

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 3

FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE



N° d'ordre.....

Série.....

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de MAGISTER
OPTION : ARCHITECTURE CLIMATIQUE ET ENVIRONNEMENT

THEME

**Pratique du biomimétisme dans l'architecture bioclimatique :
Essai sur la performance énergétique des enveloppes
architecturales autonomes responsives dans un climat aride**

Présenté par : **Hadbaoui Hicham**

Sous la direction de : **Pr. BOURBIA Fatiha**

Jury d'examen :

Président : BOUCHAHM Yasmina	Professeur	Université Constantine 3
Examineur : BENCHARIF Meriama	Docteur	Université Constantine 3
Examineur : KABOUCHE Nabil	Docteur	Université de Batna
Rapporteur : BOURBIA Fatiha	Professeur	Université Constantine 3

Soutenu le :28/02/2018

Remerciements

Je tiens à remercier, mon encadreur Pr. Fatiha BOURBIA directrice du Laboratoire (A.B.E) Architecture Bioclimatique et Environnement, d'avoir méticuleusement dirigé cette recherche, ses conseils précieux, sa disponibilité, sa perspicacité,..., son aide et sa générosité.

Je tiens aussi à remercier Nadia NAIT ainsi que Dr. Nassira BENHASSINE TOUAM pour avoir gravé leurs traces brillantes dans cette recherche.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous mes enseignants de la Post-Graduation 'Architecture Bioclimatique et Environnement' de la promotion 2014/2016.

Mes vifs remerciements vont au Pr. Shady ATTIA de l'université de Liège (Belgique) pour m'avoir facilité l'accès à la formation Summer School « *Adaptive façades* », tenue à l'université de Hambourg (Allemagne).

Je remercie également mes instructrices ; Erin ROVALO, Jamie DWYER, et Robyn KLEIN, pour la formation et les moments partagés lors du workshop *Biomimicry for the Built Environment Inspired by Nature*, tenu à San Francisco.

Je remercie chaleureusement mes amis Cherif BENBACHA et Mohammed LAMINE ainsi que tous mes camarades de la PG 'A.B.E' 2014-2016.

Sans oublier aussi ma famille qui m'a soutenu ; un grand merci à mes parents qui ont toujours cru en mes capacités, à ma tante maternelle tellement proche et si généreuse, à ma femme pour ses sacrifices, sa compréhension et sa noblesse.

Résumé

Le rôle majeur de l'enveloppe du bâtiment est de protéger son usager du climat environnant. Celle-ci n'est pas seulement un abri mais aussi un composant actif dans le système du bâtiment. Elle est également définie comme filtre environnemental. Le développement de la technologie du bâtiment, la conception des bâtiments deviennent une tâche de plus en plus complexe. La demande croissante en énergie exige une performance environnementale qui induit une efficacité énergétique dans le bâtiment. Les nouvelles technologies adaptées à l'architecture lui permettent une reconfiguration vis-à-vis de son environnement. La nouvelle approche de conception intégrant la conception paramétrique ainsi que le biomimétisme s'expriment à travers le comportement des bâtiments en fonction de son environnement. En général, tous les matériaux changent en fonction de la température ambiante et de la teneur en eau environnante. Ce changement est dépendant des propriétés physico-chimiques du matériau. La présente recherche vise à établir les possibilités de matériaux adaptatifs utilisés comme enveloppes de bâtiment qui pourraient répondre aux problèmes de surchauffe et de refroidissement sans pour autant augmenter l'énergie consommée. Ce phénomène est inspiré des capitules qui s'ouvrent et se ferment pour s'acclimater aux conditions environnementales en fonction de leurs besoins et au moyen du comportement thermonastique intégré de leurs tissu (biomimétisme en architecture). L'intégration de la formule de Timoshenko dans la modélisation paramétrique (Grasshopper), a permis de calculer le rayon de courbure d'une bande bimétallique. Les résultats obtenus à travers cette méthode ont révélé que l'approche de conception biomimétique est d'un grand soutien à la conception durable. Elle prouve également que la conception biomimétique contribue aux possibilités de réduire la consommation d'énergie par l'application du comportement thermique dans le matériau de bande bimétallique comme solutions d'enveloppes adaptatives autonomes.

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Résumé

Table des matières I

Liste des figures V

Liste des tableaux XII

Introduction générale

Introduction 1

• Problématique 2

• Hypothèses 3

• Méthodes et outils 3

• Structure du mémoire 5

Chapitre I Le Biomimétisme

Introduction..... 6

I.1. Comprendre le biomimétisme 7

I.1.1. Définition du terme biomimétisme 7

I.1.2. Aperçu historique sur le biomimétisme 8

I.2. Méthodologie du biomimétisme 9

I.2.1. Eléments essentiels du biomimétisme 10

I.2.1.1. Ethos 10

I.2.1.2. (Re) connecter 10

I.2.1.3. Emuler 11

I.2.2. Principes de la vie 11

I.2.3. Pensée biomimétique 12

I.2.3.1. Problématisation (Scoping) 12

I.2.3.2. Découvrir (Discovering) 13

I.2.3.3. Création (Creating) 14

I.2.3.4. Evaluation (Evaluating) 14

I.2.4. Processus du biomimétisme 15

I.2.4.1. Du défi à la biologie (challenge to biology) 15

I.2.4.2. De la biologie au design (*biology to design*) 16

I.3. Biome 17

I.3.1.	Genie du biome.....	19
I.3.2.	Référencier un biome.....	19
I.3.3.	Lecture du génie du biome	20
I.3.3.1.	Phase de problématisation	20
I.3.3.2.	Phase de découverte.....	23
I.3.3.3.	Phase de création	28
I.4.	Exemples de biomimétisme	29
	Conclusion	31

Chapitre II

Le Biomimétisme dans l'architecture

	Introduction:	32
II.1.	Pratique du biomimétisme dans l'architecture.....	33
II.1.1.	Framework pour comprendre l'application du biomimétisme	33
II.1.1.1.	Niveau 1 : l'organisme (Organism level).....	35
II.1.1.2.	Niveau 2 : le comportement (Behaviour level)	36
II.1.1.3.	Niveau 3 : l'écosystème (ecosystem level)	36
II.1.2.	Méthodologie de l'enveloppe vivante	37
II.1.2.1.	Modèle d'exploration de la nature :	39
II.1.2.2.	Générer le concept de design.....	40
II.1.2.3.	Application Méthodologique de l'enveloppe vivante.....	43
II.2.	Exemples de biomimétisme dans l'architecture :	48
II.2.1.	Projet Eastgate Building	48
II.2.2.	Council House 2 (CH2)	51
	Conclusion :	55

Chapitre III

Aperçu sur les enveloppes adaptatives

	Introduction.....	56
III.1.	Évolution de l'enveloppe du bâtiment	56
III.2.	Enveloppes adaptatives	60
III.3.	Mécanismes des enveloppes adaptatives	63
III.3.1.	Enveloppes adaptatives-niveau macro.....	63

III.3.2. Enveloppes adaptatives-niveau micro	64
III.4. Exemples des enveloppes adaptatives	65
III.4.1. Enveloppes adaptatives contrôlées	65
III.4.2. Enveloppes adaptatives autonomes	67
III.4.3. Enveloppes autonomes inspirées des structures vivantes.....	67
III.4.3.2. Enveloppes autonomes basées sur le comportement des matériaux ...	77
Conclusion	84

Chapitre IV

Conception d'une enveloppe adaptative autonome

Introduction.....	85
IV.1. Aperçu sur la ville de Bou Saada	85
IV.1.1. Climat de la ville de Bou Saada.....	86
IV.1.1.1. Température	87
IV.1.1.2. Humidité relative	87
IV.1.1.3. Vents dominants	87
IV.1.1.4. Précipitations	88
IV.1.1.5. Ensoleillement	88
IV.1.2. Analyse bioclimatique de la ville de Bou Saada	90
IV.2. Système de protection solaire adaptatif.....	91
IV.2.1. Thermonastie	92
IV.2.2. Bandes bimétalliques	92
IV.2.2.1. Formule de Timoshenko	93
IV.2.2.2. Calcul de la température de la bande bimétallique(T)	95
IV.2.2.3. Définition de la température de réaction de la bande bimétallique(T_0).....	95
IV.3. Présentation du logiciel	98
IV.4. Définition paramétrique du comportement de la bande bi matérielle	99
IV.4.1. Algorithme du bilan thermique de la bande bi matérielle	99
IV.4.2. Algorithme de la formule de Timoshenko.....	101
IV.4.3. Définition géométrique de la bande bi matérielle	102
IV.5. Modélisation du système de protection solaire adaptatif autonome.....	103
Conclusion	105

Chapitre V
Simulation, résultats et interprétation

Introduction.....	106
V.1. Consommation énergétique en Algérie.....	107
V.2. Modélisation du Box expérimental (BE)	109
V.2.1. Définition paramétrique du BE.....	109
V.3. Traitement des données climatiques	111
V.3.1. Extraction dynamique des données climatiques	112
V.3.2. Calcul du rayonnement solaire reçu par les façades du Box	112
V.4. Simulation du comportement thermique du (BE)	114
V.4.1. Présentation des plugins de simulation.....	114
V.4.2. Configuration des conditions internes	115
V.4.3. Algorithme de simulation Dynamique	116
V.5. Résultats de simulation	117
V.5.1. Résultats de simulation-période hivernale.....	118
V.5.2. Résultats de simulation-période estivale	122
Conclusion :.....	127
Conclusion générale et recommandations.....	128
Bibliographie.....	132
Annexes.....	139
Abstract	
الملخص	

Liste des figures:

Chapitre I

Fig.I.1 : Approche du Biomimétisme.....	7
Fig.I.2 : Eléments essentiels du biomimétisme.....	10
Fig.I.3 : principes de la vie.....	11
Fig.I.4 : pensée biomimétique.....	12
Fig.I.5 : pensée biomimétique «problématisation ».....	13
Fig.I.6 : pensée biomimétique « Découvrir ».....	13
Fig.I.7 : pensée biomimétique «création ».....	14
Fig.I.8 : pensée biomimétique «évaluation ».....	15
Fig.I.9 : Du défi à la biologie.....	16
Fig.I.10 : De la biologie au design.....	16
Fig.I.11 : Carte de classifications des biomes terrestres dans le monde.....	18
Fig.I.12 : Interfaces des outils de référence online (a) Ecology Pocketguide.....	19
Fig.I.13 : Situation de l'espace public à concevoir.....	20
Fig.I.14 : Modèle pour lecture du génie du biome.....	20
Fig.I.15 : Référencement de « Purisima Creek Redwood Forest ».....	21
Fig.I.16 : Taxonomie des principes de la vie «avec le choix du principe qui correspond à notre fonction ».....	22
Fig.I.17 : Présentation du site de référence (Purisima Redwood Forest) par le naturaliste John Muir Laws, pour permettre au groupe de designer d'explorer le biome.....	23
Fig.I.18 : Lecture du génie du (Coast Redwood), (a) zone d'ombre, (b) zone éclairées, (c)schématisation du phénomène.....	25
Fig.I.19 : Définition de la fonction à l'aide de « Biomimicry taxonomy ».....	26
Fig.II.20 : Classifications des informations dans le Modèle de lecture du génie du biome.....	27
Fig.I.21 : (a) présentation de la phase de création (b) vue sur le Market Street.....	28
Fig.I.22 : Nuisance sonore provoquée par chaque partie du train, le pantographe vient en première place après vient la forme du corps du train.....	29
Fig.I.23 : (a) JR500 Bullet Train, (b) le martin-Pêcheur , (c) le pantographe reconçu source:, (d) la plume de hibou source.....	30

Chapitre II

Fig.II.1: (a)The TWA terminal at John F Kennedy Airport New York city (b) the Johnson Wax building Racine city, Wisconsin USA.....	32
Fig.II.2 : « Fog-catcher »de Matthew Parkes pour le Centre hydrologique de l'Université de Namibie	35
Fig.II.3 : Castor nord-américain et son barrage caractéristique.....	36
Fig.II.4: Project Lloyd Crossing, Portland, Oregon USA.....	37
Fig.II.5 : Charte de méthodologie de l'enveloppe vivante	38
Fig.II.6 : Quatre niveaux hiérarchiques représentant les différentes entités et leur connexions .	40
Fig.II. 7 Identification des <i>pinnacles</i> en En naviguant à travers le modèle d'exploration, un chemin de fonctions, processus, facteurs et les pinacles se distingue par le zonage.....	41
Fig.II.8 : Analyse des <i>pinnacles</i>	41
Fig.II.9 : Matrice analyse des <i>pinnacles</i>	42
Fig.II.10 : Matrice des chemins de design	42
Fig.II.11 : Modèle d'exploration de la régulation de l'air.....	43
Fig.II.12 : Extraction des pinacles pertinents.....	44
Fig.II.13: (a) termitière,(b) le terrier du chien de prairie(c) trachée et poumon humain(d)valves du cœur	44
Fig.II.14: Matrice d'analyse des pinnacles de la régulation de l'air	44
Fig.II.15: Matrice des chemins de design de la régulation de l'air	45
Fig.II.16: Esquisse montrant le principe de l'échange d'air à travers l'enveloppe vivante.....	46
Fig.II.17: (a) Illustration tridimensionnelle du fonctionnement du système, (b) Membrane perméable avec valves intégrés faite en silicone gel	47
Fig.II.18: Différentes vue du bâtiment Eastgate Building à Harare	48
Fig.II.19: A gauche : illustration du fonctionnement des termitières, à droite une présentation graphique des principes de conception tirés des termitières.....	49
Fig.II.20: Détail de fonctionnement de système de rafraichissement passif d'Eastgate Building	50
Fig.II.21: Façade extérieure d'Eastgate Building avec les auvents massifs	51
Fig.II.22: Vue sur la façade ouest du bâtiment CH2 avec les volets automatiques en bois	52

Fig.II.23: Schéma de fonctionnement des systèmes de rafraîchissement et de renouvellement de l'air et vue intérieure des bureaux du bâtiment CH253

Fig.II.24: Système de rafraîchissement «tours de douche » du bâtiment CH2.....53

Fig.II.25: Façade Nord du bâtiment CH2 où du béton massive est utilisé54

Chapitre III

Fig.III.1 : Ghardaïa, vallée du M'zab, au sud algérien : tissu compact, toitures plates, constructions massives avec petites ouvertures vers l'extérieur et couleurs claire qui est celle de la chaux utilisé communément pour les revêtements des murs et les Terrace57

Fig.III.2 : Bâtiments indigènes élevés sur pilotis avec des toits élevés et des pignons ouverts pour maximiser la ventilation naturelle à Sumatra, en Indonésie58

Fig.III.3 : Musée Kunsthaus Graznaturelle à Graz, Autriche des architectes Peter Cook et Colin Fournier, une architecture impressionnante résultante de l'emploi des technologies innovantes60

Fig.III.4 : Croquis de Le Corbusier sur La Cité du Refuge (a) Description du mur neutralisant, (b) schéma de respiration exacte61

Fig.III.5 : Composition de Mur Polyvalent62

Fig.III.6 : Schéma de principe des deux systèmes de contrôle des enveloppes adaptatives,(a) Open loop system(b) Closed loop system63

Fig.III.7 : Schéma de structure moléculaire de l'eau dans les trois phases : solide, liquide et gazeuses64

Fig.III.8 : (a) façades sud de l'institut du monde arabe, (b) ambiance intérieur derrière le mur sud65

Fig.III.9 (a) mécanisme des moucharabiehs de l'institut du monde arabe, (b) rénovations des moucharabiehs en 201766

Fig.III.10 : Al Bahar Tower, principe et détail de l'écran solaire dynamique66

Fig.III.11 : (a) Étoiles cassantes «Ophiocoma Wendtii », (b) structure microscopique de son squelette de calcite69

Fig.III.12 : Aberration sphérique et contrôle parfait de la lumière par forme parabolique chez l'Étoiles cassantes «Ophiocoma Wendtii » (à droite) comparée avec lentille sphérique (à gauche)69

Fig.III.13 : coupe transversale d'une microlentille de L'Ophiocoma. Wendtii	70
Fig.III.14 : L'Ophiocoma. Wendtii change de couleur nettement du jour (a) à la nuit (b).....	71
Fig.III.15 : Schéma de principe du système d'ombrage auto sensitif (a) lentille exposée au rayons (b) lentille ombrée	71
Fig.III.16 : esquisse et maquette d'étude du système d'ombrage auto sensitif	72
Fig.III.17 : Une mouche (calliphoridae) et ces œufs	73
Fig.III.18 : différentes vues l'échelle microscopique montrent à plusieurs zooms la structure spéciale des coquilles des œufs de mouches (calliphoridae).....	74
Fig.III.19 : Model expérimental d'un élément de façade poreuse	75
Fig.III.20 : Structure hydrofuge, pores d'environ. 5 μm	75
Fig.III.21 : Coupe schématique de façade poreuse : le mode de fonctionnement, la perméabilité et la capacité d'échange de chaleur de la coquille des œufs de mouches.....	76
Fig.III.22 : Etat de cône de conifères (Pinophyta) (a) à forte teneur en humidité et (b) à faible teneur en humidité	78
Fig.III.23 : section longitudinale sur un cône femelle montrant les deux couches constituant les écailles ovulifères : « f » fibres de cellulose et « s » sclérites, (b-c) vue microscopique des fibres de cellulose et sclérites, où l'angle entre le grand axe « la » de la cellule et le sens d'enroulement des fibres de cellulose « cm » est élevé en sclérites et faible en fibres de cellulose	79
Fig.III.24 : tests empiriques sur l'influence de la forme, l'épaisseur et le sens des fibres sur la courbe de déformations des feuilles de bois stratifié.....	80
Fig.III.25 : HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion: Exposition temporaire à l'extérieure au Stadtgarten, Stuttgart	80
Fig.III.26 : L'ouverture et la fermeture du système Hygroscope selon la variation de l'humidité relative	81
Fig.III.27 : Principe de fonctionnement des bimétals (α_1 et α_2 sont les coefficients de dilatation des deux métaux).....	82
Fig.III.28 : (a-b) forme et détail de montage des tuiles de bimétals (b) model numérique de l'enveloppe « ARMOURED CORSET ».....	82
Fig.III.29 : comportement des tuiles de bimétals avec le changement de température, les pores du prototype « ARMOURED CORSET » (b) fermées(c) ouvertes	83

Chapitre IV

Fig.IV.1 : situation géographique de la ville de Bou Saada.....	86
Fig.IV.2 : zones climatique d’été et d’hiver en Algérie.....	87
Fig.IV.3 : Rose des vents de la ville de Bou Saada.....	88
Fig.IV.4 : Diagramme psychrométrique de la ville de Bou Saada, (a)zone de protection solaire des fenêtres (b) Gain solaire passif direct avec une grande masse thermique.....	90
Fig.IV.5 : Modèle paramétrique du comportement de matériaux des bandes bimétalliques.....	91
Fig.IV.6 : (a) Fleurs de Crocus s’ouvrent lorsque la température augmente (b) schéma de principe de mécanisme de mouvement thermonastique des Crocus	92
Fig.IV.7 : Vue de profil sur une bande bimétallique plate(a) et incurvée(b).....	93
Fig.IV.8 : Matériel expérimental utilisé.....	96
Fig.IV.9 : Mesure expérimentale de la température de réaction de la bande bi-matérielle	97
Fig.IV.10 : Interfaces de Rhinoceros et Grasshopper et leurs logos	98
Fig.IV.11 : Algorithme de la formule de Bilan thermique édité sous Grasshopper.....	100
Fig.IV.12 : Coefficient d’absorption des matériaux semi transparents et opaques.....	100
Fig.IV.13 : Algorithme de la formule de Bilan thermique édité sous Grasshopper.....	101
Fig.IV.14 : Définition géométrique paramétrique de la bande bi matériel, (a)et(b)la courbure se produit au changement des entrées (la température de l’air dans ce cas).....	102
Fig.IV.15 : Module de base du système de protection solaire	103
Fig.IV.16 : Modèle géométrique paramétrique du système de protection solaire	103
Fig.IV.17 : Système de protection solaire ouvert.....	104
Fig.IV.18 : Système de protection solaire fermé.....	104
Fig.IV.19 : Une facture de consommation énergétique du bâtiment cas d’étude	92

Chapitre V

Fig.V.1 : (a) Répartition de la consommation d’énergie de la nationale par secteur, (b) Répartition de la consommation d’énergie de la nationale par produit	107
---	-----

Fig.V.2 : (a) Répartition de la consommation d'énergie de Zone 07 par secteur, (b) Répartition de la consommation d'énergie de Zone07 par produit (c) la répartition géographique des zones de consommation des produits énergétiques en Algérie	108
Fig.V.3 : Dimensionnement du box expérimenta.....	109
Fig.V.4 : Définition paramétrique du BE	110
Fig.V.5 : Application du système de protection solaire sur le BE	110
Fig.V.6 : Algorithme d'importation du fichier des données climatiques.....	111
Fig.V.7 : Algorithme d'extraction dynamique des données climatiques	112
Fig.V.8 : Algorithme du calcul du rayonnement incident sur chaque face du (BE)	113
Fig.V.9 : Algorithme d'extraction dynamique des valeurs de rayonnement incident.....	113
Fig.V.10 : Algorithme de définition des journées extrêmes de l'année	114
Fig.V.11 : Logo des plugins Diva 4 et Archsim.....	115
Fig.V.12 : Bibliothèque des matériaux du plugin Archsim.....	115
Fig.V.13 : Zone de confort de Bou Saada	116
Fig.V.14 : Algorithme de simulation Dynamique.....	117
Fig.V.15 : Structure Algorithmique paramétrique générale.....	117
Fig.V.16 : Système de protection solaire ouvert entre 07het 12h de la journée du 12 janvier-cas de l'orientation Est-	118
Fig.V.17 Variation des gains des radiations solaires transmises par le vitrage des gains de chaleurs pour les orientations du (BE) : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver .	119
Fig.V.18 : Variation des températures extérieure et intérieures du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver	120
Fig.V.19 : Evaluation des charges du chauffage du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver.....	121
Fig.V.20 : Estimation et comparaison des économies d'énergie pour chauffage réalisées du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver	121
Fig.V.21 : Système de protection solaire se ferme à partir de 05h jusqu'à 12h de la journée du 21 juillet-cas de l'orientation Est-	122
Fig.V.22 : Variation des gains des radiations solaires transmises par le vitrage des gains de chaleurs pour les orientations du (BE) : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE	123

Fig.V.23 : Variation des températures extérieure et intérieures du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE	124
Fig.V.24 : Evaluation des charges de chauffage du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE	125
Fig.V.25 : Estimation et comparaison des économies d'énergie pour climatisation réalisées du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE	125
Fig.V.26 : Comparaison des économies d'énergie pour chauffage et climatisation du (BE) réalisées en Hiver et en ETE pour les orientations : Est, Sud et Ouest (Source: auteur 2017). .	126

Chapitre I

Tab.II.1 : Framework pour l'application du biomimétisme34

Chapitre IV

Tab.IV.1 : Interprétation des données météorologiques de la ville de Bou Saada 89

Tab.IV.2 : Propriétés thermo-physiques de l'aluminium et du papier 101

Introduction Générale

Introduction

« *Nous sommes réveillés maintenant, et la question est comment pouvons-nous rester éveillés pour le monde vivant? Comment faisons-nous de l'acte de demander l'avis de la nature une partie normale d'inventer tous les jours?* » (Benyus 1997). Un questionnement qui nous interpelle pour cette recherche.

«*En tant que designer, je me demande pourquoi je ne peux pas concevoir un bâtiment comme un arbre? Un bâtiment qui fait l'oxygène, fixe l'azote, séquestre le carbone, distille l'eau, construit le sol, transforme l'énergie solaire en carburant, fait des sucres complexes et des aliments, crée des microclimats, change de couleur avec les saisons et s'auto reproduit. Ceci est en utilisant la nature comme un modèle et un mentor, non pas comme un inconvénient. C'est une perspective agréable ...* » (Pedersen Zari 2006, McDonough & Braungart 1998). Une approche spécifique qui captive notre intérêt personnel dans le domaine de la recherche.

A l'heure actuelle, en tant que professionnel de l'environnement bâti l'architecte a besoin de résoudre des problèmes très urgents et difficiles liés à la mitigation et à l'adaptation aux changements climatiques, il peut être utile d'examiner des exemples où les mêmes problèmes ont été résolus par d'autres organismes vivants et des écosystèmes (Pedersen Zari 2015). Il s'agit du biomimétisme qui est par définition une science appliquée qui tire l'inspiration des solutions des problèmes humains à travers l'étude des conceptions naturelles, systèmes et processus (Panchuk 2006).

La consommation énergétique, de par son impact néfaste sur le climat, est devenue un souci mondial. Essentiellement, dans le bâtiment avec un taux estimé à 48% dont 40% est dilapidé dans son exploitation, et 8% est consommé lors de la construction (Lechner 2014).

Dans ce sens, Pr Seladji (2016) a dit que Depuis l'an 2008, l'Algérie a atteint son "Pic-Oil", c'est-à-dire le maximum qu'elle produit d'énergie primaire (hydrocarbures et gaz) avec une courbe sans cesse descendante au moment où la consommation énergétique ne fait qu'augmenter. L'Algérie consommera toute sa production et ne pourra plus exporter à l'horizon 2030". L'Algérie qui a une intensité énergétique plus forte dans le bassin méditerranéen, le Japon en consomme 6 fois moins (LARADJ 2016). La consommation énergétique dans les deux secteurs résidentiel et tertiaire jumelés, présente 38% de la consommation énergétique finale de l'Algérie pour l'année 2013, Cependant un taux de croissance annuel moyen de la consommation d'énergie de 3.82% a été enregistré dans le

secteur tertiaire et de 8.17% pour le secteur résidentiel dans la période entre 2000 et 2013 (APRUE 2015).

Ravivé par le Boom financier qu'a connu le pays avec la hausse des prix des hydrocarbures dans le marché mondial, le secteur de bâtiment a connu une croissance remarquable à partir du début des années 2000 où des programmes géants pour la construction des logements et des équipements, ont été lancés par l'état. Alors que les nouveaux modèles architecturaux produits, qu'on appelle « constructions modernes » sont de plus en plus inadaptées et gros consommateurs d'énergie. Très souvent, ces constructions négligent les aspects climatiques, dont l'importance ne paraît pas aux yeux du propriétaire ni même du concepteur dans les premières étapes du projet (Ould Henia 2003).

- **Positionnement, cadrage spatial et temporel**

Notre champ d'investigation se situe à Bou Saada pour de multiple raisons, nous en citons deux :

D'abord, étant un acteur citoyen et architecte praticien, témoin de la construction qui ne s'adapte point au climat contrasté caractérisé par un hiver très froid, et un été chaud. Quant au cadrage spatial, il concerne toute la ville de Bou Saada

Ensuite, l'utilisation des grandes surfaces vitrées dans les bâtiments pour des raisons plutôt esthétique que fonctionnelles est très répandue à travers tout le territoire national, les régions arides ne sont pas épargnées de cette pratique. Parmi ces régions, la ville de Bou Saada a eu sa part des bâtiments inadaptés à son climat aride.

Problématique

Après l'observation, et à travers de nombreuses lectures et littératures, sur la problématique générale de la pratique du biomimétisme dans le domaine de l'architecture. Des recherches précédentes liées au sujet ont été examinées, et plus particulièrement celles élaborées sur les enveloppes architecturales autonomes responsives qui s'adaptent aux changements environnementaux en utilisant les propriétés de matériau. Notre étude se portera sur la question principale suivante.

*Dans quelle mesure les enveloppes architecturales autonomes responsives **biomimétiques**, pourront-elles améliorer la **performance énergétique** d'une conception bioclimatique en climat aride contrasté ?*

Hypothèses

A partir du moment où le climat contrasté est caractérisé d'un été très chaud et d'un hiver très froid, comme réponse supposée, nous essayerons de tester deux hypothèses qui sont formulées ainsi :

1/ En période chaude, où, on a à se protéger du rayonnement solaire, la **performance énergétique** d'une conception bioclimatique serait améliorée par l'utilisation des enveloppes architecturales autonomes responsives **biomimétiques**.

Bien qu'en période froide, on a à s'exposer aux rayonnements solaires, la **performance énergétique** d'une conception bioclimatique serait aussi améliorée par l'utilisation des enveloppes architecturales autonomes responsives **biomimétiques** en climat aride-contrasté.

Afin de vérifier notre hypothèse nous pourrions procéder notre travail comme suit :

Méthodes et Outils

L'approche théorique, à travers un état des savoirs, et une analyse conceptuelle par les concepts-outils ;

- analyse de l'état de l'art du biomimétisme, l'étude des recherches précédentes sur les systèmes architecturaux autonomes responsives en particulier.
- La modélisation, la simulation et l'optimisation d'un modèle de système autonome responsive

Pour atteindre notre objectif nous allons utiliser l'outil Grasshopper, qui est un éditeur graphique d'algorithmes entièrement intégré avec les outils de modélisation 3D de Rhinoceros, et qui avec ces différentes composantes d'optimisation et de simulation, va nous permettre de paramétrer notre model afin de l'optimiser.

A ce stade de la recherche, nous donnons de brèves définitions au concept principal tiré de l'hypothèse:

- **Concept questionné**

Le **Biomimétisme**, où la faune et la flore des écosystèmes entiers sont émulées comme base pour la conception, est un secteur en croissance de recherche dans les domaines de l'architecture et de l'ingénierie. Cela est dû au fait qu'il est une origine d'une possible nouvelle source d'inspiration et d'innovation en raison du potentiel qu'il offre comme un moyen de créer un environnement plus durable et même régénératif intégré. L'application généralisée et pratique du biomimétisme comme une méthode de conception reste cependant largement inexploité (Pedersen Zari 2006).

C'est un concept qui a évolué. Approche l'architecture comme un élément changeant au fil du temps à cause des stimuli environnementaux peut être associé aux processus naturels d'adaptation. La nature est une source de conception intégrée; il n'y a aucune séquence linéaire des événements qui composent un tissu, un organe ou un organisme, mais une boucle de rétroaction constante entre la forme, la performance, et la matérialité (Doumpioti et al. 2011).

Les domaines de la biomimétique et de l'ingénierie biomécanique, qui gagnent plus de terrain dans les approches interdisciplinaires actuelles, peuvent aider à la compréhension et la mise en œuvre des applications des bio-inspirés grâce à des nouvelles innovations matérielles et au moyen des techniques d'analyse, de simulation et de calcul (Doumpioti et al. 2011)

Cependant, réunir tous les paramètres impliqués dans la production des systèmes architecturaux responsive biomimétiques, nécessite un cadre capable de communiquer et d'évaluer les résultats de chaque étape de la conception du design. Les outils informatiques acquièrent un rôle essentiel dans la conception en établissant une rétroaction entre la production et l'analyse à la recherche d'une configuration cohérente au sein de la gamme des paramètres polyvalents. Un ensemble de catalogue des données d'entrée (*Inputs*) et des réponses (*Outputs*) peut être créé pour afficher les changements possibles dans la performance à atteindre et aider à choisir la solution appropriée pour les données environnementales existantes (Doumpioti et al. 2011) .

Structure du mémoire

Introduction Générale

<u>Chapitre I</u> Le Biomimétisme	<u>Chapitre II</u> Le Biomimétisme Dans l'Architecture	<u>Chapitre III</u> Aperçu sur les Enveloppes adaptatives autonomes
---	---	---

Première Partie

<u>Chapitre IV</u> Conception d'une enveloppe adaptative autonome	<u>Chapitre V</u> Simulation, résultats et interprétation
---	--

Deuxième Partie

Conclusion Générale

Le Biomimétisme

Chapitre I

Introduction

Le biomimétisme (biomimicry en anglais) est la science qui étudie la nature, en imitant ou en s'inspirant de ses modèles et de ses méthodes pour résoudre les problèmes engendrés par l'homme. Cette approche n'est pas nouvelle, mais ce n'est que récemment que les chercheurs se sont vraiment penchés sur la question du biomimétisme. Dans les domaines scientifiques, techniques ou industriels, le champ des applications du biomimétisme est vaste et varié : de l'agriculture à l'industrie en passant par l'architecture, les perspectives en matière d'innovation semblent prometteuses.

Au cours de son existence, l'homme s'est toujours tourné vers la nature : il y recherche des solutions à ses problèmes et des réponses à ses questions. L'homme a par ailleurs constaté que la biodiversité et ses services éco systémiques lui sont indispensables pour maintenir la vie sur terre, il a remarqué que les organismes naturels interagissent avec l'environnement pendant des millions d'années et conçoivent des systèmes biologiques très efficaces pour s'adapter aux conditions environnementales afin de surmonter les défis.

Dans ce chapitre, nous essayons de clarifier quelques définitions utiles pour la recherche se rapportant au biomimétisme, sa philosophie et ses principes en relatant notre modeste expérience suite à notre participation au workshop organisé par le cabinet Biomimicry 3.8 à San Francisco aux états unis.

I.1. Comprendre le biomimétisme

How do we make the act of asking nature's advice a normal part of everyday inventing?" (Benyus 1997).

I.1.1. Définition du terme biomimétisme

Le Biomimétisme (des mots grecs bios, signifiant la vie, et mimesis, signifiant imiter) est une nouvelle science qui étudie les meilleures idées de la nature et imite alors ses conceptions et processus pour résoudre des problèmes humains. L'étude d'une feuille pour inventer une meilleure cellule solaire est un excellent exemple. Dans ce contexte, Benyus(1997) a dit : « *Je le considère comme l'innovation inspirée par la nature* ».

En effet, le biomimétisme est l'émulation consciente du génie de la nature. C'est une approche interdisciplinaire qui rassemble deux mondes souvent déconnectés: la nature et la technique, la biologie et l'innovation, la vie et la conception (**Fig.I.1**). La pratique du biomimétisme vise à apporter à la table de conception la sagesse de la vie, mise à l'épreuve du temps, pour avoir des solutions qui créent des conditions propices à la vie. Le biomimétisme est un moyen de trouver des solutions durables en empruntant des plans de vie, des recettes et des stratégies éco systémiques. Le biomimétisme nous connecte d'une manière qui adapte, aligne et intègre l'espèce humaine dans les processus naturels de la terre. (Biomimicry 3.8 2013).



Fig.I.1 Approche du Biomimétisme (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.1.2. Aperçu historique sur le biomimétisme

Depuis son existence, l'humanité n'a cessé de chercher les solutions dans la nature. De ce fait, le biomimétisme n'est donc pas une idée nouvelle. L'un des premiers exemples du biomimétisme, est l'étude du vol des oiseaux par Abbas ibn Fernas (810-887) puis par Leonardo da Vinci (1452-1519), ce qui a mené au premier avion contrôlé par les frères Wright en 1903 (Badarnah 2012).

Les travaux de Thompson (1945), dans son ouvrage «On Growth Form », sont considérés parmi les premiers qui traitent les organismes vivants comme modèles pour les solutions d'ingénierie (Badarnah 2012). Il est donc clair qu'à l'aube du temps les humains ont copié de la nature mais la pratique du biomimétisme est née en grande partie avec le scientifique multidisciplinaire Otto Schmitt dans les années 1950 dans sa recherche doctorale qui était une tentative de production d'un dispositif qui imitait explicitement l'action électrique d'un nerf (Sheridan 2015). « Le goût qu'a Otto pour le jeu verbal comprenait un usage libéral des néologismes, l'un des nombreux termes qu'il a inventés est entré dans le lexique des scientifiques et des ingénieurs d'une manière permanente et profonde : *biomimetics*. Le terme fait sa première apparition dans le dictionnaire Webster en 1974 » (Harkness 2002). La date exacte à laquelle Schmitt a inventé le terme «biomimétique» n'est pas claire. Cependant, Il a employé le terme au moins dès 1969, quand il est apparu dans le titre d'un article¹ qu'il a présenté au troisième congrès international de biophysique à Boston (Harkness 2002).

Janine Benyus, biologiste, auteur, consultante en innovation et autoproclamée «nature nerd», n'a peut-être pas inventé le terme biomimétisme, Biomimicry en anglais ; mais elle l'a popularisé dans son livre en 1997. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* (The Biomimicry Institute 2013)

Elle évoque que dans le biomimétisme, on regarde la nature Comme *modèle*, *mesure* et *mentor*, c'est à dire utiliser les modèles de la nature comme inspiration pour des conceptions qui cherchent à résoudre des problèmes humains; Utiliser des normes écologiques pour

¹ "Some Interesting and Useful Biomimetic Transforms",
Proceeding, Third International Biophysics Congress, Boston, Mass., Aug. 29-Sept. 3,1969, Abstracts, p.297.

évaluer (mesurer) l'efficacité des innovations; Enfin, en utilisant le **biomimétisme** comme un moyen pour redéfinir la façon dont les humains se rapportent à la nature (Benyus 1997).

En 1998, Janine Benyus et Dayna Baumeister ont fondé le cabinet *Biomimicry Guild*, qui est transformé en *Biomimicry 3.8* l'an 2010. En 2006, elles ont fondé avec Bryony Schwan *The Biomimicry Institute*, un institut à but non lucratif pour intégrer le biomimétisme dans l'éducation formelle et les espaces informels comme les musées et les centres naturels. Plus de 11 000 membres font maintenant partie du réseau mondial *Biomimicry*, ils travaillent dans la pratique, l'enseignement et la diffusion du biomimétisme dans leur région. En 2008, l'institut a lancé *AskNature.org*, un site Web primé² qui cherche à inspirer les concepteurs, les architectes, les stratèges commerciaux et autres innovateurs à l'information biologique pertinente à leurs défis de conception de service ou de produit de bio-inspiration (Biomimicry 3.8&The Biomimicry Institute AskNature 2016).

I.2. Méthodologie du biomimétisme

Afin d'identifier les principes et la philosophie du biomimétisme, et pour une meilleure compréhension de cette méthodologie, j'ai participé à un workshop organisé par le cabinet Biomimicry3.8, qui s'est tenu à San Francisco aux états unis entre le 02 et le 04 novembre 2016. Le programme du workshop m'a permis de connaître la vision et les valeurs du biomimétisme au sein d'un projet, en se référant à une caisse à outils de bonnes pratiques du biomimétisme élaboré par Dr, Dayna Baumeister en 2013 directrice du *Biomimicry 3.8*. Elle a développé une méthodologie non linéaire pour comprendre les solutions de la nature, c'est un ensemble d'outils qu'elle appelle *Biomimicry DesignLens* car il offre une autre vision de percevoir le monde vivant. Le résultat est un processus guidé pour utiliser le génie de la nature pour informer la conception humaine.

Selon Biomimicry3.8, la pratique du biomimétisme incarne trois ingrédients interconnectés mais uniques; les trois éléments essentiels du biomimétisme représentent la

²The Earth Awards 2010, lauréat de la catégorie « Systèmes ». L'événement a été fondé par Nicole Ting-Yap, à l'initiative du projet ecoStyleTM, créé en 2007 par le gouvernement malaisien.

fondation du biomimétisme. En combinant ces éléments ensemble, La conception bio-inspirée devient biomimétisme (**Fig.I.2**).

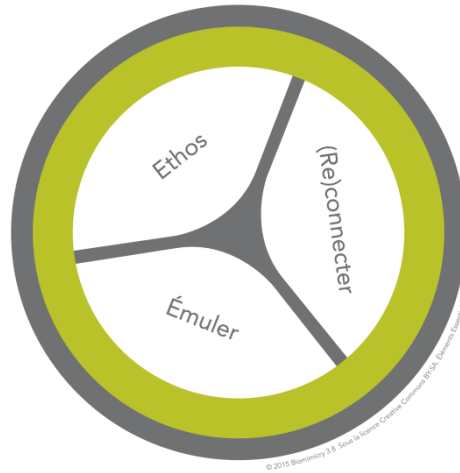


Fig.I.2 Eléments essentiels du biomimétisme (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.2.1. Eléments essentiels du biomimétisme

Les éléments essentiels du biomimétisme sont définis comme suit :

I.2.1.1.Ethos

L'élément ***Ethos*** constitue l'essence de leur éthique, leurs intentions et philosophie sous-jacente derrière leur pratique du biomimétisme. Ethos représente leur respect, la responsabilité et la gratitude envers les autres espèces et notre environnement commun.

I.2.1.2.(Re) connecter

L'élément ***(re) connecter*** renforce l'idée que tout en semblant distincts, les humains et la nature sont en réalité profondément entrelacés : nous sommes la nature. La (Re) connexion est une pratique et une mentalité qui explore et Approfondit cette relation entre les humains et le reste de la nature.

I.2.1.3. Emuler

L'élément *émuler* apporte les principes, les modèles, les stratégies et les fonctions trouvés dans la nature pour informer la conception. L'émulation c'est d'être proactif afin d'atteindre la vision des humains pour vivre durablement sur terre.

I.2.2. Principes de la vie

Les principes de vie sont des leçons de conception de la nature, Basés sur la reconnaissance de l'idée évoquant que la vie sur terre est interconnectée et interdépendante. Soumise au même ensemble de conditions d'exploitation, la vie a élaboré un ensemble de stratégies qui a duré plus de 3,8 milliards d'années. Les principes de vie représentent ces modèles dominants trouvés chez les espèces qui survivent et prospèrent sur terre. La vie intègre et optimise ces stratégies pour créer des conditions propices à la vie (Fig.I.3). Par l'apprentissage de ces leçons de conception approfondie, nous pouvons concevoir des stratégies innovantes et mesurer nos modèles contre ces repères durables, et nous permettre d'être encadrés par le génie de la nature en utilisant les principes de la vie comme nos idéaux d'inspiration.

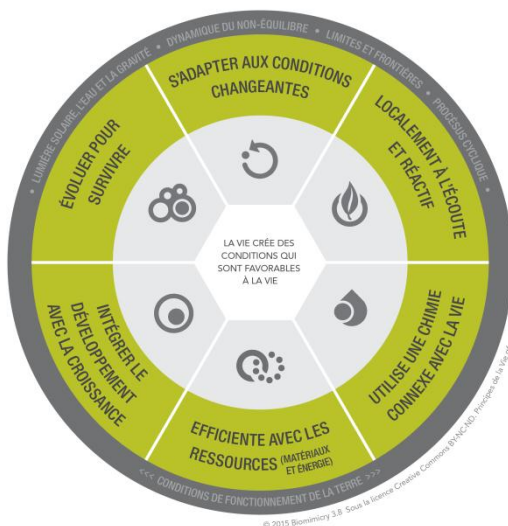


Fig.I.3 Les principes de la vie (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.2.3. Pensée biomimétique

La pensée biomimétique procure un contexte du : où, comment, quoi et pourquoi le biomimétisme s'inscrit dans le processus de toute discipline ou de toute échelle de conception. Bien que ressemblant à une méthodologie, la pensée biomimétique est un cadre pour aider les gens à pratiquer le biomimétisme pour toute conception. Il existe quatre domaines dans lesquels un *Design Lens* offre la plus grande valeur au processus de conception (indépendamment de la discipline dans laquelle il est intégré) : la problématisation, la découverte, la création et l'évaluation (Fig.I.4).



Fig.I.4 Pensée biomimétique (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.2.3.1.Problématisation (Scoping)

Cette phase consiste en la définition du problème ou du défi en termes qui peuvent conduire aux Questions; "*comment la nature ..?*"; pour la recherche ultérieure, y compris les objectifs fonctionnels et le contexte. Cette phase se matérialise dans trois étapes(Fig.I.5).



Fig.II.5 Pensée biomimétique « problématisation » (source : Biomimicry 3.8, 2015)

2.3.1.1. Définir le contexte (**Define context**)

Dans cette étape, on spécifie notre problème de conception et ses conditions d'exploitation.

2.3.1.2. Identifier la fonction (**Identify function**)

C'est une étape qui consiste à déterminer la (es) fonction(s) clé (s) que la conception doit effectuer (*Qu'est-ce qu'il faut faire?*).

2.3.1.3. Intégration des principes de la vie (**Integrate Life's Principles**)

On s'engage dans cette étape à intégrer les principes de la vie dans les exigences de conception.

I.2.3.2. Découvrir (Discovering)

À cette phase, on cherche dans la nature une source d'inspiration qui correspond aux critères établis dans la phase précédente (**Fig.I.6**).



Fig.I.6 Pensée biomimétique « Découvrir » (source : Biomimicry 3.8, 2015)

2.3.2.1. Découvrir des modèles naturels (**Discover natural models**)

Cette étape consiste à trouver des organismes ou des écosystèmes qui ont évolué et des stratégies pour répondre aux fonctions requises.

2.3.2.2. Abstraire des stratégies biologiques (**Abstract biological strategies**)

A cette étape, déterminer le mécanisme derrière chaque Stratégie d'organisme et traduire cela en un principe de conception par suppression de la terminologie biologique.

I.2.3.3.Création (Creating)

C'est la phase d'idéation basée sur des principes de conception découverts dans la nature acquis dans la phase de découverte. Cela s'effectue dans deux étapes (**Fig.I.7**).



Fig.I.7 Pensée biomimétique « création » (source : Biomimicry 3.8, 2015)

2.3.3.1. Brainstorming des idées bio-inspirées

Dans cette étape, on pense à des idées multiples sur la façon d'appliquer les principes de design pour résoudre le problème de conception.

2.3.3.2. Emuler les principes de conception (**Emulate design principles**)

On aigüise à cette étape les meilleures idées de notre brainstorming, on développe un principe de conception et on envisage des aspects de l'échelle. Si on peut aller au-delà de l'émulation de la forme, on a à émuler également le processus et l'écosystème.

I.2.3.4.Evaluation (Evaluating)

Il s'agit d'un exercice de mesure, d'évaluation ou d'estimation de la nature, de la qualité, de la capacité, de l'étendue ou de l'importance d'une solution particulière par rapport aux règles de fonctionnement. Cette phase s'effectue dans une seule étape (**Fig.I.8**).



Fig.I.8 Pensée biomimétique « évaluation » (source : Biomimicry 3.8, 2015)

2.3.4.1. Mesurer avec les principes de vie (**Measure using Life’s Principles**)

Dans cette dernière étape, on évalue notre conception en utilisant les principes de la vie comme référence.

Suivre les étapes spécifiques de chaque phase contribue à assurer l’intégration réussie des stratégies de la vie dans les conceptions humaines.

I.2.4. Processus du biomimétisme

La pensée biomimétique se matérialise à travers deux processus :

I.2.4.1. Du défi à la biologie (challenge to biology)

Ceci est un processus spécifique à travers la pensée biomimétique. Cela est utile pour les scénarios lorsqu’on a un problème spécifique et qu’on cherche des aperçus biologiques pour la solution, il est particulièrement utile pour un milieu contrôlé ou pour créer un processus de conception itératif. Évidemment, les meilleurs résultats se produisent lorsqu’on navigue le processus plusieurs fois. (**Fig.I.9**).

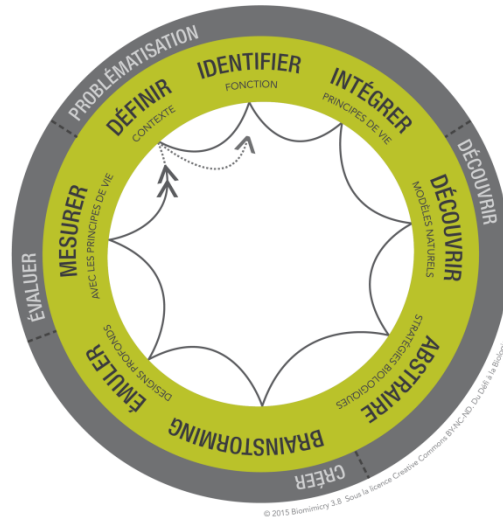


Fig.I.9 Du défi à la biologie (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.2.4.2. De la biologie au design (*biology to design*)

C'est un processus spécifique à travers la pensée biomimétique. C'est le plus approprié lorsqu'on initie avec un aperçu biologique inspirant (qui comprend un des principes de la vie) que nous voulons manifester comme conception. Ceux qui pourraient suivre cette voie sont les inventeurs et les entrepreneurs, les étudiants qui n'ont pas encore leur propre processus de conception, ceux qui sont intéressés à découvrir des stratégies qui pourraient éclairer les nouvelles innovations et les éducateurs intéressés à partager la biologie de manière à susciter l'intérêt avec les non biologistes (Fig.I.10).

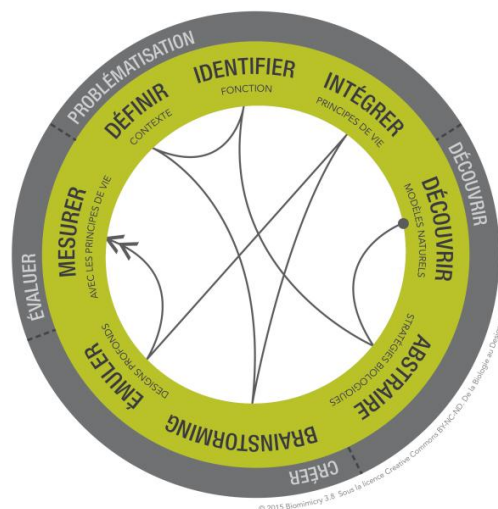


Fig.I.10 De la biologie au design (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.3. Biome

Un biome représente le type de climat et de végétation qui existe dans des régions spécifiques du monde. Le climat dans l'est de l'Amérique du nord par exemple, est similaire au climat de l'est de Chine. Les arbres qui se développent dans ces conditions, sont des arbres à feuilles larges comme les érables et les chênes ainsi que les conifères tels que les pins et les sapins (Biomimicry 3.8, HOK Group³, 2013). Il existe deux principaux types de biomes, à savoir terrestres et aquatiques. Les biomes terrestres sont généralement définis par le type de végétation qui est présente. La végétation est à son tour généralement déterminée par la température et les précipitations. Les Biomes aquatiques sont classés par les types d'eau qu'ils contiennent : eau douce et eau salée (BucketListNature & Amazon Services LLC Associates 2017). Il existe de nombreux systèmes de classification des biomes. Le cabinet Biomimicry 3.8 a sélectionné le meilleur de ces systèmes qui fournit une carte de 18 biomes (**Fig.I.11**), dérivé de la classification des écosystèmes terrestres du fonds mondial pour la nature⁴ (Olson et al. 2001). Les modes de fonctionnement des habitats et des écosystèmes présents dans un biome créent de la pertinence pour la conception humaine (Biomimicry 3.8 & HOK Group 2013).

