avion», Elmoudjahid société, available at: <https://elmoudjahid.dz/fr/societe/les-grands-savants-de-l-islam-abbas-ibn-firnas-l-inventeur-du-premier-avion-181409> (accessed: 16 April 2022).
- Eltanboly, M.F. and Ibrahim, V.A.R. (2022), Comparative Analysis between different types of Responsive Design Approach: (applicability to use in different climatic regions in Egypt), in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1113/1/012026>.
- Encarta, M. (2009), Microsoft Encarta, *Microsoft*.
- ENDB (2024), Architecture verte : le vert, architecture du futur, Ecole nationale du bâtiment, available at: <https://devenirarchitecte.fr/actu-conseils/architecture-verte/> (accessed: 17 January 2024).
- Farid, D. *et al.* (2022), Design and parameterization of a kinetic prototype that interacts with climatic variables using numerical methods, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, Vol. 14, pp. 136–142.
- Farimani, P.N. (2014), *Inspiration by nature: biomimetic research informs adaptable building skin system for natural ventilation and daylight in hot dry climate (yazd, iran)*, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo. Master of Science in Architecture, Faculty of California Polytechnic State University. pp.1-220.
- Fauzi, H.N., Al-Athas, S.I. and Rini, J.A. (2024), Potential pollutants and indoor air quality variables association towards implementation of the breathing architecture concept: a review, in *5th International Conference on Empatgic Architecture*. IOP Publishing, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1301/1/012011>.
- Fayemi, P.-E. *et al.* (2013), Contextualisation des outils biomimétiques afin de développer une nouvelle méthodologie, in *Confere 2013*. Biarritz.
- Fayet, A. (2014), *Morphologie & anatomie de l’abeille*. Available at: https://cari.be/IMG/pdf/163_fichebio.pdf.
- Fekkous, K. (2017), *L’influence de l’atrium ventilé des centres commerciaux sur le comportement thermo-aéraulique*, «cas de la ville nouvelle Ali Mendjli à Constantine. Mémoire de magister, universite Salah Boubnider constantine 03. Available at: <https://dspace.univ-constantine3.dz/jspui/handle/123456789/1620>.
- Fekkous, K. and Bouchahm, Y. (2017), L ’ influence de l ’ atrium ventilé des centres commerciaux sur le comportement thermo- aéraulique , « cas de la ville nouvelle Ali Mendjli à Constantine, *5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER– 2017) Proceeding of Engineering and Technology –PET*, Vol. 30, pp. 76–81.
- Fekkous, N., Alkama, D. and Fekkous, K. (2023), Cartography and analysis of the urban growth, case study: inter-communal grouping of Batna, Algeria, *Quaestiones Geographicae*, Vol. 42, pp. 123–139. Available at: <https://doi.org/10.14746/quageo-2023-0009>.
- Felkner, J., Zoltan Nagy, S. and Younglee Lee, B. (2021), *A breathing wall study for homeostatic buildings implementing natural ventilation effective design*. University of Texas at Austin.
- Fiorito, F. *et al.* (2016), Shape morphing solar shadings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 863–884. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086>.

- Formentini, M. and Lenci, S. (2018), An innovative building envelope (kinetic façade) with Shape Memory Alloys used as actuators and sensors, *Automation in Construction*, Vol. 85, pp. 220–231. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.006>.
- Fouad, S.M.A.E.-H. (2012), *Design Methodology : Kinetic Architecture*. Master of Science. pp.1-128.
- Fox, M.A. and Yeh, B.P. (2000), Intelligent kinetic systems in architecture, *Managing Interactions in Smart Environments*, pp. 91–103. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0743-9_9.
- Fressnapf (2024), Est-il normal pour un chien de haleter? available at: <https://fressnapf.ch/fr/magazine/chien/sante/haleter/> (accessed: 22 August 2024).
- Gamage, A. and Hyde, R. (2011), Can Biomimicry, as an approach, enhance Ecologically Sustainable Design (ESD)?, *45th Annual Conference of the Architectural Science Association*.
- Gamm Vert (2024), Conseils jardinage et plantes, Jardinage au naturel, available at: <https://gammvert.fr/conseils-idees/chlorose-du-rhododendron> (accessed: 26 January 2024).
- Gheznawy, D. El *et al.* (2020), smart breathing walls for integrated ventilation: heat exchange and indoor air quality improvement, *Port-Said Engineering Research Journal*, Vol. 24, pp. 10–17. Available at: <https://doi.org/10.21608/pserj.2020.25973.1038>.
- Gonzalez, M.-G. and Routier, E. (2014), *Le biomimétisme, clé de l'adaptation pour des villes durables*. kedge Busniess school. Available at: <https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0080/Temis-0080818/21609.pdf>.
- Goulthorpe, M. (2011), HypoSurface, Parametric house, available at: <https://parametrichouse.com/hyposurface/> (accessed: 19 January 2024).
- Grimaud, L. (2023), Solstice d'été : jusqu'à quand dure la saison estivale ?, *Le Journal des Femmes*, available at: <https://journaldesfemmes.fr/maman/guide-sorties-et-fetes-en-famille/2782835-solstice-d-ete/> (accessed: 21 June 2023).
- Hadjadj, A. (2017), Utilisation des énergies géothermiques pour rafraîchissement des bâtiments dans la régions sud _est, in *Premier Séminaire National de Génie des Procédés*. El-Oued, p.1.
- Hamza, N. (2008), Double versus single skin facades in hot arid areas, *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 240–248. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.025>.
- Hanafy, N. (2023), Improving the environmental and design performance of building facades using artificial intelligence, *Journal of Engineering Research*, Vol. 7, pp. 337–348. Available at: <https://doi.org/10.21608/erjeng.2023.240706.1268>.
- Harry, S. (2016), Dynamic adaptive building envelopes – an innovative and state-of-the-art technology, *Creative Space*, Vol. 3, pp. 167–183. Available at: <https://doi.org/10.15415/cs.2016.32011>.
- Heinrich, E.C., McHenry, M.J. and Bradley, T.J. (2013), Coordinated ventilation and spiracle activity produce unidirectional airflow in the hissing cockroach, *gromphadorhina portentosa*, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 216, pp. 4473–4482. Available at: <https://doi.org/10.1242/jeb.088450>.
- Hicham, H. (2016), كيف يمكن لواجهات المباني أن تتنفس ككائن حي؟ أفكار وتطبيقات, available at: <https://tinyurl.com/3t38x29e> (accessed: 14 May 2023).
- Horvath, L. (2015), Fourmi : une combinaison argentée pour rester au frais, sciences et avenir, available at: https://sciencesetavenir.fr/animaux/fourmi-une-combinaison-argentee-pour-rester-au-frais_19877 (accessed: 12 November 2023).
- Human, H., Nicolson, S.W. and Dietemann, V. (2006), Do honeybees, *Apis mellifera scutellata*, regulate humidity in their nest?, *Naturwissenschaften*, Vol. 93, pp. 397–401. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00114-006-0117-y>.

- Hunt, D. (2006), Les fabuleuses adaptations des plantes succulentes, Jardins de France, available at: <https://jardinsdefrance.org/les-fabuleuses-adaptations-des-plantes-succulentes/#:~:text=Les%20cactus%20globulaires%20offrent%20des,sont%20aplaties%20et%20peu%20succulentes> (accessed: 12 December 2023).
- IAAC (2019), Adaptive pneumatic skin, iaacblog, available at: <https://iaacblog.com/programs/84626/> (accessed: 20 May 2023).
- IBEF (2022), Le terme de baubiologie, Institut Français de Baubiologie et d'écologie, available at: <https://baubiologie.fr/Le-terme-de-baubiologie.html> (accessed: 9 September 2023).
- IBM (2024), Que sont les réseaux neuronaux ?, Ibm_France, available at: <https://ibm.com/fr-fr/topics/neural-networks#:~:text=Les%20r%C3%A9seaux%20de%20neurones%20artificiels,poids%20et%20un%20seuil%20associ%C3%A9s> (accessed: 7 September 2024).
- ICEB (2012), *Les guides Bio-Tech: Ventilation naturelle et mécanique*. Ile de France. Available at: https://arec-idf.fr/fileadmin/DataStorageKit/AREC/Etudes/pdf/guide_bio_tech_ventilation_naturelle_et_mecanique.pdf.
- Imbabi, M.S. and Peacock, A. (2004), Allowing buildings to breathe, renewable energy 2004, Vol. 95, pp. 85–95.
- Infobae (2022), Quels sont les aliments qui peuvent nous aider à avoir plus d'énergie et à être plus performants ? available at: <https://infobae.com/fr/2022/03/22/quels-sont-les-aliments-qui-peuvent-nous-aider-a-avoir-plus-denergie-et-a-etre-plus-performants/> (accessed: 22 March 2022).
- ISO7730 (2005), *Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*, 3ème édition, Suisse, pp.1-9.
- Jamei, E. and Vrcelj, Z. (2021), Biomimicry and the built environment, learning from nature's solutions, *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 11. Available at: <https://doi.org/10.3390/app11167514>.
- Jarimi, H., Tapia-Brito, E. and Riff, S. (2020), A review on thermoregulation techniques in honey bees' (*Apis mellifera*) beehive microclimate and its similarities to the heating and cooling management in buildings, *Future Cities and Environment*, Vol. 6, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.5334/fce.81>.
- Jomehzadeh, F. *et al.* (2017), A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp. 736–756. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>.
- Jordan, L. and Rocher, P. (2010), *Les alliages Nickel-Titane (NiTi), Société francophone de Biomatériaux dentaires*.
- JW (2015), la peau du diable cornu, les témoins de jéhovah, available at: <https://wol.jw.org/fr/wol/d/r30/lp-f/102015365> (accessed: 1 November 2023).
- Kalantar, N. and Borhani, A. (2017), Breathable walls - computational thinking in early design education, in *the 22nd Conference on computer aided architectural design research in asia (caadria)*, pp. 377–387. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2017.377>.
- Kang, D. and Strand, R.K. (2018), Performance control of a spray passive down-draft evaporative cooling system, *Applied Energy*, Vol. 222, pp. 915–931. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.039>.
- Kapelonis, C. (2018a), Receptive skins: the breathing wall, media.mit.edu, available at: <https://media.mit.edu/projects/receptive-skins/overview/> (accessed: 29 October 2023).
- Kapelonis, C. (2018b), *Receptive Skins towards a somatosensitive architecture Chrisoula*, Harvard University, pp.1-118.

- Khadraoui, M.A. (2019), *Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique (Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride)*, Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, pp.1-309.
- Khan Academy (2024), Stratégies de régulation de la température : Comment le comportement, l'anatomie et la physiologie permettent-ils aux animaux de réguler la température de leur corps ? available at: <https://fr.khanacademy.org/science/biologie-a-l-ecole/x5047ff3843d876a6:bio-3e-annee-science-de-base/x5047ff3843d876a6:bio-3-1h-le-metabolisme/a/animal-temperature-regulation-strategies> (accessed: 12 January 2024).
- Khelil, S. *et al.* (2020), Raising the efficiency of deployable building facades with Biomimetics for hot and arid regions, in *Smart Buildings, Smart Cities*.pp.1-10.
- Khorasani, M.L., Burry, J. and Salehi, M. (2014), Thermal performance of patterned facades, *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, Vol. 1, pp. 267–276. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2014.1.267>.
- Kiki, G.J.D. (2023), *Amelioration de l'efficacite energetique des batiments publics du sud du benin par utilisation des materiaux biosources locaux*.Thèse de doctorat, Université de Liège (Belgique),Liège. Available at: <https://fr.scribd.com/document/738612589/Memoire-These-Gratien-KIKI-2023.pp.1-198>.
- Kolodziej, P. and Rak, J. (2013), Responsive building envelope as a material system of autonomous agents, in *the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2013*. Hong Kong, pp. 945–954. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2013.945>.
- Konkel, L. (2012), Why Are Animals Bigger in Colder Climates? available at: <https://livescience.com/24916-animal-size-versus-climate.html> (accessed: 10 October 2023).
- Kruiper, R. *et al.* (2020), A Scientific Information Extraction Dataset for Nature Inspired Engineering, *A Scientific Information Extraction Dataset for Nature Inspired Engineering* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.07753>.
- Kuru, A. *et al.* (2019), Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 205, pp. 1–28. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544>.
- Kuru, A. *et al.* (2020), A framework to achieve multifunctionality in biomimetic adaptive building skins, *Buildings*, Vol. 10, pp. 1–31. Available at: <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10070114>.
- Kuru, A.E. (2020), *Biomimetic adaptive building skins : An approach towards multifunctionality*. School of Architecture and Design.
- Kuznetsov, S. (2022), Pourquoi les tournesols se tournent-ils vers le soleil?, Sputnik Afrique, available at: <https://fr.sputniknews.africa/20160805/tournesol-tourne-soleil-1027164851.html> (Accessed: 28 January 2022).
- Laboratorio biomimetico (2020), *Living architectural envelopes*. Gijón, Spain. Available at: <https://laboratoriobiomimetico.com/wp-content/uploads/2020/12/Envolventes.pdf>.
- Ladybug tools (2023), fichiers météorologiques, EPWMap, available at: <https://ladybug.tools/epwmap/> (accessed: 2 February 2023).
- La langue Francaise (2024), Responsif, Dictionnaire, available at: <https://lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/responsif> (Accessed: 19 April 2024).
- Lariviere, A. (2019), Apis Mellifera l'abeille mellifère, Alainla Riviere photo, available at: <https://alainlarivierephoto.com/?p=14804> (accessed: 23 October 2023).
- Larousse (2023), Dictionnaire, available at: <https://larousse.fr/dictionnaires/francais> (accessed: 23 September 2023).
- Larsen, A.L., Foged, I.W. and Jensen, R.L. (2014), Multi-layered breathing architectural

- enveloppe, in *eCAADe* 32, pp. 117–122. Available at: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2014.2.117>.
- Latitude (2023), Latitude and longitude of Batna, available at: <https://latitude.to/map/dz/algeria/cities/batna?utm> (accessed: 10 November 2023).
- Leboué, T. (2021), Un système de climatisation pour lutter contre l’humidité, espace-aubade, available at: https://espace-aubade.fr/blog/climatisation/un-systeme-de-climatisation-pour-lutter-contre-l-humidite.html?srsId=AfmBOoq0U7RKBAxxq8NOgvLn5TguDy4k6QRpF455gsCj7fXp0PJeFy66&utm_source=chatgpt.com (accessed: 14 June 2021).
- LePoint (2022), Climat : les perspectives d’une planète toujours plus climatisée, available at: https://lepoint.fr/environnement/climat-les-perspectives-d-une-planete-toujours-plus-climatisee-27-07-2022-2484599-1927.php?utm_source=chatgpt.com#11https://www.lepoint.fr/environnement/climat-les-perspectives-d-une-planete-toujours-plus-climatisee-27 (accessed: 27 July 2022).
- LeRobert (2023), Dictionnaire LeRobert, available at: <https://dictionnaire.lerobert.com/>. (accessed: 18 November 2023).
- Leroux, N. (2014), Les fougères, des plantes primitives, Permaforêt, available at: <https://permaforet.blogspot.com/2014/08/les-fougères.html> (accessed: 15 August 2023).
- Lesage, P. (2015), *La ventilation naturelle intensive des bâtiments et leur confort en été Etude de systèmes inspirés par la stratégie de refroidissement des termitières*, Université de Liège, pp. 1-111. Available at: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-Sene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI.
- LeTémoin (2024), Saviez-vous -vous que les escargots du désert peuvent dormir pendant trois ans ? available at: <https://letemoinhaiti.com/home/article/saviez-vous-vous-que-les-escargots-du-desert-peuvent-dormir-pendant-trois-ans/> (accessed: 1 February 2024).
- Linternaute (2023), Héliotropisme, Dictionnaire français, available at: <https://linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/heliotropisme/> (accessed: 15 January 2023).
- Liorhobashi (2016), Learning from the desert snail, spatial experiments, available at: <https://spatialexperiments.wordpress.com/2016/09/20/learning-from-the-desert-snail/> (accessed: 10 October 2023).
- Loonen, R.C.G.M. *et al.* (2013), Climate adaptive building shells: state-of-the-art and future challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 483–493. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>.
- López, M. *et al.* (2015), Adaptive architectural envelopes for temperature , humidity , carbon dioxide and light control, *10th Conference on Advanced Building skins*, pp. 3–4.
- López, M. *et al.* (2017), How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, pp. 692–703. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018>.
- Malik, R. (2017), Intelligent building facades, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol. 8 , pp. 1340–1346.
- Malsch, E. (2013), Un immeuble, des algues et de l’énergie !, *urbanews*, available at: <https://urbanews.fr/2013/03/06/30240-un-immeuble-des-algues-et-de-lenergie/> (accessed: 12 January 2024).
- Mansouri, K., Sriti, L. and Guedouh, M.S. (2022), post-Occupancy evaluation of thermal comfort sensation of pupils in school establishments under hot arid climate conditions, *Technium social sciences journal*, Vol. 34, pp. 180–192.

