

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Seddik BENYAHIA – Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Architecture



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :
MASTER ACADEMIQUE

Filière :
ARCHITECTURE

Spécialité :
ARCHITECTURE ET ENVIRONNEMENT URBAIN

Présenté par :
Kaouter BOUDAHI
Sabrina HAMEK

THEME :
LE BIOMIMETISME COMME MOYEN
D'AMELIORATION DES CONDITIONS
MICROCLIMATIQUES DANS LES VILLES
MEDITERRANEENNES

Date de la soutenance : 13/07/2019

Composition du Jury :

Boujemaa SOUKEHAL	MCB, Université Mohamed Seddik BENYAHIA, Jijel, Président du jury
Ammar BOUCHAIR	Pr, Université Mohamed Seddik BENYAHIA, Jijel, Directeur de mémoire
Said GRIMES	MCB, Université Mohamed Seddik BENYAHIA, Jijel, Membre du Jury

REMERCIEMENT

Au premier lieu, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour atteindre notre objectif.

Notre reconnaissance s'adresse en particulier à Pr. BOUCHAIR Ammar, qui a accepté d'être notre encadrant de mémoire et de nous avoir pris en charge, et pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Nous tenons également à remercier les honorables membres du jury : Mr. SOUKEHAL boudjema et Mr. GRIMES Said, pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous n'oublierons pas de remercier tous les enseignants du département d'architecture de l'université Mohamed Seddik Benyahia de Jijel, pour les efforts qu'ils ont fournis durant notre cursus afin de nous amener jusqu'au bout de la formation.

Enfin, grands mercis à nos familles respectives et nos amis qui nous ont aidés.

Kaouter et Sabrina

DEDICACES

A mes chers parents,

Quoi que je fasse ou quoi que je dise, je ne saurai vous remercier comme il se doit. Votre affection me couvre, votre bienveillance me guide et votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes adorables sœurs Mehdia et Houyem,

Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon cher frère Yasser,

Pour son appui et son encouragement,

A toute ma famille sans exception pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A tous mes amis.

A tous ceux que j'aime et que je respecte.

Merci d'être toujours là pour moi.

Kaouter

DEDICACES

Merci notre Dieu de nous avoir donné le courage et la foi.

Je tiens à dédier ce modeste travail en signe de respect, de reconnaissance et de gratitude :

A ma très chère mère

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. Je n'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

A mon héros à mon très cher père

De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple de l'homme parfait, ta réussite ton ta vie professionnelle m'as poussé de travailler et bosser pour arriver à ce jour-là, ta persévérance et perfectionnisme. En témoignage de brut d'années de sacrifices de sollicitudes, d'encouragement et de prières, Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur

Je tiens à remercier mon encadreur Pr. Ammar BOUCHAIR pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience, sa compréhension et pour l'intérêt constant qu'il a porté à ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

A ma très chère sœur, et frère

A Anissa à ma moitié, ma confiante et mon tout, à la sœur exemplaire, tu été toujours là à mes coté depuis mon enfance, ton amour, tes conseils, ton soutien, ta croyance en moi, tu me dis toujours Sabrina je te vois loin, merci pour tous ce que tu m'as fait pour moi, moi aussi je te vois loin, tu es et tu seras toujours le meilleur médecin.

L'aide et le respect qu'ils m'ont toujours accordé, en leur souhaitant tout le succès...tout le bonheur.

Sabrina

TABLE DES MATIERES

Table des matières	I
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XII

INTRODUCTION GENERALE

Préambule	1
Choix et intérêt du thème.....	2
Problématique.....	3
Hypothèses	4
Objectifs	4
Méthodologie d’approche.....	5
Structure du mémoire	5

PARTIE I : CADRE DE REFERENCE CONTEXTUELLE ET THEMATIQUE

CHAPITRE I : BIOMIMETISME : LE VIVANT COMME MODELE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

Introduction	7
I.1. Comprendre le biomimétisme	8
I.1.1. Étymologie et définition	8
I.1.2. Émergence du biomimétisme.....	10
I.2. Précisions lexicales	13
I.2.1. Bio-inspiration « Bio-inspiration »	13
I.2.2. Bionique « Bionics »	13
I.2.3. Biomimétisme « Biomimicry »	13
I.2.4. Biomimétique « Biomimetics ».....	14
I.3. Pourquoi le biomimétisme maintenant.....	14
I.4. Méthodologie du biomimétisme.....	15
I.4.1. Fondements du biomimétisme	16
I.4.1.1. Ethos.....	16
I.4.1.2. Re-connecter.....	16
I.4.1.3. Émuler	16

I.4.2. Principes du vivant.....	16
I.4.2.1. Le système Terre est fini et borné.....	17
I.4.2.2. L'environnement est en équilibre dynamique.....	17
I.4.2.3. La planète est basée sur l'eau.....	17
I.4.3. Processus du biomimétisme.....	18
I.4.3.1. La biologie influence la conception.....	18
I.4.3.2. Les conceptions qui cherchent dans la biologie.....	18
I.5. Les problèmes résolus par le biomimétisme.....	18
I.6. Enjeux.....	20
I.6.1 Enjeux éthiques.....	20
I.6.2 Enjeux socioéconomiques.....	20
I.6.3 Enjeux environnementaux.....	20
I.6.4 Enjeux d'innovations.....	20
I.7. Exemples notables de biomimétisme.....	21
I.7.1 L'inspiration par la forme : Le train Shinkansen au Japon et le martin pêcheur.....	21
I.7.2 L'inspiration par le processus : Un algorithme biomimétique. Une moisissure gluante inspire la conception des réseaux de transport.....	22
I.7.3 L'inspiration par l'écosystème : La ville de Kalundborg au Danemark.....	25
Conclusion.....	26

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

Introduction.....	28
II.1. L'architecture et le développement durable.....	29
II.1.1. L'implication du développement durable en architecture.....	29
II.1.2. L'architecture durable.....	30
II.1.3. La relation entre l'architecture et le développement durable.....	30
II.2. Vers une architecture biomimétique.....	30
II.2.1. Architecture vernaculaire.....	31
II.2.2. Architecture solaire.....	31
II.2.3. Architecture japonaise.....	32
II.2.4. Architecture écologique.....	33
II.2.5. Architecture organique.....	33
II.2.6. Architecture biomorphique.....	33
II.3. Origine de la conception biomimétique.....	34

II.4. Les niveaux du biomimétisme.....	36
II.4.1. L'approche formelle	36
II.4.1.1. La forme, l'apparence esthétique	37
II.4.1.2. La structure	38
II.4.1.3. Les matériaux.....	41
II.4.2. L'approche fonctionnelle	43
II.4.2.1 La thermique et la ventilation	44
II.4.2.2. L'aérodynamisme	45
II.4.2.3. L'autosuffisance en ressources naturelles	46
II.4.3. L'approche éco systémique	47
II.4.4. La bio-assistance.....	50
II.5. Outils pour le biomimétisme.....	51
II.6. Réglementation internationale sur le biomimétisme.....	53
Conclusion	54

CHAPITRE III : LE BIOMIMETISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MEDITERRANEENNES

Introduction	55
III.1. La méditerranée : un territoire riche et pluriel.....	56
III.2. Des déséquilibres exacerbés par les changements climatiques	58
III.3. Évolutions passées et futures du climat en Méditerranée.....	59
III.3.1. Un réchauffement qui s'accélère	60
III.3.2. Des systèmes de précipitations altérés	61
III.3.3. Un cycle hydrologique perturbé	61
III.3.4. Des évènements climatiques extrêmes plus intenses et fréquents.....	63
III.4. Les impacts sectoriels du changement climatique dans la région méditerranéenne.....	63
III.4.1. Impacts sur la biodiversité terrestre et marine.....	64
III.4.2. Impacts sur la production alimentaire	65
III.4.3. Impacts sur les activités touristiques	65
III.4.4. Impacts sur les ressources en eau	66
III.4.5. Impacts sur la santé	66
III.5. La Conception biomimétique pour l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets	67
III.5.1. L'architecture biomimétique	67
III.6. Le changement climatique et l'environnement bâti	69

III.6.1. Réponses au changement climatique dans l'environnement bâti.....	69
III.6.2. Le Biomimétisme pour réduire les émissions de gaz à effet de serre	70
III.7. Biomimétisme et alternatives énergétiques	70
III.8. Biomimétisme pour la séquestration du carbone.....	71
III.9. Biomimétisme pour la chimie douce et verte	71
III.10. Renouveau agricole	72
III.11. Écomatériaux bio-inspirés	72
III.12. Économie circulaire.....	73
III.13. Biomimétisme pour inspirer des villes durables.....	74
Conclusion.....	74

PARTIE II : CADRE DE REFERENCE OPERATIONNELLE

CHAPITRE IV: PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

Introduction	76
IV.1. Cas d'étude N°1 : Quartier Casino, Jijel, Algérie	76
IV.1.1. Présentation de la wilaya de Jijel	76
IV.1.1.1. Situation et limites.....	76
IV.1.1.2. Présentation du POS N°07 de quartier Casino.....	77
IV.1.1.2.1. Situation et limites.....	77
IV.1.1.2.2. Accessibilité	77
IV.1.1.2.4. Topographie	78
IV.1.3. Présentation de l'échantillon choisi.....	78
IV.1.3.1. Situation et limites.....	78
IV.1.3.2. Critères de choix.....	79
IV.2. Microclimat de Jijel.....	79
IV.2.1. Températures de l'air	79
IV.2.2. Humidité.....	80
IV.2.3. Le Vent.....	81
IV.2.4. Les précipitations	82
IV.3. Microclimat de Jijel (Période du 21 juin 2018).....	83
IV.3.1. Température, humidité, point de rosée.....	83
IV.3.2. Le vent.....	84
IV.3.3. Les précipitations	84
IV.4. Cas d'étude N°2 : Quartier de Canet, Marseille, France	84
IV.4.1. Présentation de la ville de Marseille	84

IV.4.2. Présentation de quartier Le Canet	85
IV.4.3. Présentation de l'échantillon choisi.....	86
IV.4.3.1 Critères de choix.....	87
IV.5. Microclimat de Marseille	87
IV.5.1. Température	87
IV.5.2. Humidité de l'air	88
IV.5.3. Les vents.....	89
IV.5.4. Les précipitations	89
IV.6. Microclimat de Marseille (Période du 21 juin 2018)	90
IV.6.1. Température, humidité, point de rosée.....	90
IV.6.2. Le vent.....	91
IV.6.3. Les précipitations	91
Conclusion.....	91

CHAPITRE V : METHODE D'INVESTIGATION

Introduction	92
V.1. L'outil ENVI-met (Environmental Meteorology)	92
V.1.1. Présentation du logiciel ENVI-met.....	92
V.1.2. Modèle physique décrit par ENVI-met	94
V.1.3. Avantages identifiés de la version 4.4 d'ENVI-met.....	94
V.2. Déroulement de la simulation.....	96
V.2.1. Cas d'étude N°1 : Casino, Jijel, Algérie.....	97
V.2.1.1. Scénario N°1 (Cas de base)	97
V.2.1.2. Scénario N°2 (Modèle vert).....	98
V.2.2. Cas d'étude N°2 : Le Canet, Marseille, France	99
V.2.2.1. Scénario N°3 (Cas de base)	99
V.2.2.2. Scénario N°4 (Modèle fluide semi-blanc).....	99
Conclusion.....	100