³ HOK est une entreprise mondiale de design, d'architecture, d'ingénierie et de planification sis à St. Louis, MISSOURI aux états unis, site web officiel : www.hok.com

⁴ Fonds mondial pour la nature : organisation non gouvernementale World Wildlife Fund (WWF) sis à Washington aux états unis, site web officiel : www.worldwildlife.org

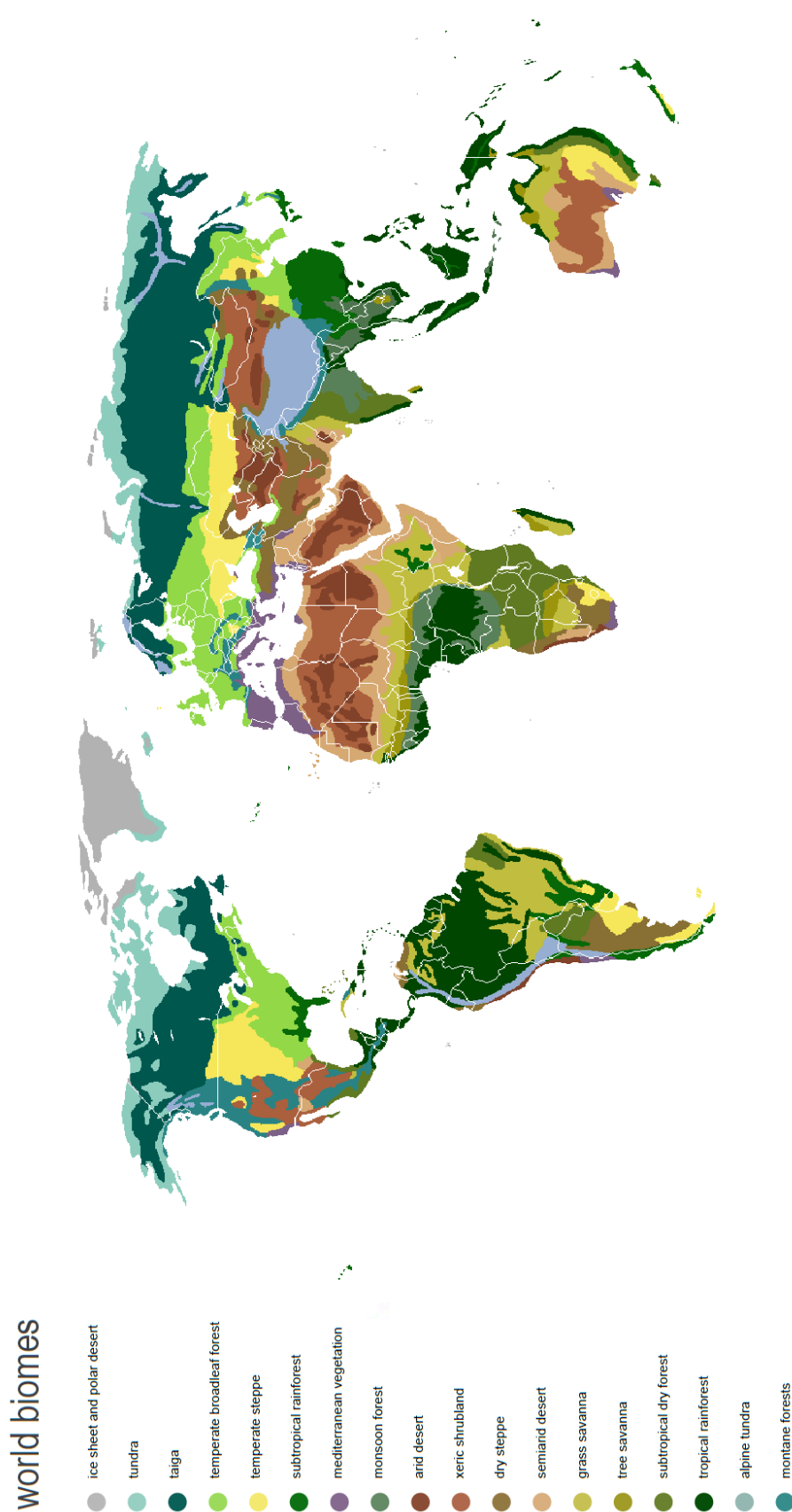


Fig.I.11 Carte de classifications des biomes terrestres dans le monde
 (Source: *Genius of Biome report* (Biomimicry 3.8 & HOK Group 2013))

I.3.1. Genie du biome

Un génie du biome décrit l'ensemble des stratégies et des conceptions adoptées par les organismes vivants, trouvés dans des régions du monde de climat et de végétation similaires. Ces stratégies et conceptions peuvent aussi être étudiées au niveau des écosystèmes. Ces derniers sont composés d'entités vivantes avec leurs conditions abiotiques (climat, température, types de sol, topographie). Dans un biome, les conditions abiotiques sont tout aussi importantes, comme elles le sont pour les architectes, les concepteurs et les planificateurs. L'écologie donc offre une lentille supplémentaire à travers laquelle nous pouvons voir le génie de la nature et apprendre des principes de conception qui s'adaptent aux conditions abiotiques et biotiques du biome (Biomimicry 3.8 & HOK Group 2013).

I.3.2. Référencier un biome

Afin de pouvoir lire le génie du biome, on a à référencier le (es) écosystème (s) qu'il contient en identifiant le contexte écologique, le domaine, le biome et l'écorégion. On doit aussi prendre en considération les facteurs spécifiques du site, tels que la topographie, l'hydrodynamique et les adjacences. Il y'a deux outils de référence online : **WWF WildFinder** et **Ecology Pocketguide** (**Fig.I.12**) qui offrent la possibilité d'explorer les informations biologiques sur les écosystèmes, entre autres les espèces végétales et animales et leurs identification commune et scientifique (Biomimicry 3.8 2013), ce qui nous offre une meilleure adaptation à l'écosystème pour entamer le processus de biomimétisme d'une manière claire.



Fig.I.12 Interfaces des outils de référence online (a) Ecology Pocketguide

(Source : <http://www.ecologypocketguide.com/>)

(b) **WWF WildFinder** (source: <http://www.worldwildlife.org/science/wildfinder/>)

I.3.3. Lecture du génie du biome

Lors du workshop du San Francisco, les instructeurs nous ont programmé un exercice de pratique du biomimétisme dans un biome. Le *défi* était de *concevoir un espace public dans la ville de San Francisco* qui doit démontrer un principe de conception fonctionnelle, tiré de l'habitat de référence local proposée (Purisima Creek Redwood Forest).

I.3.3.1.Phase de problématisation

L'espace public va se situer dans la rue « Market Street » pour relier les deux placettes sur ces côtés (Fig.I.13).

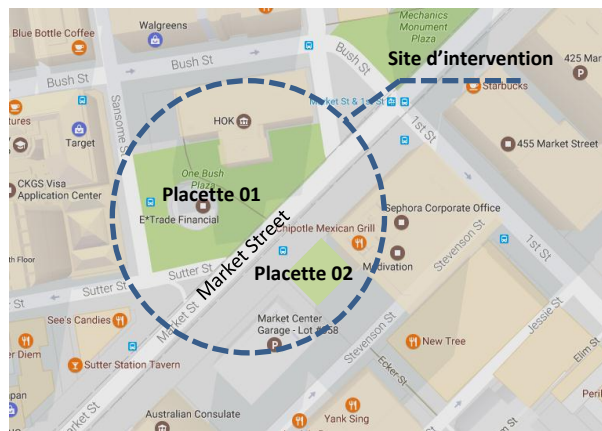


Fig.I.13 Situation de l'espace public à concevoir (source : Google maps, 2016)

Pour effectuer cet exercice, on a suivi le processus du biomimétisme : Du défi à la biologie (*Challenge to biology*). Le processus s'effectue selon un modèle qui permet de classer les différentes informations acquises dans chaque phase (Fig.I.14).

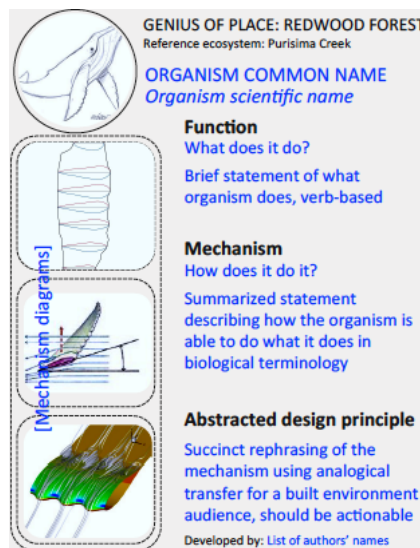


Fig.I.14 Modèle pour lecture du génie du biome (source : Biomimicry 3.8 2016)

Ceci par une structuration en différentes étapes successives relatives à chaque phase de la pensée biomimétique selon une logique évolutive, en commençant par le référencement de site de (Purisima Creek Redwood Forest) par le biais de l'outil online : **WWF WildFinder** (**Fig.I.15**), ce qui nous a permis de définir le biome de notre site de référence (Temperate Coniferous Forests), et qui nous permettra dans la phase suivante d'avoir des informations sur l'(les) espèce(s) qui va (ont) nous inspirer.

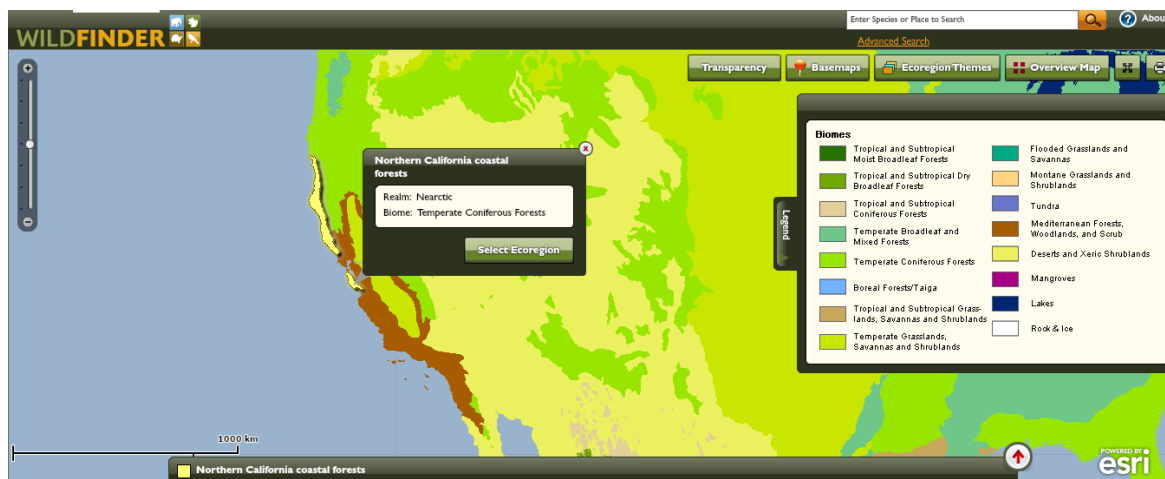


Fig.I.15 Référencement de « Purisima Creek Redwood Forest »

(Source: <http://www.worldwildlife.org/science/wildfinder>,2016)

On s'est posé la question : « *que voulons-nous que notre conception fasse ?* » afin d'identifier la fonction que notre design doit effectuer, cela a été fait à travers une discussion en groupe où on a développé les réponses suivantes à notre question :

- Notre espace public doit connecter les deux placettes sur les côtés de la rue et permettre aux piétons de traverser la rue librement à tout moment.
- Il doit offrir aux utilisateurs l'accès à la lumière du soleil, au calme, à l'air frais ainsi qu'une belle vue perspective sur le « Market Street ».
- Il doit permettre aux utilisateurs de se partager des moments de décontraction.

Dans le but de passer à la phase de la découverte des modèles dans la nature qui ont pu survivre et prospérer en développant des stratégies et pouvant accomplir les fonctions que nous voulons que notre design effectue, on a essayé de **biologiser** les réponses ci dessus en correspondant nos phrases à la question suivante : « *comment les espèces dans la nature s'adaptent-elles dans leur habitat pour atteindre les ressources vitales (eau, lumière, nourriture, etc...? Et comment coexistent-elles pour le faire équitablement ?* » .

Après avoir défini notre défi, son contexte, ses conditions de fonctionnement puis identifié les fonctions à accomplir par le design et leur biologisation en une question de synthèse, nous sommes arrivés à la dernière étape de la phase de problématisation dans notre pensée biomimétique. Il s’agit de l’intégration des principes de la vie dans les exigences de notre design, cela s’est fait à l’aide de taxonomie de ces principes fournis par Biomimicry 3.8. La comparaison des fonctions clés de notre question sur les espèces dans la nature avec les principes de la vie, nous a permis de les faire correspondre avec celui qui leur convient «*Efficiente avec les ressources (Be resource efficient ;material and energy)* »(Fig.I.16).Ce principe de vie sera notre référence pour évaluer notre design à la fin du processus.



Fig.I.16 Taxonomie des principes de la vie «avec le choix du principe qui correspond à notre fonction» (Source: Biomimicry 3.8 2016) édité par l’auteur

I.3.3.2. Phase de découverte

Dans cette phase de notre pensée biomimétique, on s'est déplacé vers l'habitat de référence (Purisima Creek Redwood Forest) pour chercher des organismes ou des écosystèmes qui ont développé des stratégies pour accomplir la fonction qu'on souhaite que notre design effectue. La présence d'un naturaliste connaisseur du lieu nous a aidés à explorer d'une autre manière le monde vivant, en dépassant le regard d'admiration superficiel de la nature vers une vision profonde de la manière d'être des espèces, des processus et des écosystèmes (**Fig.I.17**).



Fig.I.17 Présentation du site de référence (Purisima Redwood Forest) par le naturaliste John Muir Laws, pour permettre au groupe de designer et d'explorer le biome (Source: auteur, 2016)

Pour une meilleure lecture du génie du biome, on est appelé à voir à travers plusieurs lentilles selon nos objectifs de design. Ces lentilles s'appellent : les lentilles biologiques (*Biological Lenses*) selon (Biomimicry 3.8 & The Biomimicry intitute 2015), ces lentilles se définissent comme suit :

- Lentille de fonction (**Function lens**)

Utilisée pour rechercher une fonction particulière qu'on essaye d'accomplir dans notre conception, en utilisant le processus de biologisation de la question : *comment la nature... ?* (Celle utilisée dans notre cas).

- Lentille écologique (**Ecological lens**)

Utilisée lors de la conception d'un système avec des relations ou des interactions entre ces composantes, en explorant les écosystèmes, pour définir par exemple les stratégies reproductives des espèces, les web alimentaires ou les différentes niches⁵ dont les espèces se spécialisent. Les concepts tirés sont souvent métaphoriques et peuvent être appliqués comme modèle de conception ou d'inspiration pour une conversation plus profonde avec le monde naturel.

- Lentille naturaliste (**Naturalist lens**)

Utilisée lorsqu'on cherche des idées pour une conception bio-inspirée. On doit être conscient des choses belles et particulières qui attirent notre attention et notre imagination. On peut trouver une application pour les phénomènes remarquables comme on ne peut faire, mais ils peuvent néanmoins susciter notre intérêt et notre créativité. Cette lentille est améliorée lorsqu'on s'entraîne à reconnaître les stratégies biologiques et les principes de conception dans le monde vivant.

- Lentille de condition de fonctionnement (**Operating condition lens**)

Utilisée lorsqu'on a des conditions environnementales particulières que notre design doit accommoder ou gérer, ou bien lorsqu'il traite avec des caractéristiques environnementales spécifiques durant son cycle de vie, où il ne doit pas rester dans la même situation géographique. Parmi les exemples de ces conditions, on peut citer : l'exposition au rayonnement solaire intense, exposition au feu, à l'eau salée et l'exposition à la pression atmosphérique.

On doit se poser ces questions : quels organismes dans le monde vivant doivent traiter avec ces conditions ? Et quel écosystème présente ces caractéristiques ?

- Lentille locale (**Local lens**)

Utilisée lorsque notre design final restera toujours dans la même situation géographique et pour identifier comment les organismes locaux répondent-ils aux pressions biotiques et abiotiques sur ce site.

⁵ Ensemble des conditions environnementales telles qu'une espèce donnée peut former des populations viables. (<http://www.supagro.fr>,2017).

Après la présentation du site par le naturaliste (John Muir Laws), on a commencé le travail d'exploration des lieux de (Purisima Creek Redwood Forest) en focalisant toujours les fonctions dont notre espace public doit accomplir, cela nous a fait découvrir quelques modèles champions dans ces fonctions : ce sont les plantes et les arbres de la forêt, ils grandissent verticalement puis ils étendent leur branches horizontalement vers les zones où ils peuvent atteindre la lumière du soleil.

L'arbre célèbre de cette forêt connu par le nom (*Coast Redwood*) était l'espèce qui nous a interpellés le plus par sa manière de grandir pour capter la lumière du soleil et la manière dont ses branches s'étendent vers les zones éclairées et s'atrophient dans les zones d'ombre en laissant de la place aux branches d'arbres voisins, ce qui permet une équité d'accès à la lumière (**Fig.I.18**). Le phénomène sus-décrié montre le génie du lieu, car l'équité d'accès aux ressources de vie notamment la lumière, a favorisé la densité de notre champion (*Coast Redwood*). Cette dernière est nécessaire pour que les arbres se protègent contre les conditions abiotiques telles que le vent. Vue la hauteur immense que peuvent atteindre ces arbres lorsqu'ils grandissent en étant rapprochés, leurs racines s'enchevêtrent et leur offrent un bon ancrage au sol⁶.



Fig.I.18 Lecture du génie du (*Coast Redwood*), (a) zone d'ombre, (b) zone éclairée, (c) schématisation du phénomène (Source: auteur, 2016)

Pour synthétiser les leçons tirées de notre expérience sur site, on était appelé à définir la fonction que notre espèce champion (*Coast Redwood*) accomplit dans sans habitat en utilisant

⁶ Ces informations sont données par le naturaliste John Muir Laws en guise de réponse à nos interrogations sur les phénomènes rencontrés lors de notre visite de (Purisima Creek Redwood Forest).

la taxonomie des fonctions (*Biomimicry taxonomy*) qui organise les fonctions dans des groupes et des sous-groupes. Lors d'une séance de travail en groupe, on a conclu que notre fonction tombe dans le groupe modifier (**Modify**), le sous-groupe adapter et optimiser (**Adapt/Modify**) et notre fonction était : optimiser l'espace et les matériaux (**Optimize Space/Materials**) (**Fig.I.19**).

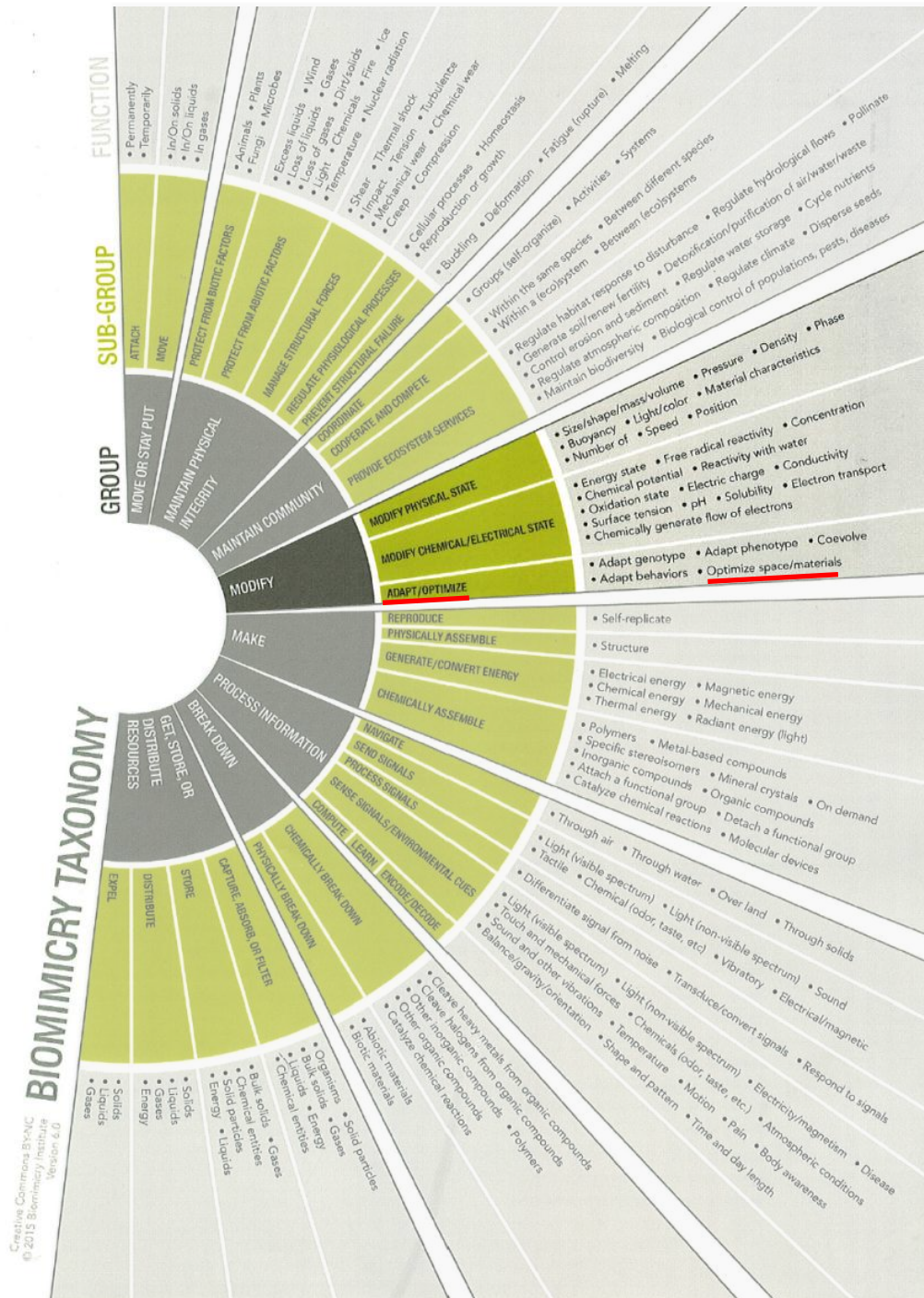


Fig.I.19 Définition de la fonction à l'aide de « Biomimicry taxonomy »

(Source: Biomimicry Institute 2016)

Une fois la fonction est définie, la première étape de la phase de la découverte est achevée, on est passé donc à la deuxième étape qui est l'abstraction des stratégies biologiques. Dans cette étape, on doit rédiger un résumé descriptif du mécanisme de la fonction dont notre espèce championne accomplit en utilisant une terminologie biologique :

- **Le mécanisme :** « Dans les populations denses, les arbres poussent vers la lumière et les ressources de vie, maximisent la croissance des branches vers les côtés éclairés, et s'auto élaguent les branches improductives (ceux dans les côtés ombrés) ».

Arrivant à ce stade, on a essayé de reconnaître les composantes essentielles et pertinentes du mécanisme par l'extraction des mots clés suivants : *Populations denses / poussent vers / lumière / ressources / côtés éclairés / auto élagué/ côtés ombrés*.

En incluant la pertinence du mécanisme, on a reformulé le résumé en supprimant la terminologie biologique pour enfin abstraire les principes de design de notre espèce championne (*Coast Redwood*).

- **Les principes du design abstraits :** « L'unité redirige les ressources vers des opportunités inexploitées tout en conservant les avantages de la densité ».

Dans notre pensée biomimétique, les deux premières phases : la problématisation et la découverte, ont été finalisées par le classement de toutes les informations collectées, les schémas et les illustrations faites dans le modèle de lecture du génie du biome qui nous a été proposé (Fig.I.20).

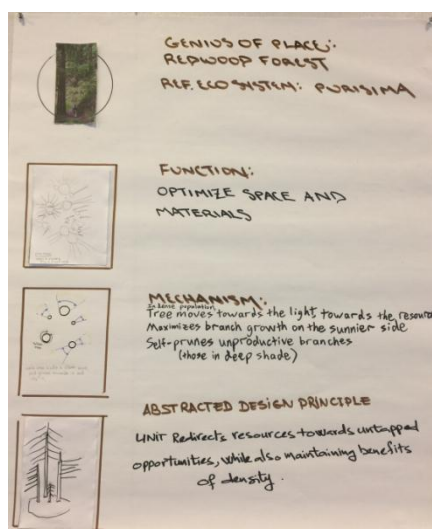


Fig.I.20 Classifications des informations dans le modèle de lecture du génie du biome (source :auteur 2016)

I.3.3.3.Phase de création

Dans cette phase, on a essayé de penser à des idées dans le but de développer des concepts applicables pour répondre à notre défi (brainstorming) en soulignant cette fois-ci les mots clés de notre paragraphe d'abstraction des principes du design : *ressources/opportunités inexploitées/ les avantages de la densité*, pour les correspondre aux besoins de notre design . Cela s'est toujours fait à travers une discussion en groupe où on a développé nos concepts de design sur des schémas de principe et des croquis (**Fig.I.21**) afin d'atteindre l'étape d'émulation avec des idées affinées.

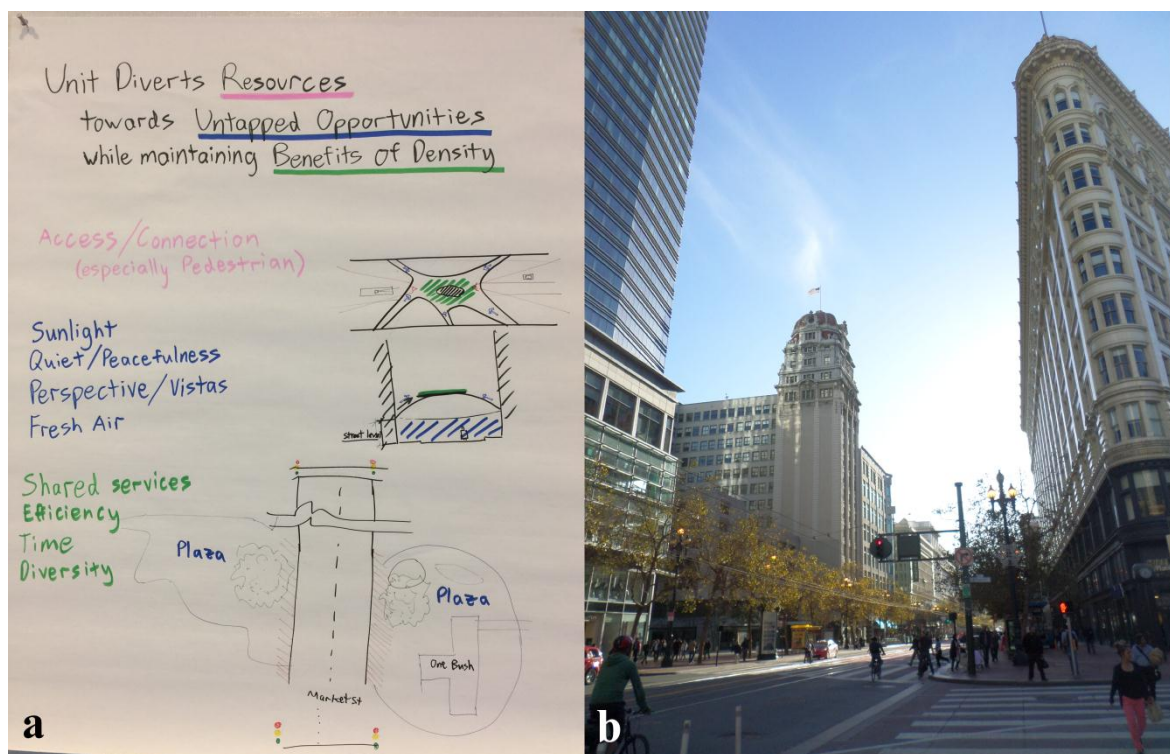


Fig.I.21 (a) présentation de la phase de création (b) vue sur le Market Street

(Source : auteur 2016)

L'idée qu'on a jugée meilleure pour développer notre concept de design, était enfin de créer un espace sur la rue (Market Street) qui connectera les deux placettes et qui sera au-dessus du niveau des câbles électriques alimentant les bus et le tramway. Dans cet espace, il y'aura des services permettant la rencontre des individus, de cette manière on aura donné aux utilisateurs plus d'accès à la lumière du soleil , aux belles vues perspectives le long de la rue de (Market Street) (**Fig.I.21**) ainsi que le gain du temps souvent perdu lors de l'attente des feux verts pour traverser la rue. L'aspect de l'échelle est apparent dans cette étape d'idéation

et cela va nous permettre de développer notre design et d'y aller vers l'émulation de type d'adaptation de la forme, découvert chez les arbres de (Purissima Redwood Forest).

Dans notre exercice, la phase de l'émulation n'a pas été menée jusqu'au bout et on s'est contenté du concept de design vu que l'exercice n'a duré qu'une seule journée. De même, la phase d'évaluation n'a pas été achevée vue que le design n'est pas finalisé.

I.4. Exemples de biomimétisme

Plusieurs exemples de succès des solutions basées sur le biomimétisme dans plusieurs domaines où les designers ont réussi à répondre aux défis d'une manière révolutionnaire. Parmi ces exemples, on peut citer :

- **Le Shinkansen Bullet Train**

Les trains de séries 500 doivent rouler à une vitesse de 300 km/h, ce qui provoque un niveau de bruit important qui dépasse les standards environnementaux (**Fig.I.22**).

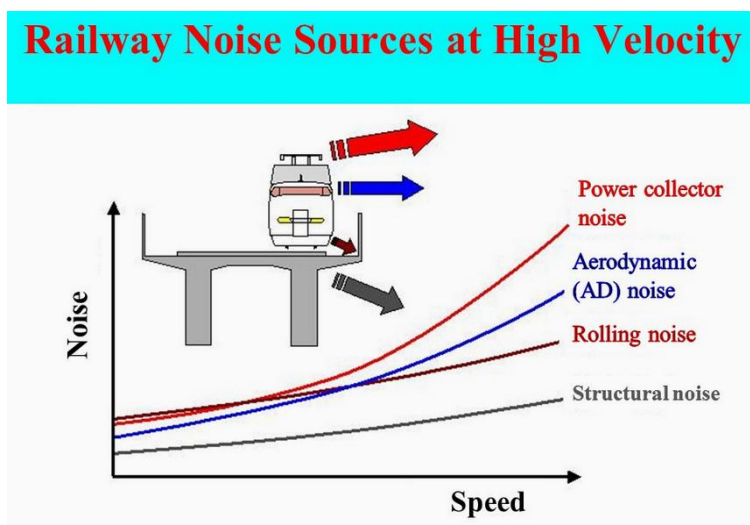


Fig.I.22 Nuisance sonore provoquée par chaque partie du train, le pantographe vient en première place après vient la forme du corps du train (Source : <http://labs.blogs.com>, 2017)

Quand le train entrait dans un tunnel, une forte explosion se produisait. Lorsqu'il sortait, à cause du volume d'air fixe du tunnel et de l'augmentation soudaine de la pression provoquée par le train entrant, une autre source de bruit était le pantographe : une pièce qui relie le train à sa source d'énergie électrique (vibre et fait de grands bruits). Pour résoudre ces

problèmes, l'ingénieur Eiji Nakatsu qui travaille chez la compagnie japonaise de chemins de fer de l'ouest « JR West », a exploité ses connaissances en tant qu'observateur d'oiseaux pour reconcevoir l'aérodynamique du train ainsi que celle du pantographe, en émulant l'oiseau « Martin-pêcheur » dont la forme du corps est optimale pour passer de l'air à l'eau pour attraper les poissons. Le nez du train était remodelé comme le bec du martin-pêcheur, le bruit à la sortie du tunnel a été éliminé (Asknature 2016).

Un nouveau design du pantographe pour éliminer les vibrations, a été inspiré par l'étude des plumes de hibou qui ont de minuscules dentelures sur les bords. Cela permet au hibou de se faufiler tranquillement sur sa proie la nuit, en incluant de minuscules dentelures sur les bords du pantographe, le bruit a été éliminé (Asknature 2016) (**Fig.I.23**).

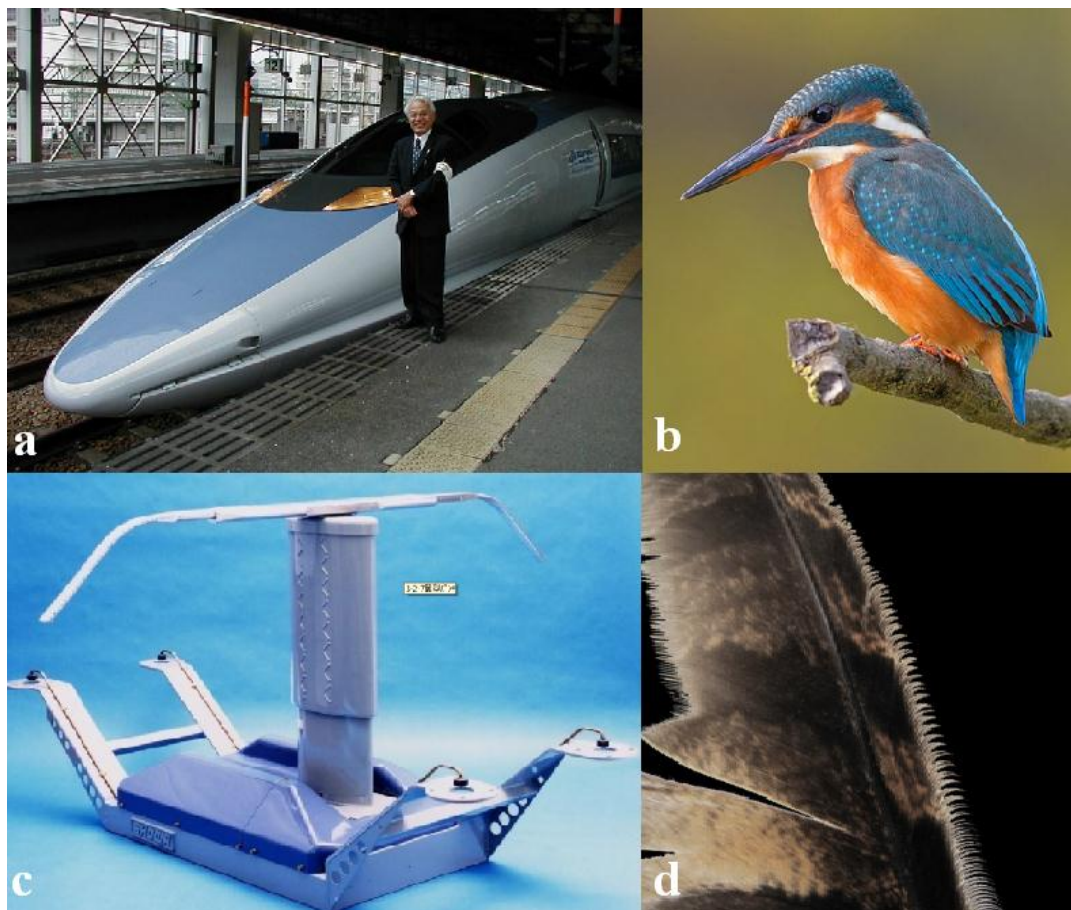


Fig.I.23 (a) JR500 Bullet Train (source : www.labs.blogs.com) , (b) le martin-Pêcheur (source : www.bishopsmeadowtrust.org), (c) le pantographe reconçu source: (www.labs.blogs.com), (d) la plume de hibou source : (<http://natureinspireus.wordpress.com>)

Conclusion

Chercher l'inspiration dans la nature n'est pas une idée neuve. La pratique a été courante tout au long de l'histoire de l'humanité. Mais imiter la nature pour innover de façon durable, voilà une idée qui prend tout son sens au moment où tous les pays du monde s'appêtent à s'engager dans une transition à la fois énergétique et écologique.

Il s'agit d'une démarche qui invite l'homme à puiser aux multiples sources d'inspiration que lui présente la nature, qu'il s'agisse des formes, des matériaux ou des écosystèmes. Les solutions mises au point et perfectionnées tout au long de l'évolution par le vivant sont des exemples à suivre, afin de les reproduire d'une manière qui facilite la résolution des problèmes des sociétés humaines et leur permette de satisfaire leurs propres besoins, tout en limitant la consommation de matières et d'énergie. Le biomimétisme se veut un outil au service du développement durable.

Ces dernières années, le biomimétisme est déjà passé du stade de l'idée à celui de la recherche puis de la pratique. Dans le chapitre suivant, nous étudierons le concept du biomimétisme appliqué au domaine de l'architecture pour comprendre le transfert d'un mécanisme de la vie à des systèmes non vivants.

Le Biomimétisme dans l'architecture

Chapitre II

Introduction:

Tout au long de l'histoire, les architectes se sont référés à la nature comme source d'inspiration pour les formes de leurs projets, ou leurs approches de décoration. En architecture, il est important de faire une distinction entre «biomimétisme» et «biomorphisme».

Les architectes modernes ont fréquemment utilisé la nature comme source de formes non conventionnelles et pour le symbolisme aussi, tel qu'Eero Saarinen dans le terminal TWA de l'aéroport de John F Kennedy à New York, dont la forme symbolise le vol d'un oiseau et Frank Lloyd Wright dans le « Johnson Wax building », où il s'est inspiré des colonnes des nénuphars (**Fig.II.1**) en créant un espace spectaculaire, alors que fonctionnellement ils n'ont rien de commun avec les feuilles de lys (Pawlyn 2011).



Fig.II.1 (a) The TWA terminal at John F Kennedy Airport New York city (source: www.greatbuildings.com), (b) the Johnson Wax building Racine city, Wisconsin USA (source: www.loc.gov)

Le biomimétisme en architecture est différent de l'architecture organique, biomorphique ou zoomorphique, qui sont scrutées par la mimique esthétique de la forme organique dans la conception (Pedersen Zari 2012). Cependant, le biomimétisme n'a été appliqué à la conception d'un bâtiment que dans une mesure assez limitée, en s'appuyant souvent sur des exemples fréquemment cités, tels que les termitières et les toiles d'araignées.

Ces dernières années, le biomimétisme s'est développé très rapidement dans d'autres domaines tels que le design industriel et la médecine (Pawlyn 2011). La sélection des

modèles de la nature est un défi commun auquel font face les architectes. Les processus, les morphologies et les systèmes sont tous des stratégies disponibles pour imiter, qui peuvent être mises en œuvre à différentes échelles de résultats, par exemple : matériau, objet, produit, bâtiment et design urbain (Badarnah 2012).

Le transfert d'un concept ou d'un mécanisme de la vie à des systèmes non vivants est une réplique simple et directe du prototype biologique est rarement réussie même si cela est possible avec la technologie actuelle. Une forme ou une procédure d'interprétation ou de traduction de la biologie à la technologie est nécessaire (Vincent et al. 2009).

II.1. Pratique du biomimétisme dans l'architecture

Certains architectes chercheurs ont essayé de suggérer un cadre (Framework) pour la pratique du biomimétisme dans l'architecture et l'urbanisme, tout en se référant aux deux processus du biomimétisme « Du défi à la biologie (*challenge to biology*), de la biologie au design (*biology to design*) ». Parmi ces architectes (Pedersen Zari 2006) a proposé un cadre pour comprendre le biomimétisme. Une autre architecte (Badarnah 2012) a proposé une méthodologie appelée « *living envelope methodology* ».

II.1.1. Framework pour comprendre l'application du biomimétisme

A travers les deux processus du biomimétisme cités dans le paragraphe précédent, il existe trois niveaux d'émulation des principes de conception qui sont : la forme, le processus et l'écosystème (voir chapitre II .page 8), (Pedersen Zari 2006) dit qu'en étudiant un organisme ou un écosystème, la forme et le processus sont des aspects d'un organisme ou d'un écosystème qui pourraient être imités. L'écosystème pourrait être étudié pour rechercher des aspects naturels spécifiques à imiter. Alors cette chercheuse a proposé un Framework qui redéfinit les différents niveaux précédemment cités, et tente également de clarifier le potentiel du biomimétisme.

Ce Framework issu du biomimétisme, permet aux concepteurs qui souhaitent l'utiliser comme méthodologie de conception, de générer un environnement bâti durable et efficace. La première partie stipule qu'en examinant les technologies biomimétiques existantes, il

est évident qu'il existe trois niveaux de mimétisme : l'organisme (*Organism*), le comportement (*Behaviour*) et l'écosystème (*Ecosystem*).

- Le premier niveau se réfère à un organisme spécifique comme une plante ou un animal et peut impliquer l'émulation d'une partie ou de l'organisme entier.
- Le deuxième niveau se réfère à l'émulation d'un comportement c'est à dire la façon dont un organisme se comporte ou se rapporte à un contexte plus large.
- Le troisième niveau est l'émulation d'écosystèmes entiers et les principes communs qui leurs permettent de fonctionner avec succès.

Pedersen Zari (2006) stipule que dans chacun de ces niveaux, cinq autres dimensions possibles du biomimétisme existent. Le design peut être biomimétique par exemple : à quoi il ressemble (*forme*), de quoi il est fait (*matériau*), comment il est fait (*construction*), comment il fonctionne (*processus*), ou ce dont il est capable d'accomplir (*fonction*). Les différences entre chaque dimension de biomimétisme sont décrites dans un tableau et sont illustrées en examinant comment les différents aspects d'une termite ou d'un écosystème pourraient être imités (**Tab.II.1**).

Level of Biomimicry		Example - A building that mimics termites:
Organism level (Mimicry of a specific organism)	<i>form</i>	The building looks like a termite.
	<i>material</i>	The building is made from the same material as a termite; a material that mimics termite exoskeleton / skin for example.
	<i>construction</i>	The building is made in the same way as a termite; it goes through various growth cycles for example.
	<i>process</i>	The building works in the same way as an individual termite; it produces hydrogen efficiently through meta-genomics for example.
	<i>function</i>	The building functions like a termite in a larger context; it recycles cellulose waste and creates soil for example.
Behaviour level (Mimicry of how an organism behaves or relates to its larger context)	<i>form</i>	The building looks like it was made by a termite; a replica of a termite mound for example.
	<i>material</i>	The building is made from the same materials that a termite builds with; using digested fine soil as the primary material for example.
	<i>construction</i>	The building is made in the same way that a termite would build in; piling earth in certain places at certain times for example.
	<i>process</i>	The building works in the same way as a termite mound would; by careful orientation, shape, materials selection and natural ventilation for example, or it mimics how termites work together.
	<i>function</i>	The building functions in the same way that it would if made by termites; internal conditions are regulated to be optimal and thermally stable for example (fig. 6). It may also function in the same way that a termite mound does in a larger context.
Ecosystem level (Mimicry of an ecosystem)	<i>form</i>	The building looks like an ecosystem (a termite would live in).
	<i>material</i>	The building is made from the same kind of materials that (a termite) ecosystem is made of; it uses naturally occurring common compounds, and water as the primary chemical medium for example.
	<i>construction</i>	The building is assembled in the same way as a (termite) ecosystem; principles of succession and increasing complexity over time are used for example.
	<i>process</i>	The building works in the same way as a (termite) ecosystem; it captures and converts energy from the sun, and stores water for example.
	<i>function</i>	The building is able to function in the same way that a (termite) ecosystem would and forms part of a complex system by utilising the relationships between processes; it is able to participate in the hydrological, carbon, nitrogen cycles etc in a similar way to an ecosystem for example.

Tab.II.1 Framework pour l'application du biomimétisme (source: Pedersen Zari 2007)

Certains types de biomimétisme se chevauchent et ne sont pas mutuellement exclusifs. Par exemple, une série de systèmes capables d'interagir comme un écosystème. Les détails individuels d'un tel système, sont basés sur un organisme unique ou un comportement mimétique, tout comme un écosystème biologique est constitué de relations complexes entre une multitude d'organismes uniques (Pedersen Zari 2006).

II.1. 1.1 Niveau 1 : l'organisme (Organism level)

L'imitation du dendroctone du désert namibien *Stenocara* (Garrod et al. 2007), capable de capturer l'humidité des brouillards qui se déplacent rapidement dans le désert en inclinant son corps dans le vent, constitue un bon exemple de ce niveau.

Des gouttelettes se forment sur la surface (rugueuse et alternativement hydrophile - hydrophobe) du dos et des ailes de l'insecte et roulent dans sa bouche. Matthew Parkes Architecte de KSS a procédé à l'imitation de ce modèle avec sa conception proposée « fog-catcher » pour le centre hydrologique de l'Université de Namibie (Pedersen Zari 2006 ; Parker & Lawrence 2001) (**Fig.II.2**).

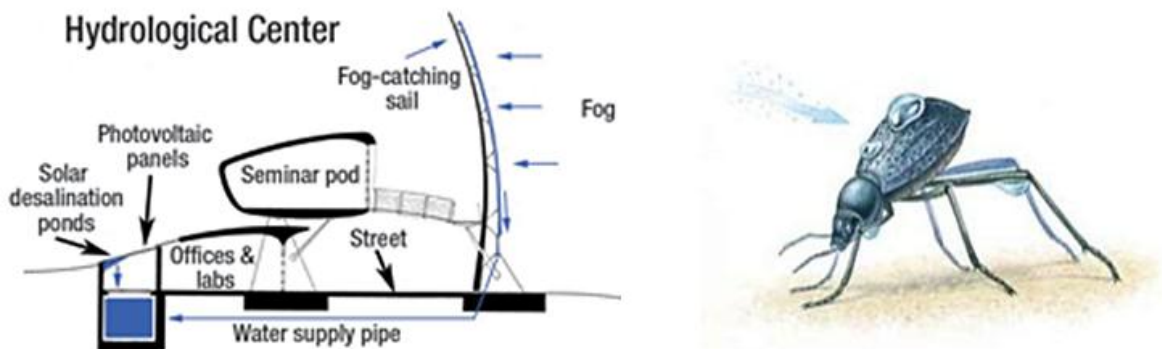


Fig.II.2 « fog-catcher » de Matthew Parkes pour le Centre hydrologique de l'Université de Namibie (Source : Google images) et l'insecte *Stenocara* (source: asknature.com)

(Pedersen Zari 2006) souligne que le biomimétisme devient une technologie ajoutée aux bâtiments, plutôt que d'y être intégrée, en particulier si les concepteurs ont peu de connaissances biologiques et ne collaborent pas avec des biologistes ou des écologistes lors des premières phases de conception. Bien que cette méthode puisse donner lieu à des technologies ou des matériaux de construction nouveaux et novateurs. Néanmoins, les méthodes visant à accroître la durabilité ne sont pas encore explorées.

II.1. 1.2 Niveau 2 : le comportement (Behaviour level)

Le niveau 2 concerne le comportement de l'organisme dans son écosystème. Les humains peuvent acquérir des connaissances, s'inspirant du comportement des autres espèces pour s'adapter à leur environnement tout en respectant l'écosystème (Pedersen Zari 2006).

Le castor canadien modifie des paysages entiers grâce à des activités de barrage et de recherche de nourriture en créant des zones humides. Dans ce processus, il augmente la rétention des éléments nutritifs, la diversité végétale et animale qui contribuent à rendre l'écosystème plus résilient aux perturbations (Pedersen Zari 2006; Rosemond & Anderson 2003)(Fig.II.3).



Fig.II.3 Castor nord-américain et son barrage caractéristique (Source : <http://www.wikiwand.com>)

(Pedersen Zari 2006) dit que le mimétisme au niveau du comportement exige que des décisions éthiques soient prises quant à la pertinence de ce qui est imité pour le contexte humain. Les organismes ne présentent pas forcément des comportements qui conviennent à l'homme pour les imiter. Par exemple, imiter le comportement des termites pourrait être approprié pour la création de bâtiments thermiquement confortables à régulation passive. Imiter la structure sociale des colonies de termites ne serait toutefois pas approprié si les droits humains universels sont considérés. Il peut être plus approprié d'imiter des systèmes entiers plutôt que des organismes uniques à cet égard.

II.1. 1.3 Niveau 3 : l'écosystème (ecosystem level)

Mimer les écosystèmes présente une partie intégrante du biomimétisme, vu que cela offre des plans de vie, des recettes et des stratégies éco systémiques, permettant de trouver des solutions durables aux humains (Biomimicry 3.8 2013).

Le terme *éco mimicry* a été utilisé par plusieurs chercheurs pour décrire l'imitation des écosystèmes dans la conception (Russell et al. 2006; Marshall 2007; Pedersen Zari 2006). Ce niveau de biomimétisme peut être utilisé conjointement avec les autres niveaux (organisme et comportement).

Il est également possible d'incorporer des méthodes de construction durables existantes qui ne sont pas spécifiquement biomimétiques. Certains projets proposent des aspects d'une telle approche : le projet Lloyd Crossing proposé pour la ville de Portland, Oregon aux USA, réalisé par une équipe de conception comprenant Mithūn Architects et GreenWorks Landscape Architecture Consultants. Dans ce projet, l'écosystème existant a servi pour le développement du projet. Cette approche appelée « *Pre-development Metrics™* » fixe des objectifs pour la performance écologique du projet sur une longue période de temps (Pedersen Zari 2006) (**Fig.II.4**).



Fig.II.4 Project Lloyd Crossing, Portland, Oregon USA

(Source : <http://www.aiatopten.org>)

Un autre avantage d'une approche de conception biomimétique basée sur l'écosystème, est qu'il est applicable à une gamme d'échelles temporelles et spatiales (Reap et al. 2016) et peut servir de référence pour une conception vraiment durable ou même régénératrice pour un lieu spécifique tel que démontré par le projet Lloyd Crossing (Pedersen Zari 2006).

II.1.2. Méthodologie de l'enveloppe vivante

Au cours de sa recherche doctorale intitulée « *Towards the LIVING envelope Biomimetics for building envelope adaptation* », en se référant au processus de biomimétisme « Du défi à la biologie (*challenge to biology*) », (Badarnah 2012) a

développé une nouvelle méthodologie structurée pour la génération des concepts d'enveloppes de bâtiment adaptatives. Cette méthodologie proposée comprend plusieurs phases et sous-phases, qui sont présentées dans des organigrammes, des tableaux et des figures uniques. Elles fournissent un outil convivial et sélectif pour faciliter les transitions entre les différentes phases du processus de conception tout en accordant une attention particulière aux aspects biologiques, à la représentation de l'information, à l'identification et à l'abstraction des principes de design, ainsi qu'à leur sélection (**Fig.II.5**).