- Manutan (2023), Au bureau ou en entrepôt, quels sont les objectifs de l'ergonomie au travail pour l'entreprise ?, Manutan blog, available at: <https://manutan.fr/blog/conseils/au-bureau-ou-en-entrepot-quels-sont-les-objectifs-de-lergonomie-au-travail-pour-lentreprise/#:~:text=L%E2%80%99objectif%20de%20l%E2%80%99ergonomie,s%C3%A9curit%C3%A9%20et%20leur%20bien-%C3%AAtre> (accessed: 23 August 2023).
- Martinet, C. and Meyer, J.-P. (1999), Travail à la chaleur et confort thermique, note scientifique et technique. dtr. Available at: <https://inrs.fr/inrs/recherche/etudes-publications-communications/doc/publication.html?refINRS=NOETUDE%2F3641%2FN5184> (accessed: 04 August 2023).
- Mathis, R.C. and Tarpay, D.R. (2007), 70 million years of building thermal envelope experience: Building science lessons from the honey bee, *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings x*, pp. 1–9. Available at: https://techstreet.com/standards/70-million-years-of-building-thermal-envelope-experience-building-science-lessons-from-the-honey-bee?product_id=1713048.
- Matin, N.H. and Eydgahi, A. (2019), Technologies used in responsive facade systems: a comparative study, *Intelligent Buildings International*, Vol. 14, pp. 54–73. Available at: <https://doi.org/10.1080/17508975.2019.1577213>.
- Matin, N.H., Eydgahi, A. and Shyu, S. (2017), Comparative analysis of technologies used in responsive building facades, in *American Society for Engineering Education*. Michigan, pp. 1–29. Available at: <https://doi.org/10.18260/1-2--28052>.
- May, N. (2005), Breathability: the key to building performance, *Construction*, pp. 1–34. Available at: <http://ecotimberframe.ie/pdf/BreathabilityinbuildingsNBT.pdf>.
- Meddour, B. (2007), *Modelisation et simulation du comportement thermomecanique des alliages a memoire de forme*. Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna. pp. 1-105.
- Meirone, C. (2022), Climatisation : vers une explosion de la demande mondiale d'ici 2050, available at: https://tameteo.com/actualites/actualite/climatisation-vers-une-explosion-de-la-demande-mondiale-d-ici-2050-etude-changement-climatique.html?utm_source=chatgpt.com (accessed: 27 July 2022).
- Mercedes (2024), Mercedes-benz museum, available at: <https://mercedes-benz.com/en/art-and-culture/museum/> (accessed: 16 January 2024).
- Minsolmaz Yeler, G. and Yeler, S. (2017), Models from nature for innovative building skins, *Derleme Minsolmaz Yeler&Yeler / Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, Vol.3, pp. 142–165.
- Mirajkar, N. and Agrawal, A. (2019), Exploring the Possibilities of using biomimicry to improve the thermal behaviour of walling units, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, Vol. 134, pp. 423–435. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5974-3_37.
- Mohamed, N.A.H., Mandour, M.A. and Marey, S. (2022), Applying innovative criteria to achieve Biomimicry in Architecture, *Engineering Research Journal*, Vol. 176, pp. 90–109. Available at: <https://doi.org/10.21608/erj.2022.272649>.
- Monde Végétal (2021), pin D'alep - pinus halepensis, Monde Végétal: Semez une graine, récoltez la vie, available at: <https://monde-vegetal.fr/blogs/blog/pin-dalep> (accessed: 5 November 2021).
- Mortelmans, M. (2020), La Tour Eiffel, une dame de fer inspirée... du fémur humain !, Baleine sous Gravillon, available at: <https://podcast.ausha.co/des-baleines-sous-les-gravillons/s01e11-la-tour-eiffel-est-inspiree-du-femur-humain> (accessed: 9 July 2020).
- Mosa, R. (2018), *Developing a strategic framework for the design of adaptive building envelopes*. Heriot-Watt University School of the Built Environment. pp.1-96.
- Municipalité de Batna (2023) *Des données obtenues via La municipalité de Batna*.
- MyPet (2024), La dilatation des pupilles du chat: que signifie-t-elle? available at: <https://fr.mypet.com/> (accessed: 20 December 2023).

- N'konou, F. (2023), Types de caméléons, available at: <https://planetanimal.com/types-de-cameleons-1687.html> (accessed: 18 December 2023).
- Nait, N. (2011), *La rehabilitation energetique dans les logements collectifs existants cas du climat semi aride de constantine*, Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine. Available at: https://academia.edu/38369118/Nait_Nadia_pdf.
- Nasir, O. and Kamal, M.A. (2022), Inspiration from Nature: Biomimicry as a Paradigm for Architectural and Environmental Design, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 10, pp. 126–136. Available at: <https://doi.org/10.12691/ajcea-10-3-3>.
- Nasr, Y.T.A. (2017), *Using smart materials to mimic nature in architecture*. master thesis, university, alexandria department of architecture. pp.1-79.
- Ned Kahn Studios (2004), Articulated Cloud, available at: <https://nedkahn.com/portfolio/articulated-cloud> (accessed: 10 August 2022).
- Nessim, M.A. (2015), Biomimetic architecture as a new approach for energy efficient buildings through smart building materials, *Journal of Green Building*, Vol. 10, pp. 73–86. Available at: <https://doi.org/10.3992/jgb.10.4.73>.
- Nour ElDin, N. (2024), Biomimicry and artificial intelligence for climate change mitigation, *Engineering Journal*, Vol. 1, pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.4186/ej.20xx.xx.x.xx>.
- Nour ElDin, N. and Abdou, A. (2020), An Approach to Adaptive Sustainable Facades Inspired by Plants, *The Academic Research Community publication*, Vol. 4, pp. 52–62. Available at: <https://doi.org/10.21625/archive.v4i2.755>.
- OpenEd Cuny (2007), Systems of Gas Exchange: Tracheal Systems, [opened.cuny.edu](https://opened.cuny.edu/courseware/lesson/808/student/?section=4), available at: <https://opened.cuny.edu/courseware/lesson/808/student/?section=4> (accessed: 15 February 2023).
- Öztoprak, Z. (2018), *A Biomimetic perspective on (retro)fitting of building envelopes*. Middle east technical university. pp.1-179. Available at: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12621923/index.pdf%0Ahttps://hdl.handle.net/11511/27141>.
- Padmanabhan, A. (2013), *The eco office : dynamic and homeostatic façades inspired by biomorphism , biomimicry , and biophilia*, School of Architecture University of Hawai'I, pp.1-205.
- ParlonsSciences (2023), Comment les animaux se protègent-ils du froid pendant l'hiver? available at: <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/activites-pratiques/comment-les-animaux-se-protègent-ils-du-froid-pendant> (accessed: 10 October 2023).
- Pawlyn, M. (2011) *Biomimicry in architecture*. Edited by J. Porritt. RIBA.
- Pawlyn, M. (2019), *Biomimicry in architecture*. Second Edi. Edited by F. Gibbons. Newcastle upon Tyne: RIBA Publishing. Available at: <https://doi.org/10.4324/9780429346774>.
- Payne, A. (2007), The air flow(er), *Lift architects*, available at: <http://liftarchitects.com/air-flower/> (Accessed: 12 March 2023).
- Peeks, M. and Badarnah, L. (2021), Textured building faades: utilizing morphological adaptations found in nature for evaporative cooling, *Biomimetics*, Vol. 6, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS6020024>.
- Phouthonnesy, P. (2019), Biomimétisme : le futur se trouve dans la nature, La Nouvelle République, available at: <https://lanouvellerepublique.fr/romorantin/biomimetisme-le-futur-se-trouve-dans-la-nature> (accessed: 21 July 2019).
- Ramram, A. (2020), *syndrome des batiments malsains (sbm) ; enjeux et perspectives*. Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Benyahia – Jijel. pp. 1-87.
- RespirFil (2023), Fonction pulmonaire, available at: <https://respifil.fr/maladies/fonction-pulmonaire/> (accessed: 7 September 2023).
- Rezek, M. (2015), – مفهوم المباني المتنفسه لمواجهة التغير المناخي, مذكرة ماجستير, كلية الهندسة – جامعة القاهرة –

الحبيرة, pp.1-237.

- Rhino3d (2023), Rhino dans l'architecture, l'ingénierie et la construction, Rhino 3D, available at: <https://rhino3d.com/fr/for/architecture/> (accessed: 15 March 2023).
- Ricanet, C. (2024), Pourquoi les racines de l'orchidée sortent-elles du pot ?, Rustica, available at: <https://rustica.fr/orchidees/pourquoi-racines-orchidee-debordent-pot,2672.html> (accessed: 14 August 2024).
- Roger, M. (2021), Stomates (plantes): fonctions, structure et caractéristiques, warbletoncouncil, available at: <https://fr1.warbletoncouncil.org/estomas-plantas-10155> (accessed: 12 December 2023).
- Romano, R. *et al.* (2018), What is an Adaptive Façade? Analysis of Recent Terms and Definitions from an International Perspective, *Journal of Facade Design and Engineering*, Vol. 6, pp. 65–76. Available at: <https://doi.org/10.7480/jfde.2018.3.2478>.
- Rosenfeld, A. (2013), *Bio- inspiration la nature comme modèle*. 12th edn. Edited by P. Richard. La lettre d'information.
- Saha, D. *et al.* (2014), *Indoor air pollution, Monitoring Guidelines: Draft for comments*, Central Pollution Control board, Ministry of Environment & Forest, Government of India. Delhi.
- Sandak, A. *et al.* (2019), State of the art in building façades, *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*, pp. 1–26. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3747-5_1.
- Schweig, M. (2009), C3, C4, CAM Photosynthesis, Henry shaw cactus and succulent society, available at: <https://hscactus.org/resources/digest/plant-info/c3-c4-cam/> (accessed: 25 November 2023).
- Shahda, M.M., Elhafeez, M.M.A. and Mokadem, A.A. El (2018), Camel 's nose strategy : New innovative architectural application for desert buildings, *Solar Energy*, Vol. 176 pp. 725–741. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.072>.
- Sharaidin, K. (2014), *Kinetic facades: towards design for environmental performance*. Rmit University, pp. 1-211.
- Sheikh, M. El and Kensek, K. (2011), Intelligent skins : daylight harvesting through dynamic light-deflection in office spaces, *Arcc 2011*, pp. 293–304.
- Sheikh, W.T. and Asghar, Q. (2019), Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings, *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 8, pp. 319–331. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>.
- Smith, B. (2015), How this lizard harvests water on its skin, cosmos, available at: <https://cosmosmagazine.com/science/biology/how-the-texas-horned-lizard-harvests-water-on-its-skin/> (accessed: 12 October 2023).
- Soba, A.I., Zaki, B.. and Aliyu, A.M. (2016), A study of biomimetic architectural traits in a pre-medical school complex in nigeria : a case-study of faculty of medicine , Kaduna, *Journal of Environment and Earth Science*, Vol. 6, pp. 132–141.
- Sommese, F. *et al.* (2024), Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting, *Building and Environment*, Vol. 247, pp. 1-19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111052>.
- Sommese, F., Badarnah, L. and Ausiello, G. (2023), Smart materials for biomimetic building envelopes : current trends and potential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 188, pp. 1-17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113847>.
- Stamp, E. and McLaughlin, K. (2024), 9 conseils pour entretenir les plantes succulentes (sans les tuer), Admagazine, available at : <https://admagazine.fr/article/plantes-succulentes-conseils-entretien> (accessed: 25 January 2024).
- Stavridou, A.D. (2015), Breathing architecture: conceptual architectural design based on the investigation into the natural ventilation of buildings, *Frontiers of Architectural Research*,

- Vol. 4, pp. 127–145. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.03.001>.
- Structurae (2022), Thyssenkrupp quartier Q1, base de données et galerie internationale d'ouvrages d'art et du génie civil, available at: <https://structurae.net/fr/ouvrages/thyssenkrupp-quartier-q1> (accessed: 17 August 2022).
- Sung, D.K. (2011), Bloom, dosu-arch, available at: <https://dosu-arch.com/bloom> (accessed: 19 November 2023).
- Sung, D.K. (2021), Director of undergraduate architecture programs, available at: <https://stevens.usc.edu/featured-researchers/doris-sung/> (accessed: 10 August 2023).
- Sung, D.K. (2010), Armoured Corset, dosu-arch, available at: <https://dosu-arch.com/armoured-corset> (accessed: 15 March 2023).
- Sung, D.K. (2011), *Prototyping a self-ventilating building skin with smart thermobimetals, Report of University Research*. California. Available at: <https://brikbases.org/sites/default/files/aiab092636.pdf>.
- Sung, D.K. (2012), Tracheolis, dosu-arch, available at: <https://dosu-arch.com/tracheolis> (accessed: 12 March 2023).
- Sung, D.K. (2016), Oculus, dosu-arch, available at: <https://dosu-arch.com/oculus> (accessed: 16 March 2023).
- Synth, R.D.E. (2020), *Projet urbain bio-inspiré*. Nouvelle Aquitaine, Ceebios.
- Tabadkani, A. et al. (2020), A review of automatic control strategies based on simulations for adaptive facades, *Building and Environment*, Vol. 175, pp.1-19. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106801>.
- Tabadkani, A. et al. (2021), Design approaches and typologies of adaptive facades: A review, *Automation in Construction*, Vol. 121, pp. 1-25. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>.
- Tahri, A. (2018), *L'effet de la baie vitrée sur le confort thermique dans l'espace de bureau en climat chaud et sec. Cas des immeubles de bureaux contemporains à Béchar*. Mémoire de magister, Université Mohamed Khider -Biskra. pp. 1-238. Available at: <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/4224>.
- Taylor (2022), Aperçu : Le Biomimétisme, andil trader inside, available at: <https://andil.com/forum/apercu-le-biomimetisme-ouvertures-du-23-27-03-20-t37010.html> (Accessed: 20 May 2020).
- Techno-science (2023), bec - définition, encyclopedie, available at: <https://techno-science.net/glossaire-definition/Bec.html> (accessed: 20 March 2023).
- Termium Plus (2023), Température effective, gouvernement du canada:la banque de données Terminologiques et linguistiques du gouvernement du canada, available At: https://Btb.Termiumplus.Gc.Ca/Tpv2alpha/Alpha-Fra.Html?Lang=Fra&I=1&Srchtxt=Température+Effective&Index=Alt&Codom2nd_Wet=1#Resultres (accessed: 20 February 2023).
- Tiffrent, F. (2016), *Etude analytique de l'habitation traditionnelle auressienne (cas de Mena)*, Mémoire de master en architecture, Université Larbi Tébessi – Tébessa, pp. 1-76.
- TPE sur les Cactus (2016), L'adaptation des cactus aux milieux arides, available at: <https://tpecactusabk.wordpress.com/category/tpe/> (accessed: 23 December 2023).
- TPEBiomimétisme (2024), Le stade de Munich, available at: <http://tpe-biomimetisme-lascasess.blogspot.com/p/le-stade-de-munich.html> (accessed: 16 January 2024).
- Tremco (2023), Acoustique du elbphilharmonie de hambourg, tremco construction products group, available at: https://tremcocpg.eu/fr-fr/conseils-dexperts/success-stories/acoustique-du-elbphilharmonie-de-hambourg/?utm_source=chatgpt.com (accessed: 8 August 2023).
- Trubiano, F. (2013), *Design and Construction of High-Performance Homes Building Envelopes, Renewable Energies and Integrated Practice, Public Works*. Edited by F. Trubiano.
- Tu, P.A. (2023), Design and performance assessment for kinetic façade based on minimal surface