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction	101
VI.1. Présentation et interprétation des résultats obtenus.....	101
VI.1.1. Variations de température et de l'humidité de l'air pour le scénario N°1	102
VI.1.2. Variations de température et de l'humidité de l'air pour le scénario N°2	106

VI.1.3. Variations de température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent pour le scénario N°3	110
VI.1.4. Variations de température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent pour le scénario N°4	117
Conclusion	122
CONCLUSION GENERALE	123
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	125

ملخص

Abstract

Résumé

Liste des figures

Figure I.1 : Approche du Biomimétisme	9
Figure I.2 : Les fondements du biomimétisme	16
Figure I.3 : Les principes de la vie	17
Figure I.4 : Nuisance sonore provoquée par chaque partie du train	21
Figure I.5 : (a) JR500 Bullet Train, (b) le martin-pêcheur	22
Figure I.6 : Physarum polycephalum dans son habitat naturel.....	23
Figure I.7 : Reconstitution du réseau de Tokyo par le Physarum & comparaison avec celui actuel.....	24
Figure I.8 : Le réseau de transport à Mexico développé par le Physarum Solver.....	25
Figure I.9 : L'écologie industrielle de la Ville de Kalundborg, Copenhague	26
Figure II.1 : Shibam au Yémen entièrement auto-construit	31
Figure II.2 : Une earthship au Stanmer Park à Brighton, Royaume-Uni.....	32
Figure II.3 : Intérieur de maison traditionnelle japonaise	32
Figure II.4 : Maison sur la cascade, architecte Frank Lloyd Wright.....	33
Figure II.5 : Détail du toit de la Sagrada Familia, architecte Antonio Gaudi.....	34
Figure II.6 : Conception biomimétique - Solution-Based	35
Figure II.7 : Conception biomimétique - Nature-Based.....	35
Figure II.8 : Le village olympique de Barcelone, architecte Franck Gehry	38
Figure II.9 : Aéroport Lyon SauntExupéry, architecte Santiago	38
Figure II.10 : The yellow lost dog, architecte François Scali.....	38
Figure II.11 : Pavillon américain de l'exposition universelle	39
Figure II.12 : Structure d'un Radiolaire (Auloniahexagona).....	39
Figure II.13 : Le Crystal palace, architecte Joseph Paxton	39
Figure II.14 : Feuille de nymphéa	39
Figure II.15 : Coquillage (Tridacne géant).....	40
Figure II.16 : Le marché de Royan, architectes Simon et Morisseau.....	40
Figure II.17 : La Sagrada Familia, architecte Antonio Gaudi	40
Figure II.18 : La Sagrada Familia, imitation de l'arbre	40
Figure II.19 : Parc Olympique de Munich, architecte Frei Otto.....	42
Figure II.20 : Toile d'araignée posée sur l'herbe	42
Figure II.21 : Effet Lotus avec des gouttes d'eau tombent sur la surface	43
Figure II.22 : Façade sans et avec le revêtement autonettoyant	43
Figure II.23 : Système de ventilation naturelle	45

Figure II.24 : Fonctionnement de l'Eastgate Center, architecte Mike Pearce	45
Figure II.25 : La Tour Swiss Re de Londres, architecte Norman Foster & éponge de mer	45
Figure II.26 : Le terminal international de Waterloo.....	46
Figure II.27 : Le pangolin.....	46
Figure II.28 : Théâtre de l'eau à Las Palma, architecte Nicolas Grimshaw.....	46
Figure II.29 : Le stenocara, insecte bioinspirateur du système de condensation.....	46
Figure II.30 : Dragonfly, un projet de biomimétisme écosystémique de Vincent Callebaut ...	49
Figure II.31 : Les nouvelles propositions spectaculaires de Vincent Callebaut, pour la Cité des Sciences de Rome.....	49
Figure II.32 : La cité tressée et la cité des habitarbres, architecte Luc Schuiten.....	51
Figure III.1 : La mer Méditerranée et ses pays riverains.....	57
Figure III.2 : Produit Intérieur Brut par tête selon les pays en United States Dollars, 2000 à 2015	58
Figure III.3 : La diversité des climats autour de la mer Méditerranée. Diagrammes ombrothermiques de plusieurs sites littoraux	59
Figure III.4 : Évolution de la température à la surface terrestre, 1901-2012	60
Figure III.5 : Variations moyennes des températures de l'air en été, 1986-2005 vs 2081-2100	60
Figure III.6 : Changements observés des précipitations annuelles sur les terres émergées 2100	61
Figure III.7 : Évolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100.....	61
Figure III.8 : Hausse du niveau des mers, période 1900-2010 (observations), et 2010-2100..	62
Figure III.9 : PH de la surface des océans à l'échelle mondiale.....	62
Figure III.10 : Distributions saisonnière et mensuelle des inondations sur la période 1940-2015	63
Figure III.11 : Biot (Région PACA, France), après les inondations d'octobre 2015	63
Figure IV.1 : Situation géographique de la wilaya de Jijel et ses limites.....	76
Figure IV.2 : Vue aérienne sur le POS N°7 Casino	77
Figure IV.3 : Vue aérienne sur l'accessibilité de site	77
Figure IV.4 : Coupes topographique du site d'étude.....	78
Figure IV.5 : Vue aérienne sur l'îlot choisi	78
Figure IV.6 : Vues aérienne sur la partie choisie de l'îlot.....	78
Figure IV.7 : Vues des bâtiments collectifs de Casino.....	79
Figure IV.8 : Température moyenne maximale et minimale de la ville de Jijel	80

Figure IV.9 : Pourcentage de temps passé dans divers niveaux de confort selon l'humidité, catégorisés par le point de rosée	81
Figure IV.10 : Vitesse moyenne du vent	82
Figure IV.11 : Le pourcentage de jours durant lesquels divers types de précipitation sont observés, excepté les quantités traces.....	83
Figure IV.12 : Moyennes mensuelle de la température, l'humidité, point de rosée absolue, pour la du 21 juin période 2018.....	83
Figure IV.13 : La vitesse annuelle des vents pour la du 21 juin période 2018.....	84
Figure IV.14 : Pluviométrie et pression au niveau de la mer pour la du 21 juin période 2018	84
Figure IV.15 : Vue aérienne sur la ville de Marseille	85
Figure IV.16 : Vue aérienne sur le quartier de Canet.....	85
Figure IV.17 : Quartier Le Canet	86
Figure IV.18 : Vues aériennes sur l'îlot choisi.....	86
Figure IV.19 : Température moyenne maximale et minimale de la ville de Marseille.....	88
Figure IV.20 : Pourcentage de temps passé dans divers niveaux de confort selon l'humidité, catégorisés par le point de rosée	88
Figure IV.21 : Vitesse moyenne du vent	89
Figure IV.22 : Le pourcentage de jours durant lesquels divers types de précipitation sont observés, excepté les quantités traces.....	90
Figure IV.23 : Moyennes mensuelle de la température, l'humidité, point de rosée absolue, pour la du 21 juin période 2018.....	90
Figure IV.24 : La vitesse annuelle des vents	91
Figure IV.25 : Pluviométrie et pression au niveau de la mer pour la du 21 juin période 2018	91
Figure V.1 : Plan montrant les sous-modèles d'ENVI-met	94
Figure V.2 : Tableau montrant la différence de calcul de la température des façades entre la version 3.1 et la version 4.4 d'Envi-met.....	95
Figure V.3 : Schéma du modèle des 3 nœuds	95
Figure V.4 : Schéma montrant l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met	96
Figure V.5 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°1, vue en 2D, vue en 3D	98
Figure V.6 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°2, vue en 2D, vue en 3D	98
Figure V.7 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°3 vue en 2D, vue en 3D	99
Figure V.8 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°4, vue en 2D, vue en 3D	100

Figure VI.1 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°1.....	102
Figure VI.2 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°1.....	103
Figure VI.3 : Coupes verticales présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°1. Au-dessus la coupe à 15h, au-dessous la coupe à 21h.....	104
Figure VI.4 : Graphe de température de l'air de scénario N°1	105
Figure VI.5 : Graphe d'humidité relative pour le scénario N°1	105
Figure VI.6 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°2.....	106
Figure VI.7 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°2.....	107
Figure VI.8 : Graphe de la température de l'air pour le scénario N°1 et le scénario N°2.....	107
Figure VI.9 : Coupe verticale à 15h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°2	108
Figure VI.10 : Coupe verticale à 21h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°2	109
Figure VI.11 : Graphe de l'humidité relative pour le scénario N°1 et le scénario N°2.....	109
Figure VI.12 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°3	110
Figure VI.13 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°3	111
Figure VI.14 : Coupes verticales présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°3. Au-dessus la coupe à 15h, au-dessous la coupe à 21h.....	112
Figure VI.15 : Graphe de température de l'air de scénario N°3.....	113
Figure VI.16 : Graphe d'humidité relative pour le scénario N°3	114
Figure VI.17 : Coupe horizontale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°3 .	114
Figure VI.18 : Coupe verticale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°3	115
Figure VI.19 : Graphe de la vitesse de vent pour le scénario N°3	116
Figure VI.20 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°4	117
Figure VI.21 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°4	118
Figure VI.22 : Coupe verticale à 15h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°4	118

Figure VI.23 : Coupe verticale à 21h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°4	119
Figure VI.24 : Graphe de la température de l'air pour le scénario N°3 et le scénario N°4....	119
Figure VI.25 : Graphe de l'humidité relative pour le scénario N°3 et le scénario N°4.....	120
Figure VI.26 : Coupe horizontale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°4 .	121
Figure VI.27 : Graphe de la vitesse du vent pour le scénario N°3 et le scénario N°4.....	121
Figure VI.28 : Coupe verticale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°4	122

Liste des tableaux

Tableau V.1 : Paramètres utilisés pour le lancement de la simulation	97
Tableau V.2 : Albédo des différentes surfaces du modèle simulé.....	98
Tableau V.3 : Albédo des surfaces modifiées dans le modèle fluide semi-blanc	100

Liste des abréviations

BADT	Biologists At the Design Table.
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable.
CIEC	Commission Internationale de l'Etat Civil.
CO2	Dioxyde de Carbone.
EPLF	Entreprise de Promotion du Logement Familial.
GES	Gaz à Effet de Serre.
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.
H2O	Formule brute de l'eau.
ICU	Ilots de chaleur urbains.
IDEA	International Institute for Democracy and Electoral Assistance.
IPREM	Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux.
ISO	Organisation Internationale de Normalisation.
RCP	Représentative Concentration Pathways.
SiO2	Le dioxyde de Silicium.
STO	Société de Transport de l'Outaouais.
TGV	Train à Grande Vitesse.
TRIZ	Theory of Inventive Problem Solving.
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature.