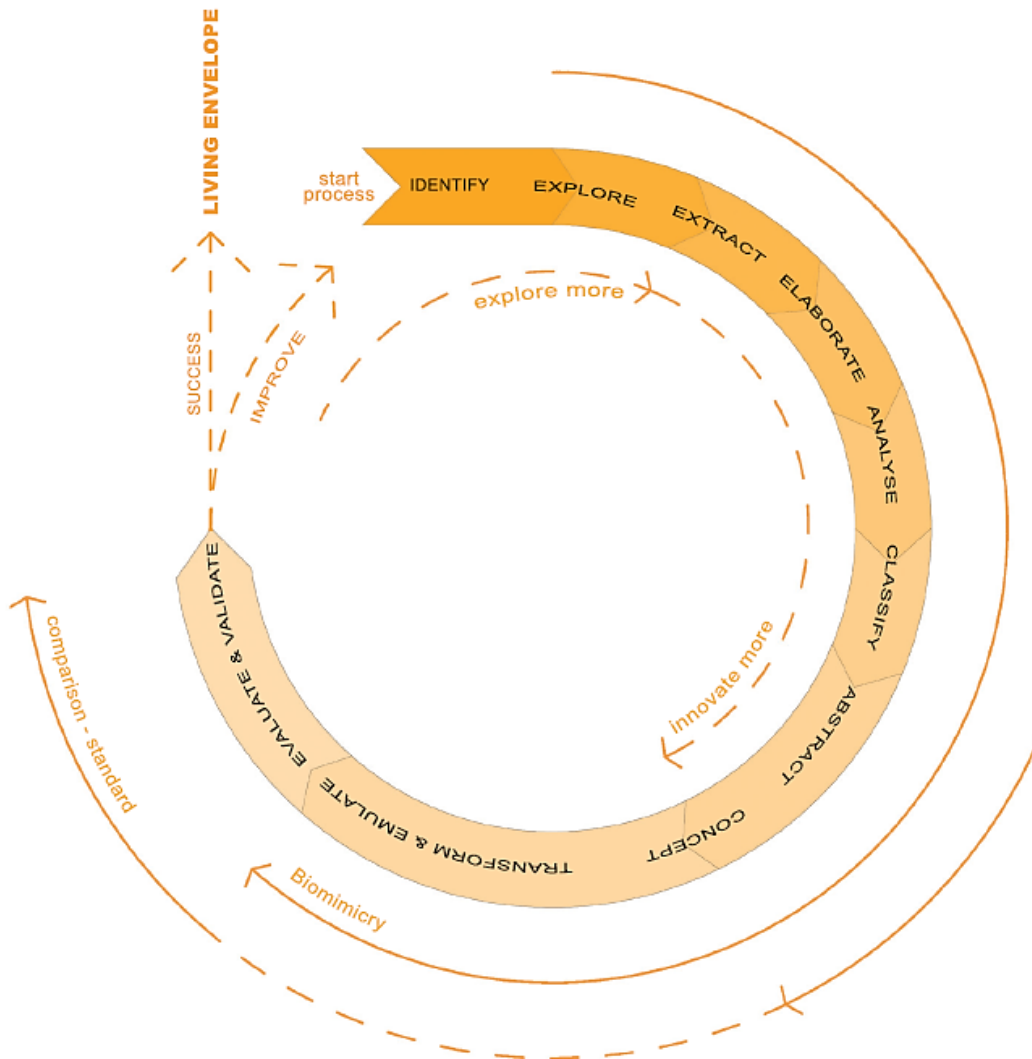


Fig.II.5 Charte méthodologique de l'enveloppe vivante (Source : Badarnah 2012)

Cette méthodologie de conception a été définie en fonction de deux phases principales: la phase de la conception préliminaire et la phase d'émulation. Cependant (Badarnah 2012) a souligné que les architectes rencontrent des difficultés pour étudier les stratégies de la nature et y extraire leurs grands principes ainsi que pour établir un concept de design. Elle a également remarqué que la transformation des stratégies disponibles dans la nature en

solutions techniques pour la construction d'enveloppes, est un processus multidisciplinaire compliqué. Cela devient encore plus compliqué, et engendre des conflits qui surviennent, lorsqu'on intègre un certain nombre de stratégies, de différents organismes pour optimiser les solutions. Badarnah (2012) propose également une méthodologie étendue qui vise la phase de conception préliminaire.

Cette phase traite essentiellement le processus d'exploration ainsi que l'investigation des organismes, et conduit l'architecte à un concept de design inspiré de la nature. Pour développer une enveloppe vivante, un certain nombre de phases doit être réalisé : identifier les défis requis, explorer la nature pour des fonctions similaires, extraire des principes, construire des taxonomies, faire des brainstormings, évaluer des idées et transposer les meilleures dans les conceptions, construire des modèles physiques, les évaluer et les valider, et déterminer s'il y a une amélioration suffisante (succès) ou si une amélioration supplémentaire est nécessaire (recommencer). La charte des différentes phases de la méthodologie proposée, a été illustrée dans la figure ci-dessus (**Fig.II.5**).

II.1.2.1 Modèle d'exploration de la nature :

Le modèle d'exploration représente l'information biologique obtenue pour chaque défi à quatre niveaux hiérarchiques (**Fig.II.6**). Au lieu de catégoriser d'abord les entités biologiques, l'auteur vise à créer un modèle d'exploration qui représente les aspects fonctionnels au premier niveau, les processus pertinents au second niveau et les facteurs d'influence au troisième niveau. Dans ce modèle, les entités biologiques (*pinnacles*¹) sont présentées au quatrième niveau et représentent un exemple pour une fonction, un processus et un facteur spécifiques. Ce modèle hiérarchique est similaire à la taxonomie des fonctions de (*Biomimicry taxonomy*) de biomimicry 3.8 (voir chapitre I, page 18).

¹ Le mot *pinnacles* est défini dans cette méthodologie comme un organisme ou un système représentatif de la nature pour une stratégie d'adaptation particulière.

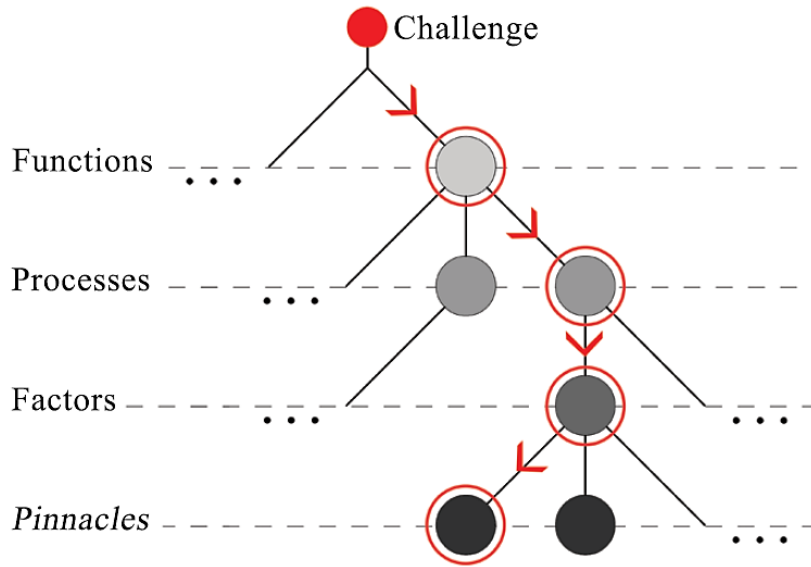


Fig.II.6 Quatre niveaux hiérarchiques représentant les différentes entités et leur connexion (Source : Badarnah 2012)

Selon Badarnah (2012), la catégorisation et l'organisation de l'information biophysique obtenue représentent un processus difficile, où les limites sont définies et une approche systématique est recherchée. Premièrement, le nombre de niveaux est limité à quatre ; deuxièmement, les entités de chaque niveau sont variables sauf pour le niveau fonction qui reste fixé. Cette fixation est importante pour augmenter l'efficacité du processus de conception initial.

II.1.2.2 Générer le concept de design

Afin de générer un concept de design, Badarnah (2012) a divisé la phase de conception préliminaire de sa méthodologie, en trois sous-phases: une phase d'exploration générale (modèle d'exploration), une phase d'analyse et d'abstraction des *pinnacles* et une phase de détermination des fonctionnalités dominantes pour un concept de design optimal. Un certain nombre d'organismes ou systèmes sélectionnés, appelés *pinnacles*, est étudié. Ces *pinnacles* sont des organismes considérés parmi les scientifiques comme ayant des stratégies d'adaptation spéciales, qui sont fournies pour démontrer l'extraction de leurs stratégies.

- La phase d'exploration : consiste à Construire une représentation fonctionnelle des connaissances en biophysique basée sur des hiérarchies (modèle d'exploration) (**Fig.II.7**), ou utiliser un modèle existant pertinent pour le défi.

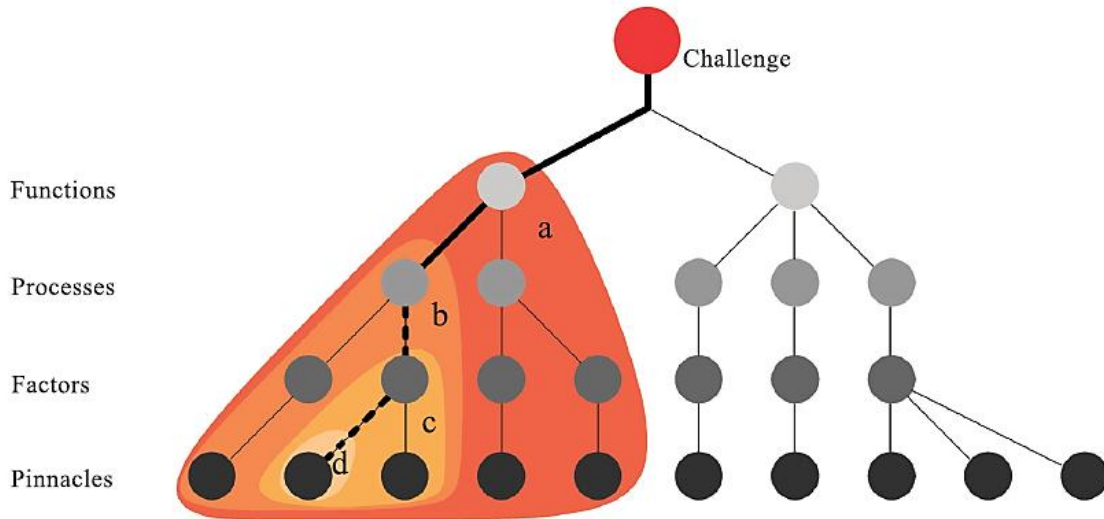


Fig.II.7 Identification des *pinnacles* en naviguant à travers le modèle d'exploration, un chemin de fonctions, processus, facteurs et pinacles se distingue par le zonage
(Source : Badarnah 2012)

- La phase d'analyse et d'abstraction des *pinnacles* : se matérialise par l'identification de la stratégie, la mise de l'accent sur le mécanisme, l'extraction du principe de design et l'indication de la fonctionnalité principale (**Fig.II.8**).



Fig.II.8 Analyse des *pinnacles* (Source : Badarnah 2012)

- La phase de détermination des fonctionnalités dominantes : se réalise en construisant la matrice des différentes fonctionnalités des *pinnacles* étudiés (*Pinnacle analysing matrix*), et en distinguant les fonctionnalités dominantes (*imaginary pinnacles*), puis en appliquant ces pinacles dans la matrice des chemins de design (*design path matrix*), pour enfin distinguer les caractéristiques dominantes et les relations pour une conception optimale.

Pour générer des pinacles imaginaires (surligner en rouge, vert et bleu (Fig.II.9) pour des fonctions spécifiques (F1 à F3), ayant la caractéristique dominante de chaque catégorie (colonne verticale) est illustré par l'exemple ci-dessous.

Challenge	Pinnacles	Processes			Flow		Adaptation		Scale				Environmental context (from Table 3.4)					Morphological features					Material features			Other features												
		Diffusion	Natural Convection	Etc ...	Active	Passive	Physiological	Morphological	Behavioural	Nano	Micro	Meso	Macro	A	B	C	D	E	Q	Funnels	Mounds	Fractals	Valves	Chimney	Conduits	Etc ...	Porous	Elastic	Etc ...	Counter-current flow	Contracting	Enlarged surface area	Unidirectional flow	Etc ...				
	P1	X			X		X		X				X	X	X	X			X				X		X													
	P2	X			X		X		X				X						X						X				X		X							
	P3		X		X		X		X				X	X	X	X				X					X													
Function 1	(imaginary pinnacle)	X			X		X		X				X						X					X				X		X								
	P4		X		X		X		X				X	X						X					X													
	P5	X			X		X		X				X		X					X	X			X		X												
	P6	X			X		X	X	X				X	X						X				X		X												
Function 2	(imaginary pinnacle)	X			X		X		X				X							X				X		X												
	P4		X		X		X		X				X		X					X				X		X												
	P5	X			X		X		X				X		X				X	X				X		X												
	P6	X			X		X		X				X		X					X				X		X												
Function 3	(imaginary pinnacle)	X			X		X		X				X						X				X		X													

Fig.II.9 Matrice analyse des *pinacles* (Source : Badarnah 2012)

Chaque colonne verticale représente une catégorie et ses différentes caractéristiques. Les lignes rouges, vertes et bleues indiquent le chemin des pinacles imaginaires. Les nœuds orange désignent la caractéristique dominante de chaque catégorie, qui représente le chemin du concept de design (Fig.II.10).

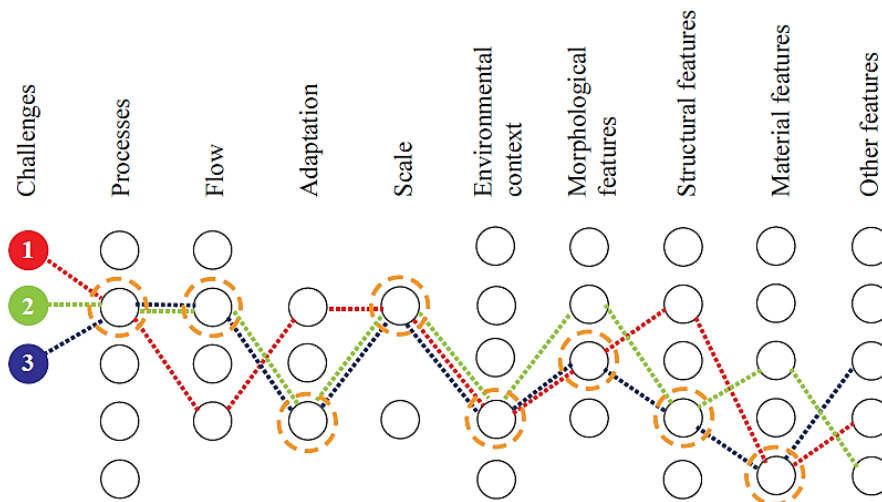


Fig.II.10 Matrice des chemins de design (Source : Badarnah 2012)

II.1.2.3 Application Méthodologique de l'enveloppe vivante

En se basant sur la méthodologie de l'enveloppe vivante, Badarnah (2012) explore les stratégies de régulation de l'air dans la nature, pour les appliquer dans les systèmes de ventilation des enveloppes de bâtiments. La régulation de l'air dans la nature se base sur deux fonctions initiales: l'échange et le mouvement. Chaque fonction intègre différents processus (Fig.II.11).

Le modèle d'exploration est classé selon quatre niveaux. Au premier niveau, les aspects fonctionnels sont identifiés: l'échange d'air et le mouvement de l'air. Le deuxième niveau d'exploration distingue les processus qui manipulent les aspects fonctionnels identifiés, par ex. convection naturelle. Les facteurs influents affectant les processus distingués sont explorés au troisième niveau, par ex. gradient de température. Ces facteurs conduisent au quatrième niveau d'exploration, où les pinacles représentent une fonction particulière, par exemple : La termitière pour le mouvement de l'air.

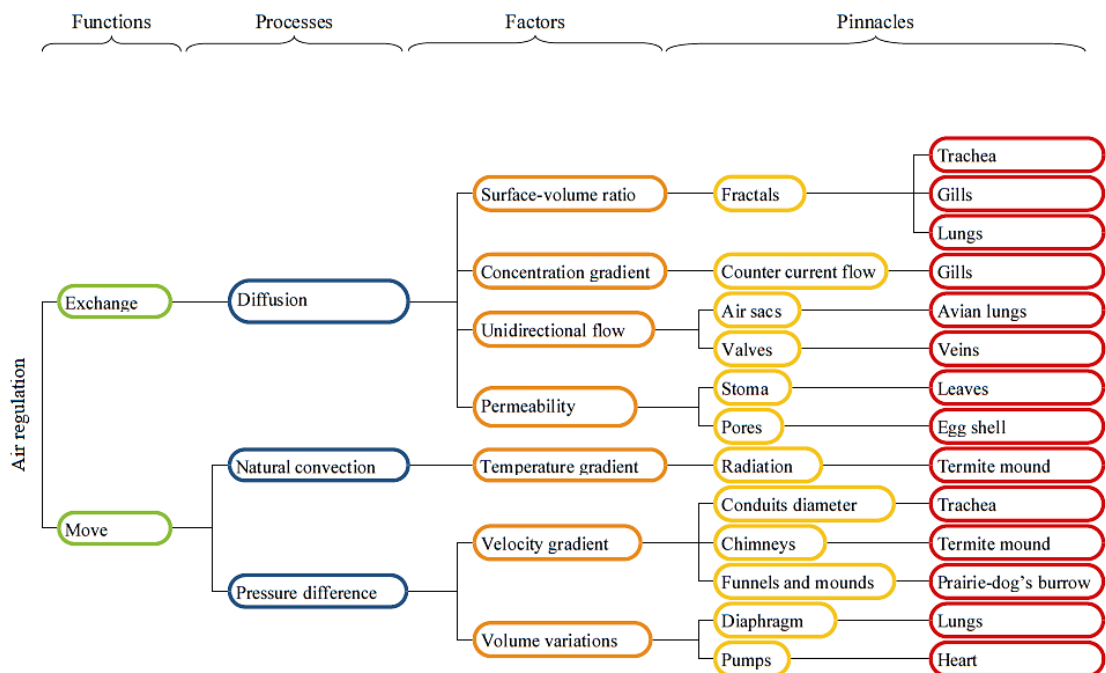


Fig.II.11 Modèle d'exploration de la régulation de l'air (Source : Badarnah 2012)

En pratique, un défi détaillé filtrera la plupart des pinacles non pertinents ici, puisqu'aucun souci technique n'est présent. La sélection finale des pinacles, parmi ceux qui sont pertinents au défi, a été effectuée arbitrairement (Badarnah 2012) (Fig.II.12).

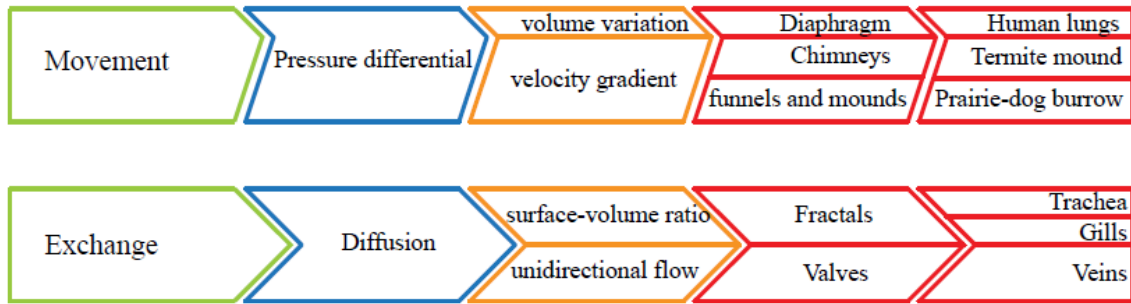


Fig.II.12 Extraction des pinacles pertinents (Source : Badarnah 2012)

Le défi de la conception a permis d'identifier plusieurs pinacles du modèle d'exploration pour la régulation de l'air: la termitière, le terrier des chiens de prairie et le poumon humain pour le mouvement de l'air, la trachée et les valves pour l'échange d'air (Fig.II.13).

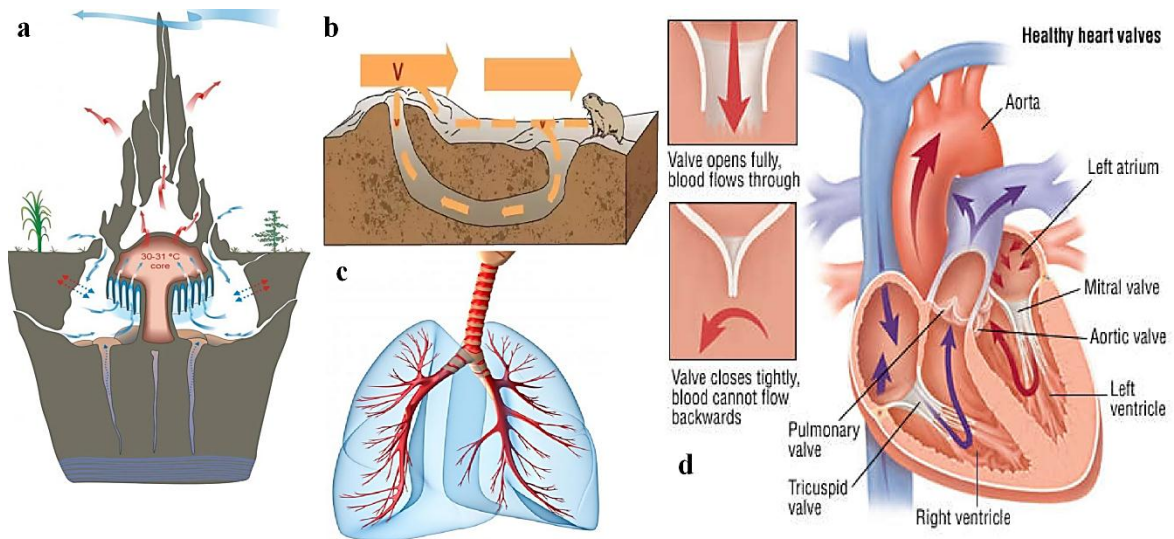


Fig.II.13 (a) Termitière (source : www.architectureoflife.net), (b) Terrier du chien de prairie (source : www.quora.com), (c) trachée et poumon humain (source : www.wisegeek.com), (d) valves du cœur (source : www.drugs.com)

Les pinacles sont explorés, sur la base de la littérature pertinente de la biologie, pour décrire les différentes structures morphologiques et leurs caractéristiques de processus d'échange de gaz pour le défi de conception actuel (Badarnah 2012). Le résumé de l'analyse est présenté dans les deux matrices (*Pinnacle analysing matrix*) (Fig.II.14) et (*design path matrix*) (Fig.II.15)

Challenges	Pinnacles	Processes			Flow			Adaptation			Scale			Environmental context			Morphological features		Structural features		Material features		Other features												
		Diffusion	Natural Convection	Pressure difference	Active	Passive	Physiological	Morphological	Behavioural	Nano	Micro	Meso	Macro	Arid	Tropical	Moderate	Continental	Polar	Aquatic	Funnels	Mounds	Fractals	Valves	Chimney	Conduits	Diaphragm	Porous	Elastic	Conductive	Counter-current flow	Contracting	Expanding	Unidirectional flow	Enlarged surface area	
Exchange	Trachea	X			X		X		X				X	X	X	X				X			X												
	Gills	X			X		X		X								X				X											X		X	
	Veins	X			X		X		X				X	X	X	X						X					X						X		
	<i>Imaginary pinnacle</i>	X			X		X		X				X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Movement	Termite mound	X	X		X		X		X				X	X								X			X	X									
	Burrow of prairie-dog	X	X		X		X		X				X	X	X	X				X	X		X										X		
	Human lungs	X	X		X		X		X				X	X	X	X	X						X	X		X				X	X				
	<i>Imaginary pinnacle</i>	X	X		X		X		X				X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Fig.II.14 Matrice d'analyse des pinacles de la régulation de l'air (Source : Badarnah 2012)

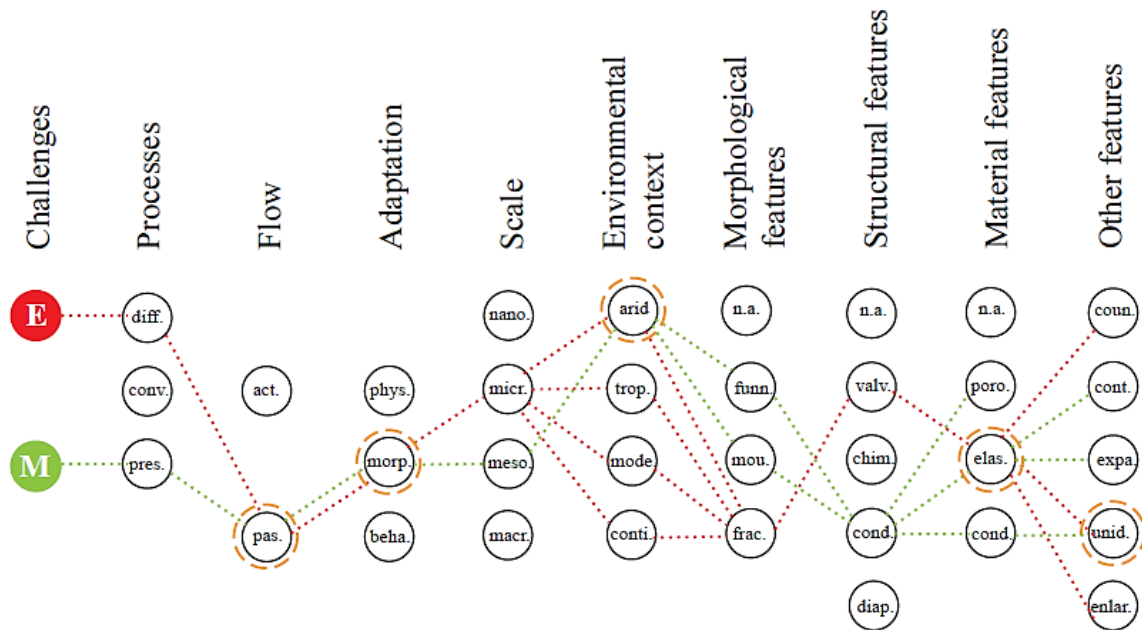


Fig.II.15 Matrice des chemins de design de la régulation de l'air (Source : Badarnah 2012)

La traduction graphique abstraite incorpore les diverses propriétés extraites de l'étape précédente de la matrice d'analyse des pinacles et la matrice des chemins design. Une enveloppe de ventilation hybride bio inspirée devrait intégrer plusieurs principes.

La stratégie de ventilation passive du terrier du chien de prairie, où les monticules sur la surface du sol ont généré une faible pression. La traduction graphique de ceci pour une enveloppe de ventilation basée sur le principe de Bernoulli², où de nombreuses ouvertures dépassent le toit et génèrent une basse pression expulsant l'air. Ces ouvertures sont reliées à des passages d'air avec une morphologie spécifique analogue à la trachée. L'air chaud ascendant (convection naturelle) à l'intérieur de l'espace est aspiré à l'intérieur des passages d'air en raison de la faible pression et il est dirigé vers l'extérieur. L'air frais est introduit à l'intérieur, dans la partie inférieure de l'enveloppe, à travers un milieu perméable. Ce milieu permet à l'air de se diffuser à l'intérieur de manière passive et, en cas de circulation d'air insuffisante, les chambres de pompage d'air situées dans ce milieu sont activées pour générer un écoulement unidirectionnel (Badarnah 2012) (Fig.II.16).

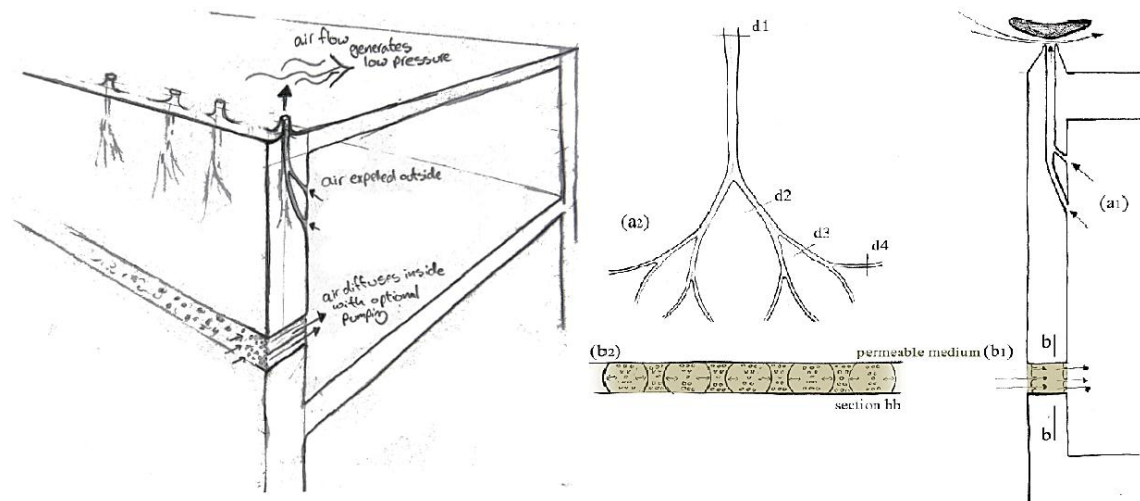


Fig.II.16 Esquisse montrant le principe de l'échange d'air à travers l'enveloppe vivante (Source : Badarnah 2012)

La cheminée a quatre générations de branches de diamètres (d1-d4) différents basés sur la loi de Hess-Murray³ (Fig.II.16). Cette configuration morphologique augmentera la quantité d'air expulsé à la suite de la force d'aspiration, dont l'ouverture supérieure est exposée à l'écoulement du vent. Le milieu perméable est constitué d'un ensemble de chambres séparées par des membranes élastiques analogues au diaphragme et de membranes perméables pour permettre le flux d'air.

²Le principe de Bernoulli : Selon ce principe, plus la vitesse d'un fluide augmente, plus sa pression diminue (et à l'inverse, plus sa vitesse diminue, plus sa pression est importante).

³La loi de Hess-Murray : le rapport entre le diamètre (d) d'une branche mère et les diamètres (d') et (d'') des branches filles est : $d^3 = d'^3 + d''^3$.

La membrane perméable, constituée de vannes intégrées, permet un écoulement unidirectionnel lorsque les chambres perméables sont activées. Les diaphragmes changent de concave en convexe et ainsi de suite, entraînant une expansion et une contraction. A l'état expansé, une basse pression est générée à l'intérieur de la chambre, ce qui entraîne l'aspiration d'air à travers les membranes perméables externes, qui ferme les vannes des membranes perméables intérieures et ouvre les vannes des membranes perméables externes (Badarnah 2012) (**Fig.II.17**).

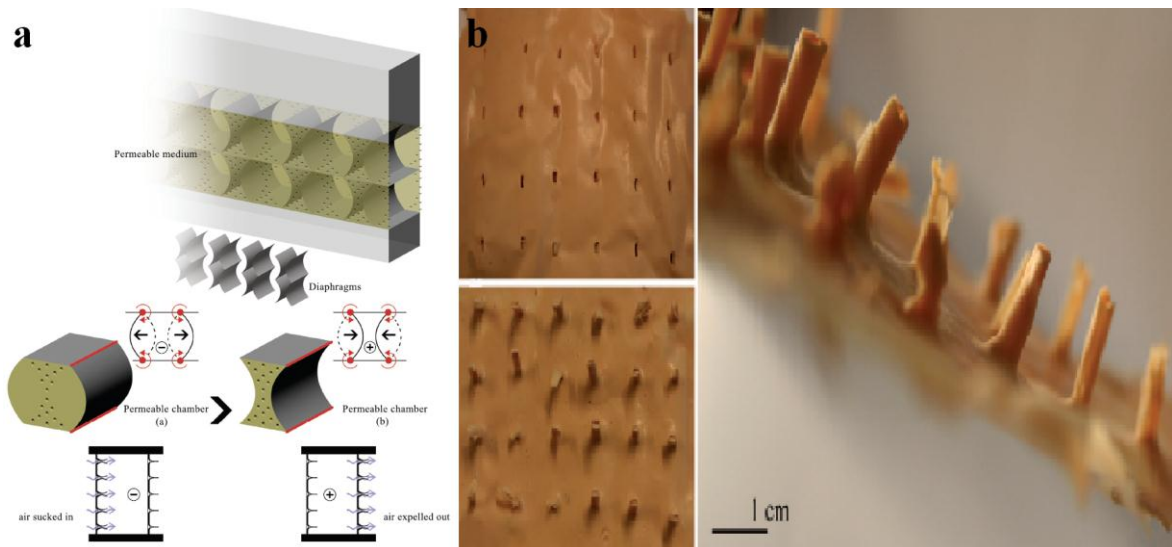


Fig.II.17 (a) Illustration tridimensionnelle du fonctionnement du système, (b) Membrane perméable avec valves intégrés faite en silicone gel (Source : Badarnah 2012)

Les simulations effectuées dans un système similaire permettent d'évaluer l'efficacité de la ventilation hybride. Comparé à un système de ventilation standard, le proposé peut atteindre l'âge moyen de l'air (MAA : Mean Air Age), tout en offrant un meilleur mélange et mouvement de l'air, ainsi que des vitesses d'air moyennes plus basses qui peuvent améliorer le confort des occupants. De plus, le système passif proposé offre une ventilation sans coût d'énergie, bien qu'il dépende en grande partie du climat extérieur (Badarnah 2012).

II.2. Exemples de biomimétisme dans l'architecture :

L'exploration des recherches précédentes relatives à la pratique du biomimétisme dans le domaine de l'architecture et l'urbanisme, nous montre que la nature fournit des modèles pertinents à émuler pour une architecture durable et résiliente avec son environnement. Certains architectes chercheurs ont déjà prouvé l'impact du biomimétisme dans la réalisation de leurs projets.

II.2.1 Eastgate building

L'exemple le plus souvent cité de biomimétisme architectural est conçu par l'architecte zimbabwéen Mick Pearce : le bâtiment Eastgate Building réalisé à Harare (**Fig.II.18**).



Fig.II.18 Différentes vues du bâtiment Eastgate Building à Harare

(Source : www.mickpearce.com)

Le bâtiment a été inspiré de la termitière, un système vivant autorégulateur dans lequel le bâtiment est devenu une extension du métabolisme des termites individuels. Une espèce de termites renferme des champignons qui ne peuvent survivre dans le terme qu'à des conditions environnementales définies (température de 31 °C et humidité relative précise) et qui doivent être nourris avec la biomasse.

Ils sont également protégés par un niveau élevé de CO₂ qui empêche l'invasion par d'autres espèces de champignons. Les termites fournissent ces conditions aux

champignons qui, en retour, servent de nourriture aux termites. Le terme et les champignons forment ainsi une symbiose.

Ce que nous voyons au-dessus du sol est un système de respiration qui est conduit par le cycle jour/nuit interconnecté avec les activités de ces animaux sociaux. La différence de température entre le cœur de ce métabolisme et la température de nuit externe peut atteindre 25 degrés. Cela provoque l'échappement de l'air évacué vers le haut de la pile qui attire simultanément de l'air frais riche en oxygène. Plus vite ils travaillent la nuit, plus le différentiel est important et donc plus il y a d'échange de CO₂ à O₂.

Ce bâtiment est un poumon, un système digestif et donc une extension du métabolisme des termites et des champignons (Pearce 2016) (Fig.II.19). En s'inspirant de se fascinant écosystème, Pearce déclare que le modèle utilisé consiste à concevoir un écosystème pas une "machine à vivre".

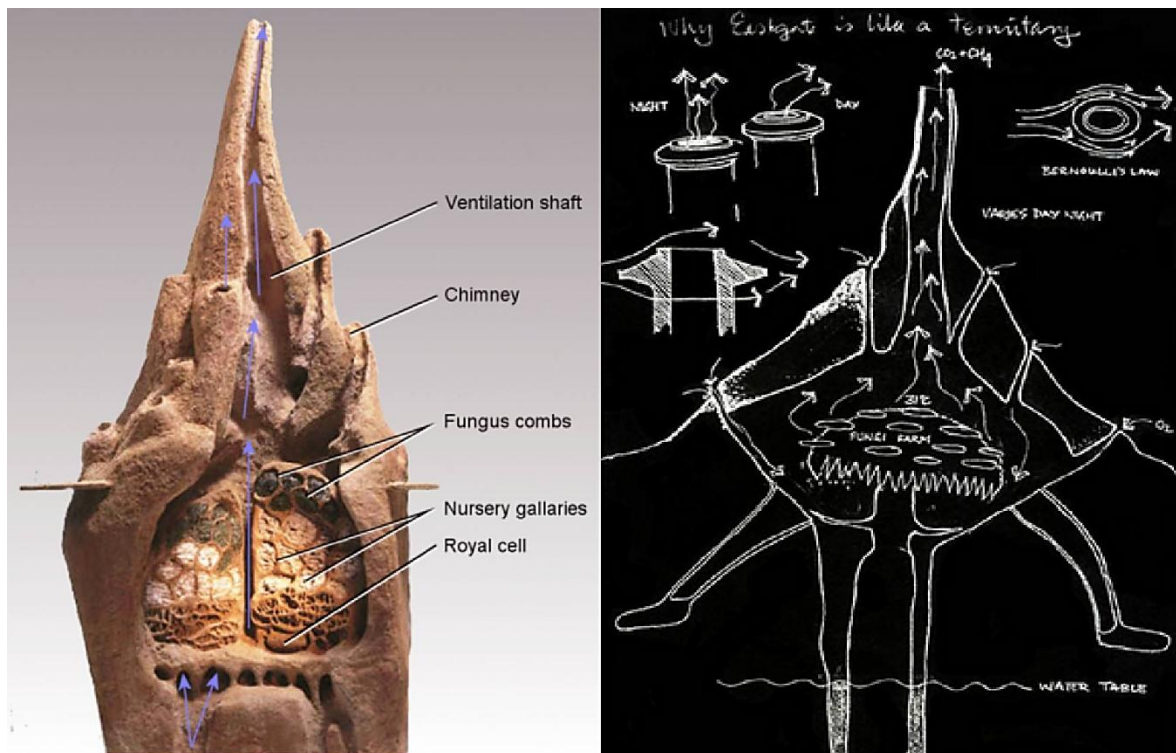


Fig.II.19 A gauche : illustration du fonctionnement des termitières, à droite une présentation graphique des principes de conception tirés des termitières (source : www.mickpearce.com)

Eastgate comprend deux bâtiments côte à côte reliés entre eux par une verrière. En contrebas, Le long du fait du toit en tuiles rouges se trouvent 48 entonnoirs en briques surmontant des cheminées internes qui évacuent l'air sortant des sept étages de bureaux.

Sous les étages de bureaux, se trouve une salle de machine en mezzanine où 32 rangées de ventilateurs à volume faible et élevés aspirant l'air de l'atrium à travers des filtres.

Cet air est poussé vers le haut à travers la section d'alimentation des conduits verticaux dans le noyau central de chaque aile de bureau. Depuis le conduit, l'air est acheminé par les planchers creux jusqu'aux grilles de niveau bas sous les fenêtres. Comme il est chauffé par l'activité humaine, il s'élève au plafond de la voûte où il est aspiré par les orifices d'échappement à la fin de chaque voûte à travers un système de conduits de maçonnerie jusqu'aux sections d'échappement des piles verticales centrales. Dans l'espace des bureaux, les plafonds voûtés en béton sont conçus pour refléter la lumière vers le bas et absorber la chaleur : le plafond sandwich voûté et le plancher voûté au-dessus servent d'échangeur de chaleur.

L'air froid de la nuit qui traverse le vide orné de dents de béton enlève la chaleur de la veille et le jour suivant, l'air extérieur chaud est refroidi d'environ 3 ° C par les mêmes dents avant d'entrer dans la pièce. Les ventilateurs à grand volume fonctionnent la nuit pour donner dix changements d'air par heure et les ventilateurs à faible volume fonctionnent pendant la journée, ce qui donne deux changements d'air par heure. En programmant le passage de vitesses d'air de faibles à élevées, l'utilisation optimale de l'oscillation diurne de la biosphère est assurée (Pearce 2016) (**Fig.II.20**).

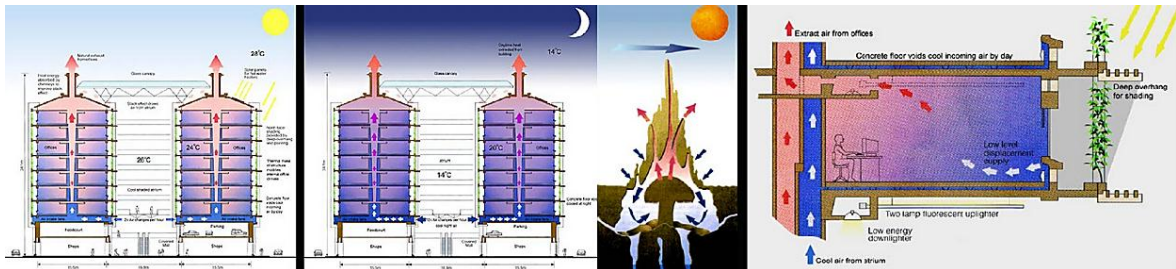


Fig.II.20 Détail de fonctionnement de système de rafraîchissement passif d'Eastgate Building (source : www.mickpearce.com)

Les éléments de pierre en saillie massive, protègent non seulement les petites fenêtres du soleil mais augmentent aussi la surface externe du bâtiment pour améliorer les pertes de chaleur dans l'espace la nuit et minimiser les gains de chaleur le jour. Ceux-ci sont faits de béton préfabriqué, brossé pour exposer l'agrégat de granit qui correspond aux roches recouvertes de lichens dans le paysage sauvage du Zimbabwe. Les saillies horizontales sont interrompues par des colonnes d'anneaux en acier supportant des vignes vertes pour ramener la nature dans la ville (Pearce 2016) (**Fig.II.21**).



Fig.II.21 Façade extérieure d'Eastgate Building avec les auvents massifs

(Source: www.mickpearce.com)

Eastgate utilise 35% d'énergie totale en moins que la consommation moyenne de six autres bâtiments conventionnels avec HVAC complet à Harare. L'économie sur le coût du capital par rapport à la HVAC complète a été de 10% du coût total du bâtiment. Pendant les coupures fréquentes de l'électricité à cause d'un mauvais entretien dans les autres bâtiments, Eastgate continue à fonctionner dans des niveaux de confort (Pearce 2016).

II.2.2 Council House (CH2)

Un autre exemple très inspirant conçu par le même architecte à Melbourne en Australie, c'est le Council House 2 (CH2), un bâtiment administratif multi-récompensé.⁴

⁴ CH2 est le premier à obtenir la meilleure note possible de six étoiles dans l'accréditation environnementale Green Star de l'Australie.

Ce projet a permis de réduire les émissions de CO2 de 87%, la consommation d'électricité de 82%, le gaz de 87% et l'eau de 72%.

Le bâtiment purge l'air vicié la nuit et tire à 100% de l'air frais pendant la journée, il transforme les eaux usées en eaux utilisables. Sa façade suit le mouvement du soleil pour réfléchir ou collecter la chaleur. Ce bâtiment a amélioré l'efficacité du personnel de 4,9% et a payé le coût de ses caractéristiques durables en un peu plus d'une décennie, et cela toujours en exploitant les principes de conception tirés du comportement des termites (Pearce 2016).

Comme Eastgate, CH2 est rafraîchi par une gestion opportune de la différence de température entre l'air nocturne et l'air diurne. Dans ce cas, un côté entier du bâtiment est ouvert pour diriger la prise d'air à travers des volets automatiques en bois recyclé (**Fig.II.22**).



Fig.II.22 Vue sur la façade ouest du bâtiment CH2 avec les volets automatiques en bois

(Source: www.mickpearce.com)

Cette «purge nocturne» évacue l'air plus chaud directement des bureaux et des espaces de vente et refroidit le plafond de béton. L'air chaud monte vers les ouvertures dans le plafond, puis circule à travers les planchers creux vers un arbre vertical et éventuellement vers les événements de toit. Ce traitement passif suffit à garder les espaces confortables pour une partie de la journée. L'air neuf rafraîchi monte à travers les diffuseurs du sol tout au long de la journée (**Fig.II.23**).



Fig.II.23 schéma de fonctionnement des systèmes de rafraîchissement et de renouvellement de l'air et vue intérieure des bureaux du bâtiment CH2 (Source: www.mickpearce.com)

CH2 building utilise également un autre gradient de température, celui de l'eau pour conditionner l'air dans le bâtiment. Tout d'abord, l'eau est «extraite» du réseau des eaux usées de la ville, triplement filtrée, puis utilisée pour les chasses des toilettes , l'arrosage des plantes et le conditionnement de l'air. L'eau à courant alternatif circule à l'extérieur de la structure par cinq «tours de douche» de 15 mètres (**Fig.II.24**).

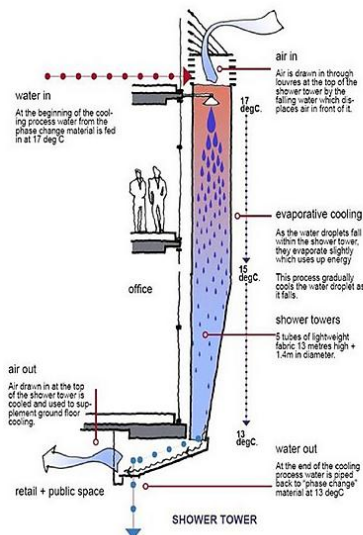


Fig.II.24 Système de rafraîchissement «tours de douche » du bâtiment CH2 (Source: www.mickpearce.com)

Les « tours de douches » créent de l'air rafraîchi par évaporation d'eau pour le diffuser dans les espaces commerciaux inférieurs. L'eau restante est canalisée et stockée au sous-sol pour être refroidie à travers un appareil à changement de phase et distribuée si nécessaire.

L'appareil à changement de phase est composé de 10 000 sphères en acier inoxydable contenant des sels à point de congélation élevée (15 °C) qui sont congelés la nuit puis utilisés pour refroidir l'eau et la distribution pendant la journée. Cette eau est nouvellement refroidie et pompée du sous-sol dans des convecteurs en tuyaux en cuivre plaqués qui déposent de l'air frais plus tard dans la journée lorsque les effets de la purge nocturne se sont dissipés.

Le bâtiment utilise également la masse thermique pour absorber la chaleur, réduisant ainsi les gains de chaleur par un placement stratégique du vitrage. Il produit de l'énergie par des panneaux photovoltaïques et thermiques, en plus d'une centrale de cogénération à gaz. Il héberge également une quantité équivalente de surface de la feuille de la plante sur le site (pour remplacer ce qui a théoriquement été perdu par l'occupation du sol de la parcelle du bâtiment), qui oxygène l'air à l'intérieur et à l'extérieur (**Fig.II.25**).

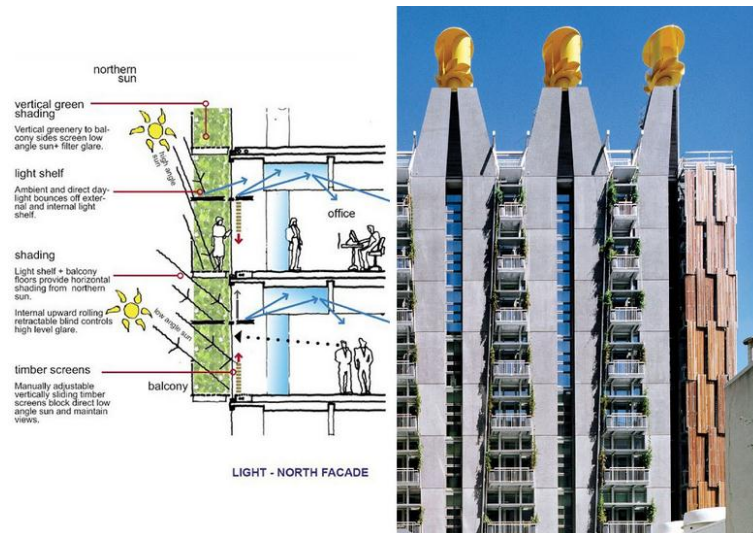


Fig.II.25 Façade Nord du bâtiment CH2 où du béton massive est utilisé
(Source: www.mickpearce.com)

Le bâtiment reçoit un changement d'air frais toutes les demi-heures, et le propriétaire affirme une amélioration de 10,9% de la productivité des travailleurs comme le plus grand retour sur investissement du système de ventilation de 11 millions de dollars (australien). Cette augmentation de la productivité est estimée à plus de 2 millions de dollars (AUD) par an en termes de temps du personnel et signifie que l'investissement sera probablement amorti dans 5-6 ans (Pearce 2016).

Conclusion :

Le biomimétisme est un domaine nouveau dont les frontières sont encore inexplorées, mais pour les concepteurs, la nature a toujours constitué une véritable base de réflexion. S'inspirer de la nature pour faire des conceptions écologiques n'est pas un fait nouveau et l'attrait pour le biomimétisme architectural s'inscrit non seulement dans le courant de l'architecture durable mais aussi dans la considération des êtres vivants comme sources d'enseignements en matière de conception.

A travers l'exploration des travaux traitant du biomimétisme en architecture, ce domaine est une véritable source d'inspiration en matière de gestion hyper efficace des ressources et d'économie. Dans le prochain chapitre, l'application du biomimétisme en architecture, nous fera découvrir de nombreuses illustrations de modèles d'enveloppes adaptatives inspirées de la nature qui s'appliquent aux bâtiments et aux compartiments de bâtiments.

Aperçu sur les enveloppes adaptatives

Chapitre III

Introduction

Le rôle principal des enveloppes des bâtiments est de nous protéger des aléas du climat environnant, mais également être en mesure de fournir un bon confort. Tout au long de l'histoire, des solutions passives telles que la protection solaire, la masse thermique, l'ombrage et la ventilation naturelle... pouvaient contribuer à la création d'un certain confort. Le bâtiment lui-même faisait face aux conditions météorologiques inconstantes (Modin 2014) sachant que l'enveloppe du bâtiment représente l'interface entre son environnement extérieur non contrôlé et son intérieur qui est contrôlé pour répondre aux exigences de ses occupants (Braun 2008).

III.1. Évolution de l'enveloppe du bâtiment

Historiquement, les bâtiments n'ont pas la même forme ni l'apparence dans différents endroits du monde. La fonction de l'enveloppe du bâtiment est de protéger les habitants du climat extérieur environnant, mais elle est conçue de la même manière quel que soit sa situation dans le monde.

Depuis très longtemps, les peuples ont construit des abris qui s'adaptent à leur climat et ont appris à utiliser des conceptions qui améliorent la performance de leurs abris, souvent simples et adaptatifs (Modin 2008). L'adaptation au climat est l'une des principales raisons qui marque la différence de l'architecture d'une région climatique par rapport à une autre (Lechner 2014). Dans les climats chauds et secs où le rayonnement solaire est très intense, l'architecture (**Fig.III.1**) est caractérisée par :

- Un plan de masse très dense et compact.
- Des ruelles étroites et sinueuses.
- Des murs et des toits massifs utilisés pour le déphasage thermique.
- De petites fenêtres pour l'éclairage intérieur tout en évitant l'effet de glare et en éliminant l'entrée de l'air chaud de la journée.
- Des surfaces extérieures de couleurs claires pour minimiser l'absorption du rayonnement solaire.