- in the context of current and projected climate changes. case study in three climate regions, Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.), Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, pp. 1-136. Available at: <https://doi.org/10.26127/BTUOpen-6561>.
- Turrin, M. *et al.* (2014), Parametric modeling and optimization for adaptive architecture, *EG-ICE 2011, European Group for Intelligent Computing in Engineering*, pp. 1–8.
- Utzon, J. (2001), Sydney opera house- inspired by nature, technology student, available at: https://technologystudent.com/prddes_2/nature1.html (accessed: 5 January 2025).
- Vazquez, E. (2021), Shape-changing architectural systems: a bottom-up and top-down approach for developing responsive building skins, *Shape-changing Architectural Systems*, pp. 347–354. Available at: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/64315>.
- Vazquez, E., Correa, D. and Poppinga, S. (2024), A review of and taxonomy for elastic kinetic building envelopes, *Journal of Building Engineering*, Vol. 82, pp. 1-16. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108227>.
- Von Frisch, K. (1973), La danse des abeilles, un langage secret, available at: <https://mesabeilles.fr/les-abeilles/la-danse-des-abeilles-un-langage-secret#:~:text=La%20danse%20des%20abeilles%20est,nourriture%20qu%E2%80%99elle%20ont%20d%C3%A9couvertes> (accessed: 10 October 2024).
- Vercesi, L. *et al.* (2020), A novel approach to shape memory alloys applied to passive adaptive shading systems, *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 8, pp. 43–64. Available at: <https://doi.org/10.7480/jfde.2020.1.4700>.
- Walsh, A. (2024), 7 plantes aux racines profondes et pourquoi c'est important, Smart Garden and Home, available at: https://smartgardenhome-com.translate.goog/houseplants/deep-roots/?x_tr_sl=auto&x_tr_tl=fr&x_tr_hl=fr&x_tr_pto=wapp (accessed: 3 September 2024).
- Wang, J., Beltrán, L.O. and Kim, J. (2021), From Static to kinetic : a review of acclimated kinetic building envelopes from static to kinetic : a review of acclimated kinetic building envelopes, in *SOLAR 2014 Conference*. San Francisco: American Solar Energy Society, pp. 1–8.
- Wikipédia (2023), L'encyclopédie libre, available at: https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal (accessed: 12 December 2023).
- Wiktionnaire (2023), Le dictionnaire libre, available at: <https://fr.wiktionary.org/wiki/papyriforme> (accessed: 10 January 2024).
- Yedeki Arslan, G. (2014), Biomimetic architecture: a new interdisciplinary approach to architecture, *Alam Cipta, International Journal of Sustainable Tropical Design Research and Practice*, Vol. 7, pp. 29–36. Available at: <http://frsb.upm.edu.my/alamcipta/index.php/alamcipta/article/view/157>.
- Yi, H. *et al.* (2020), 3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture, *Automation in Construction*, Vol. 114, pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103151>.
- Yoon, J. (2018), Climate-adaptive facade design with smart materials: Evaluation and strategies of thermo-responsive smart material applications for building skins in Seoul, in *PLEA 2018 - Smart and Healthy within the Two-Degree Limit: Proceedings of the 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Hong Kong, pp. 620–626.
- Zari, M.P. (2007), Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability, *Sustainable Building Conference (SB07)*, pp. 33–42.
- Zwart, H. (2018), *What is mimicked by biomimicry? Synthetic cells as exemplifications of the three-fold biomimicry paradox*. Nijmegen.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A

A.1. Exemples d'adaptation comportementale chez la faune

- **Migration** : certaines espèces parcourent de grandes distances pour se nourrir, échapper aux conditions hivernales difficiles ou se reproduire dans des environnements plus propices (Deluzarche, 2020).
- **Se camoufler** : désigne l'action de la tortue qui se rétracte dans sa carapace lorsqu'elle se sent en danger, ou elle peut rester immobile à l'intérieur pendant de grandes périodes.

A.2. Exemples des stratégies d'amélioration de l'évaporation chez la faune

- **Vibration** qui est une adaptation comportementale où certains animaux, en faisant vibrer rapidement des organes humides spécifiques, utilisent l'eau comme dissipateur de chaleur (Peeks and Badarnah, 2021).
- Les **écopes d'air** qui se trouvent sur les deux côtés des fourmis argentées qui vivent dans le désert révèlent un mécanisme d'adaptation morphologique pour éviter la chaleur en favorisant un refroidissement par évaporation, ce qui permet d'atteindre une température corporelle comprise entre 48°C et 51°C, tandis que la température du sol peut dépasser les 70 °C (Horvath, 2015).
- **La transpiration**, comme chez certains animaux possédant le processus d'urohidrose ; urine sur les jambes qui ont de nombreux vaisseaux sanguins, provoque la dissipation de la chaleur lorsque l'urine s'évapore permettant le refroidissement de leur corps. Par exemple, les dindes et les vautours noirs sont de couleur sombre et absorbent une quantité considérable de chaleur pendant la journée, utilisent ce principe pour se refroidir.
- **Refroidissement par voie respiratoire**, ce phénomène, noté chez quelques mammifères tels que les chameaux, est en partie lié à l'action des turbinats nasaux. Ceux-ci favorisent un refroidissement efficace via des transferts thermiques et de l'évaporation au sein des cavités nasales, permet d'ajuster la température corporelle de l'animal aux grandes fluctuations thermiques de l'environnement (Abdullah, Said and Ossen, 2018). Cette stratégie commence lorsque le chameau inhale l'air chaud par son nez (des cornets) ; le mucus présent dans la membrane muqueuse s'évapore, ce qui refroidit la surface des cornets et l'air saturé de vapeur. Donc, L'air inhalé gagne la température du corps sur son chemin vers les poumons par convection. Cependant, lors de l'expiration, l'air chaud et saturé passe

à travers la surface froide des cornets, ce qui rend l'air encore plus frais et condense sa vapeur (Abdullah, Bin Said and Ossen, 2019) (Figure A.1).

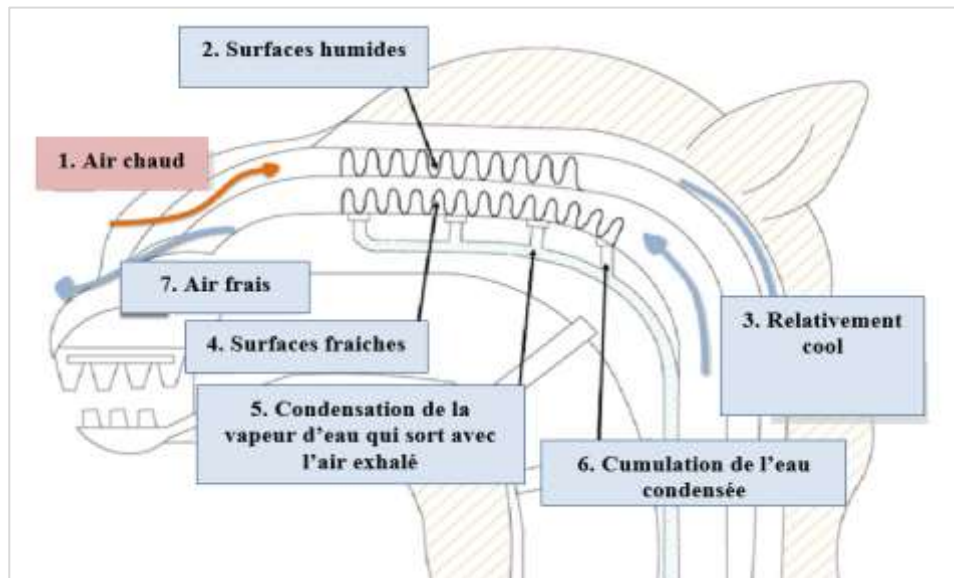


Figure A.1. Mécanisme de respiration chez le chameau.
Source : Shahda et al. (2018).

- **Stocker l'eau :** la tortue du désert comme la plupart des animaux du désert. Elle stocke l'eau d'une manière exceptionnelle, grâce à une vessie surdimensionnée. Elle supporte l'eau supplémentaire jusqu'à 50%, ce qui lui permet de survivre de longues périodes sans accès à l'eau potable.
- **Empêcher ou diminuer la perte d'eau :** certains animaux servent à empêcher la perte de l'eau de leurs corps en réduisant la surface exposée au soleil et rester au frais comme chez certains mammifères du désert qui ont moins de glandes sudoripares que leurs homologues dans des environnements moins extrêmes.
- **Creuser dans le sol humide :** dans des environnements désertiques, où l'eau est une ressource rare et pendant les heures sèches et chaudes du jour, certains animaux retiennent l'eau en creusant dans le sol humide pour mieux survivre.

A.3. Exemples de stratégies pour prévenir la chaleur chez la faune

- **Se déplacer rapidement :** les reptiles, tels que les lézards du désert, ont la capacité de se déplacer rapidement afin de trouver des zones plus fraîches où la température est plus supportable, afin d'éviter le sable trop chaud.
- **Se cacher :** l'animal à quatre pattes a tout le dos, les épaules et la tête exposés au soleil, afin de protéger son corps d'avoir un apport solaire excessif, il cherche l'ombre, via la position sous les arbres pour rester au frais.

A.4. Exemples des stratégies statiques d'adaptation chez la flore

A.4.1. Forme des feuilles : on trouve :

- **Feuilles fines, enroulées, pliées, étroites, divisées et souvent réduites** sont observées dans les climats chauds et secs, contribuant à réduire davantage la surface exposée au soleil, de plus réduisant la quantité d'eau perdue par transpiration. C'est l'exemple de la plante alliée et des feuilles des pins d'Alep (Figure A.2).

- **Feuilles succulentes** : ce sont les feuilles charnues des plantes des zones arides, favorisant la rétention de l'eau dans les tissus et restreignant leur surface d'évapotranspiration, ce qui leur permet de survivre à de longues périodes de sécheresse (Hunt, 2006) (Figure A.3).

- **Feuilles larges et plates** : signifiant que les feuilles s'étendent et s'éteignent afin de maximiser l'absorption de la lumière solaire précieuse dans des conditions climatiques froides, telles que les feuilles de rhododendron (Figure A.4).



Figure A.2. Feuilles du Pin d'Alep.

Source : Monde Végétal (2021).



Figure A.3. Feuilles succulentes.
Source : Stamp and McLaughlin (2024).



Figure A.4. Feuilles de rhododendron.

Source : Gamm vert (2024).

A.4.2. Racines : on constate :

- **Racines étendues et profondes** : dans les conditions climatiques arides et semi-arides, les plantes présentent souvent des systèmes racinaires très étendus et profonds, atteignant généralement une profondeur de 7 à 10 mètres. Ces plantes se répartissent sur de vastes zones afin d'atteindre des réserves d'eau souterraine plus stables et moins affectées par les variations saisonnières (Walsh, 2024), c'est le cas de *L'acacia* (Figure A.5).

- **Racines superficielles** : ce genre de racines s'étend horizontalement afin d'absorber l'oxygène et les nutriments présents dans la couche supérieure du sol. Ils se trouvent dans les environnements humides où l'eau est abondante à la surface du sol. Par exemple : les *Orchidées* qui ont des racines ouvertes (Figure A.6).



Figure A.5.L'acacia.
Source : Alamy (2012).



Figure A.6. L'orchidée.
Source : Ricanet (2024).

A.4.3. Tiges : On observe :

- **Tiges succulentes** : ce sont des tiges charnues qui sont souvent recouvertes d'une couche dense de poils (trichomes). Ces tiges, situées dans les régions où le climat est aride, ont une surface réduite par rapport à leur volume, ce qui leur permet de stocker une grande quantité d'eau (Elhalabiah, 2021). Les *Cactus Saguaro* font partie de cette catégorie (Figure A.7).
- **Tiges grimpantes** : s'accrochent à des supports afin d'atteindre la lumière du soleil et d'éviter la concurrence au sol pour favoriser la photosynthèse. Ce genre est présent dans les forêts tropicales où la lumière du soleil est rare au niveau du sol, comme le *Lierre* avec ses tiges aériennes (Cathersides and Viles, 2004) (Figure A.8).
- **Tiges souterraines** : ce genre est utilisé pour protéger contre le froid et la sécheresse, tandis que certaines plantes utilisent des tiges souterraines comme *les Bulbes* pour stocker leurs réserves d'énergie (Clinique des plantes, 2023) (Figure A.9).
- **Tiges photosynthétiques** : *les Fougères*, vivant dans des milieux où la lumière est rare, ont développé des tiges photosynthétiques qui contribuent à la dégradation du sucre par photosynthèse (Leroux, 2014) (Figure A.10).



Figure A.7.Cactus Saguaro.
Source :
Elhalabiah (2021).



Figure A.8. Lierre.
Source :
Cathersidesand Viles
(2004).



Figure A.9. Bulbes.
Source :
Clinique des plantes
(2023).



Figure A.10. Fougères.
Source :
Leroux (2014).

A.5. Exemples d'adaptation comportementale chez la flore

- **Mouvements foliaires** : ou l'héliotropisme, qui est un mot grec composé de « *hélios* » qui désigne le soleil, et de « *Tropos* », qui signifie tourner. Ce terme désigne le mouvement orienté de certains végétaux feuilles ou fleurs, pour mieux capter les rayons solaires (Blacha and Bots, no date; Minsolmaz Yeler and Yeler, 2017; Linternaute, 2023). Par exemple, l'orientation des feuilles, des tiges et des fleurs de tournesols (*Helianthus annuus*), vers la source de lumière, pour optimiser leur exposition au soleil et optimiser la photosynthèse sur une longue période de la journée (Figure A.11).
- **Pliage des feuilles** : les feuilles de certaines plantes sont repliées les unes sur les autres lentement et irréversiblement pour diminuer la surface exposée au soleil. L'importance de cette action est primordiale dans les zones sèches, car elle permet aux plantes de réduire la perte d'eau par transpiration, de préserver les feuilles des températures froides la nuit et de dissimuler les plantes des herbivores. Tels que : **Mimosas** (Figure A.12).
- **Changements de couleur des feuilles** : certaines plantes ont des feuilles qui évoluent en fonction d'une exposition excessive au soleil, en raison d'une accumulation de pigments. Grâce à cette modification, les feuilles sont protégées contre les rayons ultraviolets et le stress thermique est réduit en limitant l'absorption de chaleur, c'est le cas de : **Erables** (Figure A.13).



Figure A.11. Tournesols.
Source : Kuznetsov (2022).



Figure A.12. Mimosas.
Source : Gamm Vert (2024).



Figure A.13. Erables.
Source : Déco (2019).

ANNEXE B

B.1. Informations sur les ouvertures de l'annexe

L'annexe administrative se caractérise par sa transparence due à la présence d'une surface importante des ouvertures illustrées dans la Figure B.1. Les dimensions sont présentées dans le Tableau B.1.

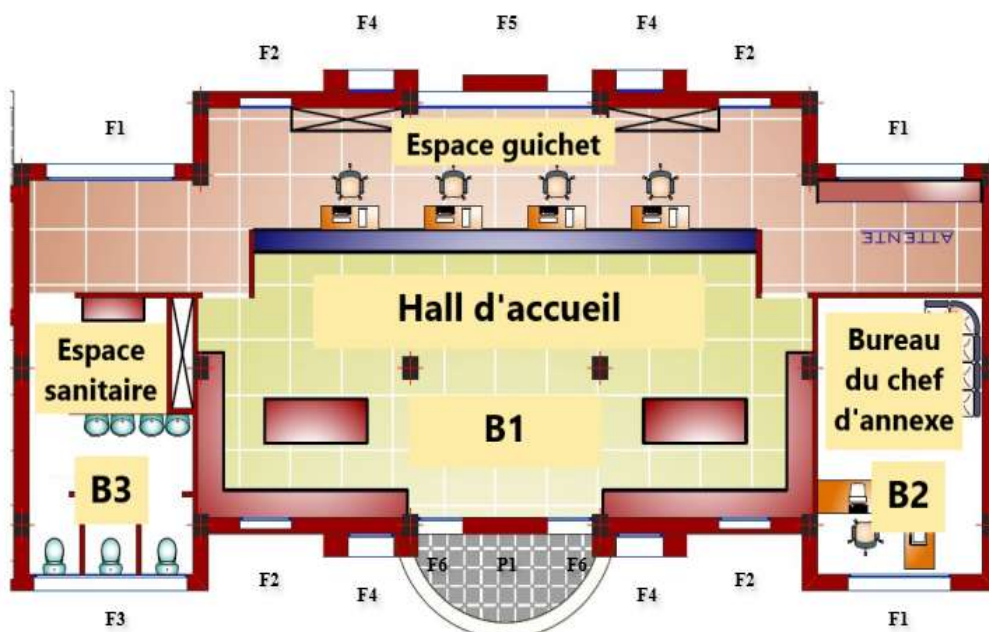


Figure B.1. Positionnement des ouvertures.
Source : BET (2014).