1. Préambule

La ville évolue au sein d'un environnement « naturel » avec lequel elle interagit en permanence. Le climat fait partie intégrante de cet environnement et le cadre bâti a été construit pour être le plus adapté possible aux conditions climatiques locales. Empirisme et approche scientifique de la construction ont ainsi permis de répondre en partie aux besoins humains de sécurité et de confort vis-à-vis d'un climat qui n'est pas toujours clément. Les villes modifient localement les paramètres climatiques. Ces modifications ont des conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments et l'efficacité de la climatisation naturelle (Santamouris et al., 2004), la pollution atmosphérique (Sarrat et al., 2006 ; Vautard, 2010), le confort extérieur (Steemers, 2006), la santé (Buechley et al., 1972) ou encore la faune et la flore (Sukopp, 2004).

Le changement climatique est souvent cité comme la menace la plus grave à laquelle l'humanité est confrontée. Ce dérèglement a de nombreux impacts sur notre environnement au sens large : qu'il s'agisse de notre environnement naturel, économique ou social, qui touche tous les pays et toutes les régions du monde. La zone méditerranéenne est reconnue comme étant sensible à ce problème. Les villes méditerranéennes, par leur configuration spatiale, situation géographique et par leur croissance, sont considérées comme des milieux particulièrement vulnérables, des « hot spots » du changement climatique. Les spécificités du climat urbain méditerranéen sont notamment : l'augmentation de la température de l'air, la diminution de la vitesse du vent, la baisse de la pluviométrie, l'augmentation des périodes de sécheresse, la hausse du niveau de la mer qui, selon quelques études, pourrait être de l'ordre de 35 cm d'ici la fin du siècle et la présence de pollution urbaine. Ces caractéristiques mettent en évidence l'îlot de chaleur urbain dont la distribution spatiale dépend essentiellement de l'occupation du sol et des paramètres météorologiques.

À l'heure actuelle, en tant que professionnel de l'environnement bâti l'architecte a besoin de résoudre des problèmes urgents et difficiles liés à la mitigation de changement climatique dans les villes. Il peut être utile d'examiner des exemples où les mêmes problèmes ont été résolus par d'autres organismes vivants et des écosystèmes depuis des milliards d'années. 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. L'appropriation d'une approche biomimétique systémique dans nos modes de conception, de production et d'organisation est une innovation de rupture encore plus prometteuse pour le développement durable. Elle nous semble en effet être annonciatrice

d'un changement de paradigme dans nos méthodes d'innovation et en particulier en ce qui concerne le développement urbain durable, avant tout parce qu'elle initie de nouveaux rapports entre homme et nature.

D'un côté, une urbanisation galopante dans les villes méditerranéennes avec des effets délétères pour l'environnement et les hommes. De l'autre, une nature qui fonctionne de manière vertueuse depuis plusieurs milliards d'années. Pourquoi ne pas s'inspirer de la seconde pour limiter les excès de la première ? C'est toute l'intention du biomimétisme : opérer des transferts de processus et de systèmes de la biologie à la technologie, afin de développer des ingénieries et des modes de fonctionnement soutenables, qui à limitent le changement climatique, n'obèrent pas l'avenir et permettent de répondre à nos besoins. C'est pour cela que nous avons souhaité développer ce sujet novateur dans le cadre de notre recherche.

2. Choix et intérêt du thème

Située entre l'Afrique sèche et chaude et l'Europe tempérée, la Méditerranée est la région du monde où les enjeux climatiques sont exacerbés et les effets du changement climatique sont les plus faciles à constater. Les villes sont partiellement responsables de ce dérèglement, mais elles peuvent également constituer une partie de la solution. Concentrée de problèmes, la ville méditerranéenne qui s'organise sur un socle naturel de grande valeur et constitue l'un des plus grands hotspots de la biodiversité à l'échelle mondiale. Elle est formée en terrain formidable d'innovations et d'expérimentations grâce à une grande variation et une richesse des ressources biologiques et écologiques.

Aujourd'hui le marché de la construction verte et des produits et services vendus au nom de l'environnement sont controversés et aucune posture ne semble répondre à la gravité de la situation. Dans le grand désordre des démarches écologiques, la question que tous les acteurs de l'aménagement se posent c'est : comment trouver des réponses à cette crise écologique systémique qui impose un changement de cadre de référence dans notre façon de concevoir, de construire, d'habiter la ville méditerranéenne ? réponse que propose le biomimétisme c'est finalement un retour aux sources. Une approche de bon sens puisqu'elle consiste à se tourner vers ce qui existe déjà et qui fonctionne depuis des milliards d'années. L'approche biomimétique met en effet à mal un postulat de base qui a consisté à opposer depuis des siècles nature et culture, génie du vivant et génie urbain, biosphère et technosphère. Le biomimétisme propose une réconciliation de ces antithèses en nous invitant à prendre la nature non pas comme « un gisement de ressources à exploiter sans limites, mais bien comme un gisement de connaissances à explorer » comme l'explique si bien Benyus.

Les rares exemples de projets d'aménagement bio-inspirés dans le monde sont la preuve des réels bénéfices écologiques qui peuvent apporter une conception biomimétique de l'aménagement urbain durable. Ils sont les premiers témoins de l'application d'une approche intégrée qui permettra sans doute de trouver de nouvelles réponses aux enjeux posés par la gestion de l'énergie, des matériaux, des transports, de la mixité, au sein des villes actuelles. En effet, nous constatons qu'actuellement cette discipline influence beaucoup la démarche des architectes et semble étonnamment liée aux enjeux environnementaux. Or, si la nature fut de tout temps une source d'inspiration, la revendication d'un lien entre ce raisonnement par analogie et le développement durable semble être une idéologie contemporaine. Ce sujet est une opportunité pour nous pour contribuer à rendre les villes du bassin méditerranéen plus résilientes au changement climatique.

3. Problématique

Le changement climatique, l'urbanisme écoresponsable et la maîtrise de la consommation énergétique sont autant de questions qui ont été érigées depuis quelques années comme problèmes publics sur les rives de la Méditerranée. La moitié de la population mondiale est en passe de devenir urbaine, deux habitants sur trois le sont déjà dans les pays de la Méditerranée et, vers 2030, ce sera les trois quarts. Le pourtour du bassin méditerranéen est caractérisé par la périurbanisation au Nord, l'urbanisation galopante des pays du Sud et de l'Est et un processus généralisé de littoralisation. Gérer l'accélération de l'urbanisation au sud et à l'est, satisfaire les besoins qui l'accompagnent, maîtriser son développement diffus sur la rive nord, limiter la concentration dans les grandes agglomérations, atténuer la vulnérabilité au risque environnemental sont des défis majeurs posés par les modes de développement urbain en ce XXI^e siècle.

Dans cette partie du monde, les villes, autrefois compactes, se déploient en tache d'huile, sous forme tentaculaire ou le long des littoraux. Elles envahissent leurs périphéries, absorbent de petits villages et consomment des terres agricoles périurbaines. L'étalement urbain allonge les déplacements entre domicile et travail et multiplie les équipements de transports. Il en résulte une congestion de la circulation, une pollution atmosphérique importante au niveau local, des émissions de gaz à effet de serre en forte croissance et, plus largement, des atteintes à l'environnement et à la santé publique.

La dégradation s'accélère dans l'un des bassins mondiaux les plus riches en biodiversité. La qualité de l'eau, comme celle des sols et de l'atmosphère, inquiète les scientifiques et l'avenir climatique de la Méditerranée s'annonce bien sombre. Plusieurs

études publiées ces dernières années ne donnent pas cher de cette aire géographique qui compte parmi les espaces les plus sensibles de la planète.

Partant de ce constat, une question principale de recherche peut être soulevée :

- En quoi les apports du biomimétisme et les inspirations des concepts et des stratégies adoptées par les systèmes naturels qui ont fait leurs preuves face à des problèmes de toute sorte dans la nature, peuvent-ils influencer les microclimats des villes méditerranéennes et par conséquent les effets du changement climatique ?

En d'autres termes :

- Dans quelle mesure le génie de la nature et du vivant peut constituer une méthodologie de conception innovante initiatrice d'un changement de paradigme vers l'avènement d'un aménagement urbain « écosystémique », compatible avec la biosphère pour rendre les villes du bassin méditerranéen moins vulnérables aux évolutions climatiques ?

4. Hypothèses

Afin de répondre aux questionnements soulignés dans la problématique, nous croyons que les hypothèses suivantes peuvent valider la finalité de notre recherche :

- ✓ Les solutions fondées sur la nature représentent des opportunités importantes pour répondre aux enjeux des changements climatiques au sein des villes, de sorte que la nature dans la diversité de ses formes, procédés et stratégies, constitue une source infinie d'expérimentation, d'inspiration et d'innovation pour nos systèmes humains.

- ✓ Le biomimétisme consiste à s'inspirer des propriétés remarquables des systèmes naturels pour un développement soutenable des sociétés humaines. Elle peut constituer pour nous un accélérateur de l'innovation, appelant à repenser nos modes de concevoir, d'organiser, de construire et d'aménager l'espace urbain afin de vivre sainement et durablement dans les villes.

5. Objectifs

Ce travail de recherche vise sans doute à mettre de la lumière sur les objectifs suivants :

- ✓ Montrer les données les plus récentes concernant les spécificités du climat urbain méditerranéen et les connaissances portant sur les changements climatiques prévus dans les villes méditerranéennes puis d'identifier les conséquences de ce dérèglement sur leur environnement en général et en particulier sur leurs paramètres microclimatiques, et leurs écosystèmes naturels.

- ✓ Démontrer les potentialités du biomimétisme à produire des solutions extrêmement efficaces aux défis environnementaux et ses rôles dans la lutte contre le changement

climatique dans l'environnement bâti afin d'éviter de futurs aléas climatiques dommageables, voire de futures catastrophes naturelles.

✓ Mettre en lumière l'intérêt de l'approche biomimétique en conception architecturale, cette dernière s'inscrit dans un contexte de recherche actuel qui vise à trouver des solutions innovantes à la problématique du développement durable dans le secteur du bâtiment.

✓ Repenser les interactions entre urbain et monde vivant à travers la notion d'écosystème puis de proposer une méthodologie de conception urbaine biomimétique en quête d'innovation durable.

6. Méthodologie d'approche

Pour atteindre les objectifs tracés et en vue d'apporter des réponses satisfaisantes aux questions soulevées dans la problématique, nous avons adopté la méthode de travail suivante qui va déterminer le sens de développement de notre recherche.

Notre démarche méthodologique se décline en plusieurs étapes présentées comme suit :

- **Approche théorique**

La recherche dans cette partie comprend la collecte de documents, d'ouvrages, de revues, de travaux de recherche, d'articles de journaux, d'actes de séminaires ou colloques en plus de l'exploitation d'articles sur internet pour une lecture synthèse des notions en relation avec les éléments du thème choisi.