- Des toits plats et dégradés pour avoir beaucoup d'ombre, et souvent utilisés comme espaces de vie et de sommeil supplémentaires pendant les nuits d'été.



Fig.III.1 Ghardaïa, vallée du M'zab, au sud algérien : tissu compact, toitures plates, constructions massives avec petites ouvertures vers l'extérieur et couleurs claires qui est celle de la chaux utilisé communément pour les revêtements des murs et les Terraces

(Source: www.amusingplanet.com)

Dans les climats chauds et humides, nous trouvons un type d'architecture très différent car la vapeur d'eau bloque le rayonnement solaire, les températures de l'air sont plus basses comparées aux climats chauds et secs avec des humidités trop élevées créant l'inconfort. Il est important de noter que l'ombrage et le refroidissement par évaporation permettent l'amélioration du confort thermique (Lechner 2014) la figure (**Fig.III.2**) illustre ce principe:

- Des toits plats
- Des bâtiments blottis ensemble pour un ombrage mutuel.
- De grandes fenêtres pour maximiser la ventilation. Tandis que les grands auvents et les volets protègent du rayonnement solaire et de la pluie.
- Des murs de couleur claire pour minimiser les gains de chaleur.

- Des hauts plafonds permettront l'air de stratifier, constituant des couches d'air plus froides en partie inférieure de la construction.



Fig.III.2 Bâtiments indigènes élevés sur pilotis avec des toits élevés et des pignons ouverts pour maximiser la ventilation naturelle à Sumatra, en Indonésie

(Source: [www. allaboutsumatra.weebly.com](http://www.allaboutsumatra.weebly.com))

Dans les climats humides, les températures nocturnes sont plus basses que les températures diurnes, la construction massive est déconseillée pour ce climat. Les bâtiments sont généralement construits de bois léger. Les hauts plafonds permettent la ventilation verticale à travers les toits ou transversale à travers les fenêtres. Pour cette raison, les toits à pignon élevé sont réputés dans de nombreuses parties du monde qui ont des climats chauds et humides. Les constructions sont espacées permettant le refroidissement par le vent. Dans certaines régions humides du Moyen-Orient, des capteurs à vent sont utilisées pour augmenter encore la ventilation naturelle à travers le bâtiment (Lechner 2014).

Cet architecture vernaculaire à travers les différentes régions du monde, construites par des hommes influencées par leurs traditions et leur culture, ont été glanées à travers une longue période d'essais et d'erreurs et l'ingéniosité des constructeurs locaux qui

possèdent des connaissances spécifiques de leur situation sur notre planète terre. Peuvent promouvoir des technologies de construction passive spécifiques au climat pour les bâtiments modernes (Zhai et Previtali 2009).

Au cours du XXe siècle, L'objectif des mouvements d'architecture modernes est de combiner le fonctionnalisme avec des principes esthétiques pour la conception architecturale et de mettre en œuvre les technologies avancées de leur époque, ce qui a nuit à l'identité de l'architecture. Beaucoup d'architectures contemporaines se ressemblent à New York, Paris, New Delhi ou Tokyo, cette architecture «internationale» de facto est tout aussi inadéquate partout où elle est construite puisqu'elle n'est viable pour aucun climat et nocive pour l'environnement, elle consomme beaucoup d'énergie.

Le bâtiment en général consomme environ 48% d'énergie, dont 40% pour leur fonctionnement et 8% pour leur construction. Cette énergie est principalement dérivée de sources fossiles qui produisent le dioxyde de carbone qui est parmi les causes du réchauffement climatique (Lechner 2014).

En combinant les technologies modernes avec les procédés positifs de l'architecture traditionnelle, on peut aboutir à une architecture qui répond au confort des usagers et s'adapte aux conditions environnementales. Cette approche peut conduire à des solutions de conception fonctionnelles, où la technologie devient une partie intégrante de la conception architecturale.

Les bâtiments doivent créer une interaction entre l'humain et l'environnement tout en assurant un certain confort. Dans ce contexte, l'enveloppe du bâtiment est la partie physique qui doit être considérée. Les enveloppes des bâtiments sont associées à un large éventail de technologies innovantes qui influent de manière significative sur l'apparence du bâtiment (Badarnah 2012) (**Fig.III.3**).



Fig.III.3 Musée Kunsthaus Graznaturelle à Graz, Autriche des architectes Peter Cook et Colin Fournier, une architecture impressionnante résultante de l'emploi des technologies innovantes (Source: www.museum-joanneum.at)

L'adoption des technologies modernes dans les constructions, joue un rôle très important dont la protection de l'environnement et la préservation de la biodiversité tout en fournissant un climat intérieur favorable, tel que le Council House 2 (CH2) (voir chapitre II). Le développement et l'utilisation de ces technologies innovantes ont conduit à une tendance qui est nommé l'architecture adaptative (*smart envelope*).

III.2. Enveloppes adaptatives

Une enveloppe adaptative est une enveloppe qui possède les capacités de contrôler les conditions climatiques de l'environnement extérieur pour obtenir un confort thermique intérieur optimal. L'enveloppe de la construction qui se modifie en fonction du climat environnant pour obtenir un climat intérieur souhaité, n'est pas une idée nouvelle (Modin 2008).

En 1929, Le Corbusier a tenté de mettre en œuvre deux de ses découvertes, *mur neutralisant et respiration exacte*, pour soutenir son concept de machine à habiter et montrer l'adaptation de la nouvelle architecture du verre aux conditions environnementales. L'utilisation combinée de ces deux éléments visaient à maintenir la température de confort

intérieur et les conditions de la qualité de l'air intérieur demandé durant tout le long de l'année, quelles que soient les conditions environnementales extérieures. Pour ce faire, la grande façade sud vitrée serait composée du mur neutralisant, avec des doubles feuilles de verre et une chambre à air active, dans lequel l'air devait être introduit afin de maintenir une température intérieure constante quelle que soit la saison. La *Respiration exacte*, un système de ventilation complètement indépendant de ce mur, garantit une qualité d'air intérieur convenable dans le bâtiment, et contribue à la qualité thermique intérieure des pièces (Sendra & Suárez 2015) (**Fig.III.4**).

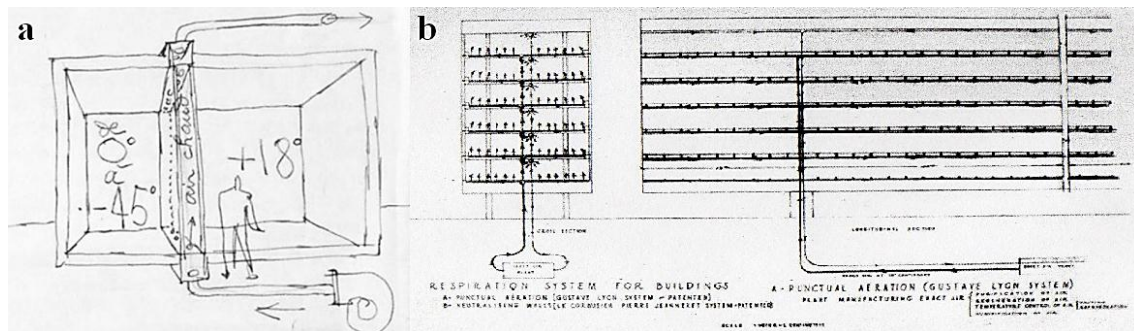


Fig.III.4 Croquis de La Cité du Refuge -Le Corbusier- (a) Description du mur neutralisant, (b) schéma de *respiration exacte* (Source: Sendra & Suárez 2015)

L'architecte anglais Mike Davies a développé un mur théorique mais potentiellement applicable en 1981, Il l'a nommé le mur polyvalent « *Polyvalent Wall* », un mur adaptable à toutes les saisons. Le mur contrôle le flux d'énergie arrivant de l'extérieur vers l'intérieur en utilisant des couches extrêmement minces (illustré dans la **Fig.III.5**) qui sont multifonctionnelles.

La membrane a la capacité d'absorber, de réfléchir, de filtrer et de transférer les énergies de l'environnement. Le mur a les propriétés du verre, mais aussi les changements d'opacité d'une fenêtre électro-chromique, la capacité de collecte d'énergie comme une cellule photovoltaïque et la capacité de produire des niveaux de chaleur confortables comme les thermopompes thermiques. Il doit être doté en plus de la capacité de ventilation comparable à celle des fenêtres traditionnelles, il s'adapte continuellement et change en rapport avec les conditions environnantes et agit comme un filtre dans les deux directions, intérieure et extérieure (Rogers et al. 2006.).

Les couches conceptuelles des murs polyvalents sont : (1) couche de silice et substrat de dépôt, (2) Couche logique de capteur et de contrôle externe, (3) Grille photoélectrique (4) Radiateur thermique / absorbant sélectif (5) Dépôt électro-réfléchissant (6) Couches

d'écoulement de gaz microporeux (7) Dépôt électro-réfléchissant (8) Couche logique de capteur et de contrôle, interne (9) Substrat de dépôt de silice et peau interne (**Fig.III.5**) (Rogers et al. 2006.)

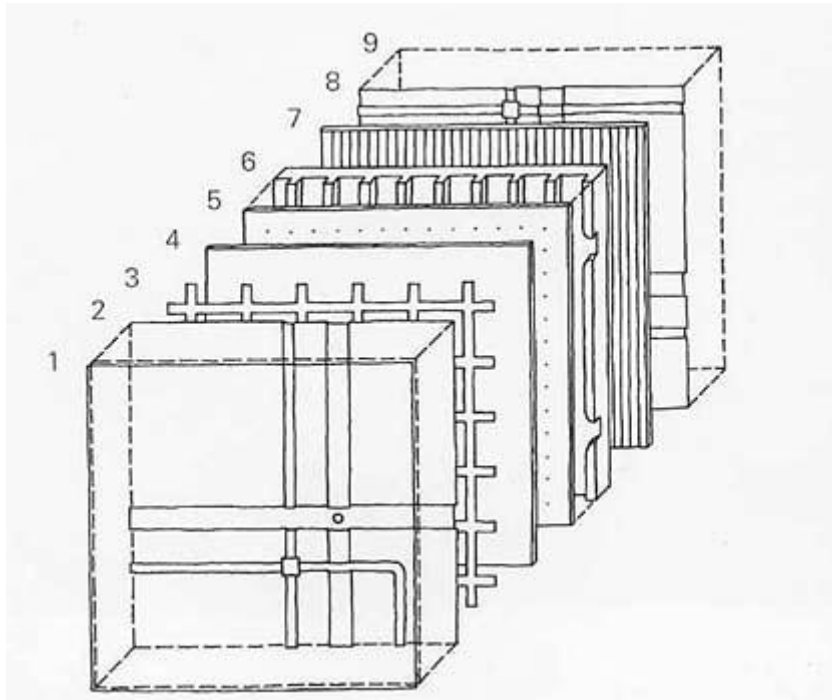


Fig.III.5 Composition de Mur Polyvalent (Source: O. Rogers et al. 2006.)

Les termes utilisés pour décrire les enveloppes de bâtiment qui changent selon la variation du climat environnant et les différentes exigences du climat intérieur sont nombreux. Les mots : adaptatives, réactives et intelligentes sont communs (Modin 2008). Il y a aussi : autonomes et responsives (Reichert et al. 2015), auto-réactives et cinétiques (Persiani et al. 2016).

L'enveloppe adaptative du bâtiment devrait répondre au changement des conditions climatiques de l'environnement extérieur tout en gérant le climat intérieur. Le concept de l'enveloppe adaptative vise à réduire la consommation d'énergie et à accroître le confort thermique des occupants, l'enveloppe adaptative devrait avoir des stratégies d'adaptation pour anticiper les variations environnementales extérieures ainsi que les activités intérieures et leurs interactions avec les habitants (Badarnah 2012).

III.3. Mécanismes des enveloppes adaptatives

Il existe deux niveaux de mécanismes qui déterminent le comportement adaptatif d'une enveloppe, le niveau macro et le niveau micro (Modin 2008).

III.3.1. Enveloppes adaptatives-niveau macro

A ce niveau le mécanisme peut être vu à l'œil nu et il est souvent associé à des mouvements de divers types comme pliage, glissement, roulement, charnière, etc. Le principe de conduite derrière un mécanisme adaptatif niveau-macro, est généralement un mécanisme contrôlé par ordinateur (Modin 2008). Il existe deux systèmes de contrôle, le premier est dit système de boucle ouverte « *Open loop system* » et le deuxième c'est le système de boucle fermée « *Closed loop system* ».

Dans un système en boucle ouverte simple, l'Input est traitée pour produire une réponse souhaitée, provoquant un déplacement du curseur sur un dispositif mécanique sans qu'il y ait une vérification dans le système là où l'action désirée a effectivement eu lieu. Le système en boucle fermée possède des fonctionnalités supplémentaires qui permettent au système de vérifier si l'action de sortie prévue s'est effectivement produite en réponse à l'entrée comme souhaité et anticipé. Cette information est réinjectée dans le système pour une éventuelle comparaison entre l'état original et l'état final (Addington & Schodek 2005) (Fig.III.6).

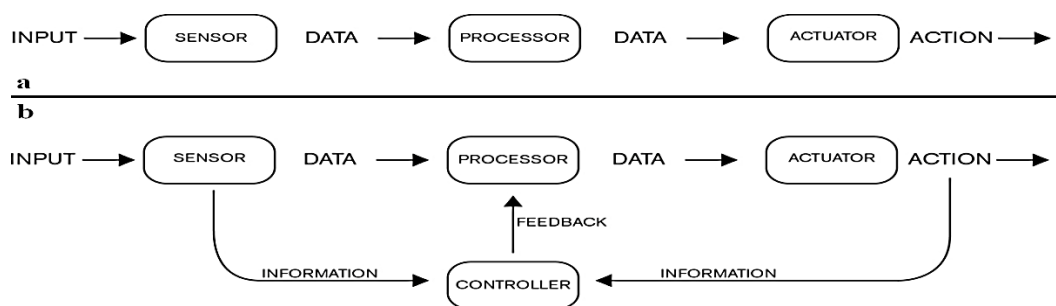


Fig.III.6 Schéma de principe des deux systèmes de contrôle des enveloppes adaptatives,(a) *Open loop system*(b) *Closed loop system* (Source: H. Modin, 2008)

III.3.2. Enveloppes adaptatives-niveau micro

Les changements du niveau-micro se produisent à une plus petite échelle. Le changement se produit au niveau du matériau lui-même, par exemple la disposition des molécules d'eau lorsque l'eau passe de la phase gazeuse à la phase fluide puis à la phase solide comme c'est illustré par la figure (Fig.III.7). Ce changement dans les propriétés d'un matériau peut être appliqué comme un changement invisible qui modifie les propriétés thermiques de l'enveloppe, où il peut être utilisé comme actuateur pour un système plus grand (Modin 2008).

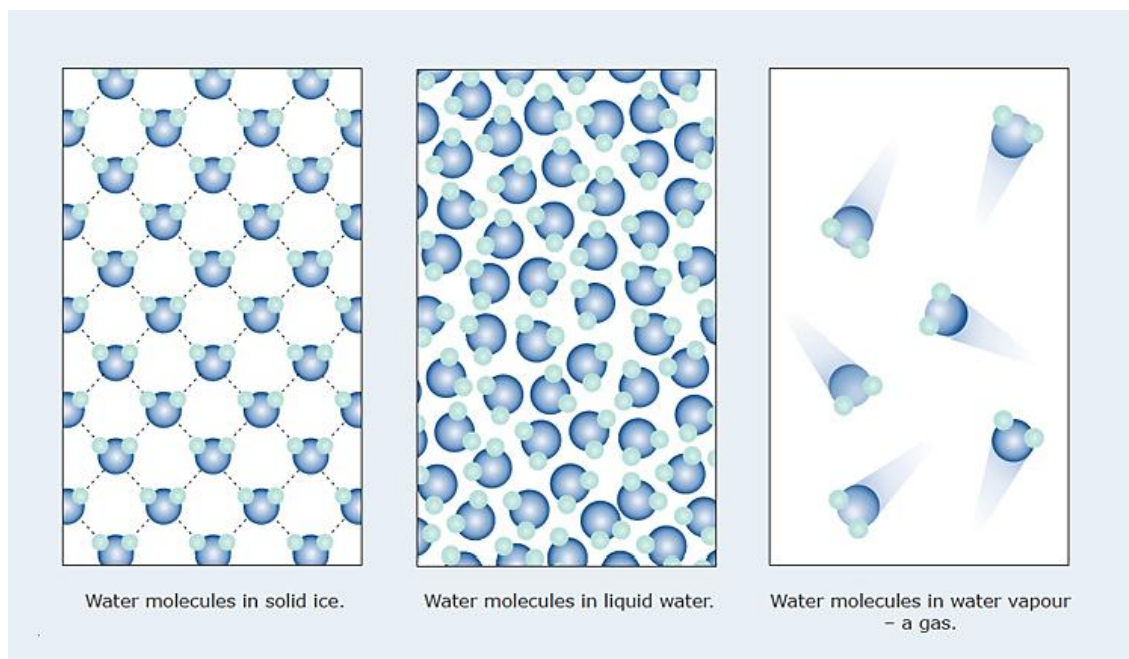


Fig.III.7 Schéma de structure moléculaire de l'eau dans les trois phases : solide, liquide et gazeuses (Source: www.sciencelearn.org.nz)

Ce niveau de mécanisme des enveloppes adaptatives est en évolution, et plusieurs recherches visent à développer des stratégies d'adaptation de ce niveau. L'utilisation croissante des systèmes contrôlés par ordinateur a augmenté la dépendance globale vis-à-vis de l'efficacité du système, et a conduit la recherche vers les solutions des enveloppes intelligentes (Persiani et al. 2016). Ces recherches poussent les investigations plus loin, éventuellement la possibilité d'intégrer directement la détection, le contrôle et l'actionnement dans le matériau lui-même, c'est-à-dire le matériau comme une machine (Reichert et al. 2015) au lieu d'utiliser des couches superposées de mécanismes à usage unique - pour la détection, l'actionnement, le contrôle et l'alimentation en énergie - sous la

forme d'équipements électroniques high-tech comme le montrent les approches actuelles de la réactivité climatique en architecture.

III.4. Exemples des enveloppes adaptatives

Les exemples des enveloppes adaptatives en architecture sont très nombreux, ils concernent les bâtiments, les compartiments de bâtiment, les prototypes et les concepts. (Loonen 2010) a classifié une centaine d'exemples des deux niveaux macro et micro. Dans notre recherche, on vise à explorer les enveloppes adaptatives autonomes basées sur les propriétés des matériaux et leur comportement par rapport aux stimuli du climat environnant (niveau micro). Des exemples de ces enveloppes adaptatives sont expliqués et analysés dans ce chapitre.

III.4.1. Enveloppes adaptatives contrôlées

L'Institut du monde arabe à Paris-France est probablement l'exemple le plus connu par son enveloppe adaptative (Modin 2008). Il a été conçu par l'architecte Jean Nouvel, achevé en 1989. Il est composé de 240 moucharabiehs photosensibles qui fonctionnent comme brise-soleil pour une façade vitrée orientée sud (**Fig.III.8**).

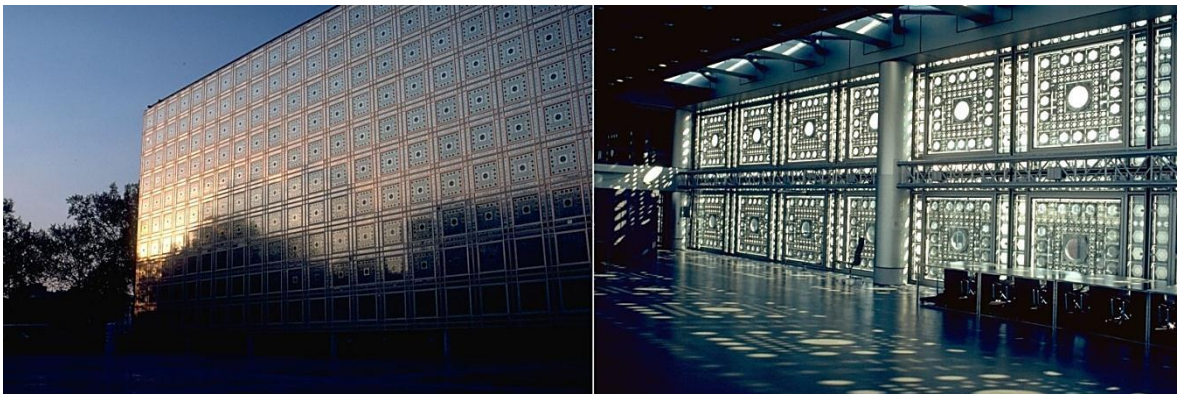


Fig.III.8 (a) façades sud de l'institut du monde arabe, (b) ambiance intérieur derrière le mur sud
(Source: www.akdn.org)

Il s'agit d'un système en boucle fermée « *Closed loop system* » dans lequel la quantité du rayonnement incident sur la façade est contrôlée, cette information est interprétée puis envoyée aux actionneurs provoquant l'ouverture ou la fermeture des volets par des

petits moteurs. Le système ne peut pas être bloqué manuellement. Malgré leur fonctionnalité et leur design saisissant, ces panneaux de façade sont bruyants et fragiles et les différentes parties ne sont pas faciles à remplacer (**Fig.III.9**) (Coelho & Maes 2009).



Fig.III.9 (a) mécanisme des moucharabiehs de l'institut du monde arabe (Source: www.akdn.org),
(b) rénovations des moucharabiehs en 2017 (Source: www.imarabe.org)

Al Bahar Tower à Abu Dhabi conçu par les architectes Aedas, a une peau externe adaptative qui minimise l'intensité de rayonnement solaire incident dans les espaces intérieurs. Le moucharabieh est traditionnellement utilisé pour obtenir l'intimité tout en réduisant l'éblouissement et les gains solaires. Le concept original de pliage pour l'unité dynamique de moucharabieh a été initialement expliqué à travers un simple modèle d'origami qui a révélé le fonctionnement de l'unité triangulaire (AHR 2017) (**Fig.III.10**). Grâce à ce macro-système qui diminue les besoins de climatisation, l'écran solaire a entraîné d'autres avantages comme la réduction des gains solaires et l'optimisation de l'éclairage naturel intérieur par l'utilisation d'un verre non réfléchissant.

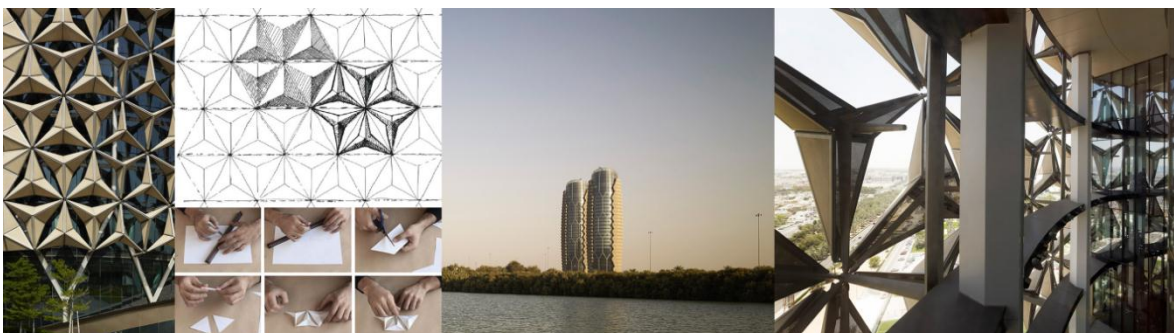


Fig.III.10 Al Bahar Tower, principe et détail de l'écran solaire dynamique
(Source: www.ahr-global.com)

Les problèmes rencontrés dans le fonctionnement de l'enveloppe de l'Institut du monde arabe de Paris, ont incité les concepteurs du projet Al Bahar Tower ont testé les éléments et les composants de cet écran solaire, tant dans les souffleries que pour la fatigue des matériaux utilisés, afin de garantir la même durée de vie que le bâtiment. Le système est également construit de telle sorte que si une pièce du mécanisme est endommagée, elle est facilement remplaçable (AHR 2017).

III.4.2. Enveloppes adaptatives autonomes

Les exemples cités dans cette partie traitent les enveloppes autonomes qui puisent dans leur mode de fonctionnement des principes biologiques et des structures de certains organismes vivants.

III.4.3. Enveloppes autonomes inspirées des structures vivantes

Parmi les recherches pertinentes dans le domaine de ces enveloppes autonomes, la recherche doctorale de Braun (2008) a porté sur 25 phénomènes naturels, qui au cours des 500 derniers millions d'années ont évolué constituant des solutions aux problèmes liés aux interfaces entre zones intérieures contrôlées et zones extérieures incontrôlées que les enveloppes de bâtiments anthropiques modernes doivent également aborder. Au cours de cette recherche, Braun (2008) a étudié ces phénomènes naturels classés selon trois catégories : matériau, structure et fonction, pour tester leur employabilité et pour l'identification des méthodes possibles à utiliser en architecture. Ensuite, dans l'étape conceptuelle du projet d'architecture, il a combiné les stratégies puisées des systèmes naturels identifiés, tout en respectant les exigences des enveloppes anthropiques perméables adaptatives du futur.

On a choisi deux exemples développés par Braun (2008) proposant des systèmes adéquats pour résoudre des problèmes liés au confort thermique, visuel et olfactif des usagers. Il s'agit d'un dispositif d'ombrage auto sensible et d'une enveloppe à structure perméable à la fois respirante et hydrofuge.

III.4.3.1.1. Dispositif d'ombrage auto sensible

Le dispositif d'ombrage auto sensible est inspiré des étoiles cassantes capables de percevoir les distances bien qu'elles n'aient ni yeux ni cerveau. Grâce à la forme particulière de la surface de leur corps, ces espèces aquatiques peuvent décomposer la lumière incidente de manière si précise qu'ils peuvent estimer la distance d'un ennemi. Grâce à un système de détection très simple. Ce système de captage à impulsions lumineuses pourrait conduire à un capteur de lumière structurel qui est capable uniquement, grâce à la texture de surface, de mesurer la teneur en UV de la lumière ou déterminer l'intensité du rayonnement solaire, Ce qui procure des informations importantes, avec lesquelles d'autres sous-systèmes tels que des dispositifs d'ombrage ou des collecteurs solaires peuvent être orientés (Braun 2008).

Les Étoiles cassantes appartiennent au tronc des échinodermes et à la classe des oursins et aux étoiles à cheveux ou à plumes. Ces Étoiles cassantes vivent dans les océans et les mers à des profondeurs allant jusqu'à 7000 mètres. Environ 2000 espèces différentes sont connues dans le monde entier, et des fouilles paléontologiques ont révélé que cette espèce existe depuis plus de 500 millions d'années. L'Ophiocoma Wendtii est un de ces espèces, il a un corps en forme de disque central de 2 à 3 cm et une longueur de bras de 6 à 8 cm. Ils vivent principalement dans les Caraïbes et au large des côtes de l'Amérique du Sud. Le corps de l'animal se compose de trois couches : la peau, le squelette qui remplace les vertèbres et un ventre. La couche externe (peau) et la couche interne (abdomen) se constitue chacune d'une seule couche de cellules. L'Ophiocoma Wendtii a la capacité de changer de couleur ou de briller au moyen de bioluminescence. Son squelette est constitué de calcite pure (CaCO_3) incolore ; un minéral du groupe des carbonates qui a une dureté de 3 selon le test de dureté de Mohs¹. En mélangeant d'autres éléments, le squelette se produit dans différentes couleurs, en dessous d'aspects optiques, la calcite claire a une biréfringence optique de la lumière. (Braun 2008) (**Fig.III.11**).

¹ L'un des tests les plus importants pour identifier les spécimens minéraux est le test de dureté de Mohs. Ce test compare la résistance d'un minéral à être rayé par dix minéraux de référence connus sous le nom de Mohs Hardness Scale (source : www.geology.com)



Fig.III.11 (a) Étoiles cassantes «*Ophiocoma Wendtii* » (Source: www.inaturalist.org),
(b) structure microscopique de son squelette de calcite (Source: www.nationalgeographic.com)

En analysant la structure microscopique du squelette de L'*Ophiocoma Wendtii*, les scientifiques ont découvert que cette Etoile cassantes possède des microlentilles à plusieurs tailles (**Fig.III.11**) très précises ayant une forme parabolique qui évite les erreurs de projection des lentilles sphériques (Braun 2008) (**Fig.III.12**).

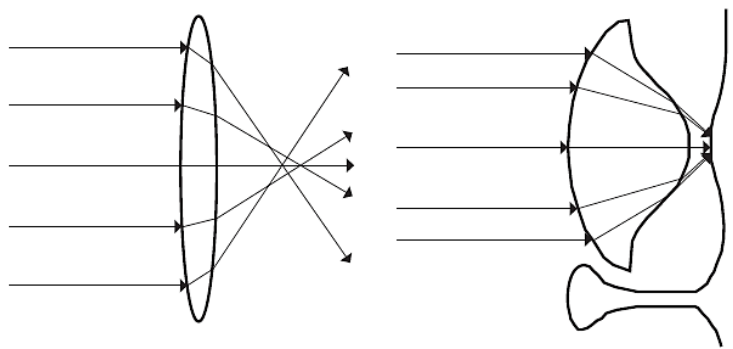


Fig.III.12 Aberration sphérique et contrôle parfait de la lumière par forme parabolique chez les Étoiles cassantes «*Ophiocoma Wendtii* » (à droite) comparée avec lentille sphérique (à gauche)

(Source: Braun 2008)

Ces lentilles concentrent la lumière sur des cordons nerveux qui se situent directement au-dessous et qui regroupent la lumière incidente et reçoivent ainsi des informations sur le monde extérieur, Ceux-ci sont convertis directement en impulsions nerveuses de mouvement. L'*Ophiocoma Wendtii* est le seul animal vivant chez lequel ce système de lentilles a été découvert. Si l'on coupe une lentille au milieu, on peut voir qu'il

s'agit en fait d'une double lentille. La lumière entrante est brisée lorsqu'elle tombe sur la première lentille, puis elle est brisée une deuxième fois en tombant sur la deuxième lentille avant qu'elle ne tombe sur le cordon nerveux (**Fig.III.13**).

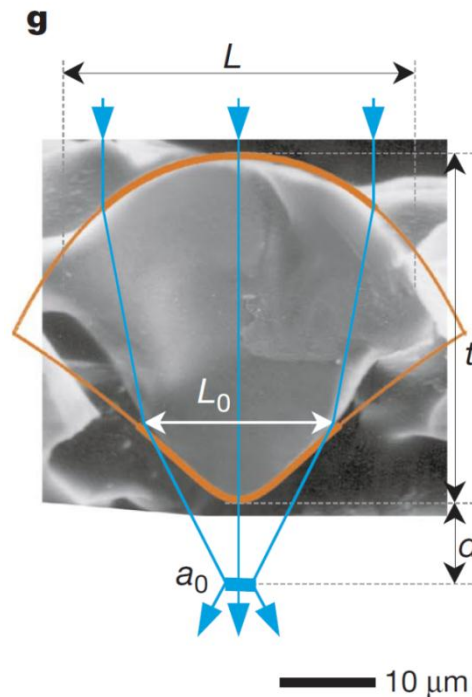


Fig.III.13 Coupe transversale d'une microlentille de L'Ophiocoma Wendtii

(Source: Aizenberg & al. 2001)

Les lentilles ont des points focaux différents sur le squelette de l'Ophiocoma Wendtii en raison de leurs tailles différentes, ce qui rend l'Ophiocoma Wendtii capable d'estimer les distances. L'Ophiocoma Wendtii est doté d'un écran anti-éblouissement qui protège ces nerfs de la lumière excessive et des dommages. Si une certaine intensité de base de la lumière ambiante est atteinte, le nerf affecté envoie un signal décentralisé vers les cellules de la peau situées au-dessus, et celles-ci commencent à assombrir graduellement les lentilles avec des pigments (Braun 2008). Cette réaction est une action de filtrage et de diaphragme des chromatophores dans ces cellules. Ces chromatophores régulent l'intensité de la lumière atteignant les lentilles en étendant leur processus de remplissage en pigment pour couvrir la lentille pendant la journée et les rétracter à une position latérale entre les lentilles pendant la nuit (Aizenberg & al. 2001), ceci est perçu par l'observateur comme un changement de couleur, un noircissement de la peau (Aizenberg & al. 2001) (**Fig.III.14**).

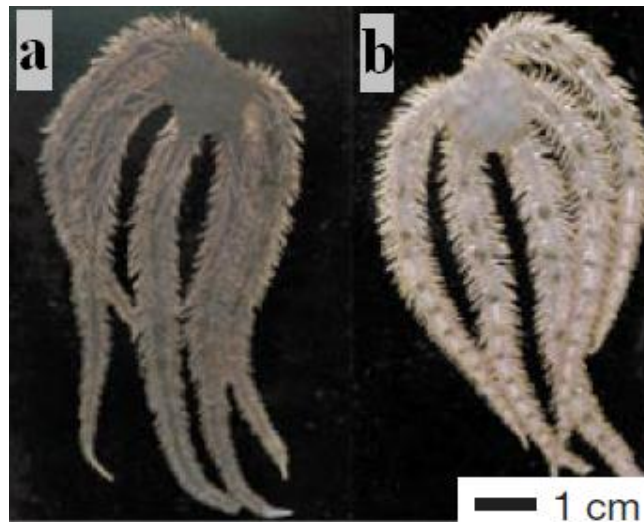


Fig.III.14 Ophiocoma Wendtii change de couleur nettement du jour (a) à la nuit (b)

(Source: Aizenberg, J, 2001)

L'étude de la structure perméable à la lumière et capable de devenir opaque de l'Etoile cassante Ophiocoma Wendtii a permis au chercheur Braun (2008) de développer le concept d'un système d'ombrage auto sensitif, inspiré d'une lentille qui a le même design que celles de l'Ophiocoma Wendtii située dans un gel transparent. Lorsqu'il est chauffé par les rayons du soleil, il se dilate et pousse un « pigment » opaque sur la lentille. Dès que la lentille est légèrement ombrée, le gel refroidit et se contracte, le pigment se retire, les rayons passent et le gel réchauffe et se dilate à nouveau jusqu'à ce que l'optimum soit atteint. Le système est donc constamment en train de s'évaluer lui-même, ce qui lui rend auto ajustable (**Fig.III.15**).

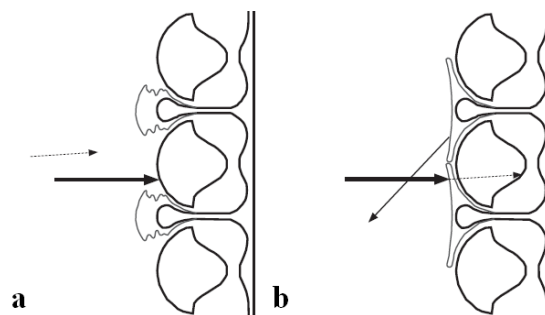


Fig.III.15 Schéma de principe du système d'ombrage auto sensitif (a) lentille exposée aux rayons (b) lentille ombrée (Source: Braun 2008)

Un modèle de système d'ombrage auto sensible a été conçu et réalisé par le chercheur Henning Braun. D (2008) et son équipe (**Fig.III.16**).

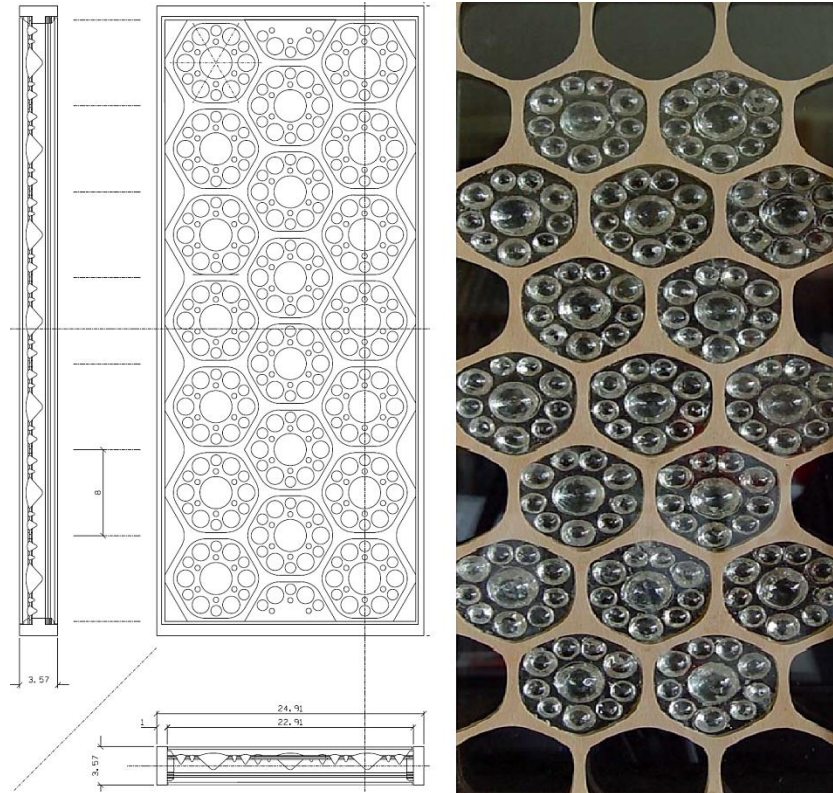


Fig.III.16 Esquisse et maquette d'étude du système d'ombrage auto sensible

(Source: Braun 2008)

Ce modèle demeure en phase conceptuelle, l'usage des lentilles biomimétiques aussi précises que celles de l'*Ophiocoma Wendtii* est encore en phase d'étude.

III.4.3.1.2. Enveloppe à structure perméable

Braun (2008) s'est inspiré du principe de l'enveloppe à structure perméable de la coquille des mouches (calliphoridae) Elle est perméable à l'oxygène pénétrant, elle dégage le dioxyde de carbone et elle résiste également à l'humidité pénétrante. Ces propriétés opposées sont résolues par une structure multicoque chitineuse² particulièrement ingénieuse, qui permet au tissu des larves de mouches en croissance de respirer même sous l'eau. En outre, ce tissu est capable de réguler son bilan thermique au moyen d'une

² Substance organique azotée qui constitue le principal élément des téguments des insectes (source : www.cnrtl.fr)

structure de gaine, une propriété qui le rend intéressant pour de nouvelles approches de structures de gaines modernes (Braun 2008).

Les mouches (calliphoridae) appartiennent à la famille des mouches (brachycera), dont environ 1000 espèces différentes dans le monde. Après l'accouplement, la femelle met ses œufs sur une place riche en protéines. Environ 200 à 250 œufs divisés en paquets de 20 à 25 morceaux. Dès qu'il y a suffisamment de chaleur, ils se dégagent de leurs cônes. Entre la ponte et l'éclosion, l'œuf doit pouvoir respirer, être protégé de l'eau et être capable d'absorber la chaleur (Braun 2008) (**Fig.III.17**).

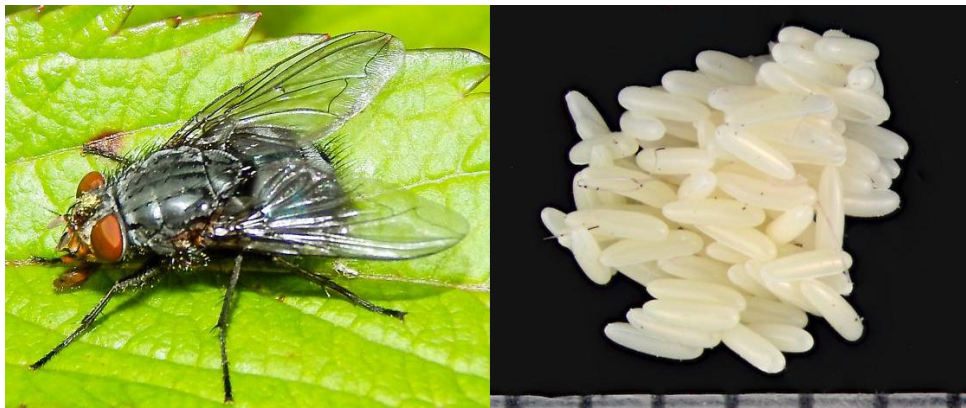


Fig.III.17 Mouche (calliphoridae) et ses œufs (Source: www.bugguide.net)

Les œufs des mouches sont donc perméables aux gaz pour assurer la respiration du tissu des larves dans l'œuf au début du développement. Le dioxyde de carbone et l'oxygène peuvent être diffusés à travers la membrane de l'œuf d'une manière passive tandis que l'enveloppe de l'œuf est hydrofuge pour protéger les larves de l'eau qui coule. Les structures des coquilles spéciales sont même capables de survivre et de respirer à la surface de l'eau, sans qu'une gouttelette d'eau ne rentre à l'intérieur.

Ces propriétés contrastées de la coquille de mouche sont obtenues par une construction spéciale avec différentes couches. La structure se compose d'une large couche centrale de structures en forme de piliers chitineux, qui sont fortement déformés à la fois à l'extérieur et à l'intérieur, et qui se ramifient également vers l'intérieur dans plusieurs directions. Sur les surfaces des couches interne et externe, il y a ainsi une peau chitinoïde, perforée par des trous trapézoïdaux angulaires. Entre les deux surfaces et les piliers basaux larges, des cavités contiguës sont formées. Ainsi, la construction de la coquille de mouche est un type spécial de construction légère chitineuse (**Fig.III.18**) (Braun 2008).

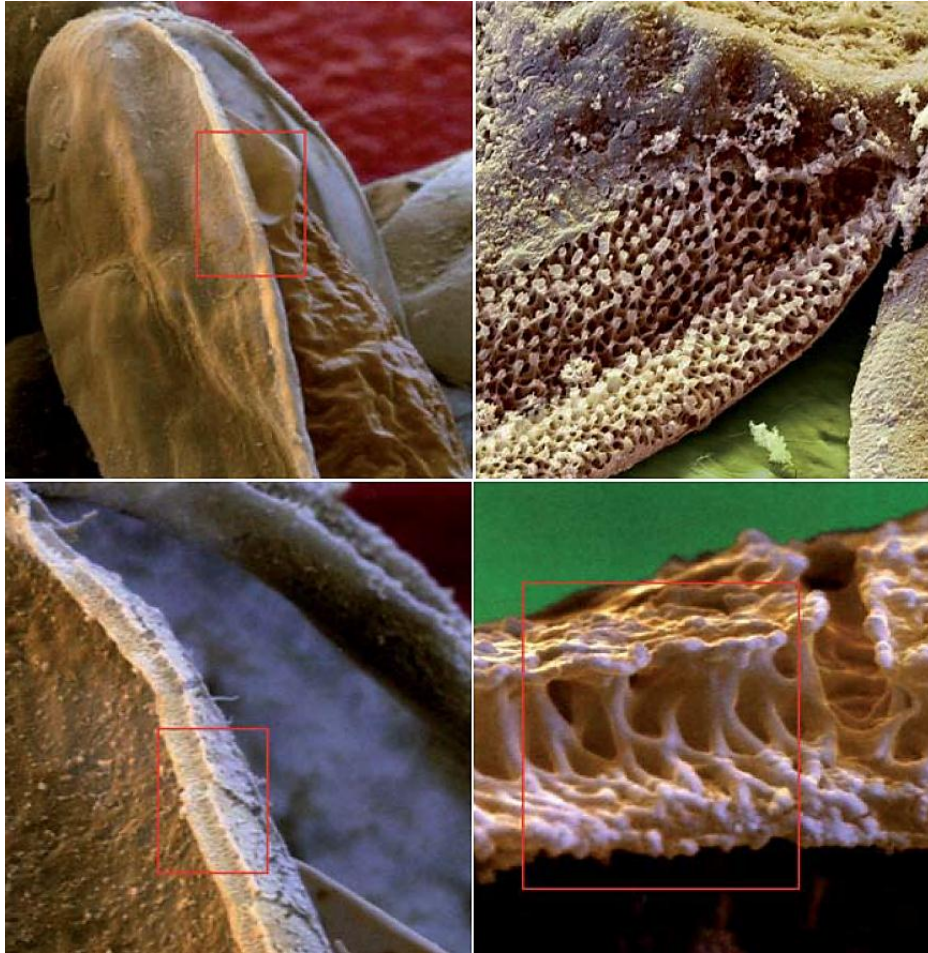


Fig.III.18 Différentes vues à l'échelle microscopique montrant à plusieurs zooms la structure spéciale des coquilles des œufs de mouches (calliphoridae) (Source: Braun 2008)

L'étude de la structure de la coquille de mouche offre une variante de solutions spéciales pour un système perméable respirant mais accumulateur de chaleur. La coquille de la mouche est constituée de matériaux poreux et hydrofuges mais néanmoins respirants. Il est nécessaire de comprendre comment la coquille extrait la chaleur du gaz qui la traverse, et de déterminer la taille requise des pores pour un échange suffisant du gaz. L'idée de base est le développement d'un procédé de façade poreux avec des propriétés respirantes et hydrofuges (Braun 2008) (**Fig.III.19**).

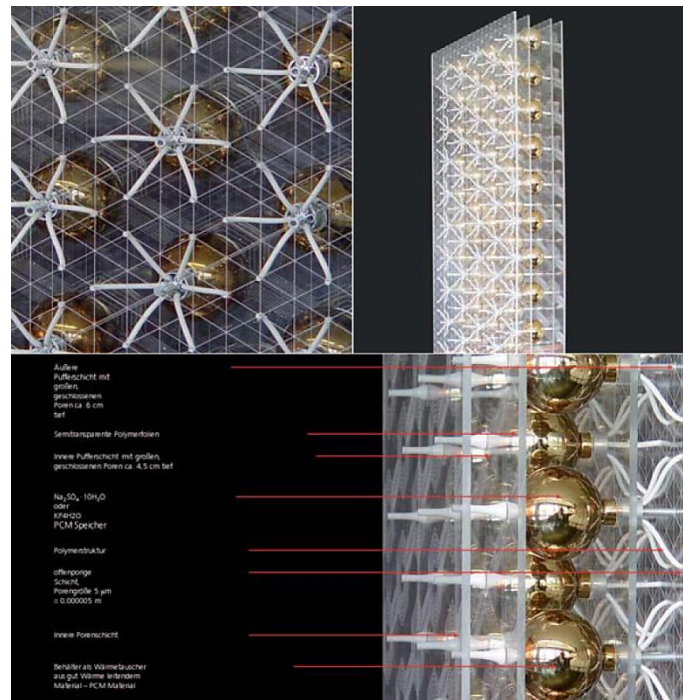


Fig.III.19 Modèle expérimental d'un élément de façade poreuse (Source: Braun 2008)

La chitine de mouches agit de la même façon que certains matériaux modernes MCP³ avec une décharge et une conduction thermique retardée. En hiver, le dioxyde de carbone qui s'écoule de l'intérieur du matériau libère son énergie calorifique aux piliers de base larges et peut s'échapper par les ouvertures d'environ 5 μm dans les couches supérieures et inférieures. La taille des pores de 5 μm correspond à la plus grande ouverture possible pour les gaz entrants et sortants sans risque d'entrée des gouttelettes d'eau. Pour cela, la forme ovale diamantée des trous est également utile car elle empêche efficacement l'entrée de l'eau (Braun 2008) (**Fig.III.20**).

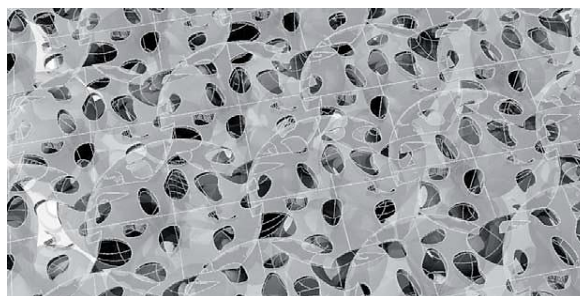


Fig.III.20 Structure hydrofuge avec pores d'environ 5 μm (Source: Braun 2008)

³ Matériau à changement de phase

Cette énergie peut être réacheminée vers l'oxygène entrant dans le même processus afin que l'air frais entrant n'ait la même température que l'air extérieur. Grâce à un contrôle spécifique de la lumière sur le récipient MCP dans la couche des bases échangeuses de chaleur (Fig.III.21), il peut y avoir un réchauffement solaire direct. L'idéal serait un dispositif qui va laisser le flux d'air neuf chaud pendant environ 4 à 5 heures après le coucher du soleil. En été, ce processus est inversé de sorte qu'une grande partie du rayonnement solaire est minimisé par le biais de la géométrie constituée de piliers en forme de base (Braun 2008).