Tableau B.1. Informations sur les ouvertures de l'annexe. Source : Auteur (2022).

N°	Désignation	Nombre	Dimensions L x H (m)
1	Fenêtre F1	3	2,60 x 1,50
2	Fenêtre F2	4	0,90 x 2,50
3	Fenêtre F3	1	1,80 x 0,60
4	Fenêtre F4	4	0,90 x 3,50
5	Fenêtre F5	1	3,40 x 2,50
6	Fenêtre F6	1	3,4 x 0,75
		2	0,8 x 2,30
7	Porte d'accès P1	1	1.40 x 2.20

B.2. Calcul de la température moyenne journalière

Tableau B.2. Données climatiques journalières. Source : Tameteo (2022).

L'heure	La journée 24 juillet 2022		La journée 25 juillet 2022		La journée 26 juillet 2022	
	Température extérieure (°C)	Humidité relative (%)	Température extérieure (°C)	Humidité relative (%)	Température extérieure (°C)	Humidité relative (%)
01h00	23,00	38,2	22	60,2	23,00	23,4
02h00	22,00	46,4	20	68,4	21,00	26,4
03h00	21,00	49,4	19	72,6	21,00	26,4
04h00	21,00	49,4	20	72,6	19,00	29,9
05h00	20,00	49,1	18	72,6	19,00	32,1
06h00	19,00	48,8	21	68,4	17,00	36,4
07h00	23,00	46,7	26	60,5	21,00	30,5
08h00	26,00	39,1	29	44,6	25,00	23,9
09h00	29,00	30,7	32	32,8	29,00	18,9
10h00	31,00	25,6	34	25,8	32,00	15,9
11h00	33,00	21,3	35	20,2	35,00	0
12h00	35,00	17,8	37	15,7	37,00	0
13h00	35,00	17,8	37	12,3	37,00	0
14h00	36,00	16,9	38	0	38,00	0
15h00	37,00	14,9	37	13,9	39,00	0
16h00	37,00	13,9	38	13	38,00	0
17h00	37,00	13,9	36	0	38,00	0
18h00	36,00	15,7	35	0	37,00	0
19h00	34,00	17,6	32	0	36,00	0
20h00	31,00	22,3	30	0	34,00	0
21h00	30,00	23,6	29	0	31,00	13,6
22h00	29,00	25	28	0	30,00	14,4
23h00	26,00	29,8	25	10,1	30,00	16,6
00h00	24,00	31,3	23	64,5	26,00	19,5
Somme	695,00	705,2	701	728,2	713,00	327,9
Moyenne journalière	28,96	29,38	29,21	30,34	29,71	13,66

B.3.Calcul de la température neutre

Tableau B.3. Calcul de la température neutre. Source : Tameteo (2022).

Le jour	Le mois de juin		Le mois de juillet		Le mois d'aout	
	T max	T min	T max	T min	T max	T min
1	38	24	42	22	37	18
2	38	24	42	20	34	18
3	38	21	40	21	34	19
4	39	25	40	24	35	19
5	39	18	40	18	36	17
6	40	16	39	20	35	17
7	38	18	37	18	34	16
8	35	14	29	16	35	15
9	31	17	33	15	36	17
10	26	12	33	15	36	10
11	30	9	34	17	36	17
12	33	11	36	18	35	16
13	35	12	36	19	38	16
14	38	15	34	17	41	20
15	37	16	35	17	39	26
16	37	18	36	18	38	25
17	36	15	38	25	40	31
18	36	14	38	18	36	21
19	38	17	38	20	31	16
20	40	16	38	19	34	16
21	40	19	37	16	34	14
22	38	17	38	19	33	15
23	40	18	38	19	32	16
24	39	19	37	19	33	16
25	40	18	38	18	35	17
26	39	25	39	17	34	17
27	42	24	40	20	35	16
28	35	19	37	17	35	17
29	40	20	40	20	37	19
30	40	28	40	19	36	18
31			39	19	27	27
	1115	539	1161	580	1091	562
	37,17	17,97	37,45	18,71	35,19	18,13
Température neutre = 17.6+(0.31 X T moyenne)				26.10°C	24.11 ≤ 26.11 ≤ 28.11	

B.4. Questionnaire

Le questionnaire distribué aux occupants de l'annexe a été rédigé en deux langues, en langue arabe et française, pour faciliter la compréhension aux personnes interrogées.

Ce questionnaire a été élaboré en se basant sur l'échelle ASHRAE.

B.4.1. Informations sur l'interviewé

Nom et prénom :

Sexe : Homme Femme

Âge :

Couleur d'habillage :

Arrivée à l'annexe : Marche à pied Véhicule Bus
Vélo Moto

Classification : Employé Citoyen

Date :

Heure :

Combien de temps que tu es là

Position : Hall d'entrée Espace guichet
Bureau chef d'annexe Espace sanitaire

B.4.2. Evaluation de la perception du bien-être vis-à-vis de l'ambiance thermique intérieure

Comment sentez-vous par rapport aux conditions thermiques intérieures via les facteurs suivants ?

B.4.2.1. Température

- Comment sentez-vous à ce moment ?

Très froid	Froid	Légèrement froid	Ni chaud ni froid	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud

- Comment vous jugez cela ?

Acceptable	Légèrement inacceptable	Inacceptable	Très inacceptable

- A ce moment, préférez-vous avoir ?

Beaucoup plus froid	Plus froid	Un peu plus froid	Pas de changement	Un peu plus chaud	Plus chaud	Beaucoup plus chaud

- Devant cette situation, préférez-vous de rester :

Proche de la porte d'entrée (ouverte)	Proche du climatiseur	Proche de la fenêtre ouverte	Dans l'espace d'attente	Autres

- Justifier votre réponse :

B.4.2.2. Humidité de l'air

- Décrivez votre sensation à propos de l'humidité de l'air en ce moment ?

Très sec	Sec	Légèrement sec	Ni sec ni humide	Légèrement humide	Humide	Très humide

- Comment vous juger cela ?

Acceptable	Légèrement inacceptable	Inacceptable	Très inacceptable

- Est-ce vous préférez un environnement intérieur ?

Beaucoup plus sec	Plus sec	Un peu plus sec	Pas de changement	Un peu plus humide	Plus humide	Beaucoup plus humide

B.4.2.3. Mouvements d'air

- Décrivez votre sensation à propos du mouvement de l'air en ce moment ?

Calme	Léger	Moyen	Elevé	Très élevé

- Vous jugez cela comme ?

Acceptable	Légèrement inacceptable	Inacceptable	Très inacceptable

- Préférez-vous qu'il y ait ?

Moins de mouvements	Un peu moins de mouvements	Sans changement	Un peu plus de mouvements	Plus de mouvements

B.4.2.4. Eclairage

- Décrivez-vous le type d'éclairage utilisé en ce moment :

Eclairage naturel	Eclairage artificiel

- Décrivez votre sensation à propos de ce type d'éclairage en ce moment ?

Acceptable	Légèrement inacceptable	Inacceptable	Très inacceptable

- Préférez-vous qu'il y ait ?

Moins de luminance	Un peu moins de luminance	Sans changement	Un peu plus de luminance	Plus de luminance

B.4.2.5. L'enseillement

- Trouvez-vous l'enseillement dans cet immeuble comme gênant ?

Réponse : Oui Non

- Si vous répondez « Oui », il est gênant par rapport à :

-L'effet de serre (surchauffe) -L'exposition directe au soleil
 - L'éblouissement -La stratification thermique

B.4.2.6. Tenant compte de tous ces paramètres (température, humidité de l'air, vitesse de l'air, éclairage, et enseillement), jugez l'environnement thermo-aéraulique interne :

- Le cas 01 : Annexe administrative sans ouverture des fenêtres et sans climatisation

Très confortable	Confortable	Acceptable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable

- Le cas 02 : Annexe administrative avec une ventilation transversale (ouverture des fenêtres sur les deux cotés et sans climatisation)

Très confortable	Confortable	Acceptable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable

- Le cas 03 : Antenne fermée avec climatisation

Très confortable	Confortable	Acceptable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable

Autres commentaires :

.....

ANNEXE C

C.1.Choix du matériau intelligent

L'apparition de matériaux intelligents fait partie des progrès technologiques. Dans cette optique, la cinétique de l'enveloppe adaptative générée s'appuie sur l'emploi des alliages à mémoire de forme servant à créer le mouvement d'ouverture et de fermeture de l'enveloppe (Figure C.1) face aux changements de température (Tableau C.1).

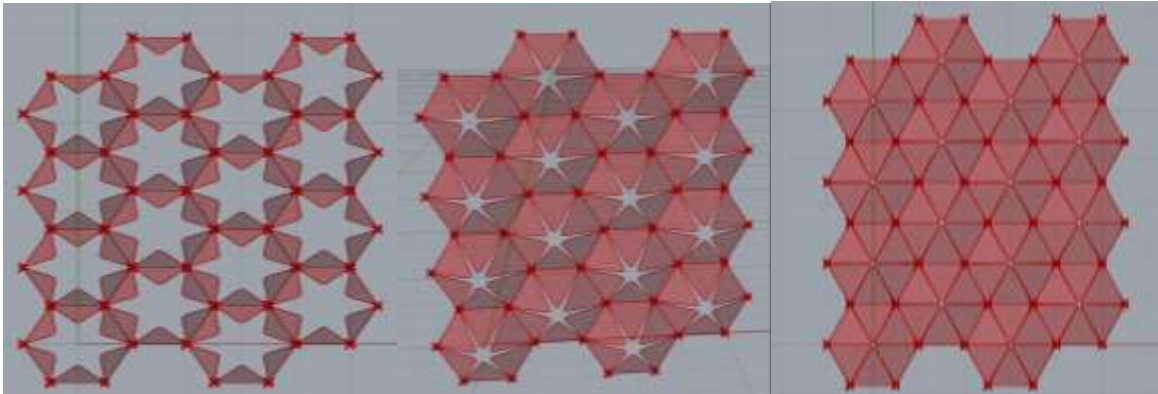


Figure C.1. Ouverture et fermeture de l'enveloppe.
Source : Auteur (2023).

Tableau C.1 : Caractéristiques des alliages à mémoire de forme, Source : Yoon (2018).

Matériau	Morphologie	Forme	Contrôle	Actionneur	Sortie
Matériau à changement de phase (MCP)		Poudre Liquide	Phase		Transparence
Thermo bimétal		Feuille	Expansion Courbure	•	Mouvement Ouverture
Alliage à mémoire de forme SMA		Fils Ressort Feuille	Contraction Relâchement	•	Mouvement
Polymère à mémoire de forme		Feuille Forme libre	État Transition	•	Déformation Elasticité
Thermochromique		Poudre Liquide	Ordre interne		Couleur

C.2. Resultats du scénario 1

C.2.1. Humidité relative

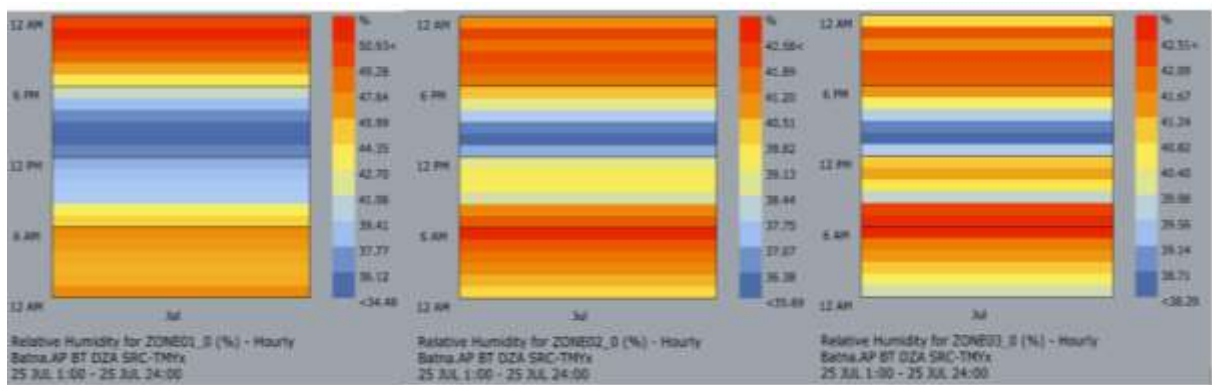


Figure C.2. Humidité relative.
Source : Auteur (2023).

C.2.2. Température opérative

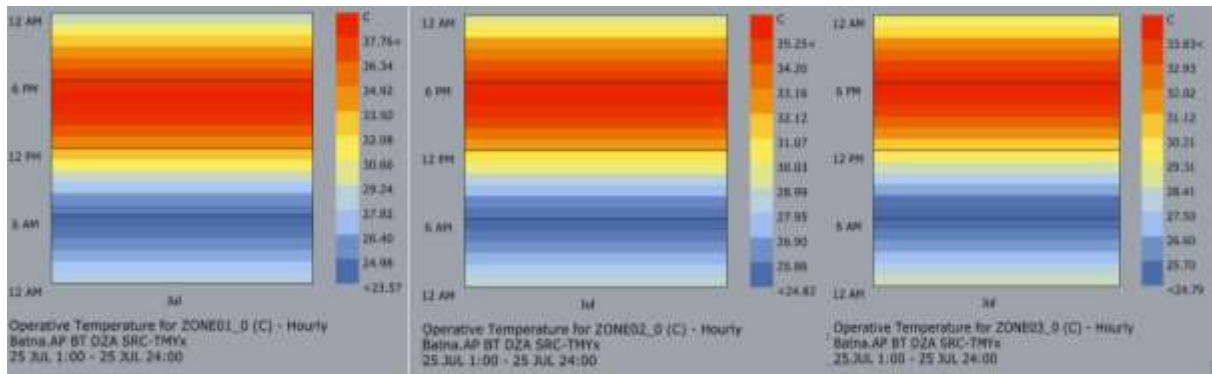


Figure C.3. Température opérative.
Source : Auteur (2023).

C.2.3. Température radiante

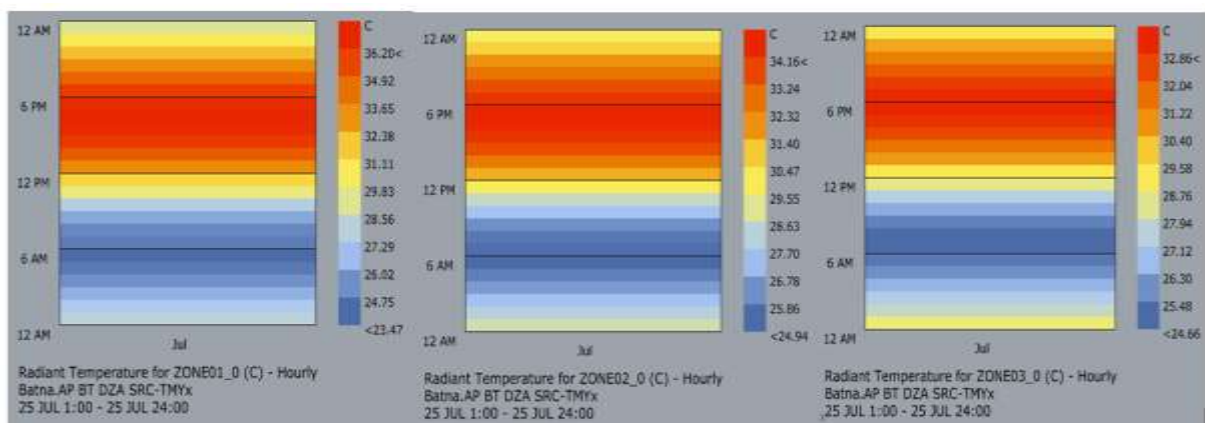


Figure C.4. Température radiante.
Source : Auteur (2023).