- **Approche opérationnelle**

Comprenant la simulation à l'aide du logiciel informatique « ENVI-met V4.4 ». Il sert à la modélisation numérique du microclimat urbain et l'étude des paramètres affectant ce dernier par l'élaboration de divers scénarii. Les techniques d'ENVI-met ont été utilisées pour l'analyse et l'interprétation des résultats à l'aide des graphes et des cartes de ce logiciel.

7. Structure du mémoire

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire est structuré en deux parties distinctes mais complémentaires divisées en six chapitres, les deux parties sont précédées par une introduction générale et suivies d'une conclusion générale.

- **Introduction générale**

Définissant notre thème de recherche et les causes de son choix. Elle englobe également la problématique dans laquelle plusieurs questions relatives au sujet sont soulevées. On a essayé de répondre aux différentes questions posées par de multiples hypothèses qui retracent les objectifs mentionnés, après cela vient la démarche générale qui explique la méthode avec laquelle nous avons entrepris notre recherche.

Revenant aux parties qu'on a traité comme ce-suit :

I. Première partie : Cadre de référence contextuel et thématique

Comprendra un ensemble de définitions, de notions théoriques et de critères relatifs à notre thème d'étude à travers laquelle le sujet d'étude justifie son existence et sa destinée. Cette partie est subdivisée en trois chapitres :

- **Chapitre I** : Ce chapitre permet de définir la démarche biomimétique, d'en faire sommairement son historique, d'exposer sa méthode et d'en présenter ses applications les plus notables.

- **Chapitre II** : Dans ce chapitre, nous étudierons le concept du biomimétisme appliqué au domaine de l'architecture pour bien comprendre le transfert d'un mécanisme de la vie à des systèmes non vivants.

- **Chapitre III** : Il présente le contexte particulier du bassin méditerranéen, et introduit les implications du changement climatique et leurs conséquences sur les sociétés méditerranéennes et leur environnement naturel. Il aborde aussi le potentiel du biomimétisme en vue de contribuer à la lutte contre le changement climatique et de la réduction des risques naturels.

II. Deuxième partie : Cadre de référence opérationnelle

Englobe trois chapitres :

- **Chapitre IV** : Consiste à une analyse des sites choisis et leurs spécificités de divers points de vue notamment du point de vue morphologique et climatique.

- **Chapitre V** : Consiste à une présentation de la méthode utilisé dans l'investigation, il s'agit d'une simulation basée sur un outil informatique avec l'exploitation du logiciel « Envi-met V4.4 », en élaborant plusieurs scénarios avec différentes caractéristiques des échantillons choisis.

- **Chapitre VI** : Présente les résultats de la simulation et l'ensemble des recommandations tirées.

- **Conclusion générale**

Présente les recommandations appréhendées à travers l'outil de simulation en se référant aux résultats obtenus ultérieurement.

Introduction

« Le génie de l'homme peut produire de nombreuses inventions grâce à la mise en œuvre de divers instruments contribuant au même but. Cependant, il n'en fera jamais de plus belles, de plus simples ou de plus adaptées que celles de la nature. Car, dans ses inventions à elle, rien ne manque et rien n'est superflu »

Léonard De Vinci

Au cours de l'histoire humaine, l'homme regarde la nature avec beaucoup d'étonnement. Les designers, les architectes et les artistes se sont toujours tournés vers la nature pour imiter la beauté de ses formes et y chercher l'inspiration d'un point de vue esthétique ou pour en imiter les procédés et les comportements. Le biomimétisme est la science qui étudie la nature, en imitant ou en s'inspirant de ses modèles et de ses méthodes pour inventer des solutions écologiques aux problèmes engendrés par l'être humain et pour développer de nouvelles interactions entre l'homme et ses environnements. Cette approche n'est pas un nouveau concept, mais elle a commencé récemment à être scientifiquement formulée. 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.

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

Carlo Goldoni

Depuis toujours, l'être humain s'est inspiré de la nature pour améliorer son existence : il y recherche des solutions à ses problèmes et des réponses à ses questions. D'ailleurs, la nature très souvent a déjà résolu la plupart des problèmes auxquels nous sommes confrontés, elle a fait évoluer ses systèmes pendant des milliards d'années et ils travaillent en harmonie les uns avec les autres. Les animaux, les plantes et les microbes sont des ingénieurs qualifiés. Ils ont trouvé ce qui fonctionne, ce qui est approprié, et ce qui dure. C'est pourquoi la nature est considérée comme le professeur permanent et universel au cours de l'histoire et dans tous les domaines. Après des siècles de recherches et de développements naturels, nous pouvons considérer ce qui nous entoure dans la nature comme étant le secret de la survie.

Dans la partie suivante, un survol du biomimétisme est effectué dans un premier temps. Ce chapitre permet de définir cette science, d'en faire sommairement l'historique, d'exposer sa méthode et d'en présenter quelques applications qui permettent de percevoir l'ampleur, l'importance et l'utilité du biomimétisme pour l'être humain.

I.1. Comprendre le biomimétisme

*« The more our world functions like the natural world, the more likely we are to endure
on this home that is ours, but not ours alone. »*

Janine M. Benyus

I.1.1. Étymologie et définition

Étymologiquement, le terme biomimétisme provient de la réunion de deux mots grecs : βίος *bíos*, signifiant la vie, et μίμησις *mímêsis*, signifiant imiter. Le dictionnaire le définit comme une « démarche d'innovation durable qui consiste à transférer et à adapter à l'espèce humaine les solutions déjà élaborées par la nature (faune, flore, etc.) » (Larousse, Dictionnaire français, Biomimétisme).

La science que l'on nomme en français biomimétisme et biomimicry en anglais est une posture scientifique récente qui a été développée par la biologiste américaine Janine M. Benyus. Le terme biomimicry semble apparaître pour la première fois dans la littérature scientifique en 1962. Mais c'est bien Janine M. Benyus qui popularisera le terme dans son livre de 1997 *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*. Dans le livre, le biomimétisme est décrit comme : « Une nouvelle science qui étudie les modèles de la nature puis imite ou s'inspire de ces idées et procédés pour résoudre les problèmes humains. [...] le biomimétisme utilise des critères écologiques pour déterminer si nos innovations sont "bonnes". Au bout de 3,8 milliards d'années d'évolution, la nature a appris à reconnaître ce qui marche ; ce qui est approprié ; ce qui dure. [...] le biomimétisme est une nouvelle façon de considérer et d'apprécier la nature. Il ouvre une ère fondée non pas sur ce que nous pouvons extraire du monde naturel, mais sur ce que nous pouvons apprendre. »

Le même livre dans lequel Janine M. Benyus propose trois définitions du biomimétisme, ces définitions peuvent être entendues comme les fondements d'une nouvelle philosophie ou, à minima, comme des principes de bons sens :

1. La nature comme modèle : Le Biomimétisme est une nouvelle science qui étudie les modèles de la nature, puis imite ou s'inspire de leur design et processus pour résoudre des problèmes humains.

2. La nature comme mesure : Le Biomimétisme propose d'utiliser les standards de l'écologie pour juger de la « justesse » de nos innovations. Après 3,8 milliards d'années d'évolution, la nature a appris : ce qui marche, ce qui est approprié, ce qui dure.

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

3. La nature comme Mentor : Le Biomimétisme est une nouvelle manière de considérer et d'apprécier la nature. Il introduit une ère fondée non pas sur ce que nous pouvons extraire du monde naturel, mais sur ce que l'on peut apprendre de lui.

Le biomimétisme se définit comme étant l'étude des œuvres de la nature afin d'en imiter les concepts, les schémas et les procédés, et de les appliquer pour résoudre nos problèmes quotidiens. 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 (Figure I.1).

Le concept de biomimétisme se propose de s'inspirer des idées géniales développées dans la nature pour concevoir nos innovations dans une perspective de durabilité. Le biomimétisme est donc basée non pas sur ce que l'on peut extraire des organismes biologiques et de leurs écosystèmes, mais sur ce que l'on peut apprendre d'eux. En fait, depuis qu'elle est apparue sur terre, la vie a agi en véritable laboratoire de recherche et de développement. Pour résoudre des problèmes auxquels se confronte l'être humain, elle a « imaginé » des solutions efficaces, saines et adaptables, qui ne compromettent pas la résilience ni la pérennité de la nature. L'efficacité des innovations et le génie de la vie deviennent source d'inspiration lorsqu'il est question de biomimétisme (Benyus, 2011). L'humain a donc tout intérêt à puiser dans cette « sagesse » et de ne plus voir la nature seulement comme un bien, mais plutôt comme un guide (Morinière, 2009).



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

I.1.2. Émergence du biomimétisme

De tout temps, l'Homme, de manière plus ou moins consciente, s'est inspiré de la nature dans sa façon de vivre, de construire ou de produire. Qu'il s'agisse de chasser, pêcher ou encore de se chauffer l'Homme s'est développé et a longtemps appris en imitant ou en innovant à partir des faits et gestes des êtres vivants présents dans son environnement pour reproduire ou transformer divers procédés naturels pouvant lui être utiles, afin de trouver de nombreuses réponses à des problèmes simples voire complexes. De ce fait, le biomimétisme n'est donc pas une idée nouvelle, si la discipline est récente en tant que sciences théorisées - ou en voie de théorisation -, elle est bien plus ancienne en tant que pratique.

La datation de l'apparition du biomimétisme, si tant est que cela soit pertinent, apparaît être difficile à formuler, même de façon grossière. Si ses premières traces irréfutables remontent à la Renaissance par l'intermédiaire de Léonard de Vinci et ses études du vol des oiseaux pour la conception de ses ornithoptères et automations (Da Vinci, 2013), les premières investigations des connaissances issues du vivant relatives au vol lui sont antérieures.

Abbas Ibn Firnas (810-887), cristallisant la fascination que l'homme a pour le vol aérien, n'aura eu de cesse, tout au long de sa vie, que de tenter de décrypter le mécanisme mis en œuvre par les oiseaux (Jamsari et al., 2013). Près de mille ans plus tard, à la fin du XIX^e siècle, Otto Lilienthal (1911) concevra ses planeurs suite à l'étude de la capacité de portance de l'extrados des ailes d'oiseau. Un siècle supplémentaire s'écoulera avant que Clément Ader, fasciné par les chauves-souris et plus particulièrement la roussette et son ossature lui permettant d'effectuer de courts vols planés, réalise son avion III, aux caractéristiques aérodynamiques sans précédent (Vincent et al., 2006). Ce sont tous ces travaux, parmi tant d'autres, qui mèneront les frères Wright sur le chemin de la réussite en 1903 (Hwang et al., 2015), avec leur Flyer inspiré des vautours, finissant d'imprimer la marque de la bioinspiration au domaine de l'aviation. Encore aujourd'hui nombre d'innovations de l'aéronautique (p. ex. les winglets des grands rapaces américains, microdrones inspirés des insectes) puisent leur inspiration de la nature.

Au cours des dernières décennies, de nombreux termes sont apparus, venant se cristalliser autour du sujet : biomimétique, bionique, solutions basées sur la nature, etc. Compte tenu du peu de littérature scientifique et d'une abondance d'écrits populaires sur le sujet, issus d'auteurs aux parcours très distincts, des aspirations antithétiques apparaissent. La situation de l'objet est davantage compliquée, que la discipline a émergé dans diverses disciplines scientifiques ou non, dont chacune a son langage propre, sa méthodologie et son

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

but. Nous considèrerons ici que chaque terme revêt des aspects normatifs et idéologiques. Clarifier le sens des termes pourrait aider à en desseller les contours.