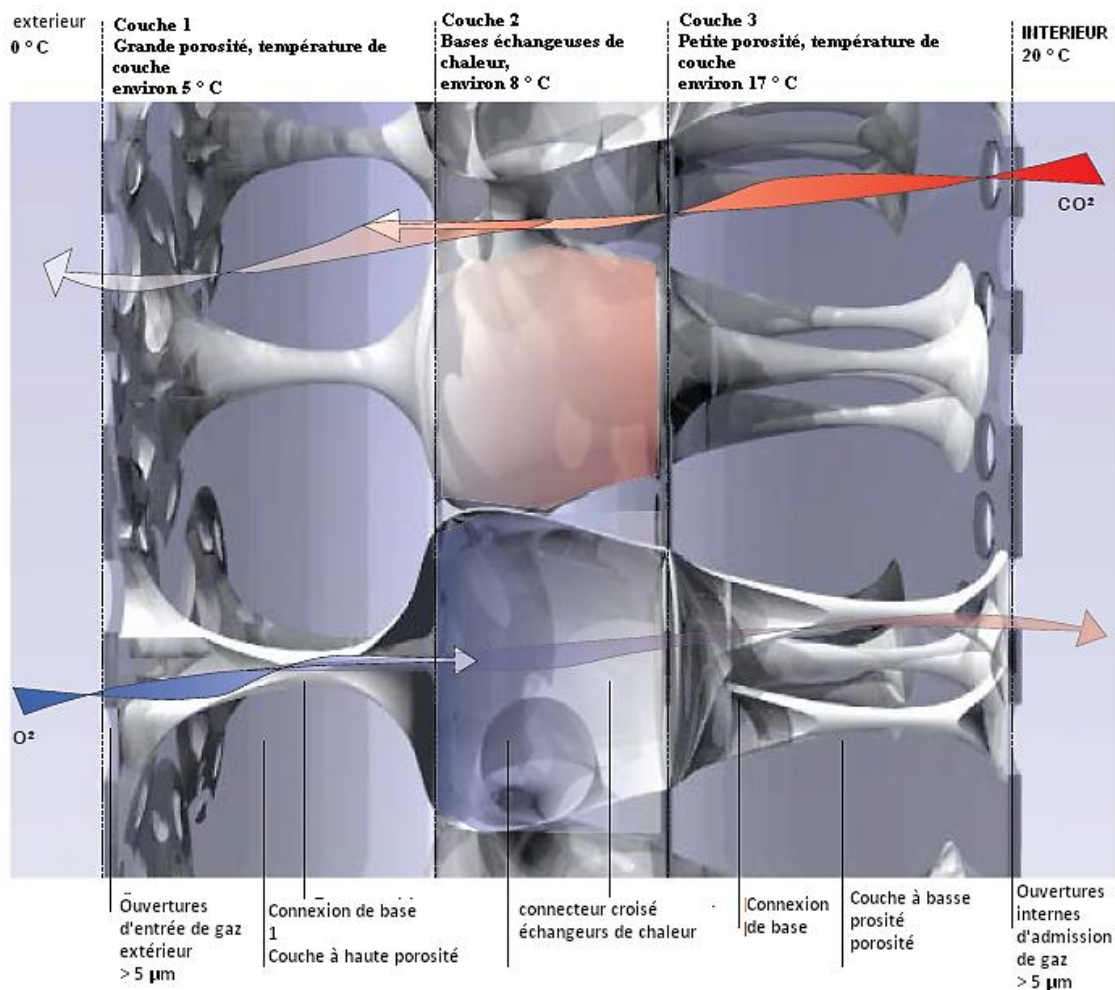


Fig.III.21 Coupe schématique de façade poreuse : le mode de fonctionnement, la perméabilité et la capacité d'échange de chaleur de la coquille des œufs de mouches (calliphoridae) (Source: Braun 2008) (traduit par l'auteur)

Pour estimer le mode d'action exact de la perméabilité de la coquille de mouches, il faut déterminer l'absorption d'énergie de la structure chitineuse par les gaz qui passent, ce qui peut être utilisé pour faire un profil de températures. A cet effet, il serait également nécessaire de déterminer la quantité de gaz dont les larves de mouches ont besoin pour

rester viable à l'intérieur de cette coquille. Cependant, la structure proposée avec des propriétés perméables et en même temps hydrofuges pourrait apporter une contribution précieuse au développement de nouvelles structures de coque (Braun 2008).

III.4.3.2. Enveloppes autonomes basées sur le comportement des matériaux

Deux exemples pertinents des enveloppes adaptatives autonomes inspirées de la nature et basées sur les propriétés des matériaux sont à citer : l'enveloppe hygrosopique « HYGROSKIN » réalisée par l'équipe des chercheurs de « *Institute for Computational Design (ICD)* » à l'université de Stuttgart Reichert. S; Menges. A; Correa. D, (2014), et l'enveloppe thermo-bimétallique « ARMoured CORSET » de l'architecte chercheuse de « University of Southern California » Kim Sung. D (2010).

III.4.3.2.1. Enveloppe hygrosopique « HYGROSKIN »

La réactivité des matériaux est particulièrement intéressante pour l'adaptation climatique. L'adoption des mécanismes contrôlés à la construction est de plus en plus utilisée pour s'adapter aux conditions climatiques. Reichert et al. (2015) ont poussé la recherche plus loin : le développement et l'intégration de la détection, le contrôle et l'actionnement dans le matériau lui-même; c'est-à-dire considérer le matériau comme une machine.

Le principe de l'enveloppe hygrosopique a été inspiré du mouvement des plantes du à l'effet de l'humidité. Ce mouvement peut être classé en deux groupes principaux: un mouvement de pression de turgescence cellulaire active, où le mouvement passif est déclenché par l'allongement différencié de la matière. Alors que le mouvement de la pression cellulaire active est relié au métabolisme des plantes, l'alternative passive est le résultat du comportement hygrosopique du matériau et de sa composition anisotrope en réponse aux changements environnementaux. Par exemple, les Pinophyta (conifères) possèdent des cônes pour protéger les graines internes (Reichert et al. 2015)

Une fois que le cône est arrivé à maturité, les écailles se dessèchent et s'ouvrent pour libérer les graines(**Fig.III.22**). À ce stade, la matière du cône est déjà morte et n'a aucun lien direct avec l'arbre. Cependant, puisque le mouvement est déclenché par des stimuli

externes et ne modifie pas plastiquement la structure moléculaire du matériau, il est complètement réversible pour un grand nombre de cycles d'ouverture et de fermeture (Reichert et al. 2015).

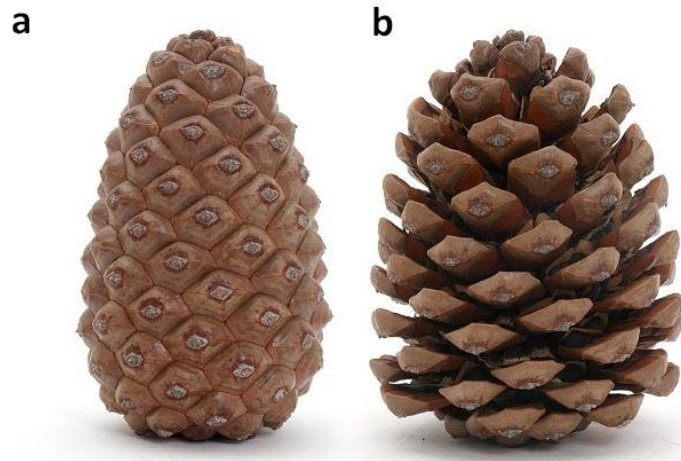


Fig.III.22 Etat de cône de conifères (Pinophyta) (a) à forte teneur en humidité et (b) à faible teneur en humidité (source : www.warrenphotographic.co.uk)

Cette déformation géométrique des écailles ovulifères est réalisée à travers deux couches de fibres différentes : une couche externe constituée de cellules épaisses parallèles, longues et densément garnies et une couche interne possédant des fibres de sclérenchyme, où la façon dont l'orientation de micro fibrilles de cellulose contrôle l'expansion hygroscopique des cellules dans les deux couches. Dans les sclérites, les micros fibrilles sont enroulées autour de la cellule (angle d'enroulement élevé) ce qui lui permet de s'allonger lorsqu'elle est humide. Les fibres de cellulose ont des micros fibrilles orientées le long de la cellule (faible angle d'enroulement) qui résiste à l'allongement. L'écaille ovulifère fonctionne donc comme une bicouche semblable à une bande bimétallique, mais réagissant à l'humidité plutôt qu'à la chaleur (Dawson, Vincent & Rocca 1997) (**Fig.III.23**). Par le gonflement et le rétrécissement, le matériau effectue la déformation autonome passive (Reichert. S et al, 2014).

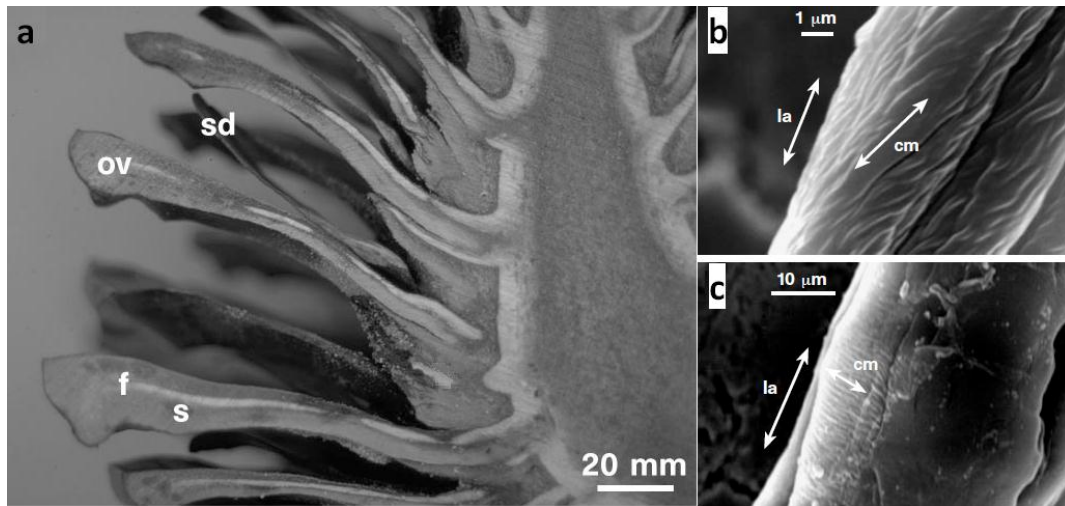


Fig.III.23 (a)Section longitudinale sur un cône femelle montrant les deux couches constituant les écailles ovulifères : « f » fibres de cellulose et « s » sclérites, (b-c) vue microscopique des fibres de cellulose et sclérites, où l'angle entre le grand axe « la » de la cellule et le sens d'enroulement des fibres de cellulose « cm » est élevé en sclérites et faible en fibres de cellulose. (Source : Dawson, Vincent & Rocca 1997)

Grâce à la compréhension des principes microstructuraux qui facilitent l'actionnement hygroscopique dans le cône du pin, et qui consistent à transférer un changement dimensionnel anisotrope dans un changement de forme, Reichert et al. (2015) ont développé un système technique intégré sensible à un comportement hygroscopique⁴ en utilisant le bois comme matériau composite fibreux naturel, qui possède une variété de propriétés complexes lui permettant toujours de rivaliser avec des matériaux contemporains de haute technologie.

Cependant, le comportement grégaire du matériau et ses changements dimensionnels anisotropes ont été considérés comme un défi à contrôler et à atténuer. En variant l'épaisseur, la direction des fibres et la forme des feuilles de bois stratifié (**Fig.III.24**) les chercheurs ont pu développer un système responsif sensible au changement d'humidité de l'air ambiant. Ce système a été utilisé dans un prototype fonctionnel à pleine échelle conçu et développé pour l'exposition ArchiLab 2013 au centre FRAC (Fonds Régional d'Art Contemporain) à Orléans (France). Une fois exposée à des changements d'humidité relative, l'ouverture et la fermeture de chaque composant du système entraîne différents

⁴ L'hygroscopie décrit la capacité d'un matériau à absorber et libérer (désorber) l'humidité de l'atmosphère environnante pour maintenir constamment un équilibre relatif avec son environnement (Reichert. S et al, 2014)

degrés de porosité de l'enveloppe dans le temps et à travers la surface, ce qui est à la fois une structure et une enveloppe sensible.

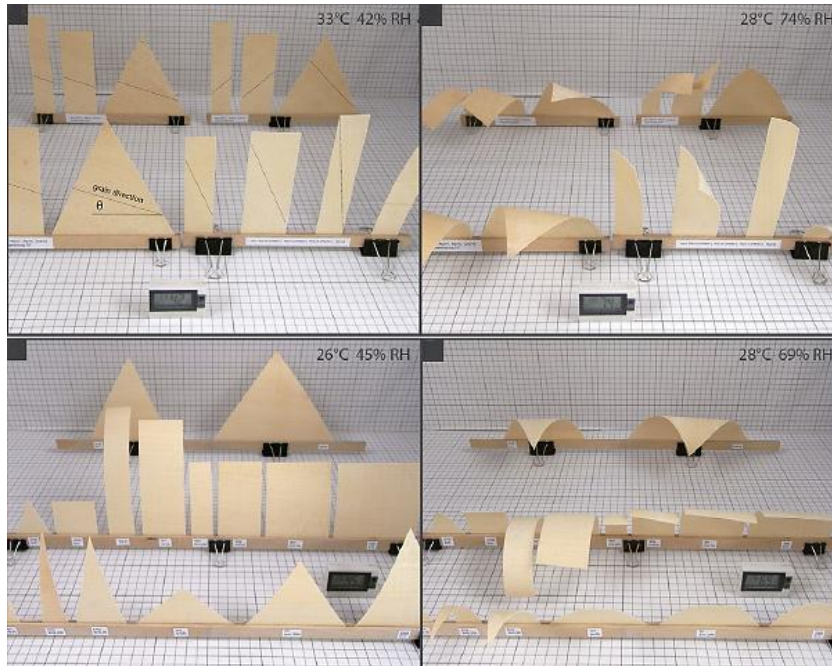


Fig.III.24 Tests empiriques sur l'influence de la forme, l'épaisseur et le sens des fibres sur la courbe de déformations des feuilles de bois stratifié (source : Reichert. S et al, 2014)

Le prototype architectural "HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion" (**Fig.III.25**) démontre l'intégration de ce système responsif sensible au changement d'humidité de l'air (**Fig.III.26**) dans un système fonctionnel adaptable en dimension architecturale.



Fig.III.25 *HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion*: Exposition temporaire à l'extérieur au Stadtgarten, Stuttgart (source : www.icd.uni-stuttgart.de)

L'ensemble modulaire est composé de panneaux coniques produits par la flexion élastique de feuilles planes de contreplaqué. Les feuilles de 4 mm d'épaisseur produisent des formes coniques auto formées en inter-reliant des joints de type puzzle de fraisage CNC le long de leurs bords. Chaque panneau devient un composant «sandwich» en enfermant une couche de mousse entre deux couches de contreplaqué. Cette configuration assure la rigidité structurelle tout en minimisant le poids. Par la suite, un processus léger de moulage sous vide normalise les irrégularités dans la mousse, tandis qu'un processus de découpage et de fraisage robotisé assure une précision dimensionnelle. Le système est non seulement hautement adaptable mais également structurellement stable et léger. Dans cet ensemble, les éléments hygroscopiques sont supportés par un treillis en polyuréthane qui médie géométriquement l'actionnement linéaire des éléments sensibles dans leur disposition polygonale avec la géométrie conique des panneaux.

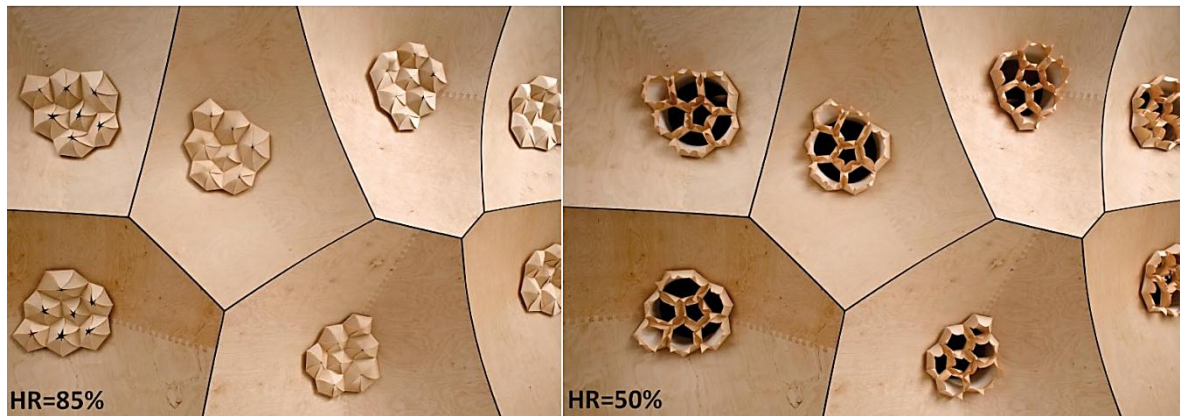


Fig.III.26 Ouverture et fermeture du système Hygroscope selon la variation de l'humidité relative (source : www.icd.uni-stuttgart.de)

III.4.3.2.2. Enveloppe thermo-bimétallique « ARMOURED CORSET »

La conservation de l'énergie et la conception de bâtiments à émission zéro ont insufflé à l'industrie un nouvel élan pour trouver des solutions de rechange. Avec l'émergence de nouveaux matériaux intelligents, l'évolution des technologies numériques et la disponibilité de méthodes de personnalisation de masse, ces mêmes murs peuvent maintenant être conçus pour être réactifs, interactifs et même poreux tout comme la peau humaine (Sung 2010).

En s’inspirant du principe de thermorégulation de la peau humaine, Sung (2010) en tant qu’ex-étudiante en biologie et architecte, a développé le concept d’une enveloppe auto-ventilée sans avoir besoin d’une source d’énergie, en se basant sur les propriétés thermo-physiques des bimétals qui ont été utilisés depuis le début de la révolution industrielle. Le bimétal est une stratification de deux métaux avec différents coefficients de dilatation thermique, il se déforme simplement lorsqu’il est chauffé ou refroidi (Sung 2010) (Fig.III.27).

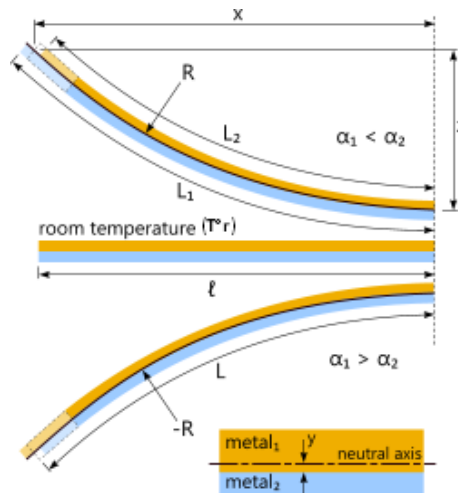


Fig.III.27 Principe de fonctionnement des bimétals (α_1 et α_2 sont les coefficients de dilatation des deux métaux) (source : www.calqlata.com)

Pour réaliser son prototype, Sung (2010) a utilisé le bimétal nickel-magnésium comme matériau intelligent sous forme de petites tuiles métalliques en forme de croix tissées ensemble constituant une coque en forme d’un corset (**Fig.III.28**).

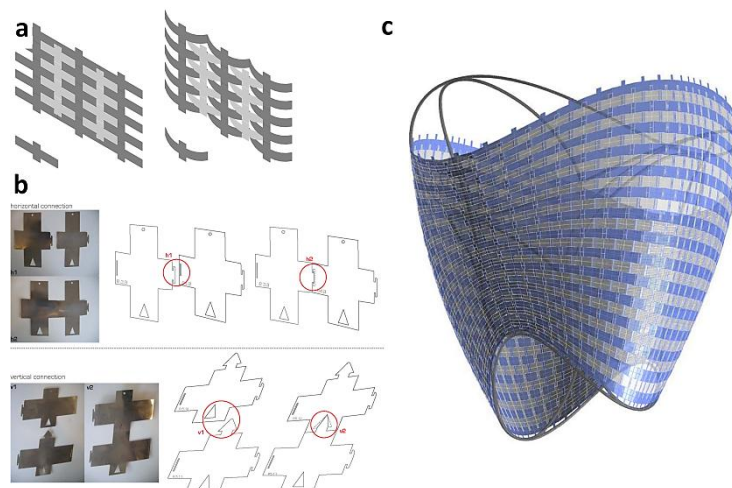


Fig.III.28 (a-b) forme et détail de montage des tuiles de bimétals (b) modèle numérique de l’enveloppe « ARMoured CORSET » (source : Sung 2010)

Pour étudier la capacité de ce matériau dans cette application, diverses formes ont été testées et modélisées numériquement en utilisant les outils de conception paramétrique : Catia et ParaCloud. Ceci a affecté l'esthétique de la peau et le motif de surface, en utilisant le système de fixation de tenant et mortaise pour assembler les tuiles, une surface tendue à froid, où chaque tuile se courbe lorsque la température augmente et les pores entre les tuiles s'ouvrent, permettant le passage de l'air à travers la coque (Sung 2010) (Fig.III.29).

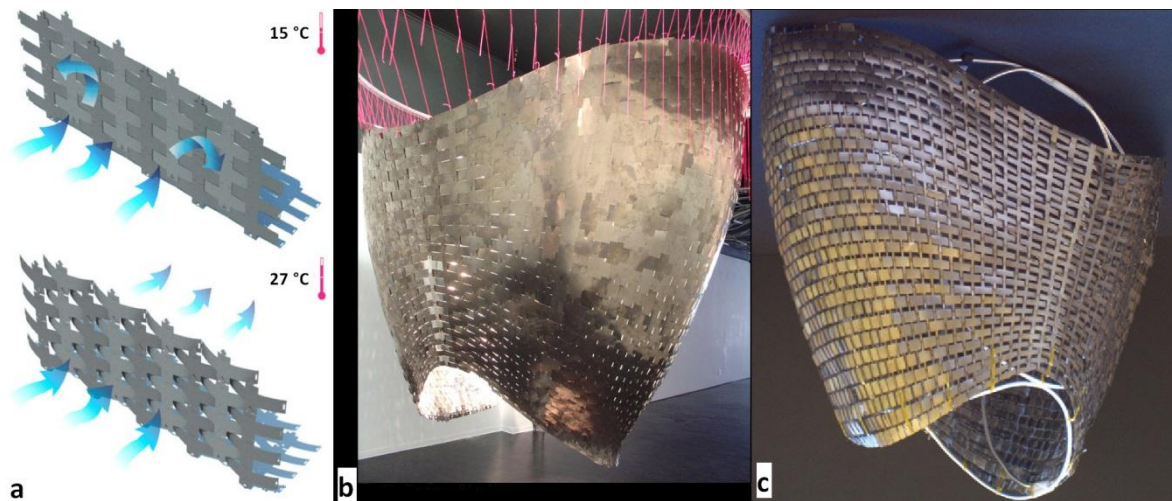


Fig.III.29 (a) comportement des tuiles de bimétal avec le changement de température, les pores du prototype « ARMoured CORSET » (b) fermés(c) ouverts (source : Sung 2010)

L'utilisation des bimétal s'avère avoir un énorme potentiel en tant que matériau de construction, en particulier en tant que matériau pouvant être sensible aux changements de température. De nombreux projets de recherche doivent être développés pour tester l'efficacité du matériau avant son application architecturale (Sung 2010).

Conclusion

A travers la revue de littérature sur le sujet des enveloppes adaptatives, notre choix a porté sur les enveloppes adaptatives autonomes, qui s'adaptent aux changements des conditions climatiques environnantes, en se basant sur des principes tirés du monde vivant. L'actionnement passif et autonome de ces enveloppes par les différents stimuli climatiques est prometteur, il fournit un mouvement passif ne nécessitant aucune source énergétique ni de contrôle sous forme d'équipements électroniques high-tech comme le montrent les approches utilisées dans les enveloppes adaptatives contrôlées.

L'investissement dans la phase de conception et de développement des enveloppes adaptatives autonomes en exploitant les avancées technologiques en matière d'interfaces paramétriques de conception et de simulation, offre un potentiel énorme pour développer, tester et optimiser des solutions innovatrices. Dans le prochain chapitre, nous allons proposer et modéliser un système de protection solaire adaptatif passif dont l'actionnement est basé sur les propriétés du matériau utilisé.

Conception d'une enveloppe adaptative autonome

Chapitre IV

Introduction

L'exploitation des outils de conception paramétriques offrant une flexibilité de manipulation des différents paramètres, semble indispensable pour créer un modèle numérique du système de protection solaire adaptatif passif que nous devons concevoir et qui sera testé afin d'évaluer les hypothèses précédemment considérées.

Dans le présent chapitre, nous allons concevoir un système de protection solaire adaptatif autonome par le biomimétisme du phénomène de mouvement thermonastique des fleurs, qui ressemble dans son principe au comportement thermique des bandes bimétalliques anthropogéniques. Cependant la création d'un modèle numérique de ce comportement va nous permettre d'émuler l'interaction entre le matériau utilisé et les conditions climatiques environnantes.

Dans cette phase de conception, l'utilisation de l'outil de modélisation paramétrique *Rhinoceros- Grasshopper*, nous a permis de faire la modélisation d'un système de protection solaire adaptatif, où les entrées (propriétés thermo-physiques du matériau utilisé et les paramètres du climat) s'interagissent d'une manière dynamique.

En outre, pour tester notre système de protection solaire adaptatif, nous devons le soumettre à des conditions climatiques réelles. Il est donc logique de commencer par le choix d'une région climatique sur laquelle notre étude sera effectuée, où une analyse climatique et bioclimatique va nous fournir tous les paramètres nécessaires qui vont servir à notre modèle numérique.

IV.1. Aperçu sur la ville de Bou Saada

La ville de Bou Saada, l'oasis la plus proche de la capitale du pays (Algérie), constitue le grand carrefour où convergent les échanges de plusieurs villes importantes (M'sila, Biskra, Alger). Avec sa position géographique au centre de la wilaya de Bou Saada, elle rayonne sur toute la partie méridionale du territoire de la wilaya de M'sila (Dechaicha

2014). Bou Saada se situe à une latitude de $35^{\circ} 33'$ Nord, $4^{\circ}20'$ Est et une altitude de 461m (Fig.IV.1).



Fig.IV.1 Situation géographique de la ville de Bou Saada

(Source: www.cartograf.fr) (Éditée par l'auteur)

IV.1.1. Climat de la ville de Bou Saada

Le climat dominant de Bou Saada est désertique. D'après Köppen et Geiger, le climat est classé BWk (arid desert cold). Cependant Bou Saada se situe dans la zone climatique d'été (E3) qui se caractérise par des étés très chauds et secs mais moins pénibles que les zones (E4) et (E5). Par ailleurs, la zone climatique d'hiver de Bou Saada est (H3a) qui est remarquable par des hivers très froids la nuit par rapport au jour, ce qui rend les écarts de température très importants (Ould Henia 2003) (Fig.IV.2).

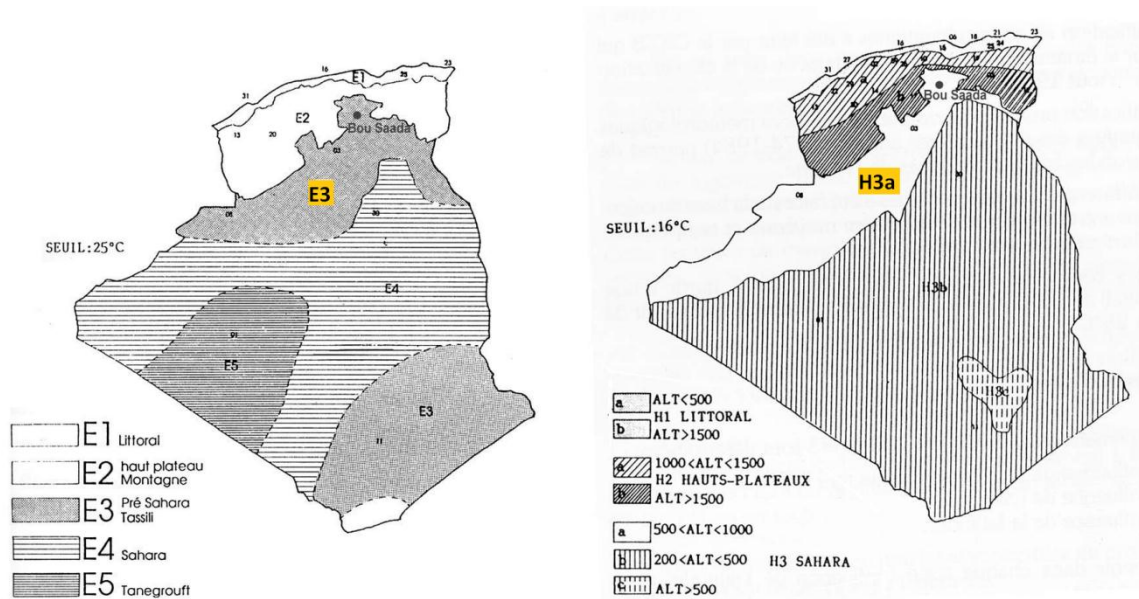


Fig.IV.2 Zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie

(Source: Ould Henia 2003) (Éditée par l'auteur)

IV.1.1.1. Température

La température de l'air moyenne annuelle à Bou Saada est de 19.63 °C, avec une température moyenne de 32.61 °C durant le mois de Juillet, marqué le mois le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid de l'année, avec une température moyenne de 9.45 °C.

IV.1.1.2. Humidité relative

Le taux d'humidité le plus élevé enregistré à Bou Saada est de 74% durant le mois de décembre. Par contre la valeur la plus basse est enregistrée au mois de juillet, elle équivaut à 33.4%.

IV.1.1.3. Vents dominants

A Bou Saada, en hiver les vents froids et secs viennent du Nord - Est. En été, les vents très chauds arrivent du Sud – Ouest. Les vents de sable et de poussière sont fréquents pendant les saisons printanières. Le sirocco a lieu généralement en été. La vitesse moyenne annuelle est de 2.64 m/s (Iowa Environmental Mesonet 2017) (**Fig.IV.3**).



[DAAD] BOU-SAADA
 Windrose Plot [All Year]
 Period of Record: 24 Feb 2001 - 29 Jun 2017

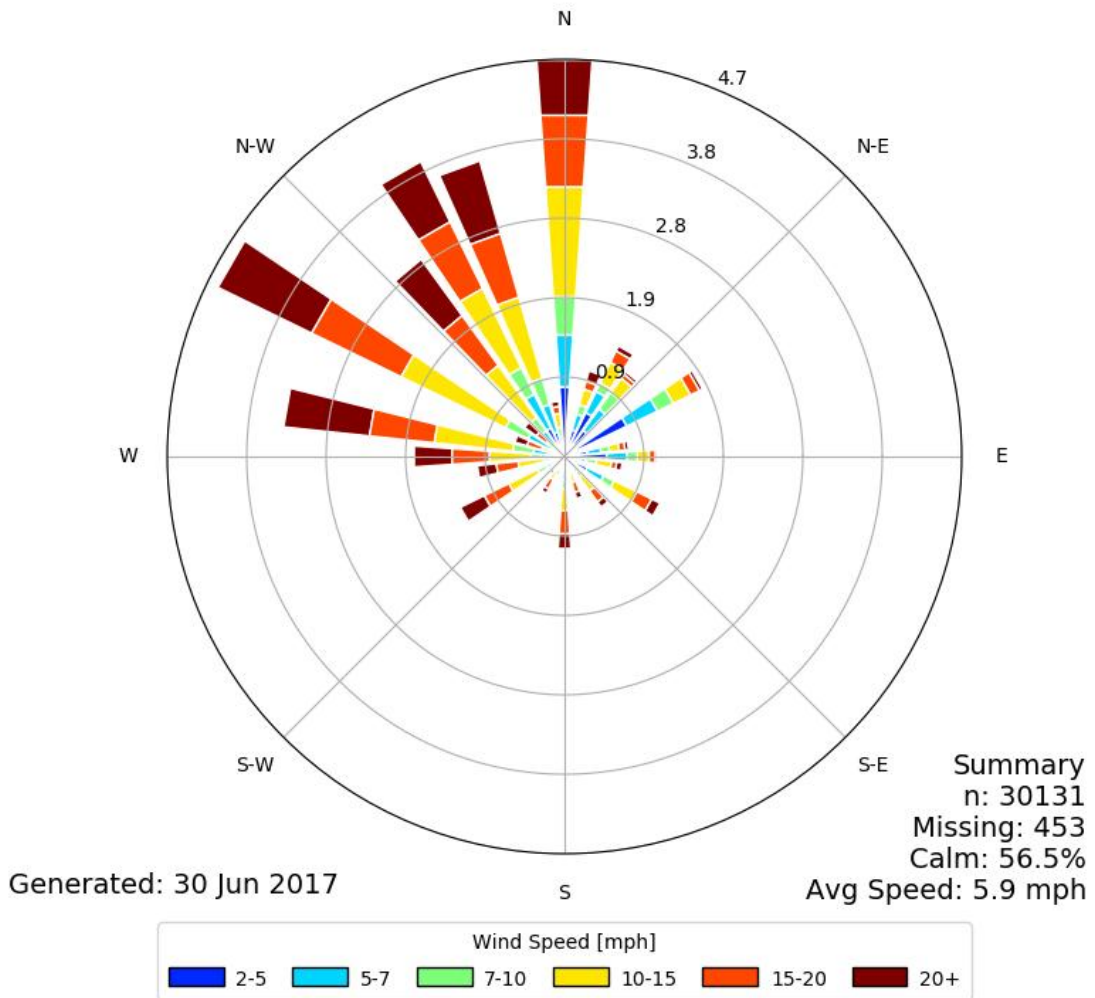


Fig.IV.3 Rose des vents de la ville de Bou Saada (Source: IEM 2017)

IV.1.1.4. Précipitations

Les précipitations les plus importantes à Bou Saada sont enregistrées au mois de septembre. Elles sont de 30.68 mm en moyenne.

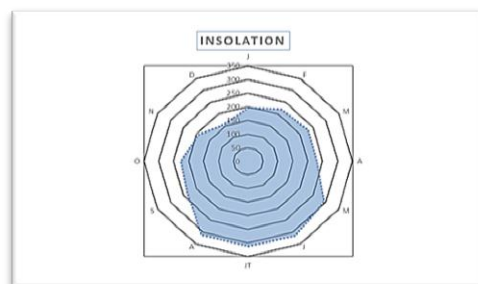
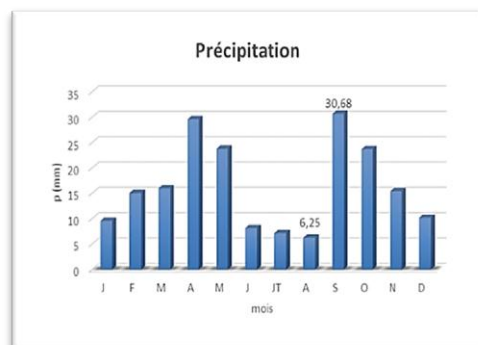
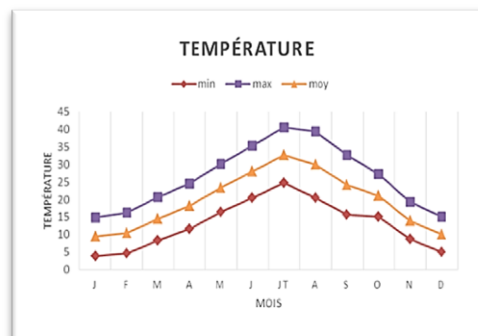
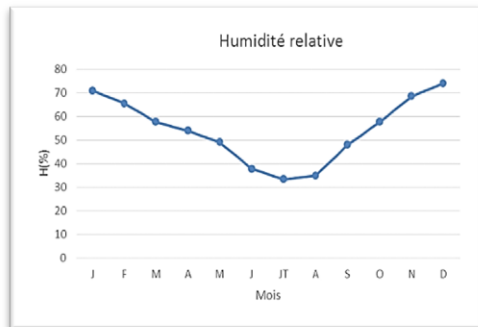
IV.1.1.5. Ensoleillement

Les radiations solaires sont très intenses à Bou Saada en été d'une durée de 316h/m durant le mois de juin et un minimum de 157.6 h/m pendant le mois de Décembre. La durée d'insolation peut atteindre les 2923.02 h/an.

Tab.IV.1 Interprétation des données météorologiques de la ville de Bou Saada

(Source : www.climate-data.org, 2015)

Bou Saada : Latitude : 35° 33' Nord, Longitude : 4° 20' Est, Altitude : 461m



Température

T moy max = 32.61 °C au mois de Juillet

T moy min = 19.63 °C au mois de Janvier

Humidité

HR moy max = 74% au mois de Décembre

HR moy min = 33.4% au mois de Juillet

Précipitations

Précip max = 30.68 mm

Précip min = 24.3 mm

Insolation

Insol max = 316h au mois de Juin

Insol min = 157.6h au mois Décembre

IV.1.2. Analyse bioclimatique de la ville de Bou Saada

Le climat de la ville de Bou Saada est contrasté, caractérisé par un hiver très froid surtout la nuit et un été très chaud et sec. La lecture des résultats de l'analyse bioclimatique est faite à l'aide de l'application «Climate Consultant 5.5». Le diagramme psychrométrique de la ville de Bou Saada (Fig.IV.4) révèle que la période de confort thermique n'occupe que **19.4%** de l'année, soit 1696 heures, par conséquent plusieurs stratégies passives et actives sont recommandées pour élargir cette zone de confort thermique durant l'année. Parmi ces stratégies :

- La protection solaire des fenêtres durant **19.3% de l'année** soit **1690 heures** pendant la période estivale.
- Les Gains solaires passifs directs avec effet de masse thermique durant **18.5% de l'année** soit **1621 heures** pendant la période hivernale.

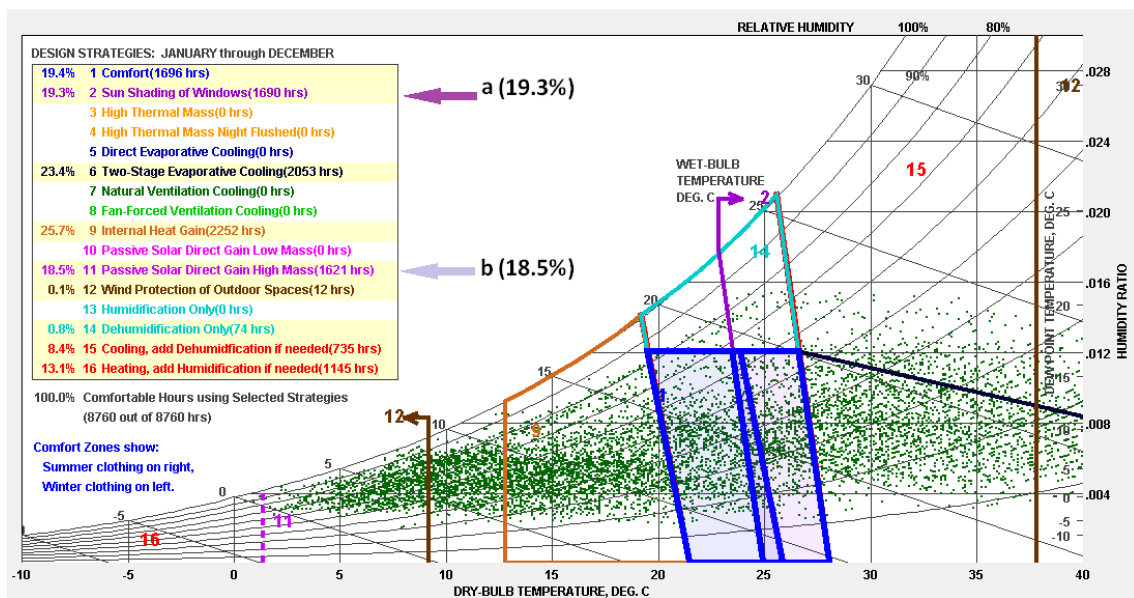


Fig.IV.4 Diagramme psychrométrique de la ville de Bou Saada, (a)zone de protection solaire des fenêtres(b) Gain solaire passif direct avec effet de masse thermique (Source: auteur, 2017)

Les deux stratégies préconisées occupent presque le même pourcentage d'heures durant l'année tout en étant dans deux périodes contrastées, ce qui représente un défi pour les architectes qui doivent trouver des solutions assurant un compromis entre les exigences des deux périodes : estivale et hivernale. La conception d'un procédé d'ombrage passif est recommandée pour répondre à ces défis

IV.2. Système de protection solaire adaptatif

Les enveloppes adaptatives autonomes ont été étudiées par plusieurs chercheurs à travers le monde, démontrant leur efficacité énergétique et leur rôle dans la protection de l'environnement. Notre choix a donc porté sur les enveloppes adaptatives autonomes basées sur le comportement des matériaux pour la conception de ce système.

Notre conception est basée sur le principe du comportement thermonastique trouvé dans les pétales des fleurs, lié aux recherches sur les matériaux des bandes biméalliques. Cette idée n'est pas notre création, elle est déjà proposée par les chercheurs Foged et Pasold (2010) qui ont proposé un modèle numérique du comportement thermique des bandes biméalliques. Ils ont conclu que la configuration du matériau avec des propriétés physiques explicitement définies, fusionnent avec les stratégies environnementales architecturales pour des conditions spatiales améliorées, en régulant la lumière du jour et les niveaux de température, l'exposition aux rayonnements ou bien pour une expression visuelle variée (**Fig.IV.5**). Cependant la définition paramétrique de ce modèle n'a pas été présentée dans cette recherche.

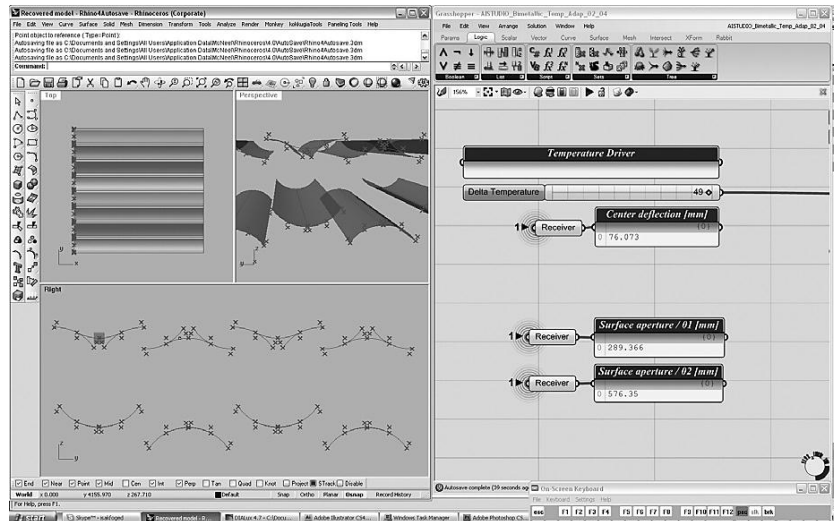


Fig.IV.5 Modèle paramétrique du comportement de matériaux des bandes biméalliques

(Source: Foged et Pasold 2010)

Dans le but de définir notre propre modèle du comportement du matériau qui sera utilisé dans notre système de protection solaire adaptatif autonome, nous avons essayé de comprendre le comportement thermonastique chez les fleurs d'une part, et le comportement thermique dans les bandes biméalliques d'une autre part.

IV.2.1. Thermonastie

Selon la définition du dictionnaire de Collins, la thermonastie est un mouvement chez les plantes en réponse à un changement de température, comme cela se produit à l'ouverture de certaines fleurs. Chez la plupart des espèces étudiées, les mouvements des pétales sont dus à une différence de taux de croissance des deux côtés. Dans les espèces qui s'ouvrent le matin et qui réagissent principalement à la température, par exemple la surface interne du pétale croît rapidement lorsque la température augmente, tandis que la surface extérieure ne se développe pas (**Fig.IV.6**) (Doorn & Meeteren 2003).

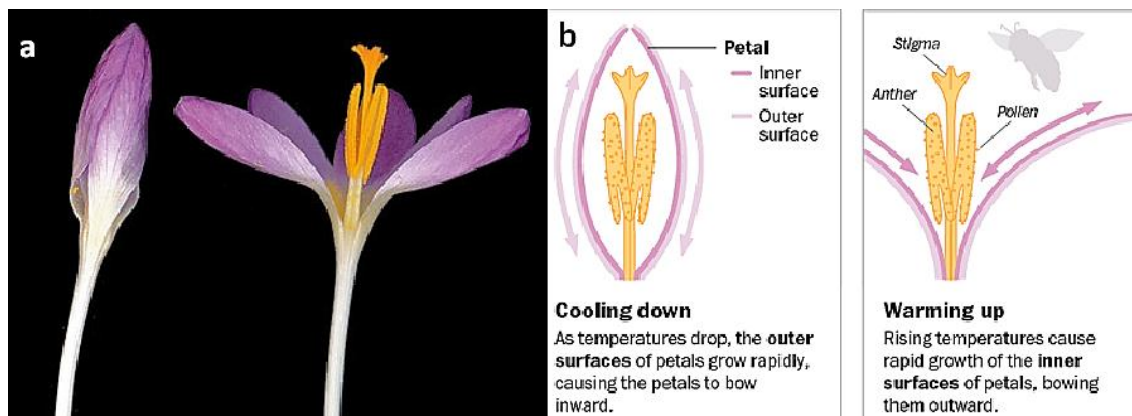


Fig.IV.6 (a) Fleurs de Crocus s'ouvrent lorsque la température augmente (b) schéma de principe de mécanisme de mouvement thermonastique des Crocus

(Source: biology4isc.weebly.com/plant-movement.html)

Le phénomène de mouvement thermonastique chez les fleurs est un comportement lié à la physiologie de leurs pétales, composés de deux couches minces bien associées présentant une réaction anisotrope au changement de température, ce qui ressemble au comportement des bandes bimétalliques anthropogéniques utilisées souvent dans le domaine de mesure de température, récemment étudiées pour les utiliser dans l'architecture.

IV.2.2. Bandes bimétalliques

La bande bimétallique est un dispositif thermomécanique composé de deux métaux de coefficients de dilatation thermique linéaire différents, désignés par deux métaux intimement et définitivement assemblés à une interface matérielle commune (Angel 2014)(**Fig.IV.7**).

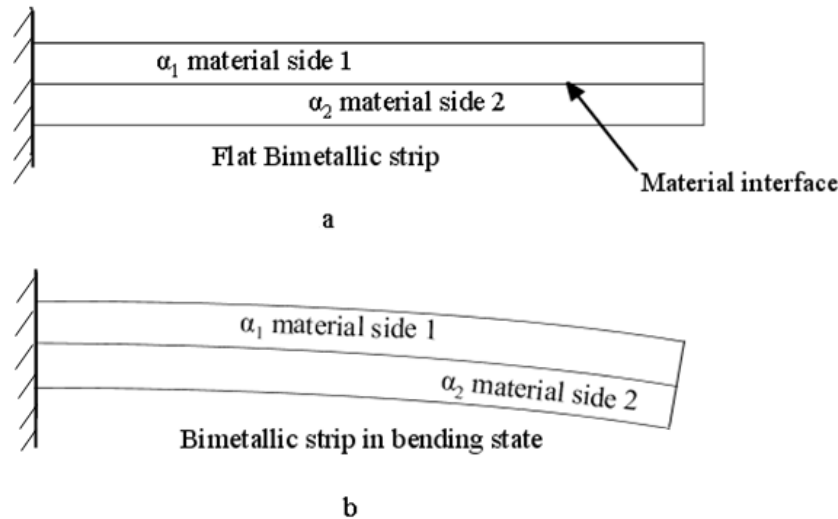


Fig.IV7 Vue de profil sur une bande bimétallique plate(a) et incurvée(b)

(Source : Angel 2014)

Lors de l'application uniforme d'un différentiel de chaleur sur toute la longueur de la bande (l'augmentation de la température à partir de la température ambiante), la bande bimétallique fléchit de l'état initial plat vers un état incurvé. La courbure reste aussi longtemps que le différentiel de chaleur à la bande est appliqué. Une fois la chaleur retirée, la bande retrouve son état initial plat (**Fig.IV.7.a**).

Si le côté du matériau 1 a un coefficient de dilatation thermique linéaire α_1 , qui est numériquement supérieur à celui du côté du matériau 2 ayant le coefficient α_2 , la flexion se produit dans la direction indiquée dans la figure (**Fig.IV.7.b**).

Par ailleurs, une formule alternative a été dérivée pour permettre une prédiction proche du rayon de courbure d'une bande bimétallique mince qui, à la température ambiante initiale, est à la fois plate et droite, c'est la formule de **Timoshenko** (Angel & Haritos 2013).

IV.2.2.1. Formule de Timoshenko

La formule du rayon de courbure d'une bande bimétallique originale de **Timoshenko** a été publiée en 1925 et depuis lors, elle a été appliquée par une multitude d'ingénieurs et de scientifiques et citée dans de nombreux articles (Angel & Haritos 2013).

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1+m)^2(T-T_0)}{h(3(1+m)^2 + (1+m.n)\left(m^2 + \frac{1}{m.n}\right))} \dots\dots\dots^1$$

Où :

ρ : Rayon de courbure de la bande bimétallique.

α_2 et α_1 : coefficients de dilatation thermique des deux matériaux et α_2 est considéré comme supérieur à α_1 .

$m = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$: Ratio des coefficients de dilatation thermique des deux matériaux.

$n = \frac{E_1}{E_2}$: Ratio des modules d'Young (module d'élasticité) des deux matériaux.

h : Épaisseur totale de la bande bimétallique.

T : Température de la bande à une température supérieure ou inférieure à la température ambiante.

T_0 : Température initiale de la bande à température ambiante.

Il est à noter que T_0 dépend fortement de la température ambiante locale, et que la bande bimétallique doit être dans une condition de température ambiante stable, avant que l'addition ou la soustraction de chaleur à la bande, produise une différence de température et donc une modification du rayon de courbure. T_0 est concédée comme la température de début de réaction de la bande bimétallique (Angel 2014)

La formule de Timoshenko présente un support important pour le modèle du comportement du matériau qui sera utilisé dans notre système de protection solaire adaptatif autonome. Par ailleurs les données de cette formule présentent les propriétés thermo-physiques des matériaux composants de la bande bimétallique, donc le choix des matériaux va les définir. Quant aux températures (T) et (T_0), celles-ci dépendent des conditions climatiques environnantes auxquelles la bande bimétallique est exposée.

¹ La première formule de Timoshenko(1925) (Source : Geoffrey 2014)

Cependant, pour définir la température de la bande bimétallique, nous devons calculer son bilan thermique (Sotehi 2009).

IV.2.2.2. Calcul de la température de la bande bimétallique(*T*)

La bande bimétallique sera exposée aux conditions climatiques de la région choisie (Bou Saada). Le bilan thermique suivant sert à calculer la température de la bande mince bimétallique.

$$T = \frac{(\alpha \times I_g + 2 \times (5.7 + 3.8 \times V_v)) \times T_a}{2 \times (5.7 + 3.8 \times V_v)} \dots\dots\dots^2$$

Où :

T : Température de la bande à une température supérieure ou inférieure à la température ambiante.

α : Coefficient d'absorption du matériau de la bande bimétallique.

I_g : Rayonnement solaire reçu par la bande bimétallique.

T_a : Température de l'air.

V_v : Vitesse du vent.

Ce bilan énergétique va nous aider à introduire les conditions climatiques de la région d'étude. Pour simplifier les calculs et concentrer le développement de notre modèle numérique sur le comportement thermique de la bande, nous allons considérer l'effet de l'humidité de l'air comme étant neutre.

IV.2.2.3. Définition de la température de réaction de la bande bimétallique(*T₀*)

Dans le but de définir la température de réaction de la plaque bimétallique, nous avons opté pour une approche expérimentale dans laquelle nous avons essayé de trouver

²Bilan thermique de la bande bimétallique (Source : Sotehi 2009)

deux matériaux que nous pouvons coller ensemble pour constituer une bande bi matérielle, vu que les bandes bimétalliques ne sont pas disponibles et leur fabrication demande une technologie et des moyens qui dépassent nos capacités dans cette recherche.

Le choix est donc tombé sur deux matériaux disponibles et faciles à manipuler : l'aluminium et le papier.