C.2.4.PMV

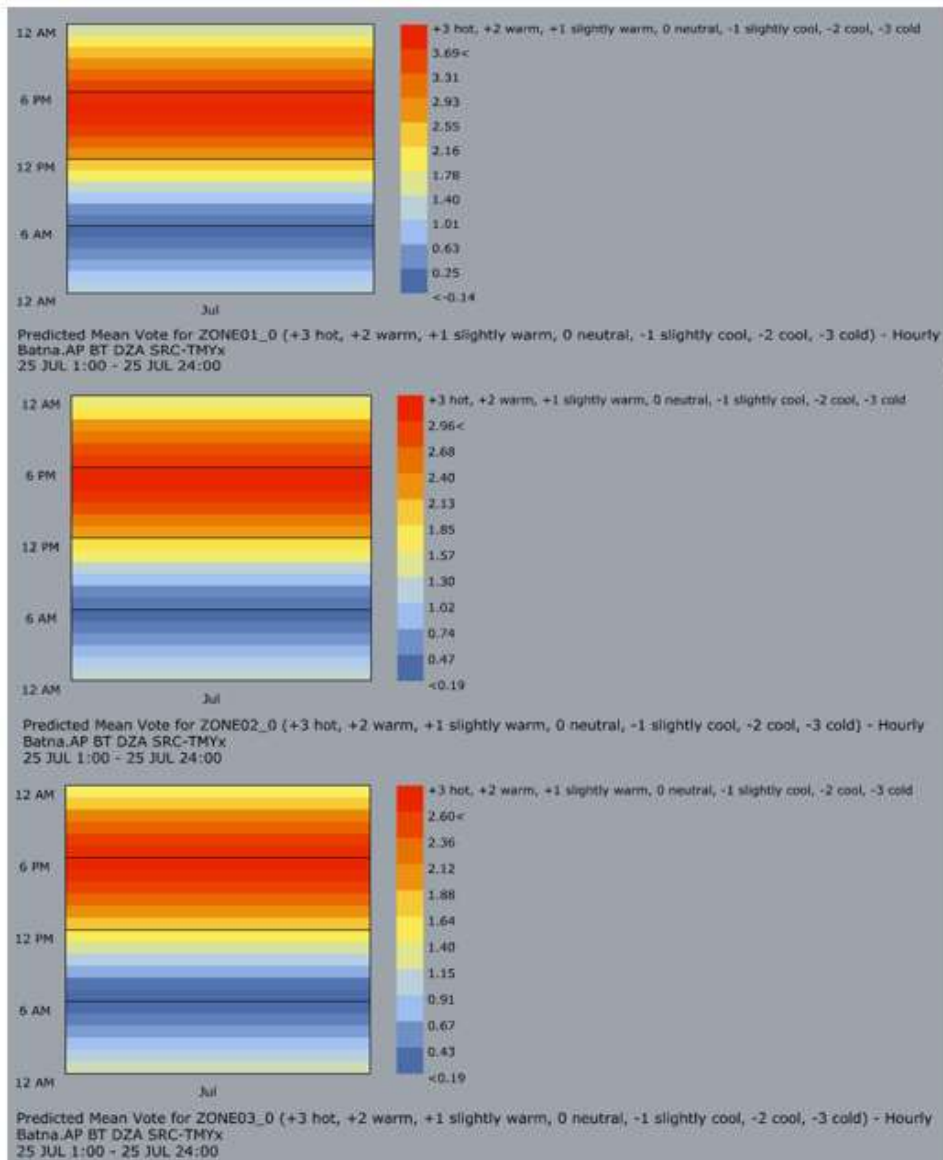


Figure C.5. PMV.
Source : Auteur (2023).

C.2.5.PPD

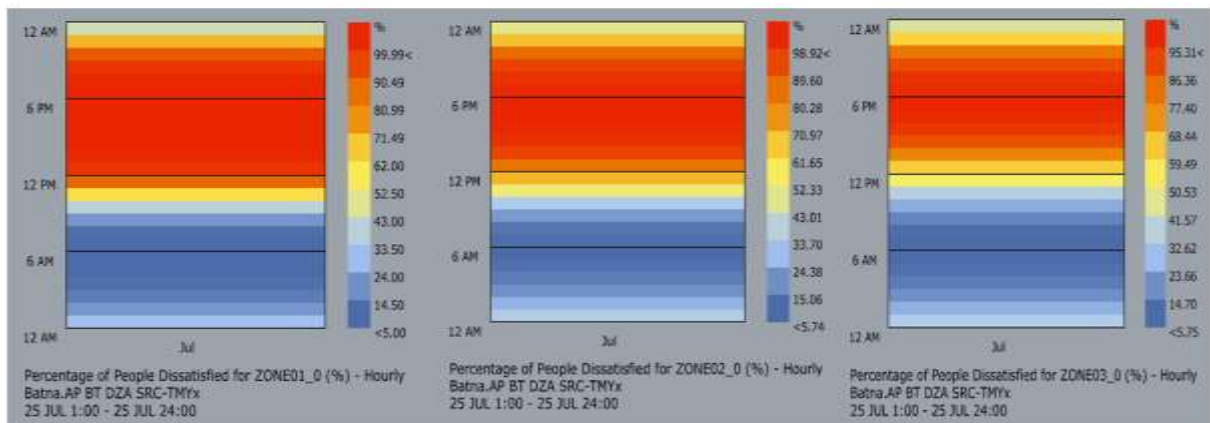


Figure C.6. PPD.
Source : Auteur (2023).

C.3. Resultats du scénario 2

C.3.1. Température de l'air

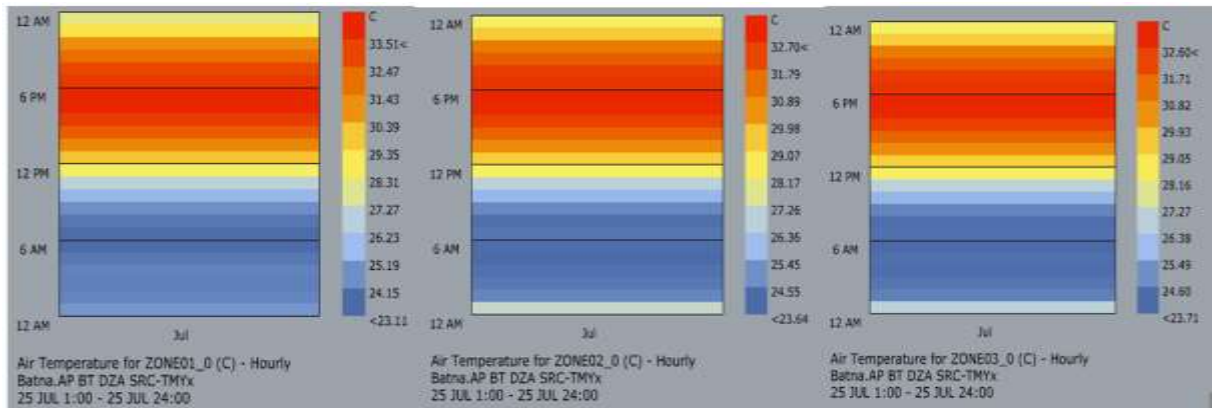


Figure C.7. Température de l'air.
Source : Auteur (2023).

C.3.2. Humidité relative

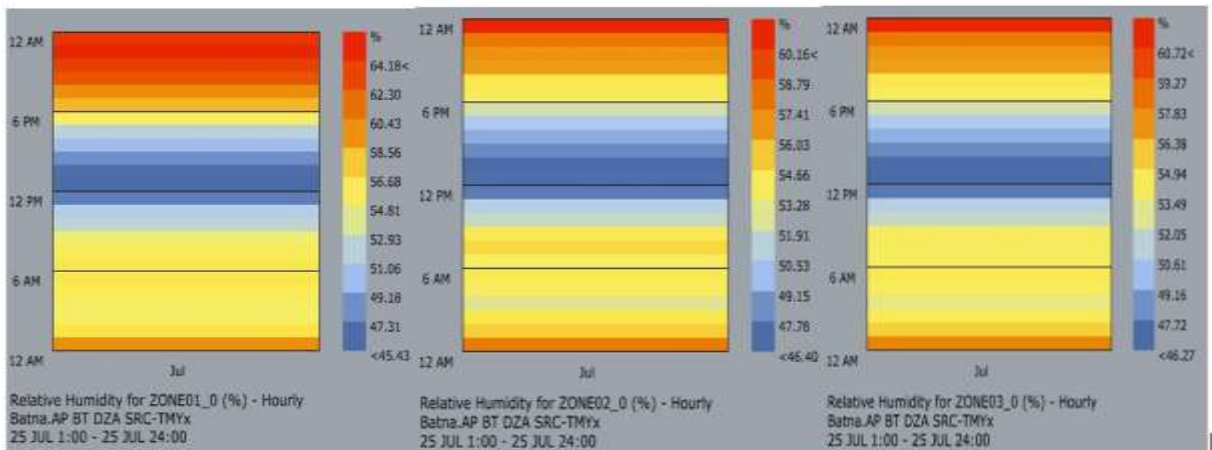


Figure C.8. Humidité relative.
Source : Auteur (2023).

C.3.3. Température opérative

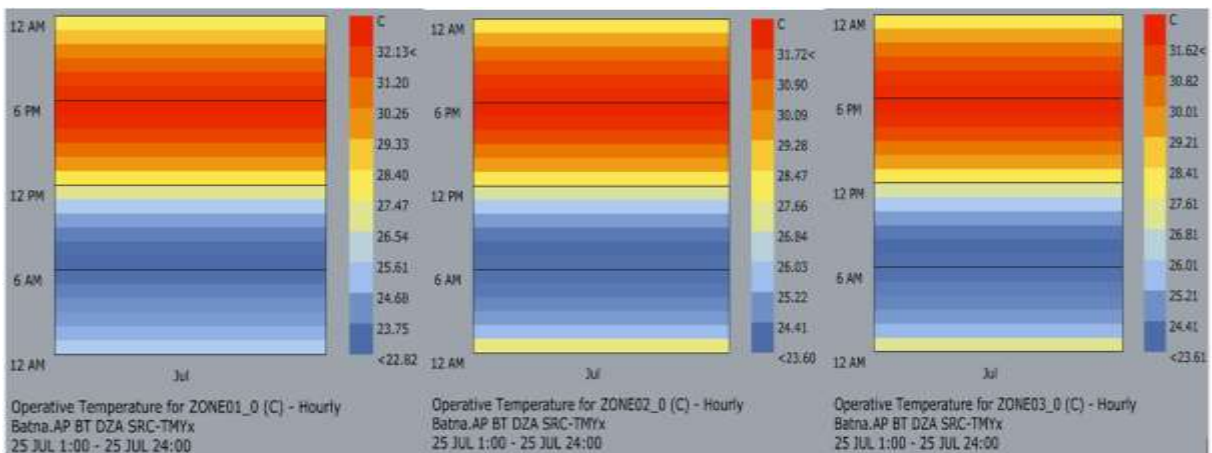


Figure C.9. Température opérative.
Source : Auteur (2023).

C.3.3. Température radiante

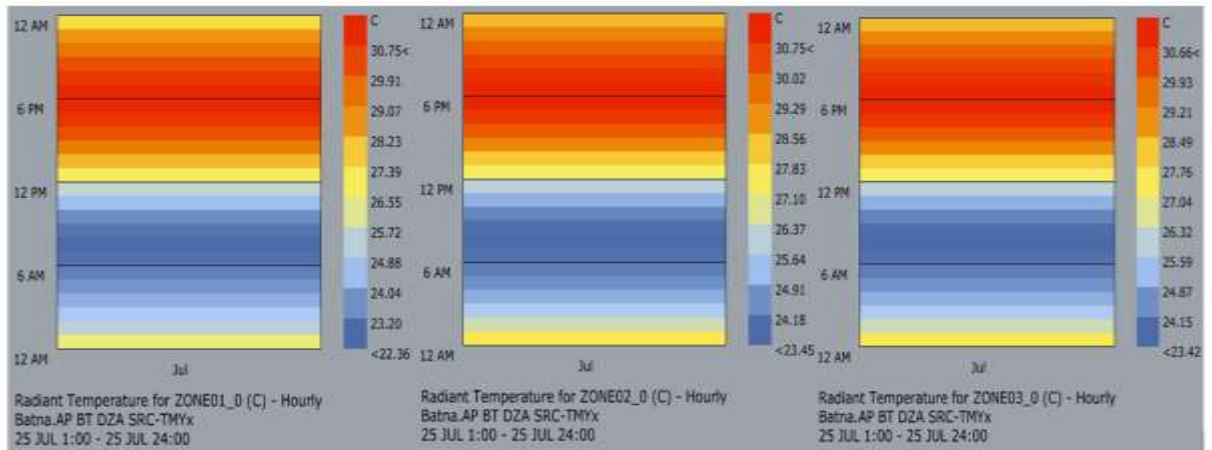


Figure C.10. Température radiante.
Source : Auteur (2023).

C.3.4. Température effective

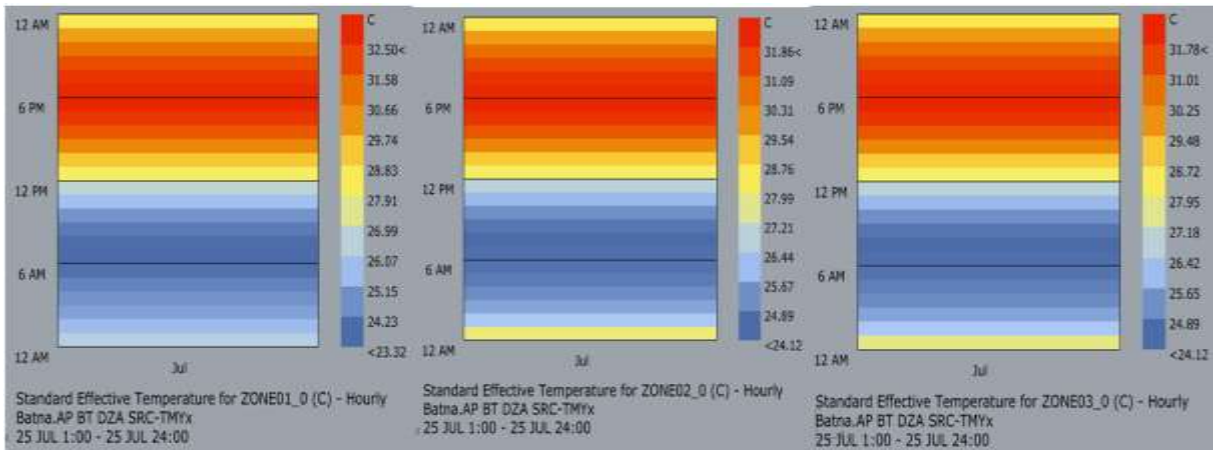
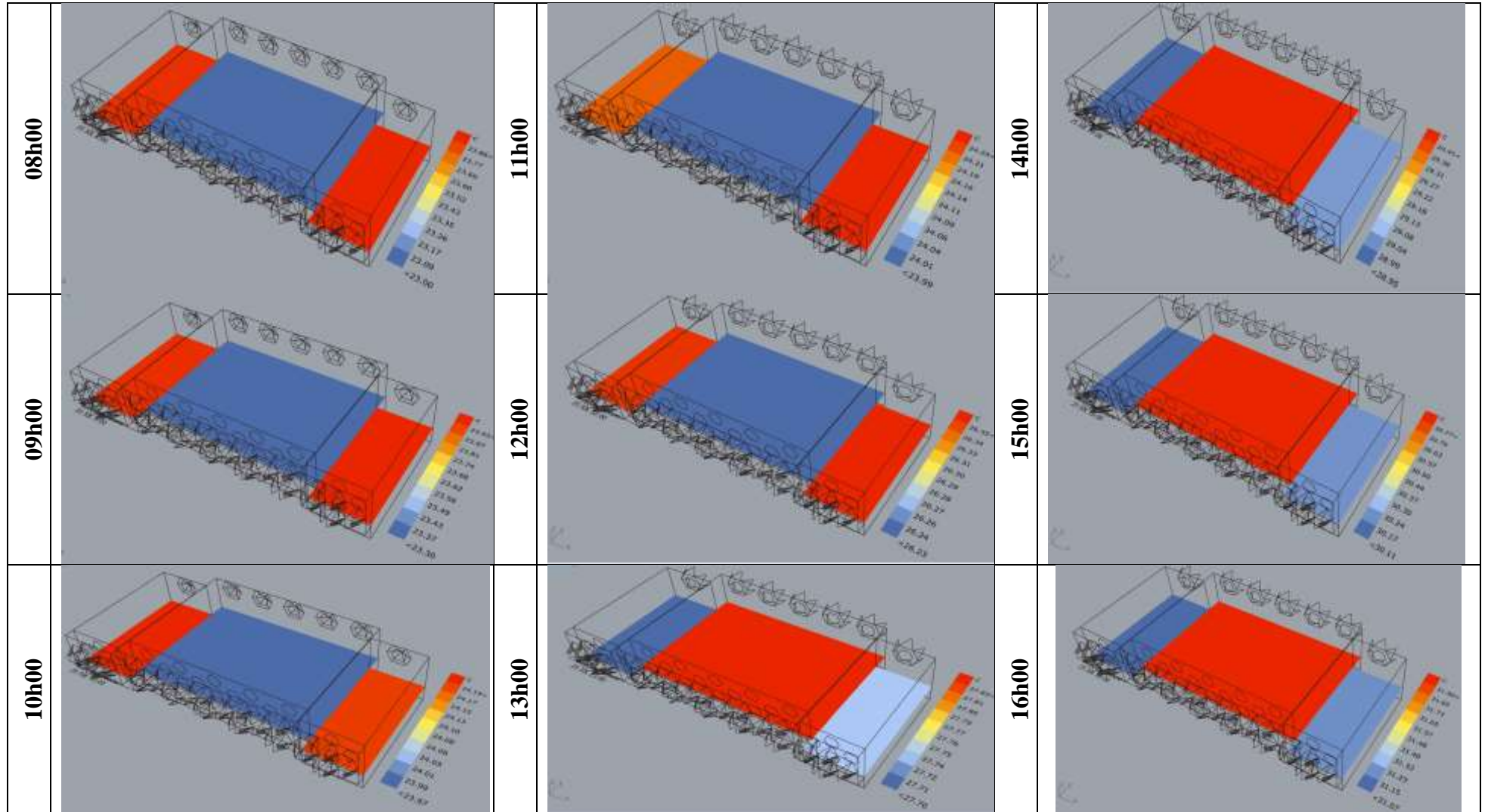


Figure C.11. Température effective.
Source : Auteur (2023).