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. Il est donc clair qu'à l'aube du temps les humains ont copié de la nature, mais cette pratique est née en grande partie avec le scientifique multidisciplinaire Otto Herbert Schmitt. Ingénieur et physicien faisait partie d'une génération de scientifiques qui ambitionnait de repousser les limites de leur discipline. Otto Schmitt délaissant une approche spécialisée au profit d'une méthode interdisciplinaire, et jetant notamment des passerelles entre les communautés techniques et scientifiques. Ce dernier effectuait des recherches sur les interactions électriques au niveau des terminaisons nerveuses. Ce travail donnera à Otto H. Schmitt l'occasion de proposer en 1957 dans sa thèse de doctorat, pour la première fois, le concept de « **biophysique** ». Qui mènera plus de dix ans plus tard, à celle de **la biomimétique** (Fayemi, 2016). À ce moment de l'histoire des sciences, où deux approches de l'ingénierie prédominaient, l'une ancrée dans les apports de la physique, l'autre dans ceux de la biologie, l'auteur - pourtant physicien de formation - conçut ce terme pour révéler l'apport de la biologie au sein de l'ingénierie. (Schmitt, 1969 cité par Vincent et al., 2006). Selon lui, « *La biophysique n'est pas tant une question de sujet que de point de vue. C'est une approche des problèmes issus des sciences du vivant sous l'angle de théories et technologies de la physique. Réciproquement, la biophysique est aussi l'approche qu'aurait un biologiste à un problème de physique ou d'ingénierie, bien que cet aspect ait été grandement délaissé* » (traduit de [Schmitt, 1957] cité dans Harkness, 2002).

Un an après les découvertes de Schmitt, en 1958, le médecin américain Jack Steele, alors en poste dans un laboratoire de recherche médicale aérospatiale, présenta une interprétation dérivée de la biomimétique, qu'il appela - contraction de biologie et technique, puis de biologie et électronique - Il énonça les objectifs scientifiques de la discipline lors d'un congrès de biophysique organisé à Dayton dans l'Ohio en septembre 1960 : lancer un programme de recherche transdisciplinaire en vue de rechercher dans la nature des méthodes de conceptions de systèmes artificiels performants (Guillot et al, 2008). Ces aspirations de recherche mèneront, bien plus tard, et non exhaustivement, à des avancées dans les champs relatifs à la robotique, les nanotechnologies et l'intelligence artificielle.

À la création de la biomimétique et de la bionique en tant que concepts, se succède celle de la « **bio inspiration** », inventée et popularisée par le chimiste américain George McClelland Whitesides, connu notamment pour ses recherches sur la résonance magnétique

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

nucléaire (RMN) et ses apports sur les nanotechnologies. La bio inspiration consiste en l'utilisation de la compréhension des fonctions en biologie pour stimuler la recherche des sciences et techniques non biologiques. Pour le chimiste, la bio inspiration revêt deux caractéristiques majeures : sa simplicité et son accessibilité. Les procédés biologiques sont source d'une extrême complexité et nécessitent des moyens et temporalités de recherche conséquents pour leur compréhension. En premier lieu, l'auteur y voit une possibilité pour tendre vers des procédés technologiques et chimiques plus simplifiés. Là où les sciences techniques procèdent par des méthodologies très complexes et riches en ressources, le génie du vivant use de moins de subterfuges et d'énergie pour des résultats similaires. En second lieu, selon l'auteur pour s'inspirer du vivant, il n'y a pas forcément besoin de connaître tous les ressorts du fonctionnement d'un organisme, mais des principes directeurs qui nous seront utiles. Il s'agit en somme d'une procédure de simplification de la biologie, dans l'optique d'une application non biologique.

Avec la parution du livre de la biologiste américaine Janyne Beynus, intitulé « Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables » en 1997, la notion de biomimétisme prit un second souffle. L'auteure, désormais présentée comme figure de proue de la discipline, s'est employée à définir l'ambition de la démarche biomimétique : « *La nature a déjà résolu les problèmes auxquels nous sommes confrontés. Les animaux, les plantes et les microbes sont des ingénieurs accomplis. Voilà le message du biomimétisme : après 3,8 milliards d'années de recherche et développement, les échecs sont devenus fossiles, et ce qui nous entoure est la clé de la survie* » (Beynus, 1997). Son ouvrage présente une synthèse des applications inspirées du fonctionnement du Vivant, dans des domaines multiples tels l'agriculture, des matériaux, de l'informatique, de l'industrie, etc. Face aux concepts de biomimétique, bionique et bioinspiration, le biomimétisme se distingue par l'accent mis sur la recherche de durabilité.

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 primé 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. Précisions lexicales

Face au flou sémantique relatif à la bio-inspiration, le premier travail effectué par le Comité technique ISO 266 dans le cadre des travaux de normalisation du biomimétisme a été de clarifier les différents termes servant à décrire le domaine.

I.2.1. Bio-inspiration « Bio-inspiration »

« Approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques »
[ISO/TC266, 2015b].

Dans cette définition, la bio-inspiration constitue un concept générique susceptible de regrouper nombre de sous-concepts et pratiques.

I.2.2. Bionique « Bionics »

« Discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des
Fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques. »

[ISO/TC266, 2015b] tel qu'aligné avec les travaux précédemment publiés
(C.-à-d. [Fayemi et al., 2013, Fayemi et al., 2014, Fayemi, 2015])

Cette définition place au cœur l'interprétation littérale des suffixes – tique (électronique) et –i (méchai), afin de proposer un concept tel qu'aujourd'hui utilisé par les communautés des sciences de la robotique. Il est à noter que cette définition respecte aussi l'interprétation populaire du terme relative à la série « L'Homme qui valait trois milliards », vecteur qui a contribué à la démocratisation du terme au cours des années 70.

I.2.3. Biomimétisme « Biomimicry »

« Philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature
afin de relever les défis du développement durable (i.e. social, environnemental et
économique). »

[ISO/TC266, 2015b], tel qu'aligné avec les travaux précédemment publiés
(I.e. [Fayemi et al., 2013, Fayemi et al., 2014, Fayemi, 2015])

Cette définition met l'emphase sur deux concepts distincts : l'aspect philosophique lié à l'usage du suffixe –ime et l'intégration du développement durable comme motivation première de ce type d'approche. La définition présentée ici respecte le sens original tel qu'introduit par Janine Benyus, sans l'enfermer dans une sacralisation de la nature qui peut être perçue comme oppressante pour ceux n'ayant pas suivi la formation de Biomimicry 3.8.

I.2.4. Biomimétique « Biomimetics »

« Coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles, ainsi que le transfert et l'application de ces modèles à la solution. »

[ISO/TC266, 2015b], tel qu'aligné avec les travaux précédemment publiés (Fayemi et al., 2013, Fayemi et al., 2014, Fayemi, 2015).

La définition proposée pour le terme biomimétique fait la part belle à son aspect méthodologique. Il est à noter que mimétisme signifie copie.

La multiplicité des pratiques fait qu'il est parfois délicat de discerner ce qui relève du biomimétisme ou non. À cela s'ajoute le fait que certains font du biomimétisme sans le savoir ou sans le concevoir ainsi. Ce qui s'apparenterait en quelque sorte à du « biomimétisme accidentel » (Fayemi, 2016). Si le recours au corpus de la biologie dans certaines démarches de production est clairement explicite, à d'autres échelles d'action, comme sur l'étude des organisations, cela devient plus complexe. S'agit-il de métaphores naturalistes ou d'imitations formelles ?

Aux définitions présentes ci-contre, nous nous proposons d'ajouter celle de « Nature-Based Solutions » définies par l'UICN comme « les actions qui s'appuient sur les écosystèmes afin de relever les défis globaux comme la lutte contre les changements climatiques ou d'autres (santé, approvisionnement et qualité de l'eau, sécurité alimentaire...) ». Afin de s'entendre et puisque la finalité de notre étude réside dans le tracé des éléments épistémologiques d'une conception biomimétique, il nous paraît plus approprié de considérer ici le biomimétisme essentiellement selon son approche philosophique.

I.3. Pourquoi le biomimétisme maintenant ?

L'homme est arrivé à un tournant de son évolution. Partant d'une petite population dans un vaste monde, l'espèce humaine s'est si bien étendue en nombre et en territoire que ce monde risque d'exploser. Nous sommes trop nombreux et nos modes de vie ne sont pas soutenables.

Outre les aspects positifs de la révolution industrielle, cette dernière a eu des impacts négatifs sur l'environnement. Ce n'est pas nouveau de dire que la façon actuelle de traiter notre environnement et la façon dont nous consommons l'énergie est catastrophique. D'autre part, nous constatons que les organismes naturels interagissent avec l'environnement pendant

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

des millions d'années et qu'ils ont conçu des systèmes biologiques très efficaces pour s'adapter aux conditions environnementales afin de surmonter les défis.

Actuellement, nous assistons à un nouveau souffle du biomimétisme après une pause induite par l'assurance exagérée d'un « mode de vie facile grâce à l'ère de la chimie ». En apprenant à synthétiser nos produits par la pétrochimie, nous avons cru nous affranchir de la nature et la dépasser. Avec l'avènement du génie génétique, certains s'imaginaient déjà tout-puissants, à la tête d'un arsenal technologique infaillible qui leur garantirait l'indépendance.

Pour les autres, il est difficile d'ignorer les signaux d'alarme qui se déclenchent autour d'eux. En ce début de 21^e siècle, les réalités environnementales s'imposent à nous et nous forcent à rechercher des modes de vie plus sains et soutenables pour la planète. L'attrait pour le biomimétisme nous vient de notre profonde connaissance des phénomènes naturels. Les connaissances dans le domaine de la biologie doublent tous les cinq ans, les différentes découvertes se rejoignant souvent à l'image d'un puzzle en construction.

Pour la première fois dans l'histoire, nous avons les instruments - micro et télescopes ou satellites- pour mesurer l'excitation d'un neurone en activité ou assister à la naissance d'une étoile. En combinant toutes les connaissances, nous sommes subitement en mesure d'imiter la nature comme jamais auparavant.

Alors que nous commençons à réaliser tout ce que nous pouvons apprendre de la nature, nos modèles sont en voie d'extinction. Ne sont pas seulement quelques espèces isolées, mais des écosystèmes entiers. Le biomimétisme n'est donc plus seulement une nouvelle manière de voir et de mettre en valeur la nature. C'est aussi le chemin de la survie.

I.4. Méthodologie du biomimétisme

Selon Janine Benyus, le concept du biomimétisme n'est pas basé sur ce qu'il est possible de prendre de la nature, mais bien sur ce qu'il est possible d'apprendre d'elle (Benyus, 2011). Il s'agit donc d'une démarche en trois temps, effectuée de manière innée, qui consiste à observer, comprendre et appliquer. Comme suite à l'observation d'un aspect de la nature, il suffit de découvrir un comportement, un geste, une forme, un fonctionnement, ou d'autres faits intéressants, de rechercher l'explication de cette intrigue, puis d'essayer de le reproduire en utilisant les technologies que l'être humain maîtrise (Morinière, 2009).