2.2.3.1. Description du matériel de l'expérience

Nous avons collé des feuilles d'aluminium et du papier couché ensemble en formant une bande bi-matérielle de 20 cm de longueur et 5 cm de largeur et de 0.045 mm d'épaisseur. Pour effectuer l'expérience, nous avons utilisé le matériel suivant (**Fig.IV.8**) :

- Un micromètre pour mesurer l'épaisseur de la bande.
- Un projecteur de lumière à lampe d'incandescence de 200 watts.
- Un anémomètre à fil chaud pour mesurer la température.
- Une caméra pour capter la mesure de température au moment opportun.
- Une trame de fond imprimée sur papier pour repérer la courbure de la bande bi-matérielle.



Fig.IV.8 Matériel expérimental utilisé (Source : auteur, 2016)

2.2.3.2. Mesure expérimentale de la température de réaction(T_0)

L'expérience s'est effectuée en exposant la bande bi matérielle à un rayonnement du projecteur de lumière à lampe d'incandescence, pour augmenter sa température et provoquer la courbure. Une fois la courbure et remarquable, nous éteignons le projecteur en laissant la bande se refroidir pour qu'elle récupère sa forme plane à nouveau.

Lorsque la bande s'aligne verticalement avec les traits de la trame de fond, nous captions la mesure de température par la caméra. L'expérience a été refaite trois fois pour confirmer la mesure. La température de réaction de notre plaque bi-matérielle est de 20.7°C (**Fig.IV.9**).

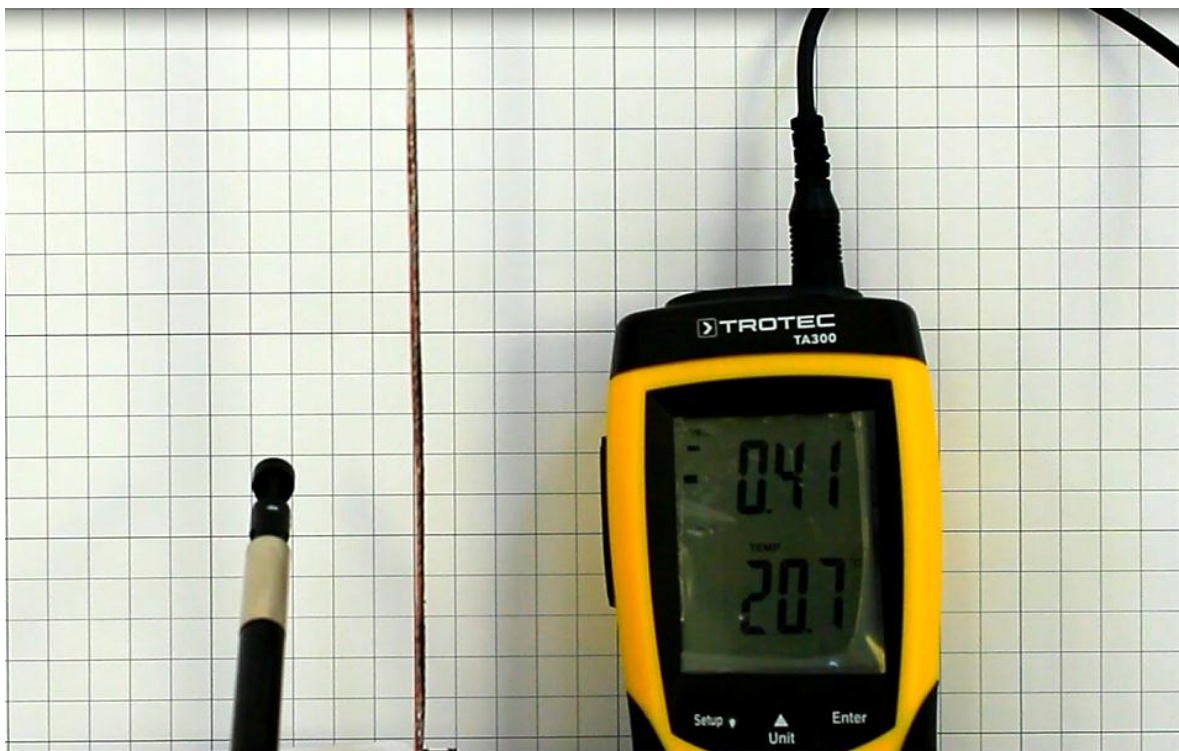


Fig.IV.9 Mesure expérimentale de la température de réaction de la bande bi-matérielle

(Source :auteur, 2016)

Après avoir acquis la formule de calcul de courbure de la bande bi matérielle, le bilan thermique de cette bande, sa température de réaction et les propriétés thermo-physiques propres aux deux matériaux, une base de données est prête pour être exploitée dans la création du modèle de comportement thermique. Cependant la manipulation de cette panoplie de paramètres liés aux matériaux et au climat qui change continuellement sera difficile à maîtriser, vu le nombre de calculs à faire

simultanément à chaque changement des trois paramètres climatiques à considérer dans notre étude (température de l'air, vitesse du vent et rayonnement solaire).

Pour cela, nous avons opté pour l'utilisation de l'outil de conception paramétrique *Grasshopper* intégré dans le logiciel de modélisation *3D Rhinoceros* pour modéliser notre système de protection solaire.

IV.3. Présentation du logiciel

D'après Robert McNeel & Associates (n.d.), *Grasshopper* est un éditeur d'algorithmes graphique développé par David Rutten, il est étroitement intégré à l'outil de modélisation *3D Rhinoceros* développé par McNeel. Grasshopper permet aux concepteurs de créer et de générer des formes du simple au complexe sans une grande connaissance de programmation ou de script (**Fig.IV.10**).

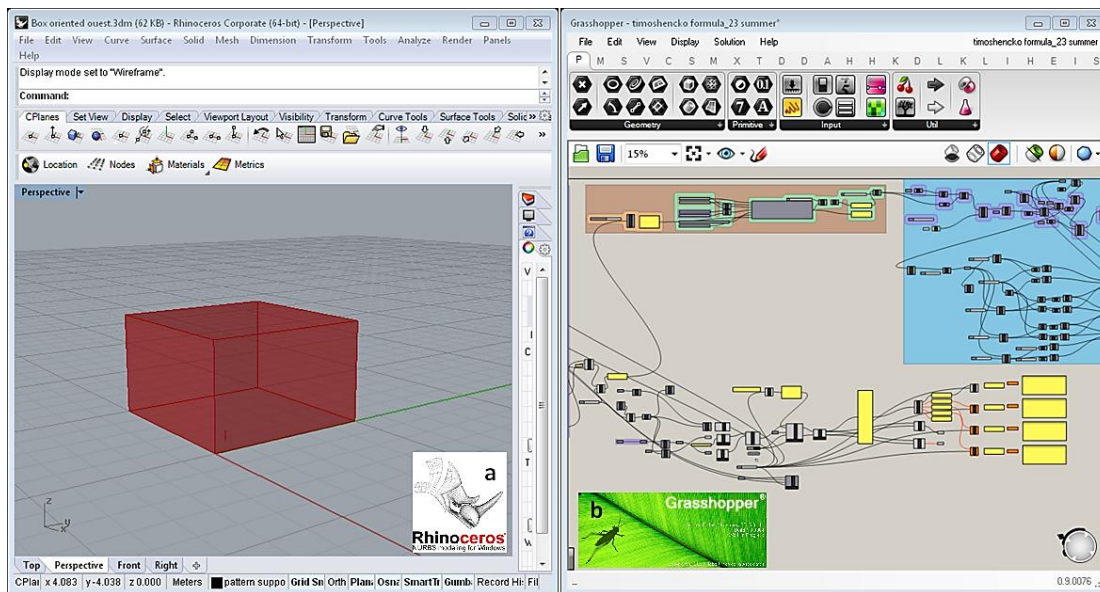


Fig.IV.10 Interfaces de Rhinoceros et Grasshopper (Source : auteur, 2017) et leurs logos (a)(source : <http://blog.rhino3d.com>) et (b) (source : <https://discourse.mcneel.com>)

Avec l'introduction de la programmation visuelle de *Grasshopper*, les possibilités de personnalisation ont été améliorées en raison de son «éditeur basé sur les nœuds» en tant qu'interface utilisateur principal pour la conception des algorithmes. De plus, la génération de données ou d'objets paramétriques n'est pas limitée aux composants intégrés dans Grasshopper. Il est également possible d'échanger des données avec d'autres add-ons en

tant qu'entrées et sorties pour d'autres calculs et de le lier à la géométrie *Rhino* ainsi que d'autres fichiers sur l'ordinateur (Ercan & Elias-Ozkan 2015).

Nous avons donc choisi *Rhinoceros* et *Grasshopper* pour générer le pliage paramétrique d'une surface qui va représenter la bande bi matérielle. Ceci en introduisant les différents paramètres (voir 2.2.3.2 de ce chapitre) influents sur le comportement de la bande bi matérielle comme entrées dans *Grasshopper* et où nous allons utiliser les différents plug-ins pour générer l'interaction entre ces paramètres en temps réel.

IV.4. Définition paramétrique du comportement de la bande bi matérielle

En utilisant les différentes composantes des plugins *Grasshopper*, nous avons introduit l'équation du bilan thermique de la bande bi matérielle et la formule de **Timoshenko**, en créant un algorithme définissant chaque équation, pour enfin modéliser géométriquement le comportement de la bande bi matérielle vis-à-vis des conditions climatiques environnantes.

IV.4.1. Algorithme du bilan thermique de la bande bi matérielle

A l'aide de la composante *Evaluate* du plugin *math* du *Grasshopper*, nous avons créé l'algorithme de la formule de Bilan thermique de la bande bi matérielle de telle sorte que le résultat émane d'une manière dynamique à chaque changement d'une ou de plusieurs entrées (données de la formule : température de l'air, rayonnement et vitesse du vent), ce qui va fournir une des entrées de la formule de Timoshenko) (**Fig.IV.11**).

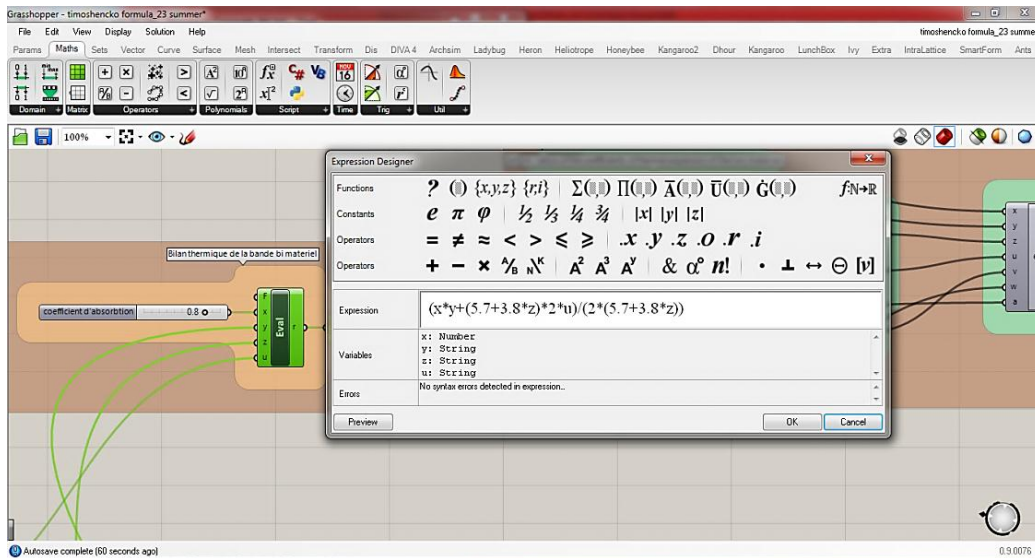


Fig.IV.11 Algorithme de la formule de Bilan thermique édité sous Grasshopper
(Source : auteur, 2017)

Cependant le coefficient d'absorption (α) représente une valeur constante liée aux matériaux utilisés, qui sera introduite manuellement une seule fois.

Le coefficient (α) est faible pour les surfaces métalliques polies et non oxydées. Il augmente pour les corps qui apparaissent noirs mais reste toujours inférieur à l'unité « 1 » (Dunkerque & Perrot 2011). Dans notre cas, la surface de la bande bi matérielle est opaque et la feuille d'aluminium est dépolie, le coefficient (α)=0.8 selon Énergie Planète (n.d) (**Fig.IV.12**)

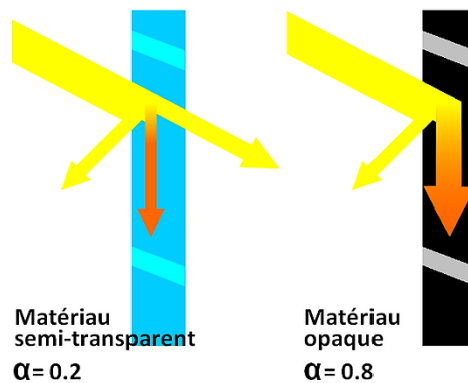


Fig.IV.12 Coefficient d'absorption des matériaux semi transparents et opaques
(Source : <http://www.energieplanete.fr/conversion-energie-rayonnante-thermique.html>)

IV.4.2. Algorithme de la formule de Timoshenko

De la même manière, nous avons créé l'algorithme de la formule de Timoshenko par le biais du plugin *math* du *Grasshopper*(Fig.IV.13).

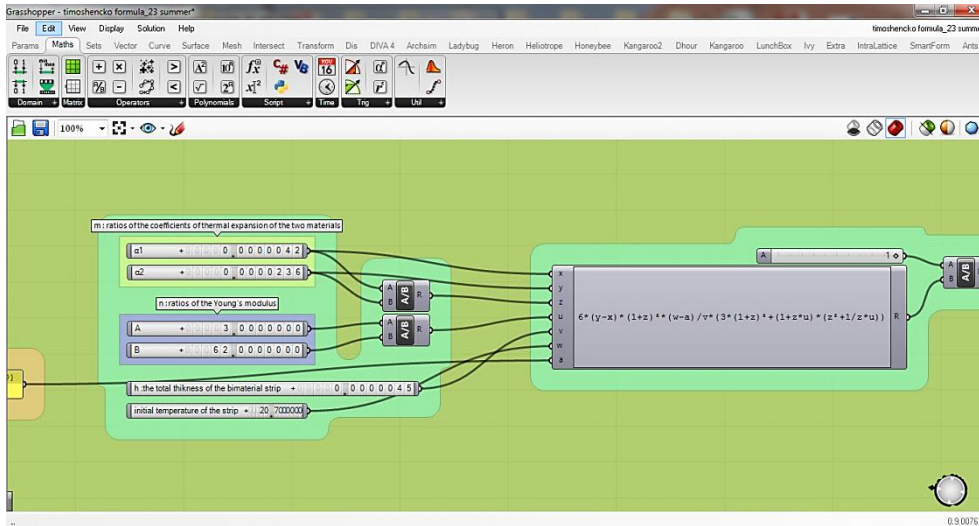


Fig.IV.13 Algorithme de la formule de Bilan thermique édité sous Grasshopper
(Source : auteur, 2017)

Les entrées, cette fois ci, représentent les propriétés thermo-physiques des matériaux composants la bande bi matérielle (Tab.V.2), où elles sont introduites manuellement dans la formule une seule fois selon le choix des matériaux, contrairement à la température de la bande bi matérielle qui représente une entrée variable selon le changement des entrées de l'algorithme du bilan thermique.

Tab.IV.2 Propriétés thermo-physiques de l'aluminium (Source : <http://www.euralliage.com>)
et du papier (Source : <https://www.iggesund.com>)

Propriétés thermo physiques /aluminium	Propriétés thermo physiques / papier
Le module d'Young: 69 GPa	Le module d'Young: 3 GPa
Le coefficient de dilatation: 23.6µm/m-k	Le coefficient de dilatation: 4.2 µm/m-k

Quant à l'épaisseur de la bande bi matérielle et sa température de réaction, les valeurs mesurées (voir: 2.2.3.1 et 2.2.3.2 de ce chapitre) sont également introduites manuellement dans la formule une seule fois.

La sortie de l'algorithme de la formule de Timoshenko deviendra à son tour entrée dans le prochain algorithme, celui de la définition géométrique de la bande bi matérielle.

IV.4.3. Définition géométrique de la bande bi matérielle

Dans cette partie, nous avons utilisé les plugins de modélisation géométrique paramétrique du *Grasshopper*, entre autres (*Params, Surface, Curve, Transform,...etc.*), pour modéliser une surface qui se plie selon un arc de cercle, dont le rayon est de valeur variable générée de manière dynamique par l'algorithme de la formule de Timoshenko (**Fig.IV.14**). La liaison du modèle géométrique de la surface pliante avec les algorithmes des formules du Bilan thermique et de la formule de Timoshenko, nous a permis de générer une courbure pour chaque changement des entrées en temps réel, ce qui représente un modèle numérique du comportement de la bande bi matérielle. Ce modèle sera donc utilisé pour modéliser le système de protection solaire adaptatif autonome.

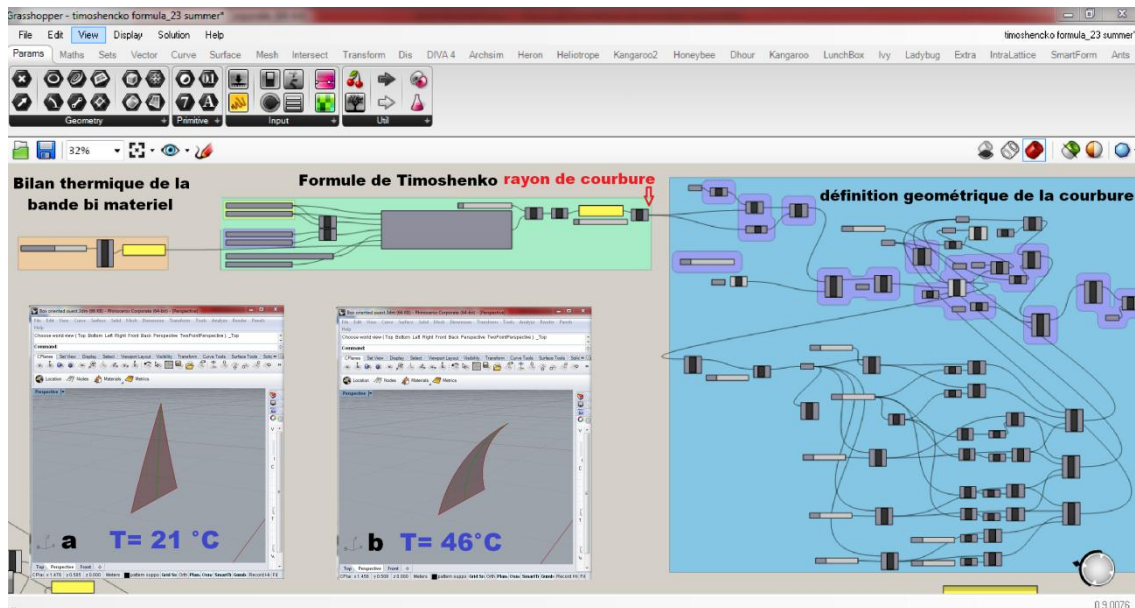


Fig.IV.14 Définition géométrique paramétrique de la bande bi matérielle, (a)et(b)la courbure se produit au changement des entrées (la température de l'air dans ce cas)

(Source : auteur, 2017)

IV.5. Modélisation du système de protection solaire adaptatif autonome

Notre système de protection solaire est conçu sur la base d'un module hexagonal autour duquel se positionnent verticalement des surfaces triangulaires formant ensemble une sorte de coquille qui s'ouvre et se ferme comme une fleur (**Fig.IV.15**)

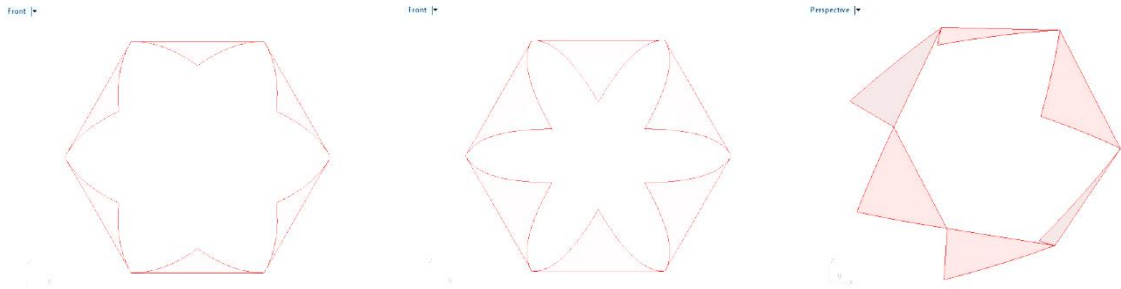


Fig.IV.15 Module de base du système de protection solaire

(Source : auteur, 2017)

Après avoir choisi le module de base du système de protection solaire, nous avons utilisé à nouveau les plugins de modélisation géométrique paramétrique du *Grasshopper* pour lier ce module à notre modèle numérique du comportement de la bande bi matérielle afin de rendre ses surfaces triangulaires pliables. En multipliant le module de base, nous avons créé un écran qui peut couvrir une surface définie (**Fig.IV.16**).

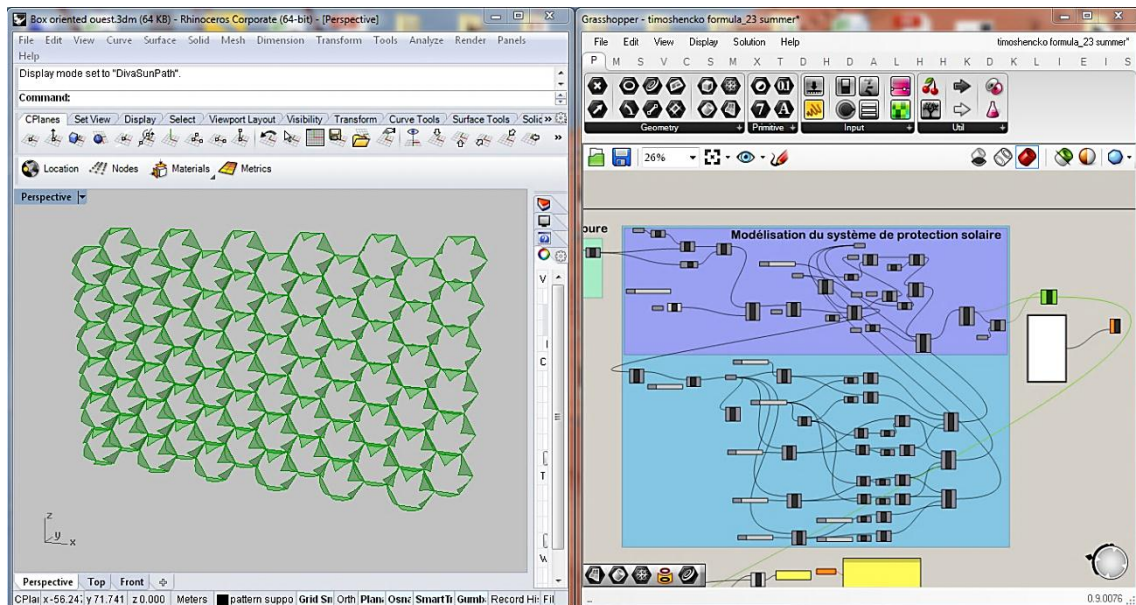


Fig.IV.16 Modèle géométrique paramétrique du système de protection solaire

(Source : auteur, 2017)

À ce stade, nous avons développé une définition paramétrique du système de protection solaire qui s'ouvre et se ferme dépendamment du changement des paramètres climatiques : température de l'air, vitesse du vent et rayonnement solaire (**Fig.IV.17**), (**Fig.IV.18**).

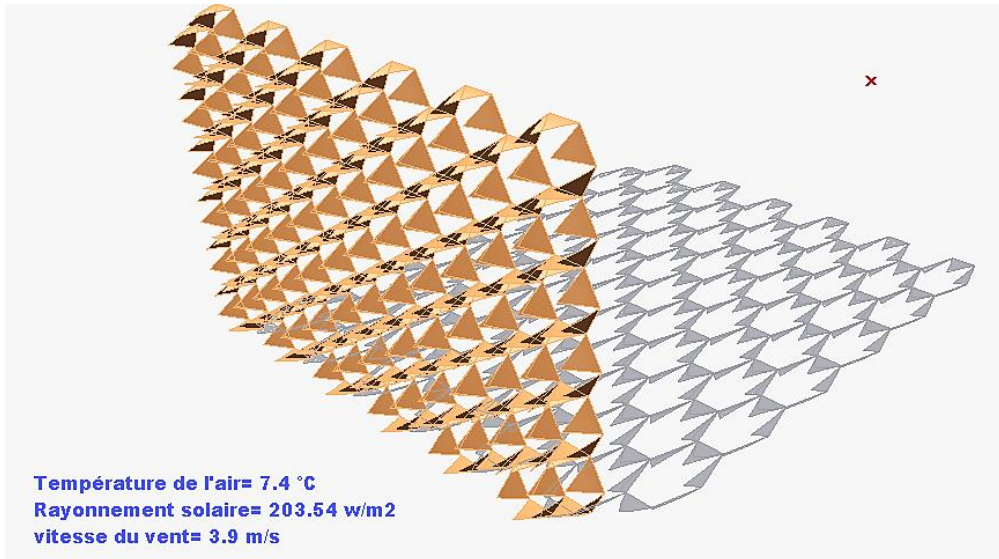


Fig.IV.17 Système de protection solaire ouvert

(Source : auteur, 2017)

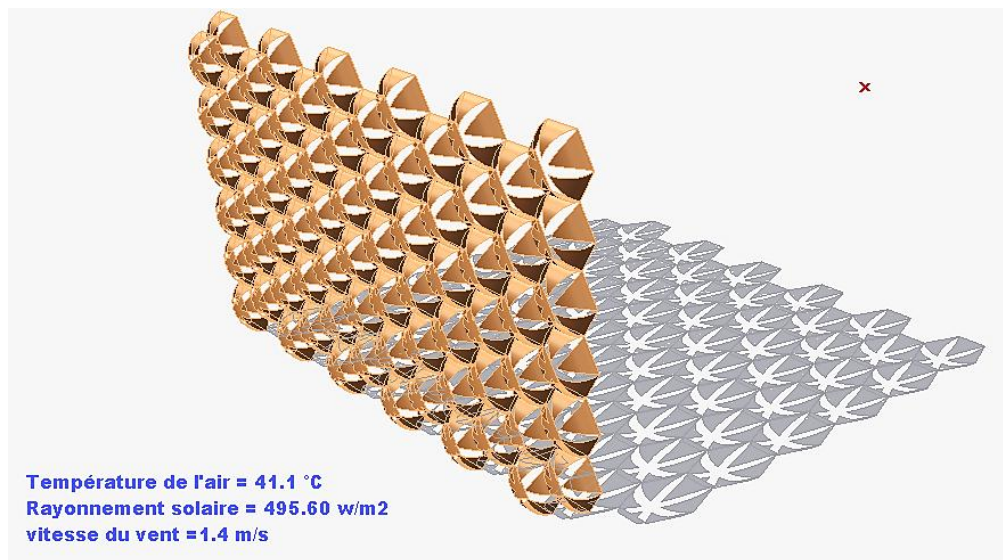


Fig.IV.18 Système de protection solaire fermé

(Source : auteur, 2017)

Conclusion

Les enveloppes adaptatives autonomes de par leur aspect dynamique, présentent un moyen pour jumeler des stratégies qui semblent contradictoires, telles que la protection solaire durant le période estivale et le captage solaire durant la période hivernale.

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle de système de protection solaire adaptatif autonome inspiré du phénomène thermonastique dans la nature en exploitant les recherches sur bandes bimétalliques, et cela en utilisant le logiciel de modélisation paramétrique *Rhinoceros- Grasshopper*. Ce dernier nous a permis d'intégrer le comportement thermique des matériaux utilisés vis à vis des conditions climatiques environnantes dans la définition géométrique du modèle de système de protection solaire adaptatif autonome.

Le résultat final est un système de protection solaire adaptatif autonome qui s'ouvre et se ferme en réponse au changement des trois paramètres climatiques : température de l'air, rayonnement solaire et vitesse du vent d'une manière dynamique durant une période définie. Dans le but d'évaluer l'effet de l'intégration de notre système de protection solaire autonome sur la consommation énergétique dans un espace architectural, nous allons procéder dans le chapitre suivant à une simulation dynamique à l'aide du logiciel de conception paramétrique *Rhinoceros- Grasshopper* à travers ses différentes composantes.

Simulation, résultats et interprétation

Chapitre V

Introduction

Dans une conception architecturale basée sur l'approche bioclimatique, l'adaptation aux conditions climatiques présente une étape primordiale qui permet aux architectes d'assurer un niveau de confort intérieur adéquat ainsi qu'une consommation énergétique réduite. Cependant l'intégration des enveloppes adaptatives autonomes ouvre le champ pour développer des stratégies passives et dynamiques innovantes qui permettent une meilleure adaptation aux changements continuels du climat.

Dans le but d'évaluer la performance énergétique du système de protection solaire adaptatif autonome qu'on a conçu dans le chapitre précédent, nous l'avons intégré dans un box expérimental pour simuler son effet sur la consommation énergétique pour chauffage et climatisation. La simulation a été menée par l'utilisation du plugin de modélisation d'énergie et d'éclairage naturel *DIVA-Rhino-Grasshopper*, cette simulation s'est déroulée pendant deux journées types, une à la période estivale et l'autre à la période hivernale.

Le système de protection solaire adaptatif autonome fonctionne dépendamment du changement de la température de l'air, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire reçu par la façade sur laquelle le système est appliqué, et cela durant une journée type choisie. Du même la simulation a été lancée d'une manière dynamique à chaque changement de position du système de protection, ce qui nous a offert une vision claire sur l'effet de l'utilisation d'un système de protection solaire adaptatif autonome sur la consommation énergétique dans un bâtiment et la possibilité d'évaluer sa performance.

V.1. Consommation énergétique en Algérie

Selon APRUE (2015), la consommation énergétique en Algérie a connu entre les années 2000 et 2013 un taux de Croissance Annuel Moyen de 6,12%, où le secteur résidentiel a connu un taux de 8,17% alors que le secteur tertiaire a connu le taux de 3,82% durant la même période. Par ailleurs ces deux secteurs (tertiaire et résidentiel) jumelés présentent 38% de la consommation énergétique nationale finale, ce qui fait de ces deux secteurs les plus énergivores au pays. Cependant le gaz naturel et l'électricité se distinguent comme les plus consommés des produits énergétiques dans le pays en 2015 avec 51% (**Fig.V.1**). Alors que la consommation du gaz naturel par les centrales électriques (Sonelgaz + auto producteurs) a connu une forte hausse de 12,5%, afin de répondre à une demande en électricité sur le marché intérieur, en constante croissance (Ministère de l'Energie 2015).

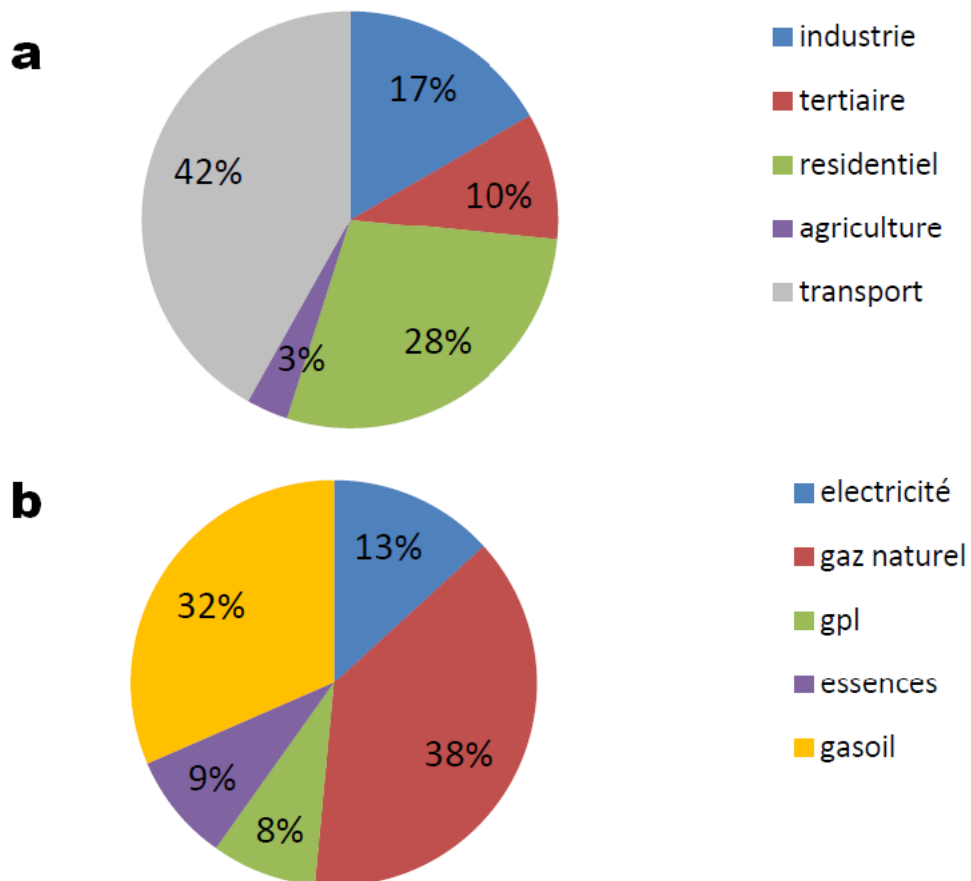


Fig.V.1 (a) Répartition de la consommation d'énergie de la nationale par secteur, (b) Répartition de la consommation d'énergie de la nationale par produit (Source: APRUE 2015)

La région de Bou Saada se situe dans la **Zone 07** selon la répartition géographique des zones de consommation des produits énergétiques à travers le territoire national réalisée par APRUE (2015), cette répartition comprend 10 zones géographiques composées de plusieurs wilayas. Le secteur tertiaire et le résidentiel présentent ensemble 45% de la consommation énergétique finale de la **Zone 07**, alors que la consommation du gaz naturel et l'électricité présente 61% de la consommation finale des produits énergétiques dans cette zone, ce qui présente des valeurs supérieures aux taux moyens nationaux (**Fig.V.2**).

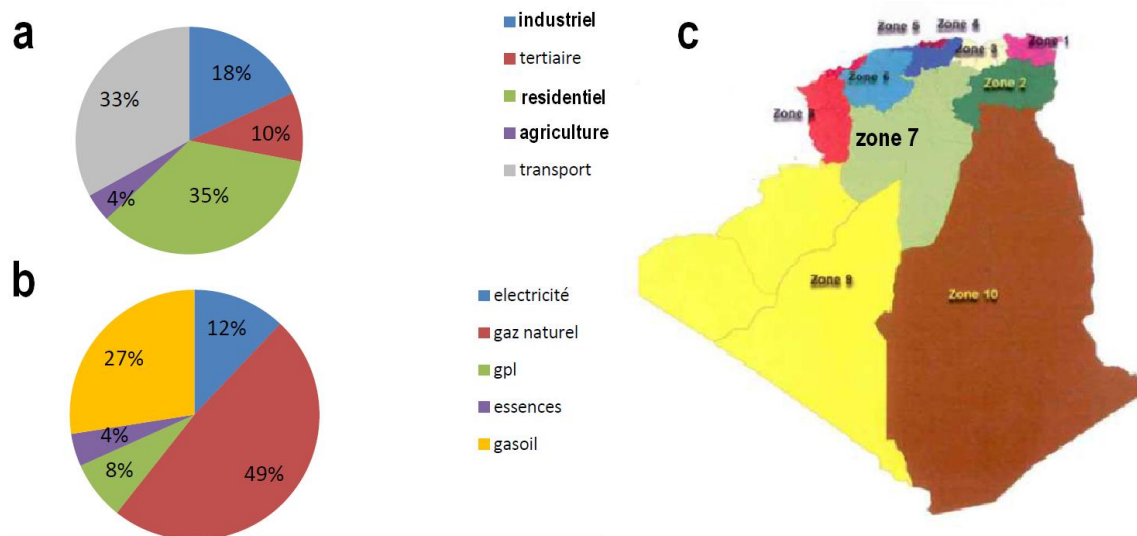


Fig.V.2 (a) Répartition de la consommation d'énergie de Zone 07 par secteur, (b) Répartition de la consommation d'énergie de Zone 07 par produit (c) la répartition géographique des zones de consommation des produits énergétiques en Algérie (Source: APRUE 2015)

La consommation énergétique dans les secteurs tertiaire et résidentiel de la **Zone 07** semble influencée par le climat contrasté de la région (voir 1.1 du chapitre IV), où le besoin d'énergie pour le chauffage et la climatisation est en constante croissance, vu le modèle architecturale très répandu et inadapté au climat de cette région (voir introduction générale). Il est donc nécessaire de concevoir des bâtiments qui s'adaptent au changement de climat pour atténuer leurs impacts sur l'environnement de point de vue réchauffement planétaire et émission de gaz à effet de serre. Dans cette logique nous allons étudier un box expérimental ayant une façade avec un ratio de vitrage assez élevée, sur laquelle notre système de protection solaire adaptatif autonome sera appliqué.

V.2. Modélisation du Box expérimental (BE)

La modélisation va permettre de mesurer l'efficacité du box proposé à travers l'observation des variations de températures. Pour cela, la simulation a eu lieu pendant les deux périodes : estivale et hivernale. Nous avons donc proposé un box expérimental dont les dimensions sont : 5m de longueur, 5m de largeur et 3.06m de hauteur. Une des faces du box comporte une baie vitrée (1.99m de hauteur par 4m de largeur) soit un ratio de surface vitrée de 52% (Fig.V.3).

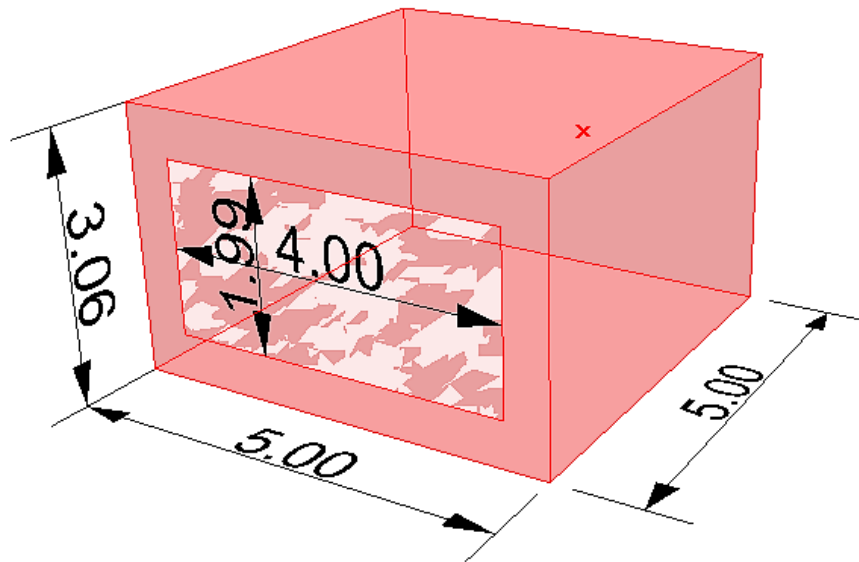


Fig.V.3 Dimensionnement du box expérimental (Source: auteur 2017)

V.2.1. Définition paramétrique du BE

Les différentes composantes des plugins de modélisation géométrique paramétrique du *Grasshopper* ont permis de créer le BE représentant un espace architectural (espace de travail). Les différentes caractéristiques comportant les propriétés thermo physiques des matériaux du Box sont introduites entant que des inputs ainsi que son orientation et ses conditions de fonctionnement (Fig.V.4).

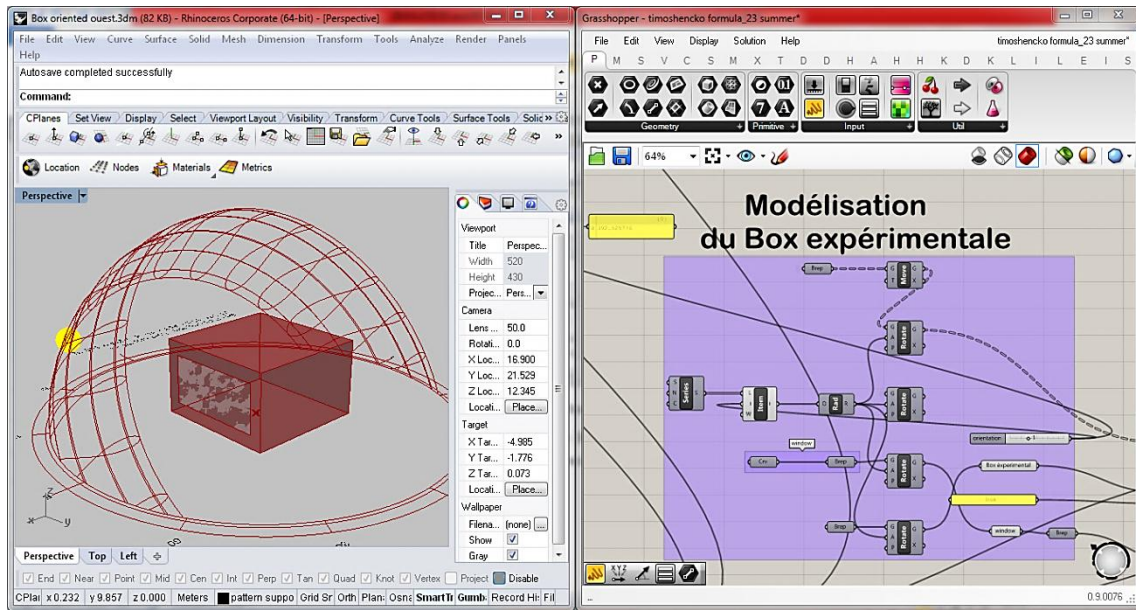


Fig.V.4 Définition paramétrique du BE (Source: auteur 2017)

Après avoir modélisé et paramétré le BE ; nous avons appliqué sur sa façade vitrée le système de protection solaire adaptatif autonome reliant les algorithmes du système avec celui du BE. Cet assemblage BS¹ (box + système) va nous permettre de simuler l'effet de la paroi autonome sur le confort intérieur (Fig.V.5).

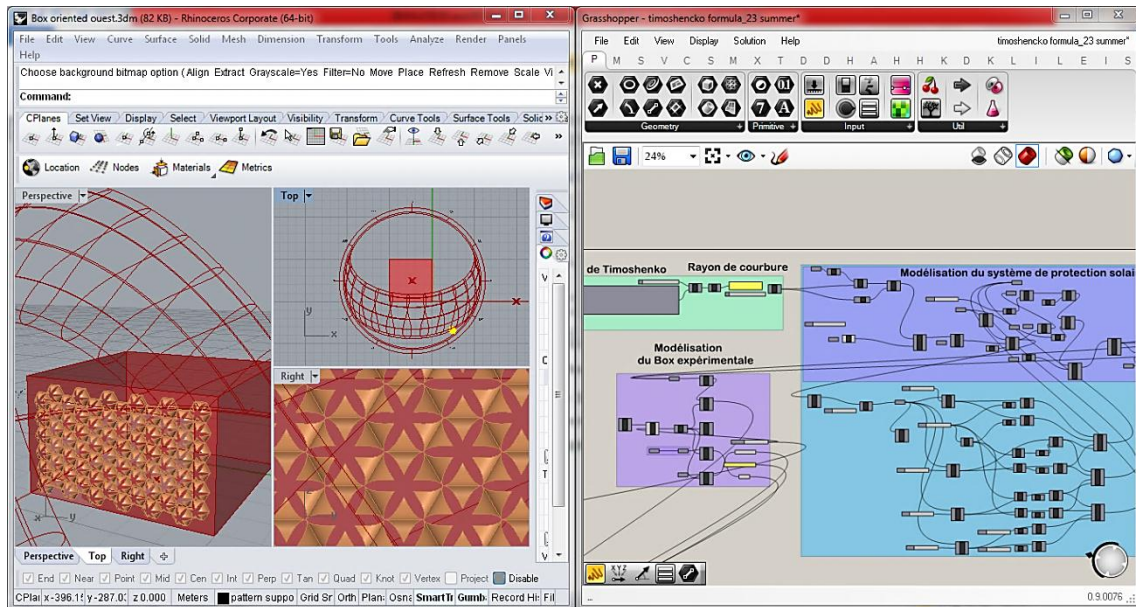


Fig.V.5 Application du système de protection solaire sur le BE (Source: auteur 2017)

¹ (Box + système)

V.3. Traitement des données climatiques

Le logiciel *METEONORM 7* a permis d'extraire les données climatiques de la région d'étude -ville de Bou Saada- (fichier extrait est du format EPW) représentant les données horaires d'une décennie (2001-2011). Ce fichier est inséré dans *Grasshopper* à l'aide du plugin *Ladybug* qui est une application informatique de conceptions environnementales permettant d'importer et d'analyser des données météorologiques standard. Il permet aussi de dessiner des diagrammes tels que la trajectoire solaire, la rose des vents, la rose des radiations solaires, l'analyse du rayonnement, l'étude d'ombres ... (Fig.V.6).

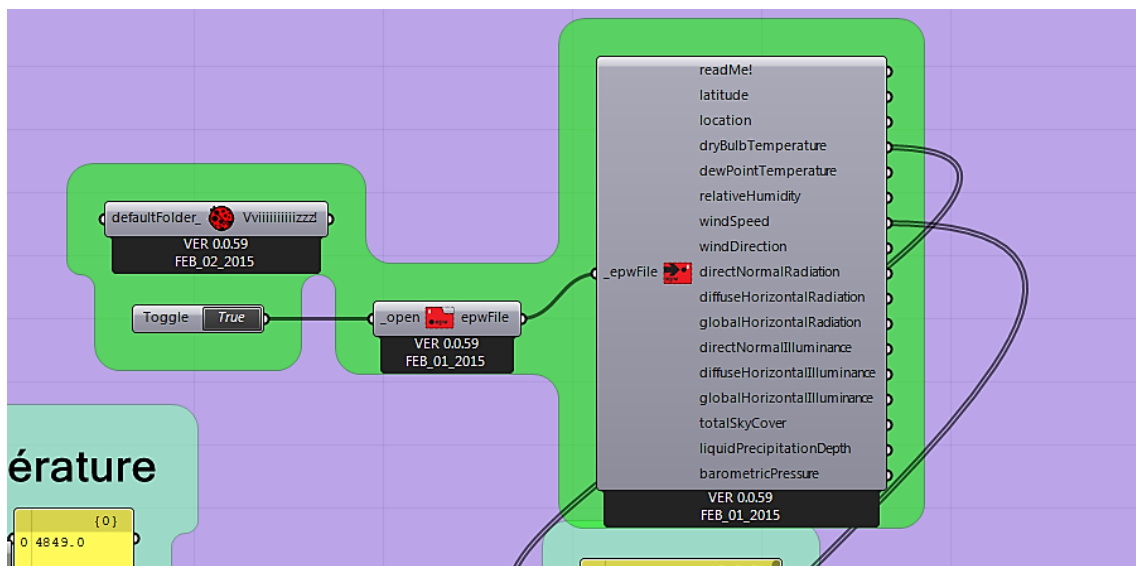


Fig.V.6 Algorithme d'importation du fichier des données climatiques

(Source: auteur 2017)

Les données climatiques du fichier importé sont traitées pour nous permettre d'extraire les valeurs horaires de la température, la vitesse du vent et le rayonnement solaire.

V.3.1. Extraction dynamique des données climatiques

A l'aide du plugin *Ladybug* et des deux plugins de base de *Grasshopper* : *Math* et *Set*, nous avons traité les données climatiques du fichier EPW par un algorithme qui nous a permis d'avoir comme outputs des valeurs uniques de température et de vitesse du vent pour chaque heure d'une journée définie. Les outputs changent automatiquement avec la variation horaire ce qui nous procure des inputs dynamiques pour les algorithmes du BS (Fig.V.7).

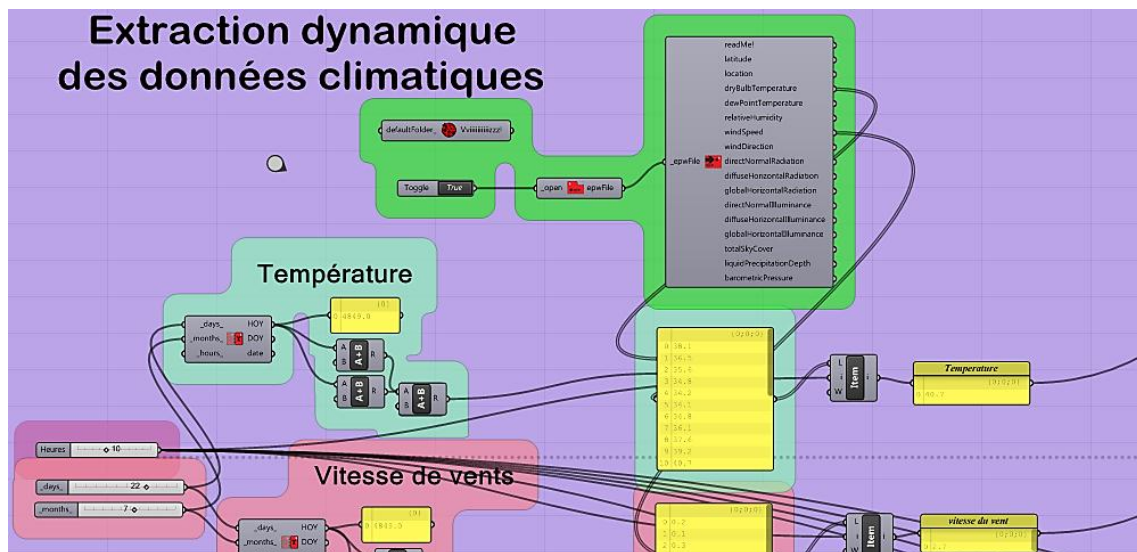


Fig.V.7 Algorithme d'extraction dynamique des données climatiques (Source: auteur 2017)

Dans cet algorithme, nous avons pu traiter les données horaires de la température et de la vitesse du vent. Cependant le rayonnement solaire direct reçu par les façades du BE doit être calculé puisque non fourni par le fichier des données climatiques.

V.3.2. Calcul du rayonnement solaire reçu par les façades du Box

Nous avons développé un algorithme par le biais du plugin de *Grasshopper* « *Ladybug* » ainsi que ses différentes applications et composantes, entre autres : *radiation analysis* et *Ladygug_DOY_HOY*. Ceci nous a permis de calculer le rayonnement solaire incident sur chacune des façades du BE. Les outputs de cet algorithme sont enregistrés sous forme d'un tableau pour chaque orientation (Fig.V.8).