Tableau C.2 : Résultats de la température de l'air issus du scénario 2, Source : Auteur (2023).



D.1. Article publié

EFFECT OF A BEE-INSPIRED ADAPTIVE ENVELOPE ON EXISTING ADMINISTRATIVE BUILDING IN A SEMI-ARID CLIMATE

K. Fekkous¹ Y. Bouchahm¹ N. Fekkous²

¹ Department of Architecture and Urban Planning, University of Constantine 3, Salah Boudhider, Constantine, Algeria, Part of Laboratory of Bioclimatic Architecture and Environment (ABE), University of Constantine 3, Salah Boudhider, Constantine, Algeria, khaoula.fekkous@univ-constantine3.dz, ybouchahm2@gmail.com
² Department of Architecture, University of 8 May 1945, Guelma, Algeria, fekkous.nadia@univ-guelma.dz

Abstract. In Algeria, building is the most energy-consuming sector, particularly during the summer. The half of energy consumption is related to air conditioning; therefore, this study aims to evaluate the indoor thermal environment in an existing administrative building in Batna City (semi-arid climate). For this purpose, two methods are used: first, in-situ investigation was carried out during the hottest day of the summer on July 25th, 2022 that showed internal overheating. On the other hand, energy simulation was performed after the application of a thermal rehabilitation by using a bee-inspired adaptive envelope that was integrated on the south and north facades to promote cross-ventilation and improve summer cooling. On the south facade, we placed a complex envelope composed of two layers that are separated by an air cavity with a downdraft evaporative cooling system to refresh the air before entering the building. Furthermore, opening and closing of the external cells are guaranteed by applying an intelligent material (shape memory alloy, or SMA) as a sensor and actuator that autonomously adapts to the external stimuli while reducing operating and maintenance costs. The obtained results show an improvement in the internal thermal environment and reduced internal overheating with a drop in temperature reaching a maximum value of 7.59 °C. These results promote energy efficiency and reduce the impact of the building on the environment.

Keywords: Adaptive Envelope, Bee, Shape Memory Alloy, Cross-Ventilation, Administrative Building, Semi-Arid Climate.

1. INTRODUCTION

Building is probably the challenge of the next decades, so we should build according to the climate and move towards energy transition with more energy efficiency and renewable energy by ensuring eco-construction in Algeria [1]. Hence, the current issue is to protect and enhance people's comfort and reduce energy consumption as well, particularly concerning heating and air-conditioning [2].

However, Batna municipal buildings of municipal heritage are distinguished by their high energy consumption, this was translated by a bill which increased from 1,400,000 DA in 2014 [3] to 5,140,000 DA in 2022, with an increasing amount of expenditure reaching 467 500 DA/year. This will negatively influence the municipal budget as stated by the Batna municipality's finance department. Because these buildings are highly glazed and their design was only based on the facade's aesthetics, ignoring their ability to adapt to the local climate and internal heat gain, causing an increase in the inner temperatures which negatively affects both internal thermal comfort and well-being. To deal with this situation, air-conditioning systems are applied to their facades to improve the internal thermal environment and the workers' thermal sensation. However, this increases energy consumption and negatively affects the aesthetic aspect and the architectural reading of the building.

In this regard, this study focuses on biomimetic architecture as an approach that can inspire climate-adapted architectural solutions for hot environment [4]. In order to reduce energy consumption of cooling, improve working conditions, promote sustainability and protecting the environment. To this end, it is necessary to create nature-inspired breathing envelopes and incorporate advanced technology to promote natural ventilation and indoor air quality in these public buildings, especially since the COVID-19 pandemic, thus improving energy efficiency.

2. MATERIALS AND METHODS

The current study aims to evaluate the indoor thermal environment in an administrative building recognized as a municipal building part of the municipal heritage of Batna during a hot period. The study design is divided in two phases, as shown in Figure 1:

• The first part used a post-occupancy evaluation approach that includes an objective investigation using in-situ experiments in the case study characterized by the collection and analysis of quantitative data obtained from

08 a.m. to 04 p.m. during the hottest day on July 25th, 2022.

• The second part is devoted to the presentation of the thermal rehabilitation strategy proposed for this building via modeling and numerical simulation procedures. First, the followed process of generating nature inspired adaptive envelope (using Top/Down technique) is presented, then the followed path to develop 3D modeling of this parametric design using the Rhino/Grasshopper software. Finally, energy simulation using the Ladybug and Honeybee plugins to evaluate its performance.

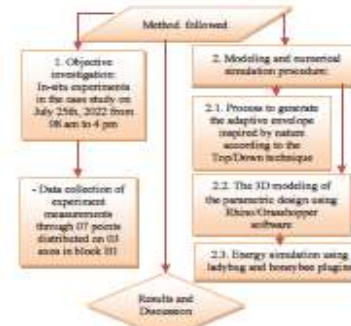


Figure 1. Summary of the method followed

2.1. In-Situ Experiments in the Case Study

2.1.1. Situation and Climatic Context

The city of Batna (Chief town of Wilaya) is located in the North-East of Algeria, at 35° 33' north, 6° 10' East. It is characterized by a semi-arid climate (zone C) apparent by long, extremely hot, very dry summers and very cold winters [2]. Table 1 shows the climate data of Batna City presented by the Ladybug plugin using weather files downloaded from the website EPW Map.

Table 1. Climatic data details of Batna city (Ladybug plugin)

Parameter designation	Minimum	Maximum
Average monthly temperature	5.6 °C in January	26.28 °C in July
Average monthly relative humidity	37.58% in June	75.55% in January
Average monthly direct radiation	173.30 kWh/m ² in February	335.94 kWh/m ² in July
Average monthly wind speed	2.04 m/s in January	4.61 m/s in March

2.1.2. Description of Building Case Study

The chosen case study is an administrative building oriented to the South, situated in an urban area named

Amirouche (Figure 2a), and it is one of the most common types of administrative buildings found in Batna. This building is composed of three juxtaposed blocks (Figure 2b), the central block (B1) which represents the reception hall and the counter area with two lateral blocks, one is reserved for the office of the chief of the building (B2) and the other for the sanitary area (B3) (Table 2). It operates 5 days a week from 08 a.m. to 04 p.m. The period from 12 p.m. to 01 p.m. is reserved for the lunch break therefore the building will be empty and closed (Table 3).



Figure 2. a) Administrative building, b) Plan of the administrative building

Table 2. Description of the case study

	Descriptions	U-Value in W m ⁻² K ⁻¹
Area of block B1	93.38 m ²	
Area of block B2	29.45 m ²	Total area = 152.28 m ²
Area of block B3	29.45 m ²	/
External wall	Thickness = 0.34 m	0.95
	(0.02 m plaster) + (0.1 m hollow brick) + (0.05 m air gap) + (0.15 m hollow brick) + (0.02 cement)	
Internal wall	Thickness = 0.14 m	3.10
	(0.02 m plaster) + (0.1 m hollow brick) + (0.02 m plaster)	
Floor	Paint color: beige	5.60
	A base with a height of 1.20 m is colored in grey paint and the rest of the wall is in white paint	
Color and type of floor	Only the ground floor	
	Made of 40-40 cm brown floor tile	

Roof	slab with hollow body roof	thickness = 0.16+0.04 m	4.13
Windows	Simple glazing		3.68
HVAC	No heating, No ventilation, No air conditioning, because it was turned off during the investigation (01 unit in the reception hall, 02 units in the counter area and 01 unit in B2)		
Artificial lighting	Panel ceiling lights 60*60 (20 units in B1 and 03 units in B2) and water-proof lamps (03 units in B3)		
Equipment	04 computers, 04 printers, 04 small display panels and a large display screen are located in B1		

Table 3. Occupancy and Schedules

Days	9 days per week (from Sunday to Thursday)
Schedules	The first tranche is from 08 a.m. to 12 p.m., and the second tranche is from 01 p.m. to 04 p.m.
Operating hours	From 12 p.m. to 01 p.m.
Lunch break	Surroundings 150-200 citizens/day + 06 persons personnel of administrative building Sex: male and female Clothing: Lightweight with bright colors Position: citizens in the reception Hall, personnel in the counter area and in B2
Occupants	

This building is located in a residential area with 48 984 inhabitants according to the population census of 2022. Consequently, a fairly high level of public frequentation permits the citizens to obtain their needed papers in addition, the presence of a large glazed surface with a higher percentage of non-openable windows (Table 4), and the absence of access to natural ventilation, especially in block "B1" (Figure 3). This led to the excessive use of air-conditioning throughout the exploitation of the building. As a result, there was a very pronounced electricity consumption in the summer.

Table 4. Facades' details

Block	South facade			North facade		
	percentage of plain	percentage of opening window	percentage of non-opening window	percentage of plain	percentage of opening window	percentage of non-opening window
B1	50.28%	4.19%	41.53%	52.46%	0.70%	46.84%
B2	70.67%	7.33%	22%	70.67%	7.33%	22%
B3	91.89%	2.70%	3.41%	70.67%	7.33%	22%



(a)



(b)



Figure 3. a) Windows in counter area, b) Windows in reception hall, c) Maximum opening of window

2.1.3. Data Collection of Experiment Measurements

The experimental measurements in the current study were recorded during 05 successive days between July 24th and 28th, 2022 (the hottest season) from different measurement points that are distributed in blocks B1, B2 and B3 in the building from 08 a.m. to 04 p.m. Physical parameters of thermal comfort in this article were taken from the reception hall and the counter area forming Block B1 because it represents the busiest space during July 25th, 2022 considered the hottest day of this period, it was characterized by an open sky with an average daily temperature of 29.21 °C and relative humidity of 30.34%. Data collection is done in 07 carefully selected measurement points that are distributed horizontally on the 03 axes.

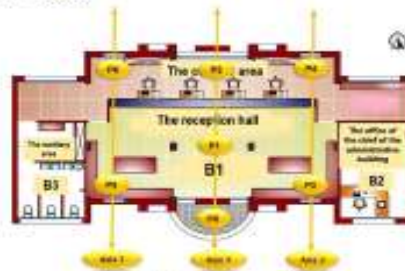


Figure 4. Position of measurement points

The first axis passes in through the middle of the block B1 and the other two axes are positioned on either side of the central axis as demonstrated in Figure 4. These measurements are taken at a height of 1.1 meters according to ASHRAE-55-2010 using the measuring instruments as illustrated in Figure 5 and their function and location as shown in Table 5.



Figure 5. Measuring instruments used

Table 5. Measuring instrument's function and position

N	Tool designation	Function (Measurement)	Position
(a)	Anemometer L.T. Lutron LM-8030	-Outdoor air temperature (°C) -Outdoor relative humidity (%) -Wind speed (m/s)	Extracurricular PO(outside)
(b)	Panel Display Thermo- hygrometer	-Indoor air temperature (°C) -Indoor relative humidity (%)	Reception hall: P3, P5 Counter area: P2, P4, P6
(c)	Indoor station delta CHM	-Indoor air temperature (°C) -Indoor relative humidity (%) -Air velocity (m/s)	Reception hall: P1

2.2. Modeling and Numerical Simulation Procedure

To maintain the required temperature for indoor thermal comfort and to ensure energy efficiency, we proposed to carry out a thermal rehabilitation of this building by creating an adaptive envelope inspired by the nature that is considered as solutions database, because living organisms have solved similar problems over 3.8 billion years. This process is carried out using a direct approach following the Top/Down technique based on the search for biological analogies to discover technical solutions to architectural problems.

Indeed, the survival mechanism observed in the world of bees is defined by different adaptation systems: physiological, morphological, and behavioral ones, offering great examples for mimicry to contribute to the optimization of the thermal performance of buildings, by reducing the energy required for cooling and improving natural ventilation [5]. In this regard, we tried to transform this biological fortune into functional architectural technical solutions.

2.2.1. Process to Generate a Bee-Inspired Adaptive Envelope

Our adaptive envelope will be generated as a complex device and its process will be developed in the following steps:

2.2.1.1. Inspiration from Physiological Adaptation

This phase is devoted to imitating the respiratory system of bees, in particular, the functioning mechanism of the stigmas "spiracles" which are 10 pairs orifices found on the skin of bees (3 pairs on the thorax and 7 pairs on the abdomen). They are characterized by a symmetrical distribution serving to control the gas exchange patterns: allowing the entry of O₂, the exit of CO₂, and limiting the loss of water [6], [7]. In bees, the air is inhaled via the abdominal spiracles (inlet) and exhaled via the thoracic spiracles (outlet) in a unidirectional airflow[8]. The abdominal spiracles are open during the inhalation allowing air to enter and the thoracic spiracles are open during exhalation permitting air to exit creating airflow in an opening/closing mechanism (Figure 6).



Figure 6. Bee spiracles

2.2.1.2. Inspiration from Morphological Adaptation

After determining the source of inspiration, we found a geometric shape for the spiracles; we kept the same context of bees' world. The hexagonal design of hives (bees) that are made of natural wax minimizes the amount of construction materials while maximizing the storage capacity per unit, in contrast to the other geometric shapes that leave unused space between cells and thus a waste of building materials (Figure 7) [9].

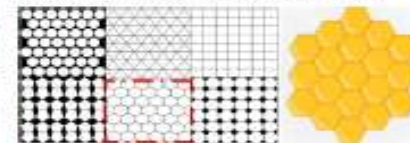


Figure 7. Hexagonal shape of beehives compared to other forms [9]

This step is devoted to giving more details to our envelope. This is done through return to vernacular Andalusian architecture (the Chacui house) notably that of the Oued Abdi valley (wilaya of Bama), defined by variety of building methods and employed environmentally friendly materials [10]. We focused our inspiration in the apertures characterized by specificities that were essentially linked to the microclimate of each Dochn. These apertures are placed at the top of the walls and serve much more for ventilation than for lighting and opening to the outside [11]. In this context, the apertures in the divided hexagonal form emit a splitting of the sun's rays with the maintenance of a significant and refined rate of luminosity, as well as good ventilation (Figure 8) [12].



Figure 8. Habitat apertures of the vernacular Auresian architecture of the Oued Abdi valley

2.2.1.3. Inspiration from Behavioral Adaptation

Bees show excellent thermoregulation strategies for their hives, especially the central brood zone, which must be maintained at an optimal average temperature of 35°C, while outside temperatures vary from 3,7°C to 30,7°C [13]. Consequently, they serve to create a ventilation mechanism to evacuate the hot and stale air outside the hive to be exchanged with fresh air from outside to avoid overheating, control humidity, ensure better air quality and reduce CO₂ concentration [14]. This is manifested in the following two strategies:

- The first strategy is the heat shield, which involves positioning the bees as a thermal screen to capture heat to protect their brood from excess heat and then flying to a cooler area of the hive to dissipate the heat absorbed or stored in their ventral side of the body (Figure 9) [15].