De fait, la pratique du biomimétisme incarne trois ingrédients interconnectés, mais uniques ; les trois éléments essentiels du biomimétisme représentent la fondation du biomimétisme. Combiner ces éléments ensemble, la conception bioinspirée devient biomimétisme (Figure I.2).

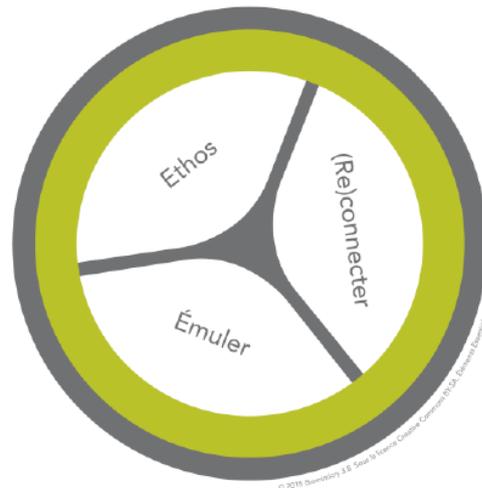


Figure I.2 : Les fondements du biomimétisme (source : Biomimicry 2015)

I.4.1. Fondements du biomimétisme

Une démarche biomimétique obéit à une triple intention : éthos, (re) connecter et émuler.

I.4.1.1. Ethos

Constitue l'essence de leur éthique, leurs intentions et philosophie sous-jacente derrière leur pratique du biomimétisme, respectueuse et responsable face à chaque forme de vie, faisant écho aux considérations précédemment évoquées.

I.4.1.2. Re - connecter

Une pratique et une mentalité qui explore et approfondit la relation entre humains et non-humains. À la recherche d'une modification des regards et perceptions sur le règne du vivant. La reconnexion est un moyen pour prendre la mesure de l'importance de s'insérer dans un système global.

I.4.1.3. Émuler

L'élément émuler est la recherche proactive des principes, des modèles, des stratégies et des fonctions issues de l'observation des phénomènes naturels, qui pourraient contribuer à un changement qualitatif de nos modes de production et de consommation, ainsi que de nos relations afin d'atteindre la vision des humains pour vivre durablement sur terre.

I.4.2. Principes du vivant

Les principes du vivant sont des règles de fonctionnement que l'on retrouve dans tous les écosystèmes biologiques sur Terre et qui sont apparus sous la pression de l'évolution et de l'adaptation. Ces principes particuliers existent, car le vivant s'est développé sous certaines contingences présentes depuis des milliards d'années et que les biomiméticiens appellent « les

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

conditions du système qui a accueilli la vie » (Figure I.3). Ce sont trois conditions auxquelles la vie a dû s'adapter :

I.4.2.1. Le système Terre est fini et borné

Les ressources sont limitées. Un modèle économique basé sur une croissance matérielle infinie avec des ressources finies n'est donc pas viable. Il faut opérer une transition vers une économie qui a réduit la diversité de ses matériaux, a mis en place un recyclage total et qui privilégie la dématérialisation.

I.4.2.2. L'environnement est en équilibre dynamique

Nous savons depuis le début du siècle dernier que l'univers est en expansion, qu'il n'est pas stable. Dans notre région d'univers, notre soleil lui-même évolue, son rayonnement fluctue au court du temps. Le soleil conditionne la vie sur terre. Le vivant s'est donc développé dans des conditions changeantes. Le vivant lui-même agissant également sur son environnement, modifie le milieu dans lequel il prospère. Les changements sont donc intrinsèquement liés à la vie. C'est ce qui a permis au vivant de développer des capacités d'adaptation et d'évoluer au court du temps.

I.4.2.3. La planète est basée sur l'eau

La vie est apparue dans les océans et a donc utilisé cette ressource première pour se construire et pour évoluer. La vie étant basée sur l'eau, tous les mécanismes du vivant doivent la garder saine sous peine de disparition.

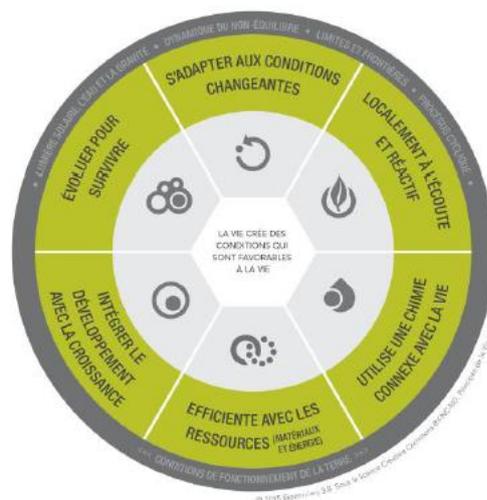


Figure I.3 : Les principes de la vie (source : Biomimicry 3.8 2015)

I.4.3. Processus du biomimétisme

Le biomimétisme, comme méthode de recherche, est scientifiquement divisé en deux groupes ; **la biologie influence la conception** (biology influencing design) et **les conceptions qui cherchent dans la biologie** (design looking to biology) (Pedersen Zari, 2007).

I.4.3.1. La biologie influence la conception

Le premier groupe « La biologie influence la conception » traite de la découverte de nouveaux comportements, fonctions ou caractéristiques biologiques afin de créer de conceptions récentes. Cette approche exige une analyse scientifique sophistiquée des systèmes biologiques et demande un suivi qui prend longtemps, de sorte que celle-ci a besoin d'une équipe de chercheurs pour découvrir une idée qui peut utiliser et améliorer une conception.

I.4.3.2. Les conceptions qui cherchent dans la biologie

La deuxième approche « conceptions qui cherchent dans la biologie » traite de la création de nouvelles conceptions en regardant les organismes et les écosystèmes naturels en vue d'étudier comment ils ont surmonté les problèmes pareils auxquels sont confrontés les concepteurs. Cette approche n'a pas besoin de la même profondeur de l'analyse scientifique demandée par le premier groupe. Elle est plus pratique parce que les concepteurs cherchent dans la nature afin de découvrir des solutions d'un seul problème en transformant ces solutions en nouveaux concepts.

Au sein de ces deux approches, les conceptions pourraient imiter quatre dimensions possibles : la composante physique (forme, structure, matériel), le comportement, la fonction (processus) ou l'écosystème. La plupart des exemples existants sont liés à la première dimension : l'apparence, la structure et le matériel.

I.5. Les problèmes résolus par le biomimétisme

Selon Laurent BILLON, chercheur à l'IPREM, « *Le vivant est capable de développer des molécules, des structures et des architectures complexes menant à des fonctionnalités ou matériaux fonctionnels. Pour cela, il utilise des processus catalysés et des assemblages ascendants peu énergivores en termes de température/pression ambiante, et n'utilisant que des éléments (C, H, N, O et quelques métaux) ou synthons (CO₂, H₂O, SiO₂...) tous abondants à la surface de la Terre ou dans les océans. Être capable de traduire et de s'approprier ces processus et ces structures hiérarchiques, tel est l'objectif de l'approche bio-inspirée pour l'élaboration des matériaux du futur... avec la vision, si possible de n'utiliser que notre environnement proche comme ressources et ainsi limiter notre impact* ».

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

Depuis 3,8 milliards d'années, les organismes vivants colonisent les milieux terrestres, en repoussant les frontières des espaces habitables. Par les mécanismes de l'évolution et le jeu de la sélection naturelle, les structures et fonctions des matériaux biologiques se sont diversifiées pour maintenir la vie dans des environnements variés. Il en résulte une grande diversité de stratégies mises en œuvre en réponse à des contraintes spécifiques.

« Heat, beat and treat » caractérise les traitements thermiques, mécaniques et chimiques lourds nécessaires à la production des matériaux issus de la technosphère. De plus, le recyclage est souvent limité à des procédés de « downcycling » (dévalorisation). À l'opposé, la sélection naturelle des organismes vivants a permis de développer une vaste gamme de stratégies de production de matériaux compatibles avec les contraintes environnementales : en termes d'utilisation des ressources - énergie et matière - et de recyclage.

- Comment nos produits sont-ils fabriqués ?

Voici un stéréotype qui illustre les procédés de fabrication de produits industriels tel qu'ils sont pratiqués encore majoritairement aujourd'hui. Notons que la fabrication du verre par exemple suit presque exactement ce procédé !

La matière première, qui a été excavée et transportée de chaque recoin du monde, est coupée, ciselée, rabotée avec au passage jusqu'à 96 % de déchet et donc seulement 4 % de produit fini. Un traitement à haute température (plus de 1000 °C pour le verre) et à haute pression, procédé très énergivore, est appliqué pour modifier les propriétés physiques. Le résultat est ensuite traité avec des produits chimiques souvent toxiques et difficilement recyclables. Chaque pièce fabriquée est assemblée pour former le produit final qui est transporté dans les différents pays de commercialisation. La durée de vie du produit commercialisé est, la plupart du temps, très longue et presque toujours largement plus longue que sa durée d'utilisation. Les produits en fin de vie sont stockés sous forme de déchets par les entreprises ou par les collectivités territoriales ou abandonnés dans des décharges. Seule une faible portion est recyclée. Il est de plus à noter que la fabrication de l'ensemble de nos produits nécessite quasiment la totalité des éléments atomiques existant sur terre, soit 92 éléments différents.

- Comment la nature fait-elle ?

La nature procède très différemment. Les organismes vivants « se construisent » par auto-assemblage à partir de quatre éléments de base présents localement (environ 97 % de leur composition) à température et pression ambiante et en utilisant comme solvant l'eau (les éponges hexactinellide sont capables de fabriquer du verre de très haute qualité dans de l'eau à 4 °C). Tous les éléments utilisés sont recyclés après « usage » et sont réutilisés par d'autres

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

organismes dans un cycle fermé, donc sans déperdition. La seule source extérieure apportée au système naturel est l'énergie solaire. Si des molécules toxiques pour le vivant sont synthétisées par des organismes biologiques, elles sont biodégradables contrairement aux nôtres qui sont rémanentes. Il n'y a aucune dégradation des conditions naturelles par les organismes et le vivant crée les conditions propices à la vie (Benyus, 1997) !

Les modes de production de produits à travers toute l'industrie sont pour la plupart très loin de suivre le modèle que nous offre le monde du vivant qui pourtant a démontré sa viabilité, son efficacité et sa pérennité depuis les milliards d'années de son existence. Le concept de biomimétisme et la méthodologie associée sont donc de proposer de changer de modèle et de s'inspirer fortement des principes de fonctionnement des systèmes vivants et des systèmes naturels plus largement pour établir un modèle plus sain et durable.