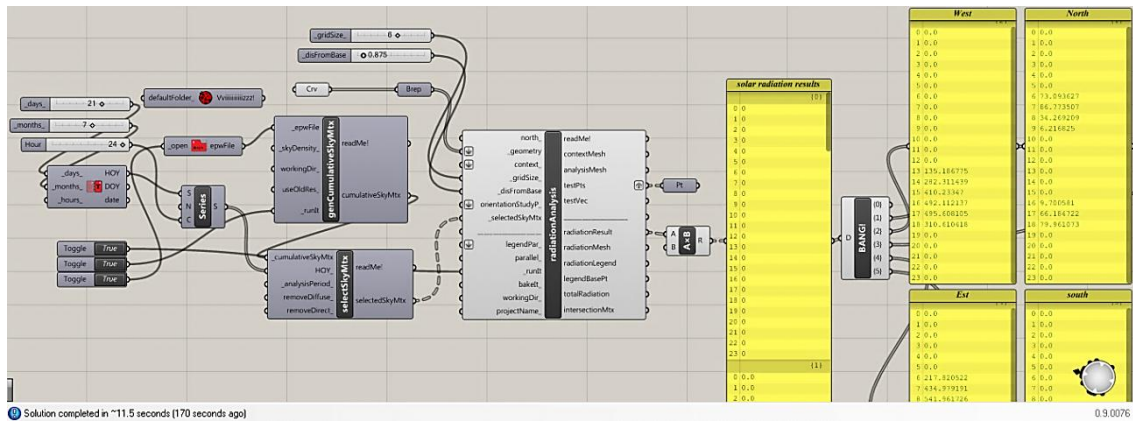


Fig.V.8 Algorithme du calcul du rayonnement incident sur chaque face du BE (Source: auteur 2017)

Les tableaux des valeurs de rayonnement solaire incident sur les différentes façades du Box seront insérés dans l’algorithme d’extraction dynamique des données climatiques afin de les traiter de la même manière que la température et la vitesse du vent (Fig.V.9).

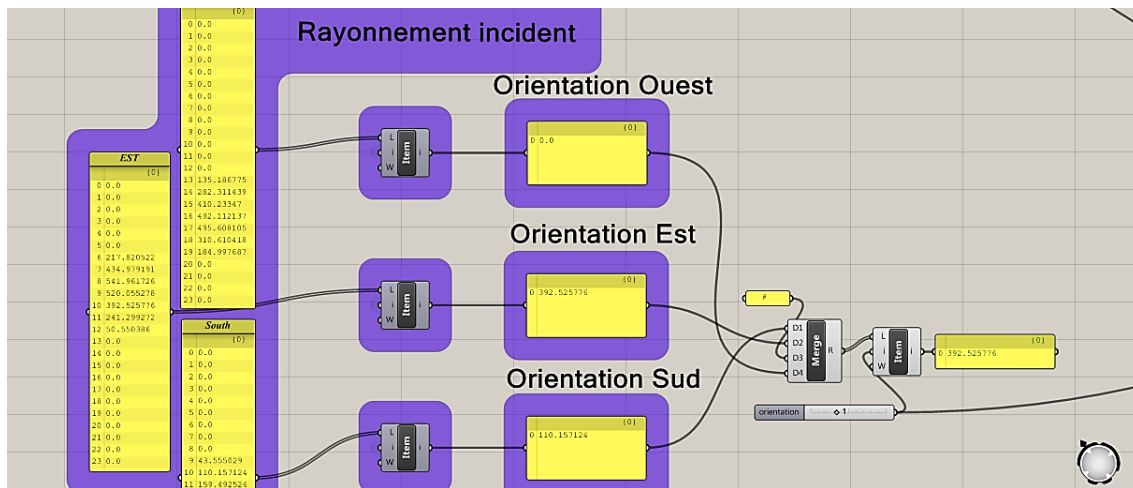


Fig.V.9 Algorithme d’extraction dynamique des valeurs de rayonnement incident (Source: auteur 2017)

Après avoir collecté tous les inputs nécessaires pour les algorithmes du BS, nous avons défini la période durant laquelle notre simulation sera menée, c’est-à-dire des journées types représentatives pour les deux périodes : estivale et hivernale. Ce choix de journées représentatives est survenu suite aux premiers tests de simulation révélant le nombre énorme de calcul à faire. La simulation sur une période d’une année est irréalisable, cela demande une station assez puissante.

La sélection des deux journées typiques (estivale et hivernale) a été effectuée par le biais du plugin *Dhour*, une boîte à outils de visualisation de prototypage développée pour *Grasshopper*. Ce plugin permet le développement systématique de graphiques d'information avec des vues plus nuancées et personnalisables des données complexes. Grâce aux composantes *EPW*, *Extremes* et *Dhr* du plugin *Dhour*, nous avons développé un algorithme qui a permis de définir la journée la plus froide et la plus chaude de l'année, il s'agit du 12 Janvier et du 21 Juillet (**Fig.V.10**).

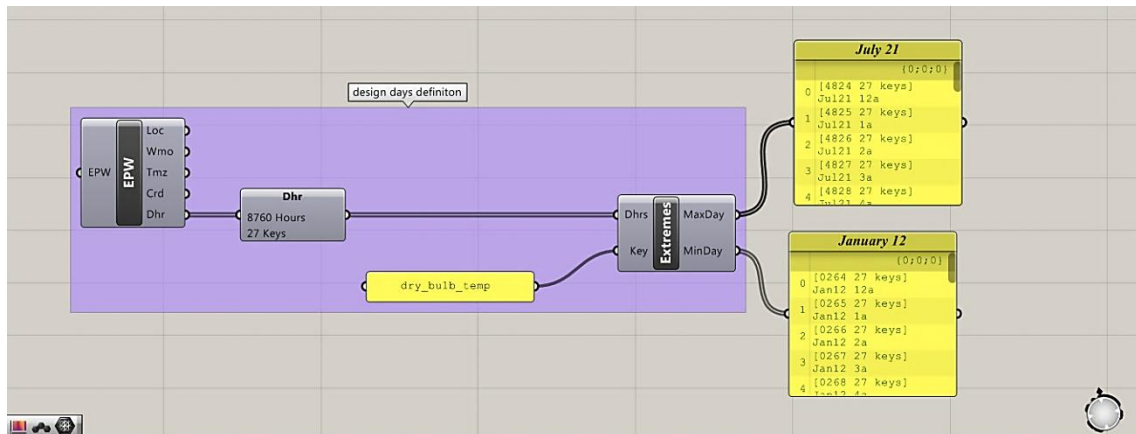


Fig.V.10 Algorithme de définition des journées extrêmes de l'année (Source: auteur 2017)

A ce stade, nous pouvons évaluer le comportement thermique du Box avec et sans le système de protection solaire durant les deux journées typiques définies.

V.4. Simulation du comportement thermique du (BE)

Dans cette phase, en utilisant les plugins de simulation thermique intégrée dans *Grasshopper* - *Diva 4* et *Archsim*, on peut évaluer l'effet du système de protection solaire sur la performance énergétique du BE.

V.4.1. Présentation des plugins de simulation

Selon SOLLEMA LLC (n.d), *DIVA-for-Rhino* est un plugin de modélisation de lumière et d'énergie hautement optimisé pour Rhinoceros et initialement développé entre 2009 et 2011 à « *Graduate School of Design* » de l'Université Harvard par un groupe de chercheurs. Ce plugin est constamment upgradé et distribué par la société Solemma LLC.

DIVA-for-Rhino permet aux utilisateurs de réaliser une série d'évaluations de performance environnementale de bâtiments et de paysages urbains. Les simulations DIVA sont basées sur les moteurs de simulation validés : EnergyPlus, Radiance et Daysim. En 2016, le plugin du *Grasshopper* : *Archsim* d'EnergyPlus a été intégré dans *DIVA* version 4 (Fig.V.11).

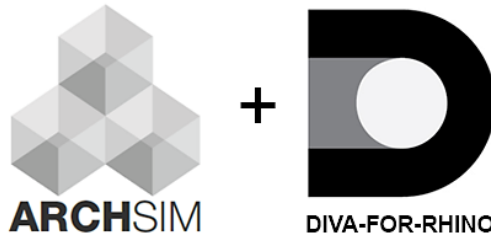


Fig.V.11 Logo des plugins *Diva 4 et Archsim* (Source: www.archsim.com)

V.4.2. Configuration des conditions internes

Dans le but d'avoir une meilleure lecture de l'effet du système de protection solaire sur la performance énergétique du Box, nous avons opté pour une configuration des conditions internes où tous les gains de chaleur interne sont considérés comme nuls. L'introduction de ces conditions s'est faite à l'aide des composantes d'*Archsim* : *Zone*, *Window*, qui ont permis grâce à leurs bibliothèques d'introduire les données relatives aux matériaux de construction utilisés. Les différentes couches composant les murs, le sol et le plancher ainsi que le type de vitrage ont été définies (Fig.V.12).

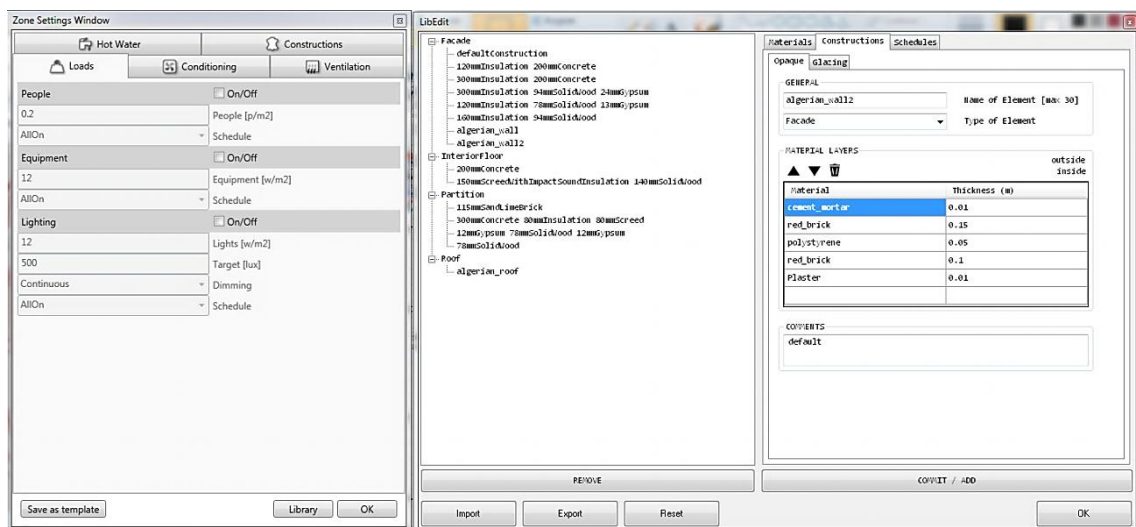


Fig.V.12 Bibliothèque des matériaux du plugin *Archsim* (Source: auteur 2017)

Les conditions internes prises en considération dans cette simulation sont :

- Le taux de renouvellement d'air par heure : 1 RAH
- La zone de confort de la région d'étude : comprise entre 21°C et 27°C (**Fig.V.13**).
- Le calendrier d'occupation : de 08h jusqu'à 17h.

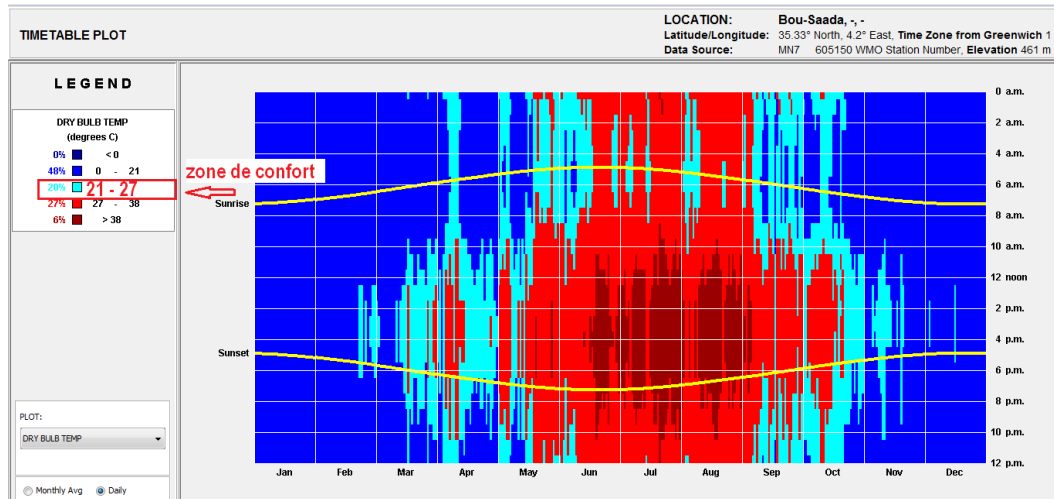


Fig.V.13 Zone de confort de Bou Saada (Source: auteur 2017)

Après avoir fixé les conditions de fonctionnement du BE et l'attribution de ses matériaux de construction, nous avons entamé la définition de l'algorithme de simulation dynamique.

V.4.3. Algorithme de simulation Dynamique

Pour créer l'algorithme de simulation dynamique, nous avons relié les composantes d'*Archsim* : *Zone*, *Window*, *Shading* avec la composante *Networker* qui va nous permettre de générer le modèle thermique comme output. Celle-ci sera reliée comme input avec la composante *E+* qui lance le moteur de simulation EnergyPlus (**Fig.V.14**).

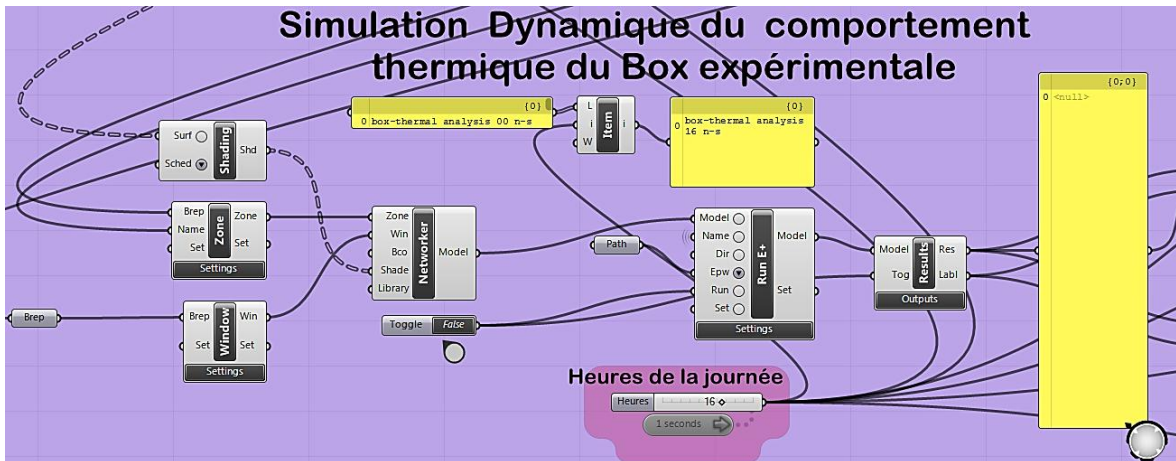


Fig.V.14 Algorithme de simulation Dynamique (Source: auteur 2017).

Cet algorithme est relié avec les algorithmes précédents pour compléter la structure algorithmique qui permet la simulation dynamique où les inputs changent en chaîne à chaque heure de la journée typique comme l’effet de domino. Les résultats sont enregistrés sous forme de tableaux qui vont être traités et interprétés sur Microsoft Excel (Fig.V.15).

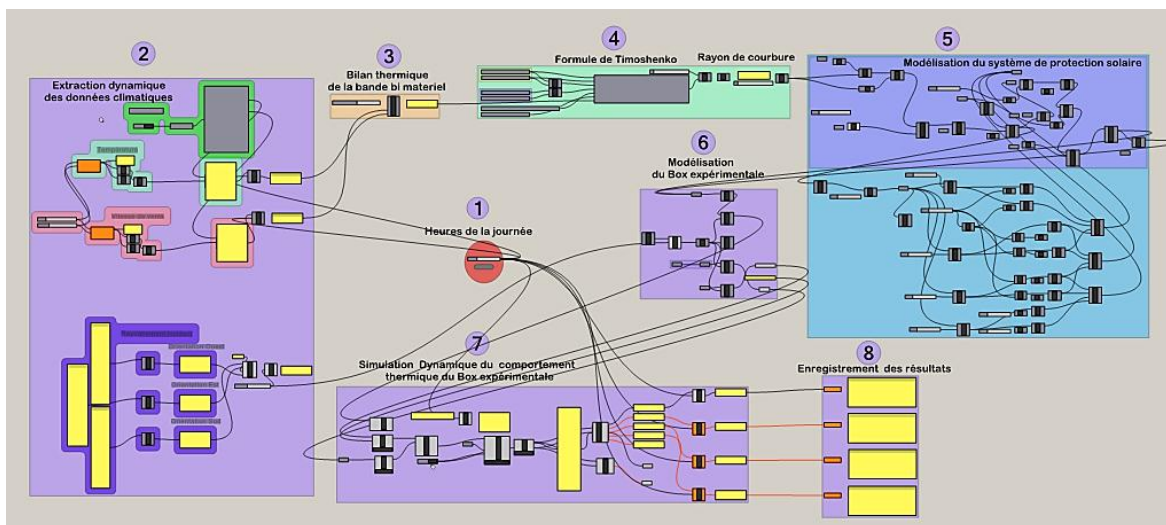


Fig.V.15 Structure Algorithmique paramétrique générale (Source: auteur 2017).

V.5. Résultats de simulation

La simulation dynamique du comportement thermique du BE s’est déroulée dans les deux journées typiques au pas horaire et en plusieurs séries de simulations. Ceci pour tester la performance du box doté du système de protection selon les trois orientations : Est, Sud et Ouest, puisque le design du système n’est spécifique pour aucune orientation. Par

ailleurs, nous avons considéré deux scénarios pour la simulation de chaque orientation qui sont : Le box sans système de protection (BE) puis doté du système de protection (BES). La comparaison des résultats de simulation des deux cas de figure permet d'évaluer la performance thermique de l'enveloppe ainsi que les économies d'énergie réalisables pour chaque journée.

V.5.1. Résultats de simulation-période hivernale

La journée typique de la période hivernale est la journée du 12 Janvier la plus froide de l'année. Les résultats de simulation montrent que le système de protection solaire demeure ouvert même durant la période où la façade est exposée au rayonnement solaire direct, cela s'explique par la baisse de température des bandes bi matérielles dû à la baisse de température de l'air et du rayonnement solaire (**Fig.V.16**).

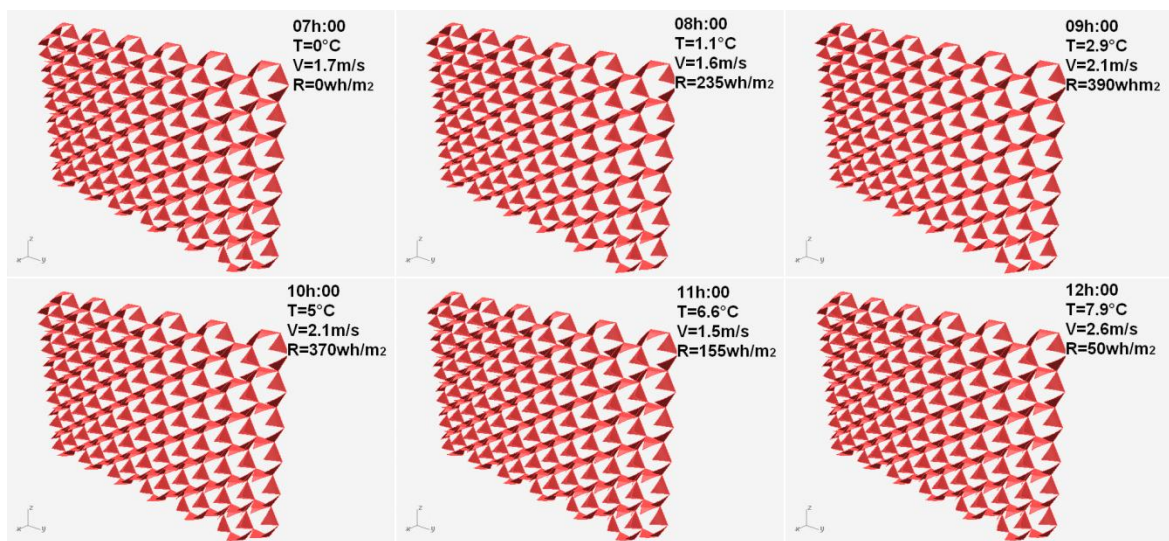


Fig.V.16 Système de protection solaire ouvert entre 07h et 12h de la journée du 12 janvier-cas de l'orientation Est- (Source: auteur 2017).

L'inconvénient du système de protection solaire autonome en hiver malgré son ouverture totale durant cette période, il reste un obstacle pour la pénétration du rayonnement solaire.

Les résultats obtenus relatifs aux radiations solaires transmises par la baie vitrée et les gains de chaleur de longues ondes pour les deux scénarios suscités (BE et BES) sont présentés dans la figure (Fig.V.17) pour les trois orientations.

On constate que le profil des gains de chaleur est intimement lié à celui des radiations, cependant les valeurs atteignent leurs pics dans les différentes périodes de la journée selon l'orientation, cela s'explique par la position de la baie vitrée par rapport à la trajectoire solaire.

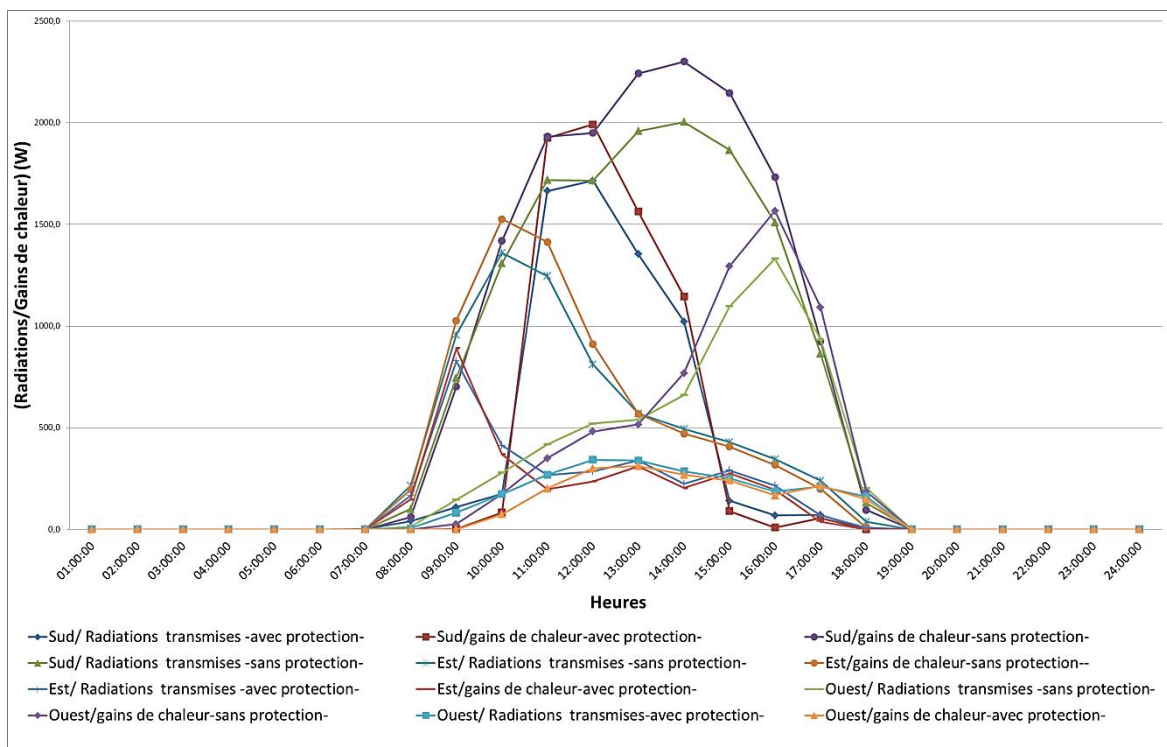


Fig.V.17 Variation des gains des radiations solaires transmises par le vitrage des gains de chaleurs pour les orientations du (BE) : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver

(Source: auteur 2017).

La variation de la température de l'air à l'extérieur est entre 0°C et 9.5°C. La température intérieure du BE varie par rapport à l'orientation : la température au sud est entre 10°C et 12°C, à l'Est et l'ouest la variation de température intérieure est presque identique entre 7.8°C et 10°C. Pour conclure les fluctuations de température à l'intérieur du BES sont les mêmes pour les deux orientations EST et OUEST. Par contre L'orientation SUD est meilleure, avec une augmentation moyenne de 2°C par rapport aux autres orientations (Fig.V.18).

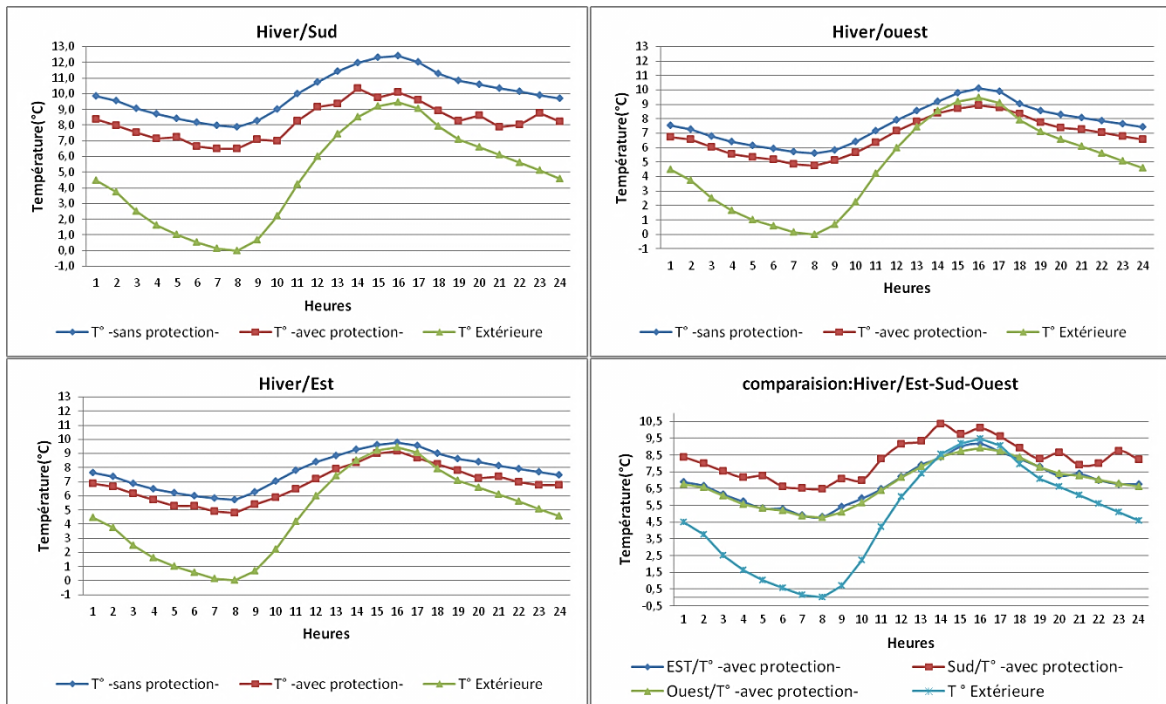


Fig.V.18 Variation des températures extérieure et intérieures du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver (Source: auteur 2017).

La température de l'air intérieure (BE) est plus élevée que celle du BES (**Fig.V.18**) en saison hivernale, La différence de température est de 1.2°C à 5.7°C entre les deux modèles. La courbe des températures internes du (BES) prend la forme d'une courbe en zigzag pour l'orientation SUD, représentant les variations des températures. Cela peut s'expliquer par le fait que l'utilisation du système de protection solaire réduit l'accumulation de chaleur en hiver, cela est dû aux position des modules de ce system et leurs dîmentions.

Dans cette étude, nous effectuons des simulations permettant d'évaluer la consommation énergétique du BE et du BES pendant la journée hivernale pour toutes les orientations. La figure (**Fig.V.19**) montre que la consommation énergétique du BE est inférieure par rapport à celle du BES.

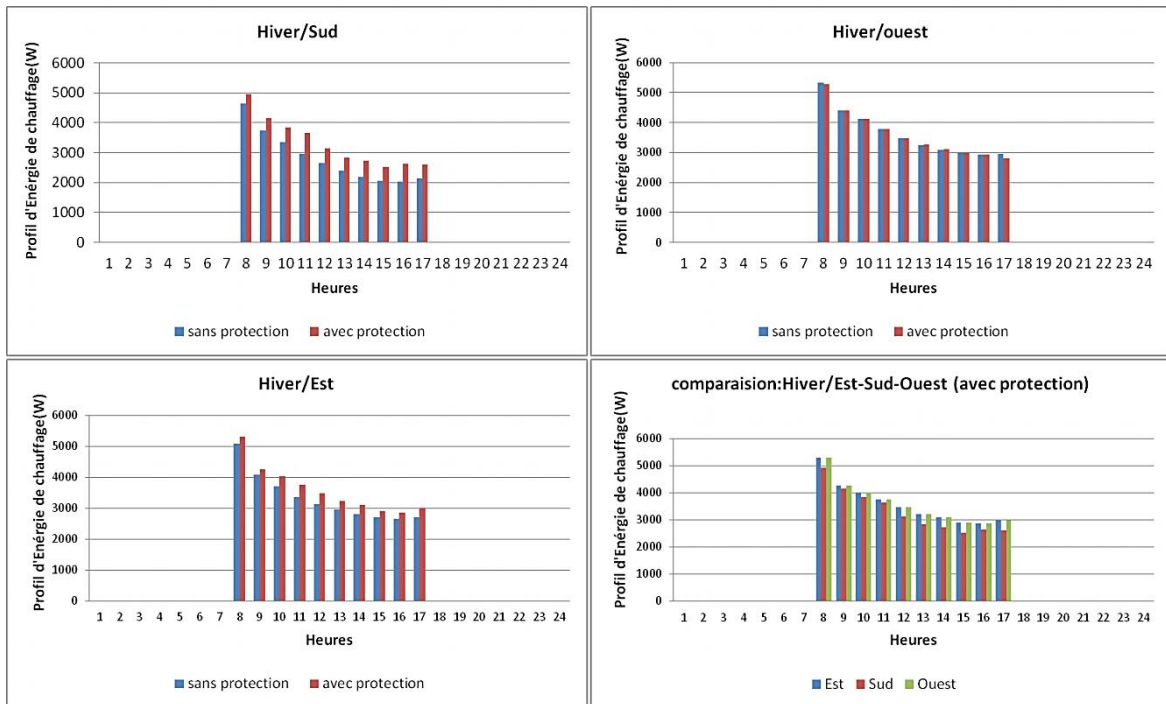


Fig.V.19 Evaluation des charges du chauffage du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver (Source: auteur 2017).

La comparaison des résultats des économies d'énergie pour chauffage du (BES) dans la figure (**Fig.V.20**) montrent qu'il y a une hausse dans la consommation du BES entre 8.86% jusqu'à 19.12% par rapport au BE, la valeur maximale a été enregistrée pour l'orientation sud, cela est dû au fait que l'orientation sud est la mieux exposée au soleil pendant l'hiver par rapport à l'Est et l'Ouest. L'orientation Ouest permet une économie d'énergie de 0.42%.

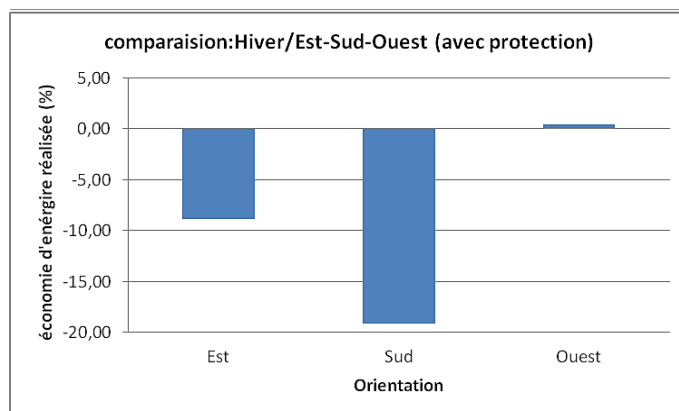


Fig.V.20 Estimation et comparaison des économies d'énergie pour chauffage réalisées du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en Hiver (Source: auteur 2017).

V.5.2. Résultats de simulation-période estivale

La journée typique de la période estivale est la journée du 21 juillet, étant donné la plus chaude de l'année. Les résultats de simulation montrent que le système de protection solaire se ferme progressivement durant cette journée suivant l'augmentation de la température et du rayonnement solaire. Cependant la fermeture atteint son maximum durant la période où la façade vitrée est pleinement exposée au rayonnement solaire direct, cela s'explique par la hausse de température des bandes bi matérielles dû à la hausse de l'intensité du rayonnement solaire incident sur la façade (**Fig.V.21**).

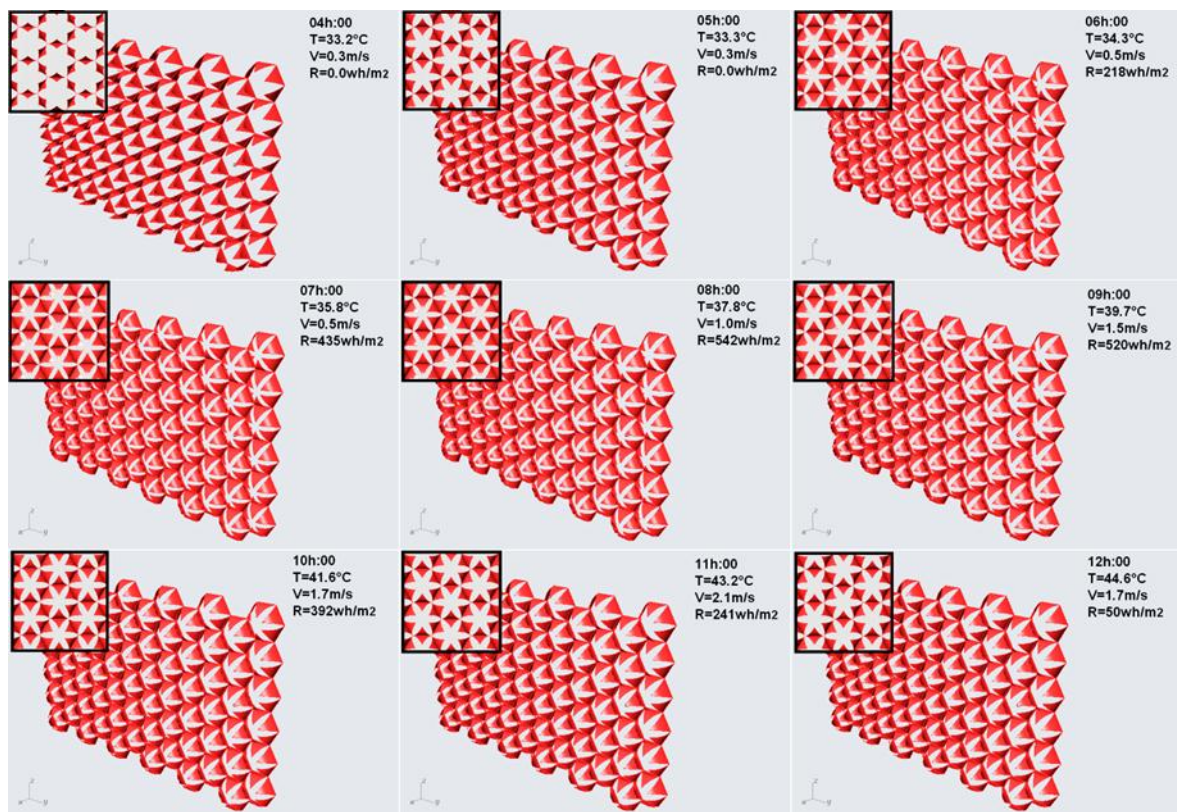


Fig.V.21 Système de protection solaire se ferme à partir de 05h jusqu'à 12h de la journée du 21 juillet-cas de l'orientation Est- (Source: auteur 2017)

La figure (Fig.V.22) représente les radiations solaires transmises par la baie vitrée et les gains de chaleur de longues ondes (BE et BES) pour les trois orientations.

Le profil des gains de chaleur et les radiations suivent la même allure sur un intervalle de temps beaucoup plus important que pour la journée hivernale. L'exposition de la baie vitrée aux radiations solaires directes pour toutes les orientations est assez significative en nombre d'heures durant la saison estivale

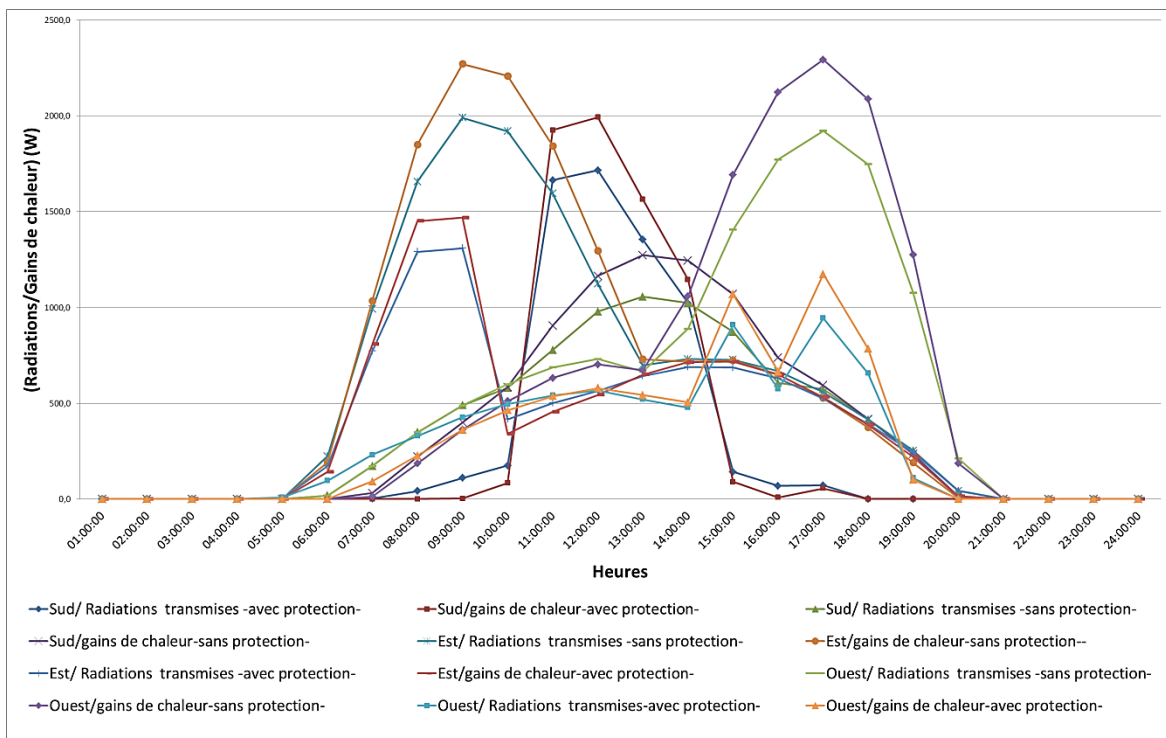


Fig.V.22 Variation des gains des radiations solaires transmises par le vitrage des gains de chaleurs pour les orientations du (BE) : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE

(Source: auteur 2017).

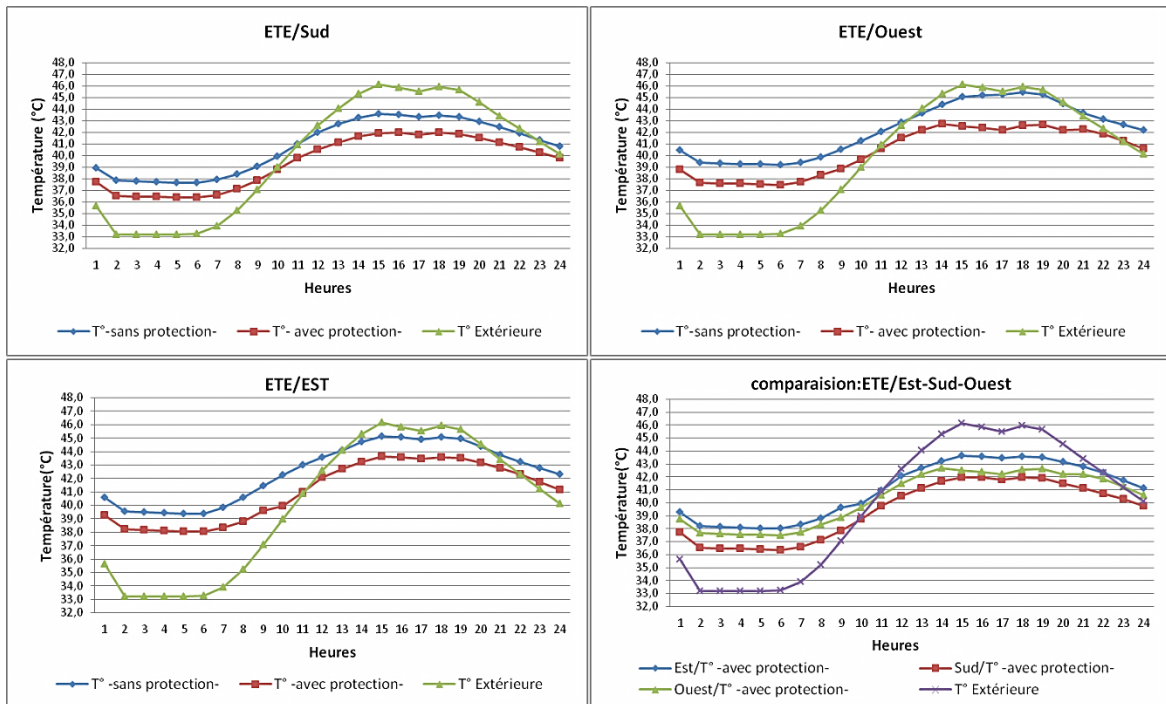


Fig.V.23 Variation des températures extérieure et intérieures du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE (Source: auteur 2017).

Durant cette journée estivale, le système de l’enveloppe adaptative autonome a engendré une diminution des températures à l’intérieur du box (**Fig.V.23**). L’augmentation de la température dépend étroitement de l’effet de l’orientation, c’est pourquoi nous constatons que la courbe de températures de l’orientation SUD affiche les valeurs plus basses suivie de l’orientation OUEST puis enfin l’orientation EST. L’atténuation de la température ambiante du BES est marquée par des écarts de températures entre 1.7°C et 3.4°C par rapport celles du BE pour toutes orientations simulées. L’utilisation du système de protection a permis de diminuer une grande proportion des gains solaires captés, les apports sont donc bien amortis grâce à l’effet du système de protection.

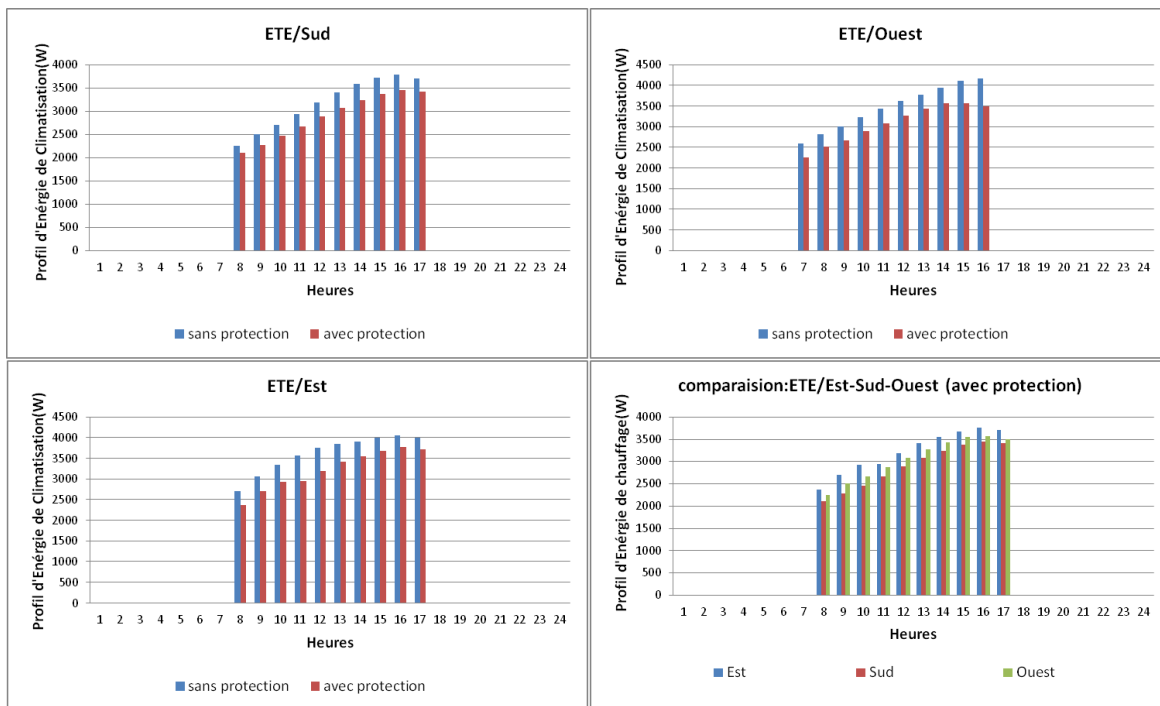


Fig.V.24 Evaluation des charges de chauffage du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE (Source: auteur 2017).

Les besoins en climatisation en période estivale se trouvent réduits (**Fig.V.24**). La consommation énergétique du BES est inférieure à celle du BE dans tous les cas.

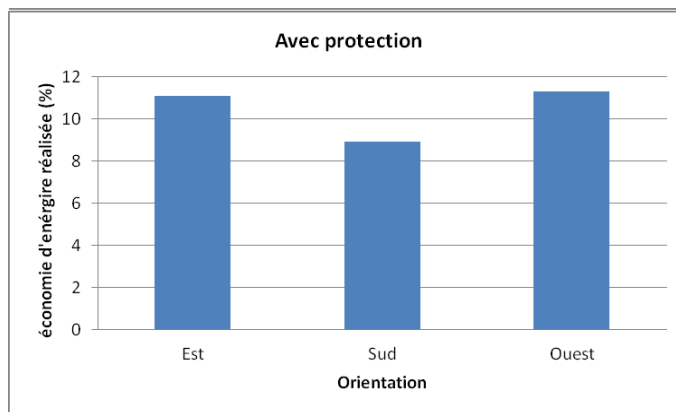


Fig.V.25 Estimation et comparaison des économies d'énergie pour climatisation réalisées du (BE) pour les orientations : Est, Sud et Ouest selon les deux scénarios en ETE (Source: auteur 2017).

L'analyse montre que l'introduction du système de protection permet un abaissement important de la température intérieure et des réductions assez significatives dans les consommations d'énergie pour les charges de climatisation. Cependant ce système a prouvé son efficacité optimale pour l'orientation OUEST. Les économies d'énergie réalisées dans le cas du BES pour la journée estivale varient entre 8.89% pour l'orientation SUD et 11.28% pour l'orientation OUEST(**Fig.V.25**). Les besoins de climatisation diminuent de façon

importante. Les résultats de cette recherche ont été comparés avec ceux de Borg, Eve Farrugia & Buhagiar (2016). La comparaison a révélée que l'utilisation d'un système de façade dynamique bimétallique a entraîné une économie d'énergie de refroidissement de 0,8% pour la journée d'été sélectionnée et de 2% pour la journée d'hiver ensoleillée sélectionnée.

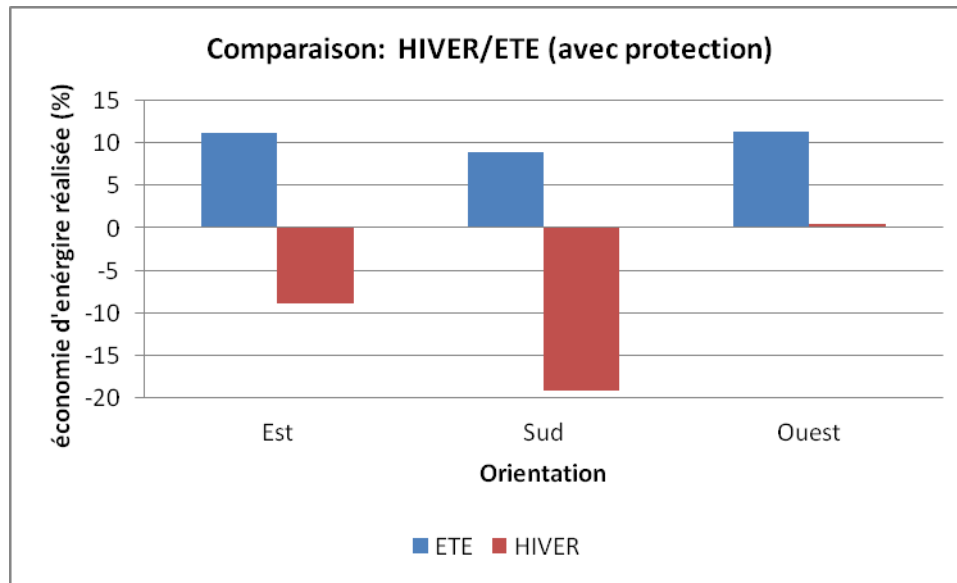


Fig.V.26 Comparaison des économies d'énergie pour chauffage et climatisation du (BE) réalisées en Hiver et en ETE pour les orientations : Est, Sud et Ouest (Source: auteur 2017).

L'étude comparative sur la consommation énergétique pour les deux journées (estivale et hivernale) (**Fig.V.26**), a trouvé que le système de protection permet une diminution des charges de refroidissement et par conséquent une consommation énergétique réduite durant l'été. Alors qu'en hiver, il y a une augmentation dans la consommation énergétique surtout pour l'orientation SUD, cela s'explique du fait que cette orientation reçoit les gains maximums en hiver par rapport aux deux autres orientations.