Figure 9. The heat shield strategy [15]

- The second strategy is evaporative cooling which was in response to a need for additional water to cool the hives and reduce the internal temperature of the brood nest and the nutrition of immature bees. Some worker bees spit out the water they have been carrying or just collected to spray it into the hive while they vent from above causing water evaporation and actively creating cool and moist air that circulates through the hive ensuring its cooling. Since bees instinctively recognize that fresh air is falling, they typically vomit water from the top under the hive cover (Figure 10) [9], [14], [15]. Lessons can be learned from bees' survival model,

specifically, their capacity to ensure internal thermal regulation, where each individual can respond to external and internal stimuli with an appropriate response in their immediate neighborhood, via a technique known as decentralized control. These methods can be used in the field of construction to create environmentally friendly and sustainable buildings [9].



Figure 10. Evaporative cooling strategy [15]

2.2.1.4. Functioning Mechanism (Intelligent Material)

To create a dynamic design in the form of an adaptive envelope, there is a growing interest in adopting advanced technology. This is manifested through the use of intelligent materials as autonomous sensors/actuators integrated into the building envelope, and characterized by their change in shape when they are affected by a stimulus such as a temperature to ensure envelope deformation. These materials can replace costly fixed hard components found in mechanical systems that use mechanical actuators that need upkeep and energy to function automatically [16]. In this regard, we used a thermo-sensitive intelligent material with shape change according to intrinsic properties that are called Shape Memory Alloy (SMA) in the "Nimrod" type composed of nickel-titanium (NiTi) in the form of prestressed wires. They allow an entropic and adaptive reaction to external stimuli such as air temperature or solar radiation, causing a modification of the wire lengths. This phenomenon does not require any computing device, but it is due to its elasticity that can perform millions of cycles without the need for activation by electric power or other energy sources [17]. This material is used in the field of architecture for the creation a flexible and efficient envelope at a low cost [18].

2.2.2. 3D Modeling of Parametric Design

It was suggested to design an adaptive envelope consisting of 14 outer hexagonal cells placed on the south facade and 5 cells on the north facade of block B1 along with 4 cells on the south facade and 1 cell on the north facade of blocks B2 and B3. Each unit occupies an area of 1.50 m² and each cell consists of six film panels in a hexagonal frame attached by elastic cords. Six tubular elements allow the panel to rotate. Each opposing panel is connected by an SMA wire which functions as an independent sensor/actuator inspired by the Airflow (ar) model generated by LIFT Architects in 2007 [19].

The integrated Rhinoceros/Grasshopper program was selected as parametric modeling software for this envelope (Figure 11), due to its inherent interface which allows parameterized manipulation of geometry and they provide a level of flexibility that is not achievable by traditional 3D tools [20]. For this purpose, our idea is developed as a complex system whose air passes through the following spaces:

- The Cells Applied to The South Facade (Layer 01): They are inspired by the operating system of the bees' abdominal spiracles (opening/closing), the hexagonal geometric shape of the bees' hives and the apertures of vernacular Auresian architecture (Chaoui house) of Oued Abdi valley. They are consisted of triangular films activated by SMA wires as autonomous sensors/actuators allowing the opening/closing of this external layer by entering the air inside (Air inlet).

When these cells subjected to direct solar radiation, the wires reach a higher temperature than the ambient temperature [21] with an activation temperature of 35-40 °C. This causes the wires contract and return to their original shape (austenitic phase) [22] causing the opening of the cells provoking air to enter. However, when the temperature drops below 20 °C [21], the wires of SMA actuators expand (martensitic phase) [19] and gainfully return the hexagonal cells to their closed position through their rigidity without using electrical energy.

- The Intermediate Space: is designed in the form of an air cavity of 1.00 m in width for block B1 and 0.60 m wide for blocks B2 and B3. This connecting buffer zone is inspired by two sources: one being the heat shield system generated by the bees to prevent heat transmission to the interior to protect the brood, and the other being the system of water spraying by the bees to ensure thermoregulation of the brood nest. This space is used to provide thermal insulation on its outer side, which is used to cool the air before its entrance to the inner space [23].

This is assured via a downdraft cooling system by spraying water droplets from its upper part, the lower part of which is equipped with a water collection and recovery tank subject to a closed circuit driven by an acceleration pump [24]. As a result, the dry air that enters is humidified and cooled when it reaches the indoor space [25].

- The Inner Aperture (Layer 02): is situated on the interior wall, having the same form as the south cells but with half of their area (1/4Sc). They are equipped with filters to prevent airborne particles and other airborne contaminants from entering the room [26]. This difference in cross-sectional area between the openings of the outer and inner layer causes an increase in air velocity through the Venturi effect and Bernoulli's principle (by increasing the inlet/outlet ratio) [27].

- The Interior Space: in which the various administrative activities take place. The air is drawn into the building due to pressure differences between indoors and outdoors, in which air moves from high pressure spaces to low-pressure spaces, such as in the process of inhalation and exhaling in most living organisms [4].

- The Cells Applied to The North Facade: were inspired in the same way as the south facade. They are opened automatically when the interior space is heated above the comfort temperature threshold (26 °C) to evacuate the warm stale air from the inside to the outside (Air-outlet) by providing cross ventilation. However, once the interior space cools beyond its lower temperature threshold (15 °C), the components are closed to maintain the appropriate and optimum temperature [19].

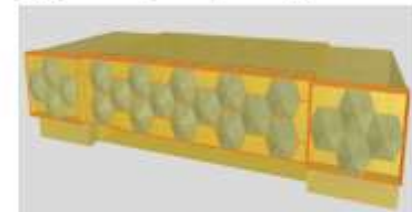


Figure 11. Bee-inspired adaptive envelope

2.2.3. Energy Simulation

The energy simulation was carried out using the Ladybug and Honeybee plugins with the integrated software Energy Plus following the recommendations for indoor thermal comfort presented by APRUE, where the indoor air temperature in summer must be between [24-27 °C] in addition to the application of cross-ventilation at 11 a.m. when the interior temperature exceeded the neutral temperature of 26 °C. The purpose of this simulation was to understand the interactions and geometric configurations of this envelope concerning solar radiation/outdoor air temperature and evaluate its performance and efficiency (Figure 12).

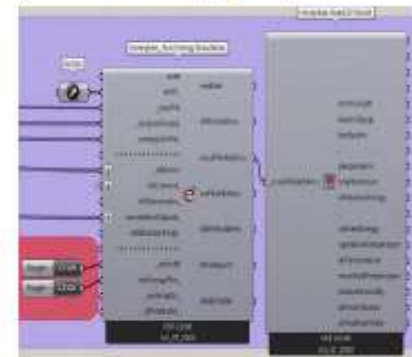


Figure 12. Run energy simulation (Honeybee plugin)

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. In-Situ Experiments Evaluation Results:

The results of the in-situ experiments during this day show that the air temperature profiles through the 3 axes present values outside the comfort range determined as (24.11 °C - 28.11 °C). These profiles are manifested by a progressive increase in temperature values since the beginning of the measurement (Figure 13). It was noted that the graphs representing the points P1, P3 and P5 located in the reception hall, indicate higher values, defined by a peak reaching 33.80 °C in P1 and P3, and 33.90 °C in P5 at 03p.m. The point P1 represents maximum values compared to the other points, characterized by an amplitude of 4.17 °C. On the other hand, the minimum values are recorded in the counter area with values reaching 29 °C recorded in P2 and P4, and 28.90 °C in P6 at 08 a.m. It is important to mention that a drop in temperature was noted when the building was out of service for the lunch break between 12 p.m. and 01 p.m.

Reading the graphs representing the relative humidity values through the 03 axes (Figure 14), the axis 01 represents very low relative humidity values compared to the other curves, when the P1 curve shows minimum values oscillating between 20.40% and 31.30% with an amplitude of 10.90%. In addition, the curves representing points P3 and P5 show minimum values which are outside the comfort zone that was determined between [35% - 65%], except for those recorded at 11a.m. and reached the value of 40% and 39% in P3 and P5 respectively. While the curves representing the points P2, P4 and P6 maintain the same path with almost similar values, the maximum value that reached 37% is recorded in P2 and 38% in P4 and P6 at 11 a.m.

The results of measurements carried out during this day showed that the values obtained for air temperature and relative humidity are outside the comfort zone and have an inverse correlation between these two parameters, so temperature increases are accompanied by drops in internal relative humidity [28] causing internal overheating that makes the space uncomfortable, thus influencing the users feeling in terms of well-being and thermal comfort.

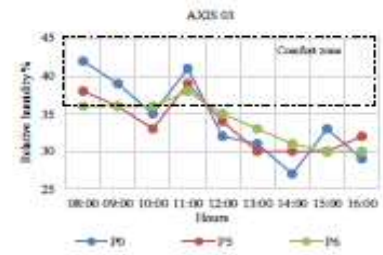
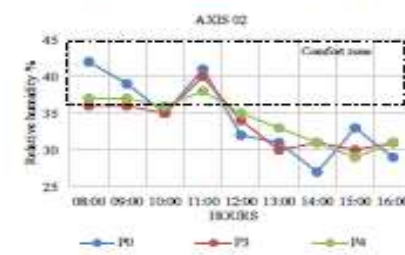
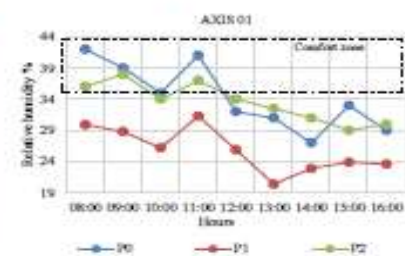
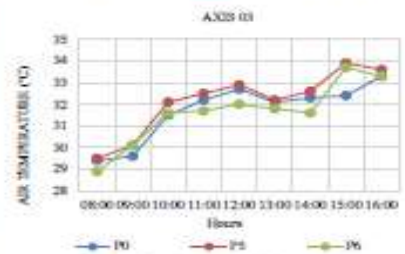
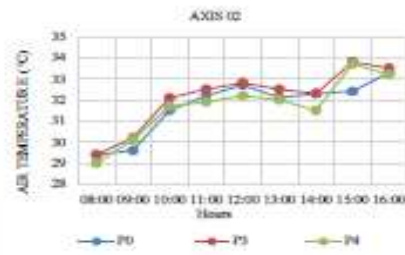
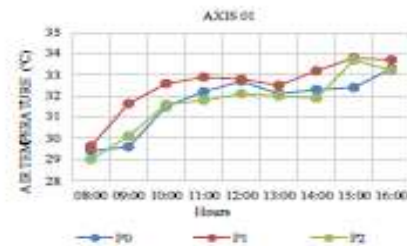


Figure 14. Results of measured relative humidity

This is due to several factors such as the type and very high ratio of exterior glazed surfaces which affect the incident solar radiation [29], the inertia of the building, the internal heat supply due to the use of artificial lighting and internal electrical appliances and another very important cause is the absence of access to ventilation due mainly to the impossibility of opening the windows of the south and north facades, which coincides with high public attendance. To face these problems, natural ventilation is recommended as a cooling resource to create a healthy natural environment that can achieve acceptable levels of thermal comfort [4], [30].

3.2. Energy Simulation Evaluation Results:

After analysis of in-situ investigation results, it was revealed that the point P1 presents critical values that are outside the comfort range. Therefore, a comparison was made between the values recorded in points P0 (outdoor measurement) and P1 and those obtained by the energy simulation, with the aim of evaluating the reliability of the applied envelope. In this regard, Figure 15a presents the three graphs indicating the variations in air temperature during this day.

It is shown that the curve representing the experimental values follows the same pattern as that of the exterior but with higher values ranging from 29.63 °C to 33.80 °C. However, these two curves are located outside of the comfort zone. This is due to internal heat gain caused by the absence of access to ventilation causing internal overheating throughout the measurement. Whereas the curve showing the simulated air temperature after the application of the adaptive envelope presents a spectacular decrease in temperature values characterized by variable values oscillating between 23.15 °C and 27.61 °C that are located in comfort range from 08 a.m. to 12 p.m. and at the same time they are much lower than those taken during in-situ experiment manifested by a maximum deviation reaching a maximum value of 7.59 °C at 10 a.m. and a minimum deviation of 1.63 °C at 04 p.m.

Regarding the relative humidity values during the same day illustrated by Figure 15b, it was found that the curve representing the values of the measurement of the real case follows the same pattern as that of the exterior, but with lower values oscillating between 20.40% and a maximum of 31, 30% that are outside the comfort range.

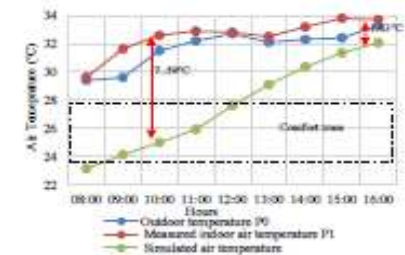


Figure 15. a) Results of variation of air temperature, b) Results of variation of relative humidity

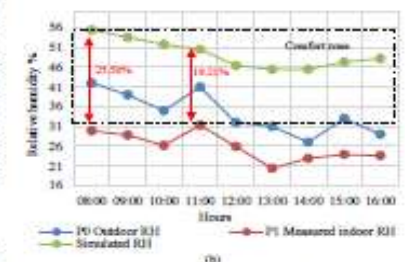


Figure 15. a) Results of variation of air temperature, b) Results of variation of relative humidity

However, the graph representing the results of the energy simulation is superior to those of the exterior and the experiment, where the values are within the comfort range during the entire period from 08 a.m. to 04 p.m. This curve is characterized by a minimum value of 45.43% at 1 p.m. and a maximum value of 53.40% at 08 a.m. The minimum difference was recorded between the real values of the in-situ investigation and those of the simulation reaching a value of 19.21% at 11 a.m., and other maximum reached a value of 25.50% at 08 a.m.

This can be explained by the fact that the relative humidity values increase accordingly to the temperature decrease [28] due to dropping water that absorbs heat from the incoming air flow and reduces the air temperature which lower energy consumption better than mechanical cooling systems. This corresponds to the idea of Jonshadeh, et al. (2017) [31] who reported that increasing air humidity improves the thermal comfort of occupants in dry climates where a breathable wall works by an inside-outside pressure gradient that allows air to slowly migrate through the walls from the highest ambient pressure to the lowest ambient pressure. This allows gradually exchanges of energy and excess water [4].

4. CONCLUSION

The present paper explored the evaluation of the thermal behavior of an administrative building located in the city of Batna, characterized by a semi-arid climate on the day of July 25th, 2022, at 08 a.m. to 4 p.m. time slot. This period is marked by high public use and a large glazed surface area with no access to natural ventilation. This study is carried out using two main methods:

- The first method is an *in-situ* investigation based on taking measurements of indoor air temperature and relative humidity at various points distributed around block B1, which represents the most frequented area. The main results are summarized as follows:

- An increase in indoor air temperature which becomes outside of the comfort zone when the building is in operation.

- As a result, inner overheating makes the space uncomfortable, which has a negative impact on the conduct of administrative activity and causes over use of mechanical air-conditioning leading to very high electricity consumption.

- The second method is devoted to assessing the thermal rehabilitation provided by an adaptive thermo sensitive envelope inspired by the various survival systems found in the world of bees. This system is developed using the Top/Down technique, characterized by the integration of SMA shape memory alloy (NTI) coating as autonomous sensors/actuators responsible for opening and closing. It is applied to the North and South facades. The latter is designed in the form of two layers separated by an air cavity featuring a downdraft water droplet spraying system to cool the air before it enters the building.

This proposed adaptive envelope was modeled using Rhinoceros/Grasshopper algorithmic software and then subjected to an energy simulation using Ladybug and Honeybee plugins with their integrated software, in particular Energy Plus. The results obtained after integration of the system show:

- A significant improvement in thermal comfort conditions, identified by a spectacular reduction in indoor air temperature compared to those measured values that belongs to the comfort range during the time slot from 08 a.m. to 12 p.m. During the entire occupancy period, the relative humidity values are within the comfort range.

- Consequently, an improvement of the inner thermal environment by expelling excess heat to the outside through the reversal of the air by cross-ventilation provides a productive working environment and leads to minimizing the use of mechanical cooling means, therefore a reduction in energy consumption and minimize the ecological footprint of the building on the environment.