I.6. Enjeux

L'idéologie biomimétique vient en alternative à la dystopie de la fatalité de l'évolution humaine. Cette position se risque aux enjeux suivants :

I.6.1. Enjeux éthiques

Le biomimétisme peut être source de progrès, mais il pourrait être aussi utilisé à contre-courant. De nouvelles armes militaires ou économiques, ou de nouveaux gaspillages de ressources peuvent en découler. Comme le souligne le rapport du CGDD (2012), une « invention de la nature » isolée de son contexte peut perdre son intérêt écosystémique, voire être contreproductive, surtout si elle n'est pas inscrite dans un processus « circulaire » où la matière n'est pas intégralement recyclée.

I.6.2. Enjeux socioéconomiques

Un rapport américain évalue à 1000 milliards de dollars en 2025 ce que pourrait être le marché du biomimétisme.

I.6.3. Enjeux environnementaux

Face à la crise tant économique qu'écologique liée à la surexploitation des ressources naturelles, de nombreux chercheurs, architectes, industriels, prospectivistes et certains gouvernements estiment que le biomimétisme pourrait aussi être un vecteur de mutation.

I.6.4. Enjeux d'innovations

L'application de ce mode de pensée ouvre de nouveaux champs d'investigations et offre une inspiration illimitée qui s'intègre aux conditions de cette planète. De la biologie pour des êtres biologiques dans une biosphère.

I.7. Exemples notables de biomimétisme

Grace aux nombreux exemples, le concept du biomimétisme reste relativement facile à comprendre. Cependant, puisque le véritable défi réside dans la compréhension de la nature elle-même, son application demeure plus difficile à concrétiser (Morinière, 2009). Par contre, cette difficulté n'est pas insurmontable car il existe de nombreux projets qui ont été réalisés ou qui sont en cours de réalisation à l'heure actuelle. Vu la multitude d'avancées dans le domaine à travers le monde, il n'est pas possible de les présenter entièrement. En conséquence, une sélection de projets a été effectuée en fonction de la représentativité des trois grands champs d'application du biomimétisme (formes, processus et écosystèmes) et à partir de la thématique de la durabilité.

I.7.1. L'inspiration par la forme : Le train Shinkansen au Japon et le martin pêcheur

Favorisant une consommation moins énergivore, les concepteurs de ce projet se sont inspirés de la nature pour l'efficacité de ses formes et de ses fonctions. Cet exemple est d'ailleurs maintes fois cité pour son ingéniosité. Il s'agit du train à grande vitesse Shinkansen au Japon. Ce train a la particularité de passer fréquemment dans de nombreux tunnels souterrains et d'en ressortir aussitôt.

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 (Figure I.4).

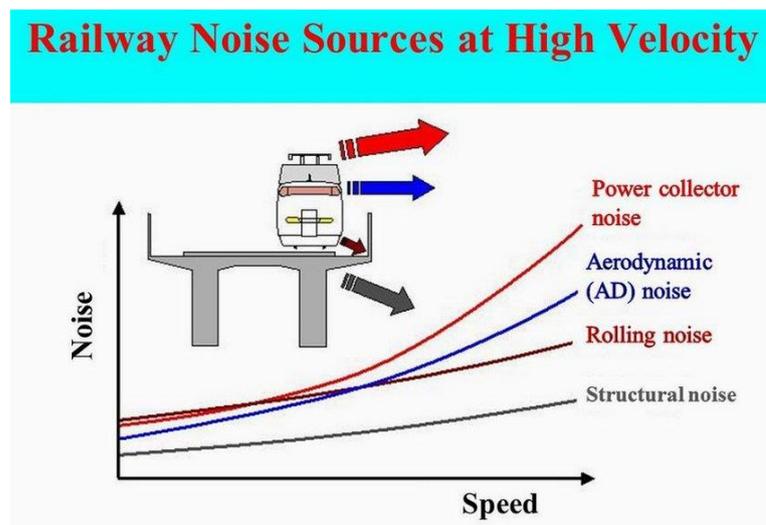


Figure I.4 : Nuisance sonore provoquée par chaque partie du train
(Source : <http://labs.blogs.com>, 2017)

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

Le défi consistait donc à trouver un modèle animal capable de passer d'un milieu à un autre milieu de densité différente sans difficulté, pour principalement atténuer le bruit provoqué par le train lors de son impact avec une nouvelle densité d'air. Pour résoudre ce problème, 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, 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).

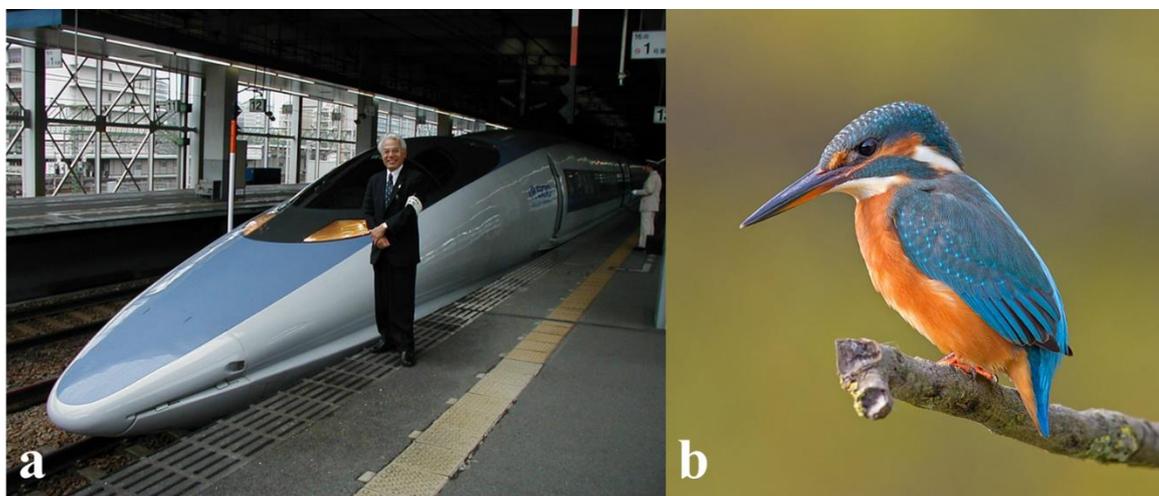


Figure I.5 : (a) JR500 Bullet Train (source : www.labs.blogs.com), (b) le martin-Pêcheur (source : www.bishopsmeadowtrust.org)

1.7.2. L'inspiration par le processus : Un algorithme biomimétique. Une moisissure gluante inspire la conception des réseaux de transport

Dans plusieurs activités de conception architecturale bio-inspirées, les architectes se construisent des méthodes de conception donnant naissance à des formes et des procédés techniques qui peuvent être complètement différents de ce qu'on trouve dans la nature. Ces méthodes de conception s'appuient généralement sur des techniques informatiques, comme par exemple des systèmes de particules, des algorithmes génétiques ou encore des systèmes multi-agents dont le fonctionnement est bioinspiré.

L'informatique bioinspirée est un champ de recherche qui se décompose en sous-champs incluant le connexionnisme, le comportement social et l'émergence. Il est proche de l'intelligence artificielle ou de la vie artificielle, et en rapport avec les champs de la biologie, des sciences informatiques et des mathématiques. Brièvement, il s'agit de créer des

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

algorithmes innovants pour résoudre des problèmes connus, comme des problèmes d'optimisation par exemple, en s'inspirant de phénomènes observés dans la nature.

L'exemple suivant présente l'utilisation d'un algorithme biomimétique capable de concevoir un réseau de transport optimisé entre différentes villes tout en tenant compte d'un certain nombre de caractéristiques (population, points d'intérêt, pannes éventuelles sur le réseau, etc.).

Tout commence au début des années 2000 lorsqu'une équipe de chercheurs japonais et hongrois découvre qu'une sorte de moisissure gluante appelée **Physarum Polycephal** est capable de retrouver son chemin dans un labyrinthe (Nakagaki et al., 2000). Cette moisissure semble faire preuve d'intelligence et capable d'explorer son environnement afin de trouver les plus courts chemins vers des sources de nourriture (Nakagashi et al., 2004). Sur la base de ces observations, un algorithme est construit, qui imite le comportement du *Physarum Polycephal* : le *Physarum Solver* (Atushi et al., 2005). Cet algorithme est capable de trouver un chemin optimal dans un réseau et s'avère être plus efficace que les algorithmes classiques lorsque le nombre de nœuds du réseau est très important.



Figure I.6 : *Physarum polycephalum* dans son habitat naturel (source : <http://sweetrandomscience.blogspot.com>)

Une expérience menée par cette équipe de chercheurs a permis de reproduire, à l'échelle du *physarum*, la problématique du réseau de Tokyo qui relie la capitale aux 36 villes voisines (Tero et coll., 2010). Ils ont recréé sur une plaque couverte de gel d'agar, la cartographie de Tokyo, puis ont placé 37 points de nourriture, correspondants aux 36 villes reliées à la capitale. Le *physarum* fut déposé au point correspondant à Tokyo et ils ont observé comment

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

l'organisme se développait. Ce dernier a d'abord colonisé l'ensemble du plateau, puis s'est réorganisé et stabilisé au bout de 26 heures ce qui a donné lieu à la création d'un réseau de larges circuits interconnectant les sources de nourriture.

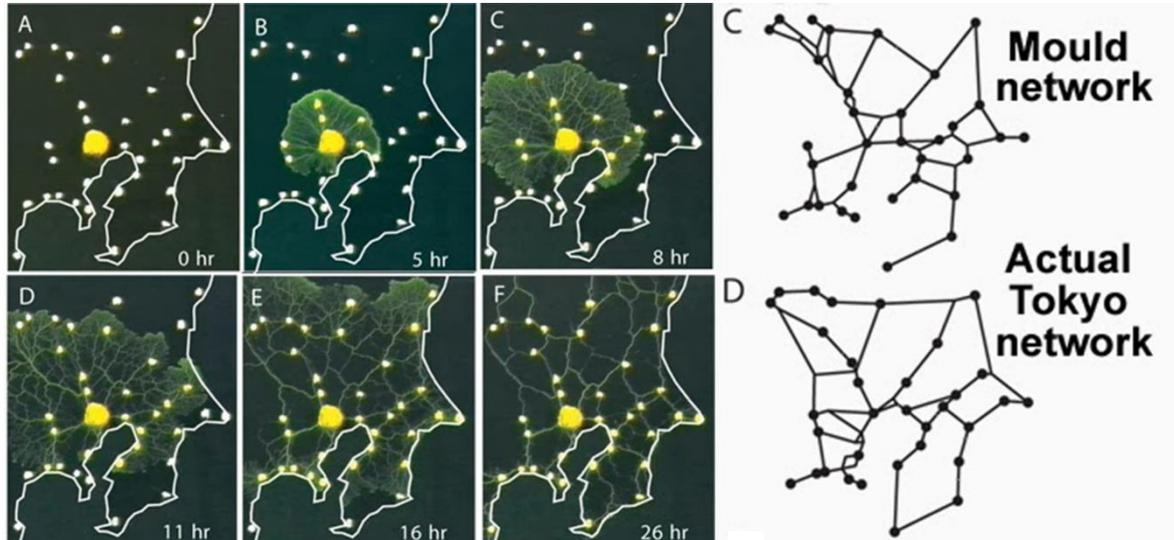


Figure I.7 : Reconstitution du réseau de Tokyo par le Physarum & comparaison avec celui actuel (source : Fayemi, 2015)

Le résultat a été comparé au réseau ferré régional selon trois critères : efficacité, coût et tolérance aux défauts. La conclusion publiée dans la revue Science, témoigne que le réseau formé par l'organisme est au moins aussi performant que celui conçu préalablement par les ingénieurs du génie civil. (Tero et coll., 2010) Un modèle mathématique imitant le comportement du Physarum a été créé pour aider à la conception de réseaux de transports efficaces (Tero et coll., 2010).