Par ailleurs, une étude d'optimisation plus approfondie sur le design d'un tel système autonome pourrait permettre d'améliorer les performances thermiques du système en maximisant les gains en hiver et en les minimisant en été.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé les différents aspects concernant l'application du concept d'enveloppe adaptative autonome dans les régions chaudes. La simulation nous a aidés à tester l'efficacité du système dans des conditions climatiques bien déterminées. La température à l'intérieur du BES est inférieure à celle à l'intérieur du BE au cours de la journée estivale et de la journée hivernale. Cette diminution de température n'assure pas un niveau de confort thermique en hiver, mais elle donne une bonne indication sur ce que ce concept biomimétique peut apporter sur le comportement thermique de nos bâtiments en été en contribuant à résoudre le problème de surchauffe existant à l'intérieur des bâtiments.

L'analyse des résultats obtenus nous a montré une amélioration des conditions du confort thermique dans le cas du BES par rapport au BE, mais l'application de notre modèle biomimétique dans la réalité nécessite une discussion plus profonde et des études plus détaillées sur différents niveaux.

Conclusion Générale

Conclusion

Les différences de températures relevées en zone urbaine comparées aux températures relevées des zones rurales sont en fait appelées « îlots de chaleur urbains ». Ces derniers sont le résultat d'une accumulation de chaleur en ville, principalement causée par sa forme et de la densité de ses bâtiments. Ils font, en effet, barrière au vent et donc aux faibles déplacements de chaleur accumulée. De plus, la perméabilité des surfaces bâties et l'usage de matériaux qui absorbent et stockent les radiations solaires augmentent cette accumulation de chaleur et diminuent l'effet d'évaporation qui permettrait de les refroidir. Enfin, la chaleur produite par les activités humaines et celle des industries sont également des facteurs affectant cet effet d'îlot de chaleur. Ce phénomène a pour conséquence l'augmentation de la consommation d'énergie pour faire fonctionner l'air conditionné, afin de réduire l'inconfort thermique engendré à l'intérieur des bâtiments. En plus d'un impact environnemental lourd, il est également la cause d'un lourd bilan financier.

Le biomimétisme a un fort potentiel en termes d'adaptation au changement climatique car « la nature a plusieurs millions d'années de recherche et développement d'avance sur nous ». A ce titre, Benyus affirme qu'« imiter la Nature peut épargner des dizaines d'années de recherche ». Cette démarche peut être considérée comme ancienne, si l'on regarde son historique, pourtant elle est très innovante par rapport à nos modes de fonctionnement modernes, en plus d'être structurée et reproductible. Le biomimétisme est une démarche qui invite l'homme à puiser aux multiples sources d'inspiration que lui présente la nature, qu'il s'agisse des formes, des matériaux ou des écosystèmes. Il lui propose d'observer les solutions mises au point et perfectionnées tout au long de l'évolution par le vivant, afin de les émuler d'une manière qui facilite la résolution des problèmes des sociétés humaines et leur permette de satisfaire leurs propres besoins, tout en limitant la consommation de matières et d'énergie. Le biomimétisme se veut un outil au service du développement durable.

Dans les domaines scientifiques, techniques ou industriels, le champ des applications du biomimétisme est vaste et varié. Les applications architecturales de cette approche vers la nature sont confinées depuis des milliers d'années dans la copie des formes « *Biomorphology/biomorphologie* ». Cette vision a commencé à changer en s'orientant vers

Conclusion Générale

l'émulation de systèmes naturels et biologiques «*biomimicry/biomimétique ou biomimétisme* ». Cette dernière est considérée comme une nouvelle porte scientifique qui peut nous conduire vers un nombre infini d'idées durables pouvant être utilisées afin de découvrir de nouvelles applications architecturales telles que les systèmes de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'énergie ou bien pour produire de l'eau.

De nombreuses études actuelles portent sur des systèmes de rafraîchissement passifs appliqués en particulier sur les toits et façades des bâtiments. Ces derniers jouent en effet un rôle important dans la régulation et le contrôle des énergies et leurs déchets, puisqu'ils forment un filtre entre l'environnement extérieur et intérieur. Les bâtiments actuels sont inertes alors que leur environnement change ; l'innovation actuelle dans la technologie architecturale tend à créer des enveloppes adaptatives, changeant continuellement face aux stimuli extérieurs.

La recherche actuelle est une tentative dans ce sens. Nous avons suivi cette approche biomimétique afin d'explorer de nouvelles applications pour surmonter le problème de la surchauffe et de refroidissement dans les régions ayant des climats contrastés telles que Bou-Saâda qui a été choisi comme un site d'étude et où nous avons appliqué notre recherche.

L'analyse qui a été apporté sur les logiques thermiques utilisées dans l'architecture locale montre que l'architecture vernaculaire applique des stratégies proches de celles appliquées dans la nature. Les tentes et les constructions légères construites par les bédouins avec les peaux naturelles fonctionnent exactement comme des « surfaces thermiquement actives ». Au contraire, les bâtiments contemporains conçus en briques et béton qui accentue le problème de surchauffe planétaire par l'utilisation intensive des climatiseurs qui perturbent les façades et consomment des grandes quantités d'énergie.

Des systèmes biologiques de refroidissement ont été présentés dans cette étude. L'analyse s'est portée sur des plantes et animaux vivants dans des régions chaudes afin de voir comment ils agissent contre le problème de la surchauffe en gardant une température appropriée pour eux. Cette analyse des systèmes naturels de refroidissement a montré une grande similitude entre ces solutions biomimétiques et les systèmes de refroidissements passifs architecturaux.

A travers la revue de littérature sur le sujet des enveloppes adaptatives, notre choix a porté sur les enveloppes adaptatives autonomes, qui s'adaptent aux changements des

Conclusion Générale

conditions climatiques environnantes, en se basant sur des principes tirés du monde vivant. L'actionnement passif et autonome de ces enveloppes par les différents stimuli climatiques est prometteur, il fournit un mouvement passif ne nécessitant aucune source énergétique ni de contrôle sous forme d'équipements électroniques high-tech comme le montrent les approches utilisées dans les enveloppes adaptatives contrôlées.

Cette observation est un des éléments qui nous a encouragés, dans cette recherche, à proposer une nouvelle approche biomimétique destinée aux façades des bâtiments en zones chaudes. A partir de là dans cette étude, nous avons proposé un système de protection solaire adaptatif autonome par le biomimétisme du phénomène de mouvement thermonastique des fleurs, qui ressemble dans son principe au comportement thermique des bandes bimétalliques anthropogéniques. Cependant la création d'un modèle numérique de ce comportement va nous permettre d'émuler l'interaction entre le matériau utilisé et les conditions climatiques environnantes. Dont l'actionnement est basé sur les propriétés du matériau utilisé.

Une analyse climatique a été faite pour la région de Bou-Saâda en évaluant l'appropriation de ce concept pour cette zone climatique. L'utilisation de l'outil de modélisation paramétrique *Rhinoceros- Grasshopper*, nous a permis de faire la modélisation de ce système de protection solaire adaptatif, où les entrées (propriétés thermo-physiques du matériau utilisé et les paramètres du climat) s'interagissent d'une manière dynamique.

Les résultats de cette étude affirment l'amélioration des températures à l'intérieur du modèle avec la paroi d'ombrage (BES) qui restent inférieures à celles de l'intérieur du modèle de référence (BE) avec une différence variant entre 1.7 °C et 3.4°C selon l'orientation, pendant la journée choisie du mois de juillet. Ce résultat montre la capacité du système à réduire les gains de chaleur en saison estivale ce qui réduit par conséquent la consommation énergétique de 8.86% à 11.29%. Néanmoins pendant la journée hivernale, des améliorations quant au modèle restent à optimiser pour un maximum de gains.

En conclusion, nous pouvons dire que le concept de la façade dynamique autonome biomimétique est un succès préliminaire au niveau théorique et pratique, mais il demande d'autres recherches approfondies afin de mettre en œuvre le concept dans la réalité. Ces études approfondies doivent être faites en collaboration avec des thermiciens et des

ingénieurs ainsi que des Biologistes et peuvent être des perspectives de recherches pour l'avenir.

Pour l'optimisation de l'efficacité du système, les perspectives envisageables concernent la validation du concept, le développement du modèle et la mesure de l'efficacité du modèle développé. Par ailleurs, une étude d'optimisation plus approfondie sur le design d'un tel système autonome pourrait permettre d'améliorer les performances thermiques du système en maximisant les gains en hiver et en les minimisant en été.

Une perspective tout aussi intéressante consisterait à effectuer des études expérimentales in situ du système de protection solaire. Ces études permettraient de soumettre le système aux conditions climatiques réelles et en considérant la réaction des occupants. Cependant la simulation numérique donnerait des résultats qui aideraient probablement à développer et améliorer le système de protection solaire en déterminant les dimensions et la surface des modules, leur épaisseur ainsi que les matériaux adéquats avant de réaliser et d'appliquer le système dans la réalité.

Bibliographie

Ouvrages

1. **Addington, M., Schodek, D.**, 2005. *Smart Materials and New Technologies - For architecture and design professions*. ELSEVIER
2. **Benyus, J.M.**, 1997. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. William Morrow.USA
3. **Duraiappah, A.K. et al.**, 2005. *Ecosystems and human well-being*, Available at: <http://www.who.int/entity/globalchange/ecosystems/ecosys.pdf> \n<http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0512/2005013229.html>.
4. **Lechner, N.**, 2014. *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. John wiley & sons.USA
5. **Pawlyn, M.**, 2011. *Biomimicry in Architecture*.RIBA Publishing.UK
6. **Pedersen Zari, M.**, 2017. *Biomimetic Urban Design: Ecosystem Service Provision of Water and Energy*. Buildings 7, 21.
7. **Thompson, D.W.**, 1945. *On growth and form*.
8. **Webster's new collegiate dictionary.**, 1974. . G. & C. Merriam Co, Springfield Mass.

Rapport d'études et articles publiés

1. **Aizenberg, J., Tkachenko, A., Weiner, S., Addadi, L., Hendler, G.**, 2001. *Calcitic microlenses as part of the photoreceptor system in brittlestars*. Nature 412, 819-822.
2. **Angel, G.D. & Haritos, G.**, 2013. *An Immediate Formula for the Radius of Curvature of a Bimetallic Strip*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2(12), pp.1312–1319.
3. **Ataman, O., Rogers, J.**, 2006. *Toward New Wall Systems: Lighter, Stronger, Versatile*. Sigradi 248-253.
4. **Badarnah, L. & Knaack, U.**, 2008. *Organizational features in leaves for application in shading systems for building envelopes*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 114, pp.87–96.
5. **Badarnah, L., Knaack, U & Ebbert, T.**, 2007, *Bionic breathing skin for buildings*, Portugal SB07 sustainable construction materials and practices, challenge of the industry for the new millenium. University of Minho, Lisbon, pp. 612-619.
6. **Chen, K. et al.**, 2013. *Is expression of aquaporins (plasma membrane intrinsic protein 2 s , PIP2 s) associated with thermonasty (leaf-curling) in Rhododendron ?* Journal of Plant Physiology, 170(16), pp.1447–1454.
7. **Coelho, M., Maes, P.**, 2009. *Shutters: a permeable surface for environmental control and communication*. Proc. 3rd Int. Conf. Tangible Embed. Interact. 13-18.
8. **Dawson, C., Vincent, J.F. V., Rocca, A.-M.**, 1997. *How pine cones open*. Nature. 390, 668.

9. **Doorn, W.G. Van & Meeteren, U. Van.**, 2003. *Flower opening and closure: a review.* , 54(389), pp.1801–1812.
10. **Doumptioti, C., McGee, W. & Ueno, M.**, 2011. *Responsive and Autonomous Material Interfaces.* Integration through Computation: Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), pp.318–325.
11. **Ercan, B. & Elias-Ozkan, S.T.**, 2015. *Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components.* *Design Studies*, 38, pp.33–53.
12. **Foged, I.W. & Pasold.A.**, 2010. *Performative Responsive Architecture Powered by Climate.* *AREA Applied Research in Environmental Architecture* ,243 | 412. , pp.243–249.
13. **Garrod, R.P., Harris, L.G., Schofield, W.C.E., Mcgettrick, J., Ward, L.J., Teare, D.O.H., Badyal, J.P.S.**, 2007. *Mimicking a Stenocara Beetle ' s Back for Microcondensation Using Plasmachemical Patterned Superhydrophobic - Superhydrophilic Surfaces.* *Langmuir* 23, 689-693.
14. **Harkness, J.M.**, 2002. *A Lifetime of Connections: Otto Herbert Schmitt, 1913-1998.* *Phys. Perspect.* 4, 456-490.
15. **Marshall. A.**, 2007. *The theory and practice of ecomimicry.* Sustaining Gondwana Working Paper Series(APO), 3.
16. **Olson, R.J., Scurlock, J.M.O., Prince, S.D., Zheng, D.L., Johnson, K.R.**, 2001. *Terrestrial ecosystems of the world: a new map of life on earth.* Bioscience.
17. **Parker, A.R., Lawrence, C.R.**, 2001. *Water capture by a desert beetle.* *Nature* 414, 33-34.
18. **Paul Borg, S., Farrugia, E., Buhagiar,V.**, 2016. *A comparative study of the energetic performance of climate adaptive façades compared to static façade design in a Mediterranean climate.* 11th Conference on Advanced Building Skins Documentation., pp438-447
19. **Pedersen Zari, M.**, 2015. *Ecosystem services analysis: Mimicking ecosystem services for regenerative urban design.* *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), pp.145–157.
20. **Pedersen Zari, M.**, 2017. *Biomimetic Urban Design: Ecosystem Service Provision of Water and Energy.* *Buildings*, 7(1), p.21.
21. **Pedersen Zari.**, 2006. *Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.* SB07 conference Paper number: 033, New Zealand.
22. **Pedersen Zari.**, 2014. *Ecosystem processes for biomimetic architectural and urban design.* *Architectural Science Review*, 0(0), pp.1–14. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2014.968086>.
23. **Persiani, S.G.L., Battisti, A., Wolf, T.**, 2016. *Autoreactive architectural facades – discussing unpowered kinetic building skins and the method of evolutionary optimization.*

24. **Ramírez-Balas, C., Fernández-Nieto, E.D., Narbona-Reina, G., Sendra, J.J., Suárez, R.**, 2015. *Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to « The City of Refuge » by Le Corbusier.* Energy Build. 86, 708-722.
25. **Reap, J., Baumeister, D. & Bras, B.**, 2005. *Holism, Biomimicry and Sustainable Engineering.* Proceedings of IMECE 2005(ASME).1 , pp. 423-431.
26. **Reap, J., Baumeister, D., Bras, B.**, 2005. *Holism, Biomimicry and Sustainable Engineering.* Proc. IMECE2005 2005 ASME Int. Mech. Eng. Conf. Expo. Orlando FL USA Novemb. 511, 1 -9.
27. **Reichert, S., Menges, A., Correa, D.**, 2015. *Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness.* CAD Comput. Aided Des. 60, 50 -69.
28. **Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J., Menges, A.**, 2014. *Fibrous structures: an integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles.* Comput. Des. 52, 27-39.
29. **Rosemond, A.D. & Anderson, C.B.**, 2003. *Engineering role models: do non-human species have the answers ?.* Ecological Engineering, 20, pp.379–387.
30. **Russell, J.A., Peters, W.H., Craig, N.N., Coull, B.C.**, 2006. *Systems and Ecosystems. Sustainability Science and Engineering: Defining Principles* , 01,pp.113-126.
31. **Shyam, V. et al.**, 2016. *Application Of Pinniped Vibrissae To Aeropropulsion .* Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition , pp.1–10.
32. **Sung, D.K.I.M.**, s.d. *Skin Deep: Making Building Skins Breathe With Smart Thermobimetals .*University of Southern California.pp. 145-152.
33. **Vincent, J.F.V., Bogatyreva, O.A., Bogatyrev, N.R., Bowyer, A., Pahl, A.-K.**, 2006. *Biomimetics: its practice and theory.* J. R. Soc. Interface 3, 471-482.
34. **Weibel, E.R.**, 2004. *Beau poumon – bon poumon ? Les bases morphométriques de la fonction pulmonaire.* Revue des Maladies Respiratoires (SPLF), pp.665–671.
35. **Zhai, Z. (John), Previtali, J.M.**, 2010. *Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation.* Energy Build. 42, pp357-365.

Thèses et mémoires

1. **Angel, G.D.**2014, *Optimisation And Characterisation Of A Curved Bimetallic Blade And Its Performance Within A Thermal Motor.* University of Hertfordshire School of Engineering and Technology.
2. **Badarnah Kadri, L.**, 2012. *Towards the LIVING envelope: Biomimetics for building envelope adaptation.* Delft University of Technology.
3. **Braun, D.H.**, 2008. *Bionisch inspirierte Gebäudehüllen.*

4. **Dechaicha,A.**,2014. *L'étalement urbain et les contraintes physiques et naturelles :Cas d'étude : La ville de Bou Saâda*.Université du Biskra.Algerie
5. **Loonen, R.C.G.M., Hensen, J.L.M., Trčka, M., Cóstola, D.**, 2010. Overview of 100 climate adaptive building shells. Tech. Univ. Eindhoven- Univ. Technol.
6. **Modin, H.**, 2014. Adaptive building envelopes 1-56.
7. **Modin, H.**, 2014. *Adaptive building envelopes*. Chalmers University Of Technology.Suède.
8. **Nait, N.2011.**,*La Rehabilitation Energetique Dans Les Logements Collectifs Existants : Cas Du Climat Semi Aride De Constantine*. Université Constantine 03 .Algerie
9. **Ould Henia.**,2003. *Choix climatiques et construction Zones arides et semi arides : La maison a cour de bou saada*.EPFL.Suisse
10. **Panchuk, N.**, 2006., *An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural]*. University Of Waterloo.Canada.
11. **SOTEHI, O.2009**. *Etude Des Caracteristiques De Fonctionnement Et De La Performance D'un Distillateur Solaire*.université Mentouri Constantine .Algerie
12. **Pedersen Zari.**, 2012. Ecosystem services analysis for the design of regenerative built environments .Victoria University of Wellington. NewZeland

Sites Web

1. *17 Museums in Graz and Styria | Universalmuseum Joanneum* , s. d. URL <https://www.museum-joanneum.at/en> consulté le(5.6.17).
2. *2016 Winners | AIA Top Ten* , s. d. URL <http://www.aiaopten.org/> consulté le(11.6.17).
3. *A Community for Naturalists · iNaturalist.org* , s. d. URL <https://www.inaturalist.org/> consulté le(5.12.17).
4. *Aga Khan Development Network* , s. d. URL <http://www.akdn.org/> consulté le(5.6.17).
5. *AHR | International Award Winning Architecture and Building Consultancy Practice* , s. d. URL <http://www.ahr-global.com/> consulté le(5.11.17).
6. *All about Sumatra - Briefing our website* , s. d. URL <https://allaboutsumatra.weebly.com/> consulté le(5.6.17).
7. *Aluminium & Alliages*, s.d URL <http://www.euralliage.com/aluminium.htm> consulté le (6.12.2017)
8. *Amusing Planet - Amazing Places, Wonderful People, Weird Stuff* , s. d. URL <http://www.amusingplanet.com/> consulté le(5.6.17).
9. *Animals in Action Pictures from Warren Photographic* , s. d. URL <https://www.warrenphotographic.co.uk/> consulté le(5.6.17).
10. *Architects for Peace*, 2011. Mick Pearce . URL <http://www.mickpearce.com/>

- consulté le(5.6.17).
11. *Architecture Design Architectural Images History Models and More - ArchitectureWeek Great Buildings* , s. d. URL <http://www.greatbuildings.com/> consulté le(5.6.17).
 12. **AskNature - Innovation Inspired by Nature** , s. d. URL <https://asknature.org/> consulté le(5.5.17).
 13. *Biology 4 ISC* , s.d URL biology4isc.weebly.com/plant-movement.html consulté le (30.10.2017).
 14. *Biomimesis y bioinspiración para el desarrollo regenerativo y sostenible | como la Naturaleza nos puede ayudar a innovar a ser mas creativos y sobre todo alcanzar el desarrollo sostenible. Simplemente lo han hecho antes!!, biomimesis, bioinspiración, dise* , s. d. URL <https://natureinspireus.wordpress.com/> consulté le(5.6.17).
 15. **Biomimicry 3.8 - Innovation Inspired by Nature** , s. d. URL <https://biomimicry.net/> consulté le(5.5.17).
 16. *Bishops Meadow Trust | Land Preservation Charity* , s. d. URL <http://www.bishopsmeadowtrust.org/> consulté le(5.6.17).
 17. *Climate Data.Org* , s. d. URL <https://fr.climate-data.org/location/3435/> consulté le(5.09.15)
 18. **Dunkerque, S. & Perrot, O.**, 2011. :COURS DE RAYONNEMENT, vu le 15/11/2017 ,à partir <http://gte.univ-littoral.fr/workspaces/documents-m-perrot/cours-rayonnement/downloadFile/file/ray-IUT-poly.pdf?nocache=1275385568.86>
 19. *Ecology Pocket Guide* , s. d. URL <http://www.ecologypocketguide.com/> consulté le(22. 2.17).
 20. *Energieplanete*,s.d URL <http://www.energieplanete.fr/conversion-energie-rayonnante-thermique.html> consulté le(25.11.2017)
 21. *Genius of Biome Report* , s. d. URL <http://issuu.com/hoknetwork/docs/geniusofbiome?mode=window> consulté le(5.6.17).
 22. *GOKU Architects - sustainable design, domestic & commercial* , s. d. URL <http://www.architectureforlife.ie/> consulté le(5.6.17).
 23. *Google maps: Map of San Francisco* , 2016. URL <https://www.google.dz/maps/place/Market+St+%26+1st+St/@37.7910075,-122.4003325,18z/data=!4m3!1m7!3m6!1s0x80858095723e33d9:0x41757f4ec9fc163f!2sBush+St,+San+Francisco,+CA,+USA!3b1!8m2!3d37.7883998!4d-122.4226917!3m4!1s0x808580624ec4bf9d:0x54e43b48c85aca47> consulté le(5.6.17).
 24. *Home - BucketList Nature* , s. d. URL <http://bucketlistnature.com/> consulté le(5.7.17).

25. *Home / Library of Congress* , s. d. . Libr. Congr. Washington, D.C. 20540 USA.
URL <https://www.loc.gov/> consulté le(11.6.17).
26. *IGGESUND HOLMENGROUP*,s.d URL <https://www.iggesund.com/en/> consulté le(5.12.17)
27. *Institut du monde arabe /* , s. d. URL <https://www.imarabe.org/fr> consulté le(5.6.17).
28. *Institute for Computational Design and Construction* | University of Stuttgart, Faculty of Architecture and Urban Planning , s. d. URL <http://icd.uni-stuttgart.de/> consulté le(5.6.17).
29. **Iowa State University.** , 2017. Iowa State University Iowa Environmental Mesonet, consulté le(15.11.17), à partir de <https://mesonet.agron.iastate.edu/>
30. *It is Alive in the Lab* , s. d. URL <http://labs.blogs.com/> consulté le(5.6.17).
31. *National Geographic* , s. d. URL <https://www.nationalgeographic.com/> consulté le(6.4.17).
32. *Quora - A place to share knowledge and better understand the world.* , s. d. URL <https://www.quora.com/> consulté le(5.6.17).
33. *Rhinoceros forums*,s.d URL <https://discourse.mcneel.com> consulté le(1.12.17)
34. *Rhinoceros*,s.d URL <http://blog.rhino3d.com> consulté le(1.12. 17)
35. **Robert McNeel & Associates** s.d. , *About Grasshopper*, consulté le 1.12.17,à partir de <http://www.grasshopper3d.com/>
36. **SOLEMMA s.d.**, *DIVA Experience the most advanced daylighting and energy modeling plug-in for Rhinoceros and Grasshopper.* ,(consulté le 28 .11.15), à partir de <http://www.solemma.net/Diva.html>
37. **The Biomimicry Institute – Inspiring Sustainable Innovation** , s. d. URL <https://biomimicry.org/> consulté le(22.5.17).
38. *Welcome to BugGuide.Net! - BugGuide.Net* , s. d. URL <https://bugguide.net/node/view/15740> consulté le(6.2.17).
39. *Welcome! — Science Learning Hub* , s. d. URL <https://www.sciencelearn.org.nz/> consulté le(11.6.17).
40. *Wikiwand* , s. d. URL <http://www.wikiwand.com/> consulté le(11.6.17).
41. *wiseGEEK: clear answers for common questions* , s. d. URL <http://www.wisegeek.com/> consulté le(5.6.17).
42. **WWF WildFINDER** , s. d. URL <https://www.worldwildlife.org/science/wildfinder/> consulté le(22.5.17).

Articles de presse

1. **LARADJ,M.** 'L'Algérie a atteint le "Pic-Oil" de son gisement pétrolier', consulté le 31.8.16, à partir de <https://www.liberte-algerie.com/actualite/lalgerie-a-atteint-le-pic-oil-de-son-gisement-petrolier-253940>.

Guides et documents techniques

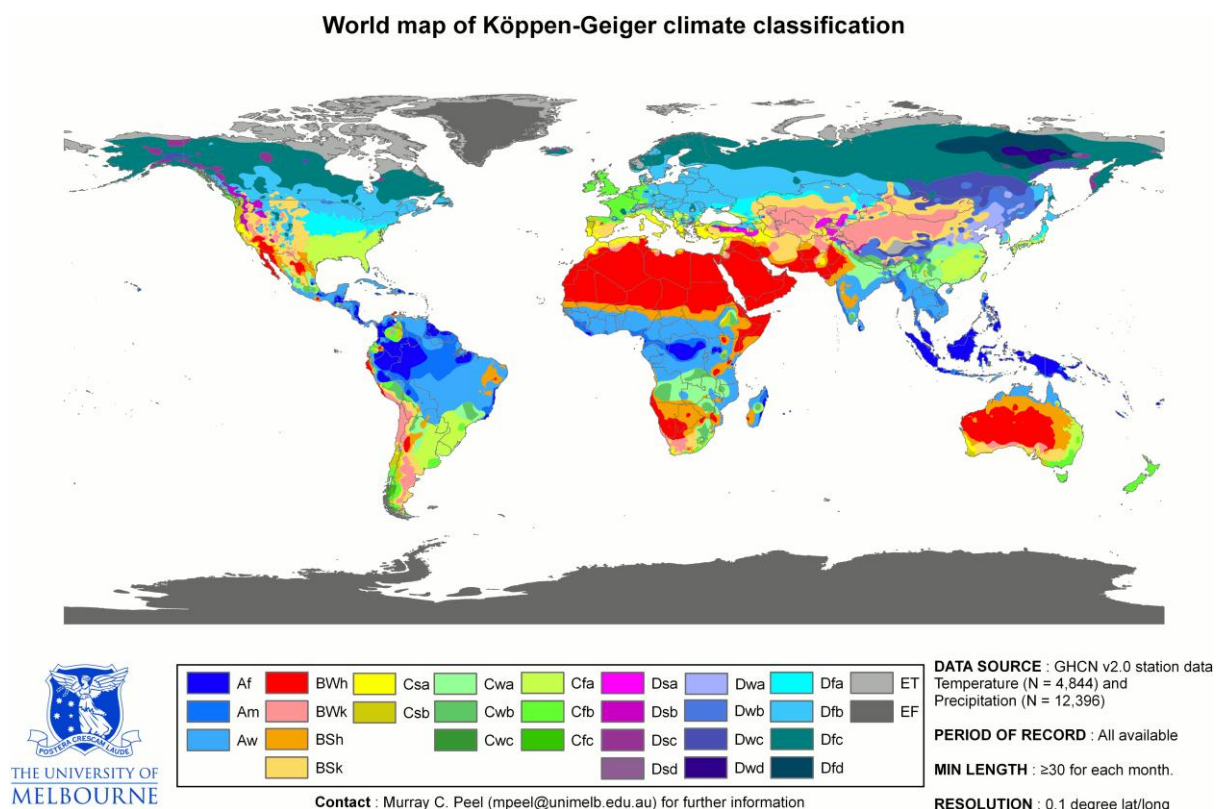
1. **Ministère de l'Energie**, *Bilan Energétique National* ,2015.Algerie
2. **Ministère de l'Energie, APRUE**, *La situation Energétique régionale*, 2015.Algerie.

Annexes

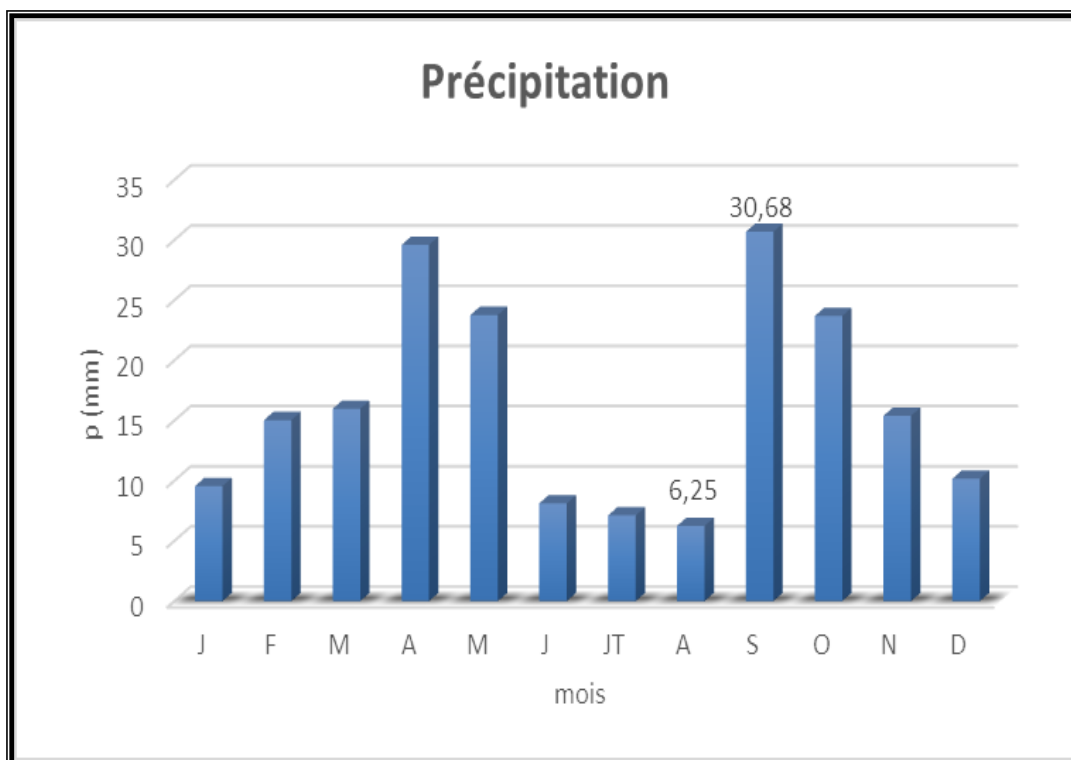
Annexe-A

I. Analyse climatique :

Le climat dominant de Bou Saâda est de type désertique. Tout au long de l'année, il n'y a techniquement aucune pluie à Bou Saâda. D'après Köppen et Geiger, le climat y est classé BWk (arid desert cold)



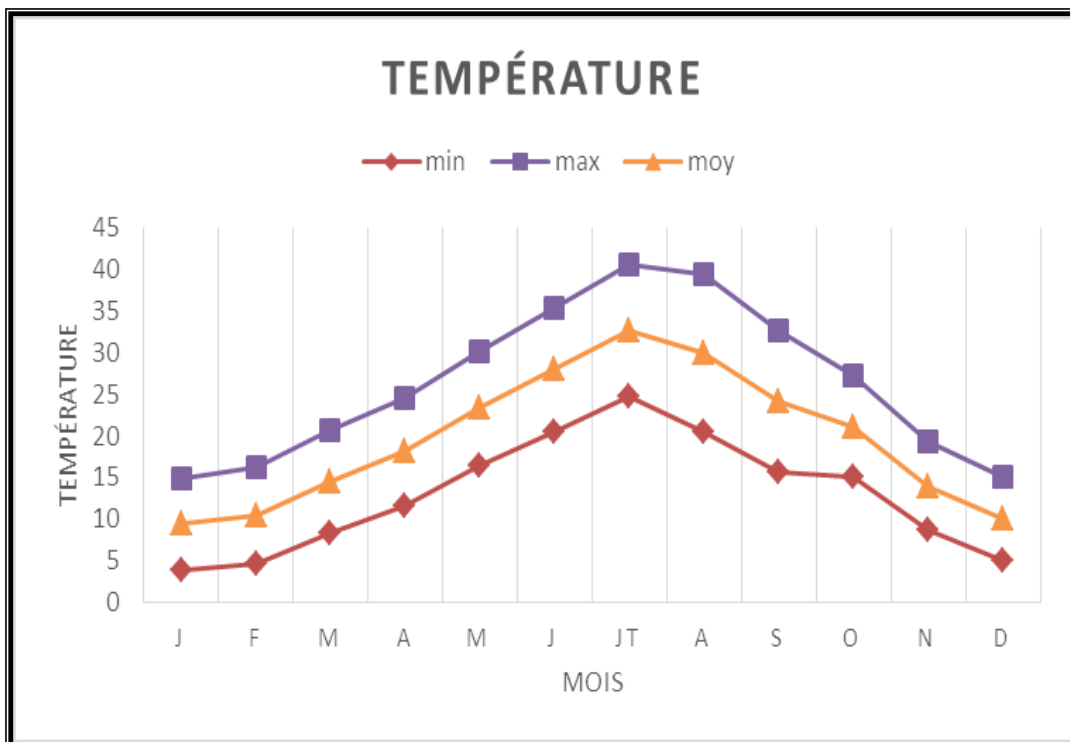
Sur l'année, la température moyenne à Bou Saada est de 19.63 °C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 195.38 mm. 6.25 mm font du mois d'août le plus sec de l'année. Les précipitations records sont enregistrées en septembre. Elles sont de 30.68 mm en moyenne.



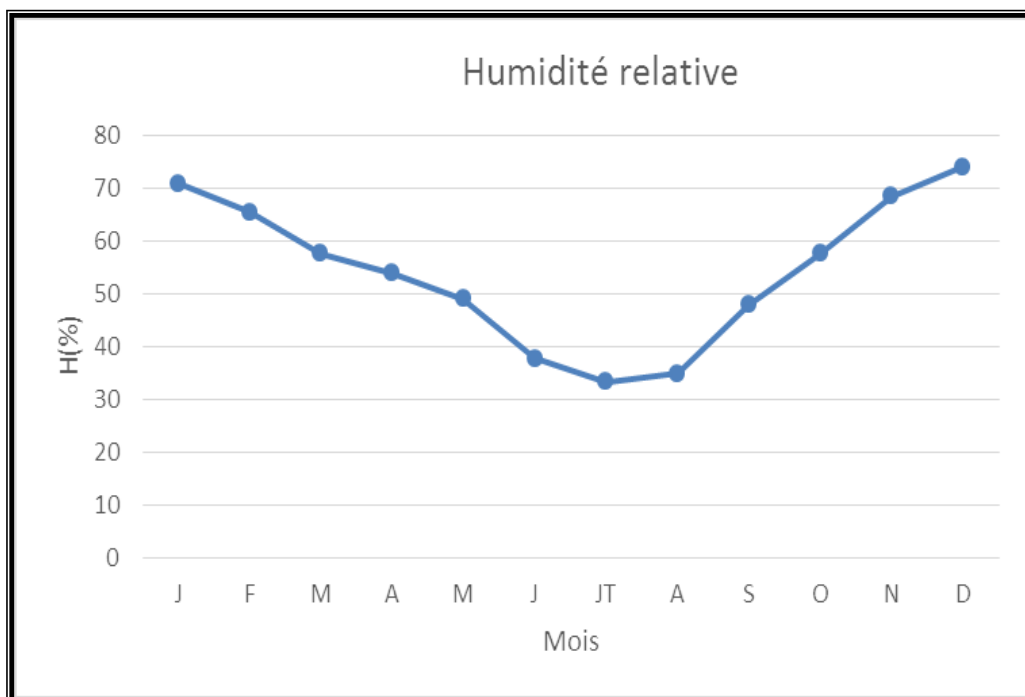
32.61 °C font du mois de Juillet le plus chaud de l'année. Le mois le plus froid de l'année est celui de Janvier avec une température moyenne de 9.45 °C.

Entre le plus sec et le plus humide des mois, l'amplitude des précipitations est de 24.3 mm.

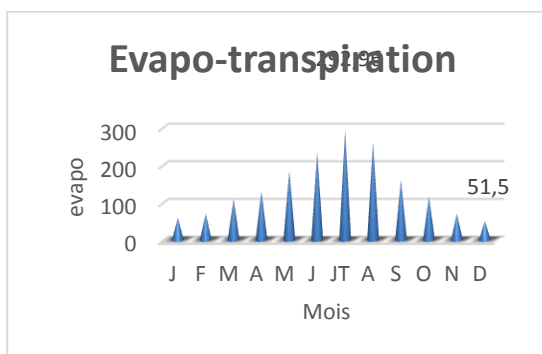
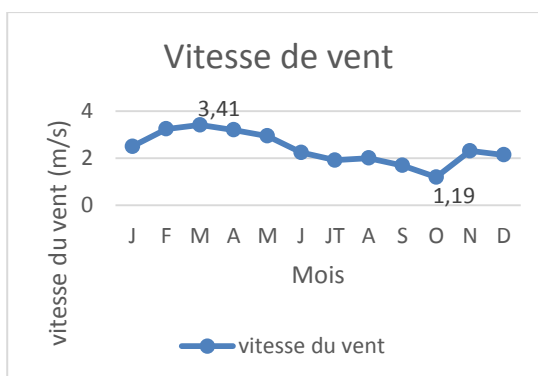
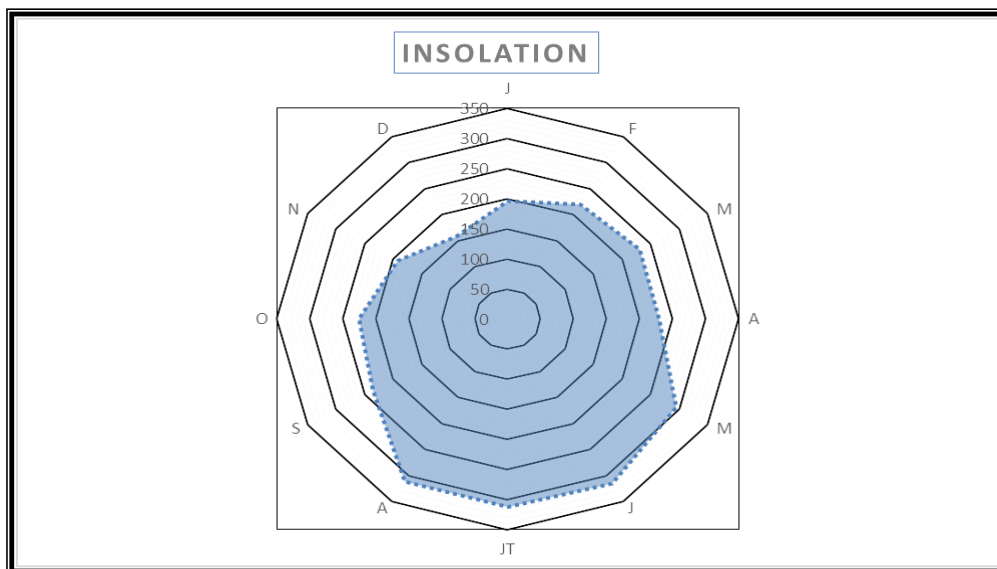
23.16 °C de variation sont affichés sur l'ensemble de l'année.



Le taux d'humidité le plus élevé est enregistré en hiver ,74% en mois de décembre, le plus bas est enregistré au mois de juillet et il est de 33.4%.



L'insolation est forte en été avec un maximum de 316h au mois de juin et un minimum de 157.6h au mois de décembre. la durée d'insolation peut atteindre les 2923.02 h/an.



II. Méthodes d'analyse Bioclimatique :

A/ Méthode de Mahoney

➤ Localisation de la ville de Bou-Saada :

Lieux	<u>Bou-Saada</u>
<u>Longitude</u>	<u>4°20' Est</u>
<u>Latitude</u>	<u>35° 33' Nord</u>
<u>Altitude</u>	<u>459 m</u>

➤ Température de l'aire en °C

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temp.Moy.max	14.93	16.16	20.69	24.54	30.18	35.32	40.47	39.36	32.55	27.25	19.32	15.13
Temp.moy.min	3.96	4.7	8.30	11.71	16.40	20.47	24.74	20.55	15.70	15.00	8.64	5.01
E.D.T	10.97	11.46	12.39	12.83	13.78	14.86	15.73	18.81	16.85	12.25	10.68	10.12

- $AMT=(H+L) / 2$
- $AMR = H-l$

T max= 40.47	AMT= 22.21
T min= 3.96	AMR= 36.51

➤ Humidité relative en %

Humidité max	84.5	78.5	75.3	73	67	57	42.4	49.9	71.2	74.9	82.6	83.4
Humidité min	45.6	40.3	30.4	27.7	22.4	18.4	18.3	19.2	25.8	32.7	43.1	5 4.3
moyenne	65.05	59.4	52.85	50.35	44.7	37.7	30.35	34.55	48.5	53.8	62.85	68.85
Groupe d'humidité	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3

Tout va être ensuite basé sur les principes suivants de **Mahoney**

Groupe d'humidité : R moyennes 1 moins de **30%**

- 2** entre **30-50%**
- 3** entre **50-70%**
- 4** plus de **70%**

➤ **Précipitations et vents :**

Précipitation (mm)	9.56	15.04	15.98	29.6	23.78	8.12	7.12	6.25	30.68	23.68	15.40	10.17
---------------------------	------	-------	-------	------	-------	------	------	------	-------	-------	-------	-------

Total annuel est de : 195.38 mm

➤ **Limites de confort :**

Groupe d'humidité	AMT plus de 20°C		AMT 15-20°C		AMT moins de 15°C	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
1	<u>26-34</u>	<u>17-25</u>	<u>23-32</u>	<u>14-23</u>	<u>21-30</u>	<u>12-21</u>
2	<u>25-31</u>	<u>17-24</u>	<u>22-30</u>	<u>14-22</u>	<u>20-27</u>	<u>12-20</u>
3	<u>23-29</u>	<u>17-23</u>	<u>21-28</u>	<u>14-21</u>	<u>19-26</u>	<u>12-19</u>
4	<u>22-27</u>	<u>17-21</u>	<u>20-25</u>	<u>14-20</u>	<u>18-24</u>	<u>12-18</u>

a- **Diagnostic de température :**

C /Froid (Cold)

O / Confort (Comfort)

H / Chaud (hot)

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Température Mens. Max	14.93	16.16	20.69	24.54	30.18	35.32	40.47	39.36	32.55	27.25	19.32	15.13
Confort diurne: sup	29	29	29	29	31	31	31	31	31	29	29	29
Confort diurne: Inf	23	23	23	23	25	25	25	25	25	23	23	23
Température Mens.Min	3.96	4.7	8.30	11.71	16.40	20.47	24.74	20.55	15.70	15.00	8.64	5.01
Confort nocturne Sup	23	23	23	23	25	25	25	25	25	23	23	23
Confort nocturne Inf	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Confort thermique: Jour	C	C	C	O	O	H	H	H	H	O	C	C
Confort thermique: Nuit	C	C	C	C	C	O	H	O	C	C	C	C

b- Indicateurs :

Humidité H1														
Humidité H1														0
H2														0
H3														0
Aride A1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
A2							x							1
A3	x	x	x									x	x	5

c- Application :

	Indicateurs	Confort thermique		pluviométrie	Groupe d'humidité	Différence moyenne
		jour	nuit			
Mouvement essentiel de l'air	H1	H			4	
		H			2-3	Mois de 10°
Mouvement indésirable de l'air	H2	O				
Quantité de pluie nécessaire	H3			Plus de 200 mm		
Capacité thermique nécessaire	A1				1-2-3	Plus de 10°
Température extérieure désirable	A2	H	H		1-2	
		H	O		1-2	Plus de 10°
Protection contre le froid	A3	C				

Total des indicateurs :

H1	H2	H3	A1	A2	A3
0	0	0	12	1	5

➤ Spécification recommandées :**1- Disposition /plan de masse**

H1	H2	H3	A1	A2	A3		
			0-10			1	Orientation nord et sud (axe long Est - Ouest)
			11,12		5-12		
					0-4	2	Plans compacts avec cours intérieurs

2- Espacement :

11,12						3	Ouverture des espaces pour pénétration de brise
2-10						4	Protection contre vent chaud et froid
0,1						5	Plans compacts

3- Mouvement d'air :

3-12						6	Chambre individuelles permettant la circulation d'air
1-2			0-5				
			6-12			7	Chambres doubles permettant une provision temporaire de l'air
0	2-12					8	Pas de mouvement d'air
	0-1						

4- Ouvertures

			0,1		0		9	Large ouvertures 40-80%
			11,12		0,1		10	Petites ouvertures 10-20%
							11	Moyennes ouvertures 20-40% de la surface du mur

5- Murs

							12	Murs légers
							13	Murs intérieurs et extérieurs épais

6 -Toit :

			0-5				14	Toiture légère
			6-12				15	Toiture épaisse

7- Terrasse :

				2-12			16	Espace demandé pour terrasse
--	--	--	--	------	--	--	----	------------------------------

8- Protection contre la pluie :

		3-12					17	Protection nécessaire contre les pluies
--	--	------	--	--	--	--	----	---

Total des indicateurs

H1	H2	H3	A1	A2	A3
0	0	0	12	1	5

1-Dimension des ouvertures :

			0-1		0		1	Large 40-80%
					1-12		2	Moyennes 25-40%
			2-5					
			6-10				3	Petites 15-25%
			11-12		0-3		4	Très petites 10-20 %
						4-12		5

2- Positions des ouvertures :

3-12							6	Au nord et au sud, murs s'élevant face au vent
1-2			0-5					
			6-12				7	Hautes ouvertures dans les murs intérieurs
0	2-12							

3- Protection des ouvertures

					0-2		8	Exclure rayonnement directe
		2-12					9	Protection contre la pluie

4- Murs et planchers :

			0-2				10	Capacité thermique faible
			3-12				11	Construction massive 8h

5- Toits :

10-12			0-2				12	Surface réfléchive de lumière
			3-12				13	Lumière quand c'est l'ensoleillement
			0-5					
			6-12				14	Exposés plus de 8 h

6- Espaces extérieurs :

				1-12			15	Espace pour terrasse
		1-12					16	Drainage adéquat des pluies

Abstract

The main purpose of the building envelope is to protect us from the surrounding climate; the building envelope is not only a shelter but also an active component in the system of the building, which can also be defined as an environmental filter. The development in building technology; building design is becoming an increasingly complex task, due to a growing demand to satisfy environmental performance requirements and reducing the energy consumption of buildings.

Material improvements present an opportunity to rethink architecture as part of its environment. The new design approach integrating parametric design and biomimicry for energy efficiency and interactive building expression.

In general, all materials change with changing temperature and moisture content, some more and some less; overall, their reaction to the temperature changes, depending on material properties. The present research is to establish the possibilities of adaptive materials used as building envelopes, which could be the solution to the over-heating problems and cool spaces without increasing the use of energy consuming. This phenomenon is inspired from the flower heads that open and close to acclimate to the environmental conditions in accordance with their needs and by means of their integrate thermo nastic material (biomimicry in architecture). The Results obtained using Timoshenko formula, for calculating the radius of curvature of a bimetallic strip, by means of parametric modeling (grasshopper). Revealed that biomimetic design approach is of great support to the sustainable design and contribute to the possibilities of reducing energy use through application of thermal behavior in bimetallic strip material as autonomous adaptive envelope solutions.

ملخص

إن الدور الأساسي لغللاف المبنى هو حماية مستخدميه من العوامل المناخية المحيطة. هذا الأخير ليس مجرد مأوى ساكن، بل هو عنصر فعال ونشط ضمن منظومة المبنى ككل. يمكننا أيضا أن نعرف غلاف المبنى على أنه مصفاة بيئية تحول دون وصول التأثيرات السلبية للعوامل المناخية مع ضمان استقرار ظروف الراحة بالداخل.

لقد جعل التطور المستمر لتقنيات البناء من مهمة تصميم البنايات أمرا متزايدا التعقيد من جهة، ومن جهة أخرى جعل الحاجة إلى الطاقة في نمو مطرد، مما أدى إلى بروز تحد كبير ألا وهو تحسين الأداء البيئي للبنايات من خلال الرفع من فعاليتها الطاقية. في هذا السياق مكنت مقاربة استخدام نظم التصميم الهيكلي (Parametric Design) وكذا منهج محاكاة الطبيعة من تقديم نماج معمارية جديدة قادرة على التفاعل مع محيطها تبعا لمتطلبات بيئتها الداخلية.

بصفة عامة، تستجيب الكائنات الحية في الطبيعة للعوامل المناخية المحيطة من خلال سلوكياتها أو من خلال بنية المواد المكونة لها والتي تتغير حالتها تبعا لدرجة الحرارة مثلا أو لدرجة احتوائها على الماء، أين يرتبط التغير بالخصائص الفيزيائية والكيميائية لهذه المواد. في هذا السياق تأتي هذه الدراسة لبحث إمكانية استخدام استجابة المواد للتغيرات في درجة الحرارة لتجسيد أغلفة مبان قادرة على التكيف بشكل ذاتي مع ارتفاع درجات الحرارة وانخفاضها في المناطق ذات المناخ المتناقض، وهذا دون الحاجة لأي مصدر للطاقة التي نسعى أساسا للحد من استهلاكها.

الفكرة الأساسية لأغلفة المباني موضوع هذه الدراسة مستوحاة من الحركة الانتحائية الناتجة عن تغير درجات حرارة الجو (Thermonastie) لدى العديد من أنواع الزهور، وهذا من خلال ربط الظاهرة بالدراسات حول انحناء الصفائح ثنائية المعادن تبعا لتغير درجات الحرارة، حيث استخدمت معادلة تيموشنكو (Timoshenko) لحساب نصف قطر انحناء هذه الصفائح في النموذج الرقمي المصمم باستخدام برنامج (Grasshopper) للتصميم الهيكلي، أين تم تصميم غلاف مبنى ذاتي الحركة يتفاعل مع المناخ لحماية الواجهات من الأشعاع الشمسي .

لقد اثبتت النتائج أن منهج محاكاة الطبيعة يشكل دعما قويا للتصاميم المستدامة حيث يمكن من توفير حلول ذكية تساهم في الحد من استهلاك الطاقة على غرار أغلفة المباني التي تعتمد على استجابة الصفائح ثنائية المواد للتغير في درجة الحرارة، وهو ما تمت دراسته كأحد الحلول الممكنة.