NOMENCLATURES

1. Acronyms

SMA	Shape memory alloys
DA	Algerian Dinars
DA/year	Algerian dinar per year

COVID-19	Coronavirus disease 2019
3D	Three dimensional
EPW	Energy Plus Weather File
B1, B2, B3	Block 1, block 2 and block 3
P0-P6	Measuring points
O ₂	Oxygen
CO ₂	Carbon dioxide
NTI	Nitinol
1/4 Sc	Half of the surface of the southern cells
APRUE	The National Agency for the Promotion and Rationalization of Energy Use
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

2. Symbols / Parameters

*C	Degree Celsius
a.m.	Ante Meridiam or Before Noon
p.m.	Post Meridiam or Afternoon
%	Percentage
KWh/m ²	Kilowatt hour per square meter
m/s	Meter per second
m	Meter

REFERENCES

- [1] K. Dali, "APRUE Eco-Construction and Energy Efficiency in Algeria", Ministry of Energy of Algeria, pp. 1-35, Berlin, Germany, July 2017.
- [2] A. Denka, S. M. El Hassar, S. Baradiy, "Guide for Eco-Energy Construction in Algeria", German International Cooperation (GLZ) GmbH, pp. 1-290, December 2014.
- [3] CES-MED, "Action Plan for Sustainable Energy (PAED) Municipality of BATNA", Cleaner Energy Saving Mediterranean Cities, pp. 1-124, Batna, Algeria, November 2015.
- [4] M.M. Elghawaby, "Towards Thermal Comfort Thanks to Building Envelope Concepts, Inspired by Nature: The Breathing Wall as a Biomimetic Example Suitable for Buildings in Hot Areas", Doctoral Thesis, Aix-Marseille University, Doctoral School 355, Spaces, Cultures and Societies, pp. 1-289, Marseille, France, June 2013.
- [5] N.N. El Din, A. Abdon, I.A. El Gawaad, "Biomimetic Potentials for Building Envelope Adaptation in Egypt", Procedia Environmental Sciences, Vol. 34, pp. 375-386, 2016.
- [6] W. Richards, R.G. Davies, "The Respiratory System", General Textbook of Entomology, pp. 210-233, 1977.
- [7] E.C. Heinrich, M.J. Mc Henry, T.J. Bradley, "Coordinated Ventilation and Spiracle Activity Produce Unidirectional Airflow in the Hissing Cockroach, *Geoplatysia portoricensis*", The Journal of Experimental Biology, Vol. 216, No. 23, pp. 4473-4482, August 2013.
- [8] L. Bailey, "The Respiratory Currents in the Tracheal System of the Adult Honey-Bee", Journal of Experimental Biology, Vol. 31, No. 4, pp. 589-593, January 1954.

- [9] R.C. Mathis, D.R. Tarry, "70 Million Years of Building Thermal Envelope Experience: Building Science Lessons from the Honey Bee", Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, pp. 1-9, 2007.
- [10] R. Boudjadja, K. Benhalilou, "Conceptual Modeling of Environmental Devices of a Vernacular House with a Patio", International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), Issue 51, Vol. 14, No. 2, pp. 267-274, June 2022.
- [11] S. Adjali, "Traditional Habitat in the Aures: the Case of the Oued Abdi Valley", Directory of North Africa, Vol. Tome XXV, pp. 272-280, 1986.
- [12] F. Tiffant, "Analytical Study of Traditional Algerian Housing (Case of Maza)", Master Thesis in Architecture, Larbi Tebessi- Tebessa University, Department of Architecture, pp. 1-98, Tebessa, Algeria, 2016.
- [13] H. Humen, S.W. Nicolson, V. Distenham, "Do Honeybees, *Apis Mellifera* Scutellata, Regulate Humidity in their Nest?", Naturwissenschaften, Vol. 93, No. 8, pp. 397-401, May 2006.
- [14] H. Jarimi, E. Tapia-Erito, S. Riff, "A Review on Thermoregulation Techniques in Honey Bee" (*Apis Mellifera*) Beehive Microclimate and its Similarities to the Heating and Cooling Management in Buildings", Future Cities and Environment, Vol. 6, No. 1, pp. 1-8, 2020.
- [15] J. Bernabe Basto, C. Martin Gomez, A. Zuanes Ros, et al., "Improvement of a Peltier HVAC System Integrated into Building Envelopes Implementing Beehive Strategies: A Theory-Based Approach", Dyna, Vol. 91, No. 5, pp. 507-511, January 2016.
- [16] E. Vazquez, "Shape-Changing Architectural Systems: A Bottom-up and Top-Down Approach for Developing Responsive Building Skins", Shape-Changing Architectural Systems, pp. 347-354, 2021.
- [17] M. Decker, A. Zuryyid, "Designing Resilient Buildings with Emergent Materials", The International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Vol. 2, pp. 179-184, September 2014.
- [18] H. Yi, D. Kim, Y. Kim, et al., "3D-Printed Attachable Kinetic Shading Device with Alternate Actuation: Use of Shape-Memory Alloy (SMA) for Climate-Adaptive Responsive Architecture", Automation in Construction, Vol. 114, pp. 1-20, February 2020.
- [19] A. Pnyas, "Air Flower, LIFTArchitects", <http://www.liftarchitects.com/air-flower>, 2007.
- [20] D. Farid, R. Boukrouma, A. Naidja, S.E. Chetah, "Design and Parameterization of a Kinetic Prototype That Interacts with Climatic Variables Using Numerical Methods", International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), Issue 53, Vol. 14, No. 4, pp. 136-142, December 2022.
- [21] M. Formisanti, S. Lenzi, "An Innovative Building Envelope (Kinetic Facade) with Shape Memory Alloys Used as Actuators and Sensors", Automation in Construction, Vol. 85, pp. 220-231, January 2018.
- [22] F. Fiorito, et al., "Shape Morphing Solar Shading: A Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, pp. 863-884, March 2016.
- [23] A. Abu Khadra, N. Chalfoun, "Development of an Integrated Passive Cooling Facade Technology for Office Buildings in Hot Arid Regions", Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 190, pp. 521-533, 2014.
- [24] A. Abdullah, I. Bin Said, D.R. Ossen, "A Sustainable Bio-Inspired Cooling Unit for Hot Arid Regions: Integrated Evaporative Cooling System in Wind Tower", Applied Thermal Engineering, Vol. 161, pp. 2-12, August 2019.
- [25] L. Bademah, Y. Nachman Farchi, U. Kasack, "Solutions from Nature for Building Envelope Thermoregulation", The Fifth Design and Nature Conf.: Comparing Design and Nature with Science and Engineering Carp. A and Brebbia CA. Ed. (Southampton: WITpress), Vol. 138, pp. 251-262, June 2010.
- [26] N. Kalantar, A. Borhani, "Breathable Walls - Computational Thinking in Early Design Education", The 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), pp. 377-387, May 2017.
- [27] P.N. Farmani, "Inspiration by Nature: Biomimetic Research Informs Adaptable Building Skin System for Natural Ventilation and Daylight in Hot Dry Climate (Vand, Iran)", Master Thesis, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, pp. 1-247, California, American United States, January 2014.
- [28] K. Fekdou, Y. Bouchalam, "The Influence of the Ventilated Atrium of Shopping Centers on the Thermo-Aerobic Behavior, Case of the new Ali Mendjli Town in Constantine", The 5th International Conference on Renewable Energy (CIER 2017) Proceeding of Engineering and Technology, PET, Vol. 30, pp. 76-81, Sousse, Tunisia, December 2017.
- [29] N. Nait, "Energy Rehabilitation in Existing Collective Housing Case of Constantine's Semi-Arid Climate", Master Thesis, Moutour University of Constantine, Department of Architecture and Urban planning, pp. 1-270, Constantine, Algeria, 2011.
- [30] M. Elghawaby, "Biomimicry: A New Approach to Enhance the Efficiency of Natural Ventilation Systems in Hot Climate", International Seminar Architectonics Network, Architecture and Research, pp. 1-10, Barcelona, Spain, June 2010.
- [31] F. Jomehadah, et al., "A Review on Windcatcher for Passive Cooling and Natural Ventilation in Buildings, Part 1: Indoor Air Quality and Thermal Comfort Assessment", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 70, pp. 736-756, April 2017.

BIOGRAPHIES



Name: Khaoula
Surname: Feldoum
Birthday: 04.12.1987
Birthplace: Batna, Algeria
Bachelor: Architect, Department of Architecture, Institute of Architecture and Urbanism, Batna, Algeria, 2010

Master: Bioclimatic Architecture and Environment, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Constantine 3, Salah Bouhssider, Constantine, Algeria, 2017

Doctorate: Student, Bioclimatic Architecture and Environment, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Constantine 3, Salah Bouhssider, Constantine, Algeria, Since 2017

Research Interests: Bioclimatic Architecture, Biomimicry Architecture, Passive Cooling and Urban Planning

Scientific Publications: 2 Papers

Scientific Memberships: Laboratory of Bioclimatic Architecture and Environment (ABE)



Name: Yasmine
Surname: Bouchalam
Birthday: 15.07.1960
Birthplace: Constantine, Algeria
Bachelor: Architect, Department of Architecture, University of Constantine, Constantine, Algeria, 1984

Master: Architecture and Building Sciences, Department of Architecture, University of Glasgow, Glasgow, UK, 1987

Doctorate: Bioclimatic Architecture and Environment, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Earth Sciences, University of Constantine, Constantine, Algeria, 2004

The Last Scientific Position: Prof., Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Constantine, Constantine, Algeria, Since 2011

Research Interests: Energy Efficiency, Bioclimatic Architecture, Passive Cooling, and Urban Microclimate

Scientific Publications: 41 Papers, 9 Projects, 17 Theses



Name: Nadia
Surname: Feldoum
Birthday: 07.09.1986
Birthplace: Batna, Algeria
Bachelor: Architect, Department of Architecture, Institute of Architecture and Urbanism, Batna, Algeria, 2009

Master: Human Settlement in Arid Environments, Department of Architecture, Faculty of Science and Technology, University of Mohamed Khider, Biskra, Algeria, 2015

Doctorate: Student, Human Settlement in Arid Environments, Department of Architecture, Faculty of Science and Technology, University of Mohamed Khider, Biskra, Algeria, Since 2015

The Last Scientific Position: Lecturer, Department of Architecture, Faculty of Technology, University of 8 May 1945, Guelma, Algeria, Since 2019

Research Interests: Cartography, GIS, Remote Sensing, Urban Planning, Urban Sustainability and Urban Microclimate

Scientific Publications: 2 Papers

LEXIQUE

LEXIQUE

Annexe administrative, cette nomination désigne, en Algérie, un type d'immeuble sous forme d'une structure secondaire rattachée à un bâtiment principal administratif et public à la fois. Elle est dotée pour effectuer des activités complémentaires, en tant qu'extension de la mairie principale qui fait partie de l'ensemble du patrimoine communal de la mairie, permettant la décentralisation des services publics, rendant les démarches administratives plus accessibles aux habitants en agissant comme un bureau administratif local (Municipalité de Batna, 2023).

Bâtiment administratif est un édifice qui abrite des lieux de travail à vocation administrative d'un gouvernement ou d'une organisation, accessibles au public pour les procédures administratives habituelles qui ne requièrent pas forcément de rendez-vous pour accéder à certaines de leurs fonctions. Cependant, il existe des bâtiments qui peuvent combiner les fonctions administratives et publiques. Par exemple, ceux des mairies qui offrent aux citoyens la possibilité d'obtenir des documents d'état civil et de gérer les services publics locaux.

Bâtiment public : désigne tous les établissements recevant du public (ERP), que ce soit des personnes, utilisateurs et usagers. Ces immeubles sont gérés directement ou indirectement par une entité publique telle que les collectivités locales, permettant de faciliter les interactions avec le public et servant à effectuer des activités du secteur tertiaire. Parmi ces bâtiments la mairie, l'école, ou le lieu de culte (Découvrir le Français, 2022; Direction de l'information légale et administrative, 2022).

Ergonomie : désigne la science qui consiste à adapter les conditions de travail aux capacités des travailleurs ou d'équipes pour améliorer leur confort, santé, sécurité, bien-être et leur efficacité (Manutan, 2023; CCHST, 2024).

Matériaux biosourcés : ce sont des matériaux de construction élaborés à partir de matières d'origine biologique, végétale ou animale, issues de ressources renouvelables. Ces matériaux incluent le bois, la paille, le chanvre, le liège, le lin, la laine de mouton. Ils sont utilisés dans le domaine de la construction et de l'architecture en raison de leurs caractéristiques écologiques et durables, ce qui contribue à diminuer l'empreinte carbone des constructions (Brayer, 2019).

Secteur tertiaire représente la majorité du parc bâti dans le domaine du bâtiment, principalement consacré à des services à usage professionnel, qu'ils soient publics ou privés. Il englobe un large éventail d'activités, notamment le commerce, les bureaux, l'enseignement, l'administration, la santé, l'éducation, le sport, les loisirs, les hôtels, les cafétérias, les restaurants et les banques (Khadraoui, 2019).

Syndrome des bâtiments malsains (SMB) est lié à des problèmes environnementaux associés à l'édifice, comme une mauvaise ventilation, des polluants internes ou un excès d'humidité. Il se traduit par une série de symptômes comme des maux de tête, des irritations aux yeux, de la fatigue ou du mal-être général qui affectent les participants. Ces symptômes, qui affectent la santé physique et psychologique des employés, sont fortement associés au temps consacré dans un édifice précis, en particulier les bâtiments de bureaux. Cependant, ils s'estompent habituellement lorsque les personnes partent des lieux (Barthe, 2010; Ramram, 2020).



Nom et Prénom : FEKKOUS Khaoula

Titre : Vers une enveloppe adaptative inspirée de la nature pour un rafraîchissement passif des bâtiments publics en zones semi-arides.
Thèse en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Bioclimatique

RESUME

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie, notamment en été. La moitié de la consommation d'énergie est liée à la climatisation. Cette consommation est fortement liée à l'enveloppe architecturale, car elle est souvent mal adaptée aux particularités climatiques de la zone. Par conséquent, cette recherche vise à évaluer l'ambiance thermique intérieure dans un bâtiment public existant dans la ville de Batna (climat semi-aride). Pour cela, deux méthodes sont utilisées :

L'une est une investigation in situ s'inscrivant dans le cadre d'une évaluation post-occupation effectuée à travers 3 jours successifs du 24 au 26 juillet 2022 (mois le plus chaud) de 08h00 à 16h00, selon deux types d'enquêtes, d'une part, une enquête quantitative et objective, basée sur une campagne de mesures des paramètres physiques liés au confort thermique à travers les trois blocs composant le bâtiment. Et d'autre part, une enquête qualitative et subjective effectuée à l'aide des questionnaires afin d'évaluer la perception du bien-être et la satisfaction des occupants. Les résultats de l'investigation in situ ont indiqué une surchauffe interne qui rend l'espace inconfortable et que les usagers sont insatisfaits.

L'autre est une simulation numérique énergétique, consacrée à examiner le comportement thermique du cas d'étude via les plugins Ladybug & Honeybee, durant la journée du 25 juillet, de 08h00 à 16h00. Selon deux scénarios différents : l'un est la pré-réhabilitation thermique du cas d'étude dans son état réel, et l'autre est la post-réhabilitation thermique après application de l'enveloppe adaptative inspirée de différentes techniques d'adaptation observées dans le monde des abeilles. Cette enveloppe a été appliquée sur les façades sud et nord pour favoriser la ventilation transversale et améliorer le refroidissement estival. Sur la façade sud, nous avons appliqué une enveloppe complexe, composée de deux couches séparées par une cavité d'air comprenant un système de refroidissement par évaporation à courant descendant pour rafraîchir l'air avant qu'il n'entre dans le bâtiment. De plus, l'ouverture et la fermeture des cellules externes d'enveloppe sont garanties par l'emploi d'un matériau intelligent (alliage à mémoire de forme, ou SMA) comme capteur et actionneur qui s'adapte de manière autonome aux stimuli externes tout en remplaçant les éléments durs des systèmes de climatisation mécanique énergivore en énergie électrique.

Les résultats obtenus montrent une amélioration de l'ambiance thermique interne, caractérisée par une réduction de la surchauffe interne avec une baisse de température atteignant une valeur maximale de 7,59 °C. Ces résultats favorisent l'efficacité énergétique et réduisent l'impact du bâtiment sur l'environnement.

Mots clés : Enveloppe adaptative, Biomimétisme, Abeille, Alliage à mémoire de forme (SMA), Ventilation transversale, Bâtiment public, Climat semi-aride.

Directeur de thèse : Yasmina Bouchahm-Université Constantine 3

Année Universitaire : 2024-2025