Cet algorithme stupéfiant peut résoudre des problèmes d'optimisation d'un réseau de transport (Figure I.8). Comment relier des villes en un minimum de lignes avec un maximum d'efficacité, c'est-à-dire en tenant compte de la densité de population, de la géographie, d'éventuels pannes ou accidents qui peuvent survenir sur le réseau, etc. ? Il a été testé dans plusieurs villes et pays : le réseau de rues de New York, le réseau ferroviaire au Japon ou encore d'autres réseaux de transport à Mexico ou en Chine (Mahadevan, 2015). Il est clair que ce type d'algorithme peut être utilisé par des urbanistes ou des architectes pour concevoir, par exemple, des réseaux de distribution optimisés et résilients (énergie, eau, etc.).



Figure I.8 : Le réseau de transport à Mexico développé par le Physarum Solver
(source : Mahadevan, 2015)

I.7.3. L'inspiration par l'écosystème : La ville de Kalundborg au Danemark

L'exemple de la ville de Kalundborg est souvent mis en avant lorsqu'il s'agit de traiter d'un biomimétisme écosystémique. Et pour cause, il s'agit d'une illustration majeure des principes de l'écologie industrielle et du concept de symbiose industrielle. Kalundborg est une ville danoise de 20 000 habitants, à une centaine de kilomètres à l'ouest de Copenhague.

Dans un principe de coopération, la ville de Kalundborg a créé une symbiose industrielle dès le début des années 90. Le parc industriel rassemble différentes compagnies, ce qui leur permet de distribuer et de réutiliser de façon circulaire l'énergie dont elles ont besoins sur le site. D'une part, elles s'assurent d'un échange d'eau et de vapeur entre elles. L'eau usée de la raffinerie sert à refroidir la centrale électrique, qui à son tour vend sa vapeur à une autre produisant des panneaux de construction, tandis que son eau chaude est revendue à une ferme d'aquaculture. D'autre part, en désulfurisant les vapeurs d'eau, la centrale électrique diminue les émissions atmosphériques polluantes et produit du gypse constituant la matière première du fabricant de panneaux de construction. La dimension locale et la coopération sont donc mises de l'avant et ce cycle basé sur le recyclage dans les écosystèmes naturels leur a permis de réaliser des gains de productivité et des gains financiers, énergétiques et environnementaux non négligeables. (Creiser, 2008, Benyus, 2011).

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

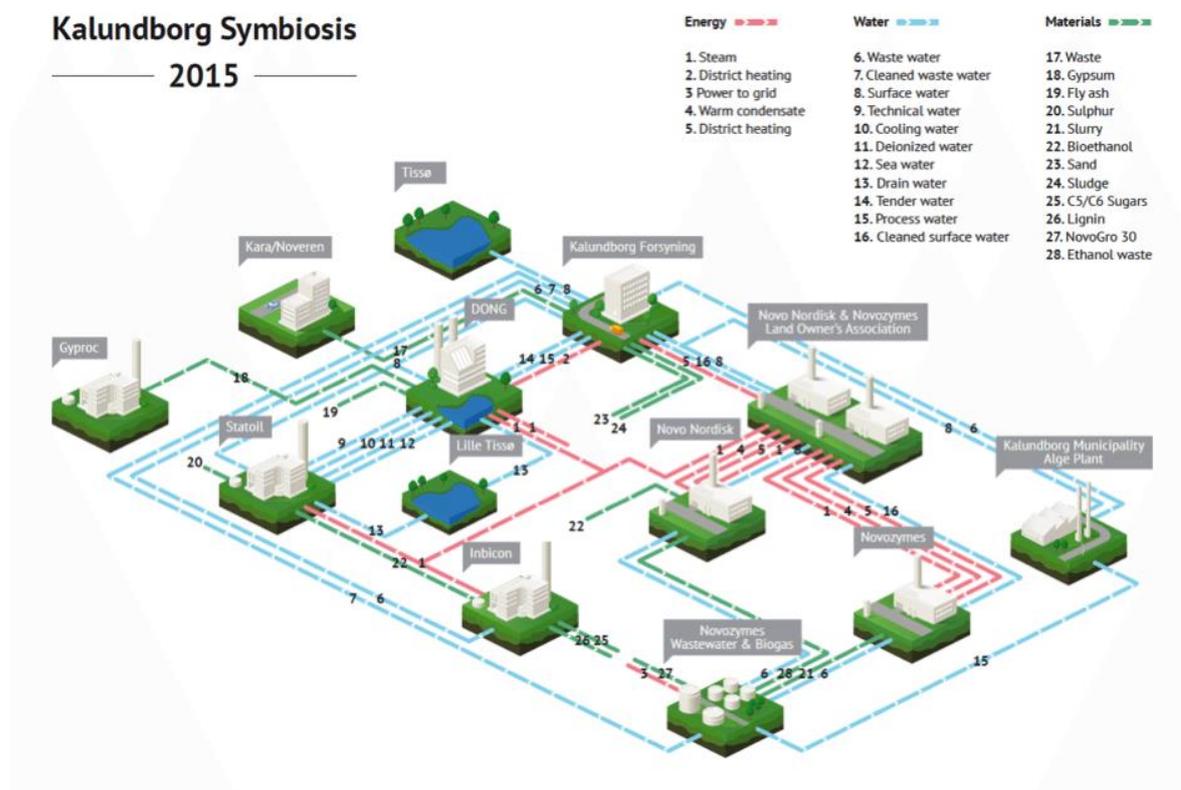


Figure I.9 : L'écologie industrielle de la Ville de Kalundborg, Copenhague (source : Gulipac, 2016)

Conclusion

Un grand nombre de créateurs à travers le temps se sont inspirés de la nature pour leurs exercices de formes. Aujourd'hui, les concepteurs vont plus loin et tentent de copier non seulement l'esthétique du monde biologique, mais également ses fonctions et sa gestion environnementale. L'objectif principal de ce chapitre visait à présenter une synthèse de l'approche de conception basée sur le biomimétisme, approche inspirée du plus vieux laboratoire de recherche et développement du monde: la nature et ses 3,8 milliards d'années d'évolution !

Loin des courants formalistes, le biomimétisme s'inscrit dans une démarche de conception scientifique. Avec le biomimétisme, la biologie n'apparaît plus comme une pourvoyeuse de matières premières, mais comme une source d'idées. Son statut passe de source d'exploitation à chamane de la connaissance. Dans la philosophie biomimétique, tout ce que nous concevons doit en définitive s'accorder avec le règne biologique. Cette symbiose nécessite au préalable d'identifier les problématiques propres à chaque site, à chaque projet et à chaque finalité. Pour pouvoir esquisser les qualités morphologiques recherchées, trouver les matériaux et systèmes adéquats, ou mettre au point un processus adapté et performant.

CHAPITRE I : BIOMIMÉTISME : LE VIVANT COMME MODÈLE POUR DES FUTURS SOUHAITABLES

Malgré les faiblesses dues à la jeunesse de son existence, le biomimétisme offre un vaste champ de possibilités. Inévitablement, l'approche biomimétique proposera ses propres principes pour l'écoinnovation, mais elle devra également s'adapter aux besoins des utilisateurs pour survivre parmi les nombreuses méthodes de conception innovante déjà implantées. La démarche biomimétique demeurera multidisciplinaire et impliquera l'ouverture d'esprit et le dialogue entre ingénieurs et biologistes. Les problèmes auxquels l'humanité fait face aujourd'hui sont complexes, mais surtout beaucoup plus multidimensionnels qu'ils ne l'étaient dans le passé. L'approche biomimétique offre dès lors une perspective intéressante pour nous inspirer dans nos recherches de solutions.

Introduction

Il est aujourd'hui communément admis que la planète fait face à une crise environnementale majeure (réchauffement climatique, épuisement des ressources naturelles, sixième grande extinction des espèces végétales et animales...) due essentiellement à l'action de l'homme et dont les effets devraient aller en s'accroissant si aucun changement de pratiques et de modes de vie n'intervient à brèves et moyennes échéances. Si les phénomènes ne sont pas nouveaux, la prise de conscience de la responsabilité humaine dans la perturbation de l'environnement a gagné plus récemment toutes les strates de la société. Les questions écologiques et plus largement le concept de développement durable ont pénétré toutes les sphères sociétales (politique, sociale, économique, technique...) au point de devenir un véritable leitmotiv. Désormais, les réflexions et les actions à l'échelle globale et à l'échelle locale vont de pair et ne peuvent plus être dissociées pour répondre aux grands enjeux de la « durabilité ».

L'architecture est l'un des maillons de la durabilité. En effet, la conception des espaces bâtis a des répercussions sur le quotidien des citoyens en influençant leurs modes de vie. Elle génère pour des décennies une empreinte sur l'environnement (consommation de la ressource en eau, rejet de gaz à effet de serre, consommation énergétique, etc.). L'architecte est, par sa pratique, un acteur essentiel des questions environnementales et de durabilité. C'est dans ce contexte que de nouvelles pratiques et démarches sont apparues depuis une dizaine d'années pour intégrer avec plus d'aisance les questions environnementales dans l'architecture. En France, cela s'est traduit notamment par l'apparition de labels (Haute Qualité Environnementale, Haute Performance Énergétique, Bâtiment Basse Consommation, etc.), de nouvelles normes réglementaires (réglementation thermique 2012...) ou encore de nouvelles méthodes scientifiques (calcul de l'empreinte écologique, bilan carbone...) pour mesurer et évaluer l'impact de l'homme, la pression que peut exercer un bâtiment sur l'environnement. À côté des matériaux, procédés, techniques et savoir-faire « écologiques », les grilles d'analyse se sont multipliées pour savoir si l'architecture produite ou envisagée est vertueuse. « L'architecture du futur construira en imitant la nature, parce qu'elle est la plus rationnelle, durable et économique des méthodes. »

Parallèlement aux évolutions techniques, de nouveaux mouvements et courants en architecture, et plus globalement dans le monde de la conception (ingénierie, design, etc.) intégrant le « fait » environnemental, émergent. Parmi ceux-ci, le biomimétisme apparaît être un courant prometteur. Celui-ci s'affiche en effet comme un mouvement en forte progression

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

et en plein essor. S'inspirer de la Nature - définition littérale du biomimétisme - pour concevoir des objets, des techniques, des matériaux, des bâtiments est sans doute l'une des pratiques les plus anciennes dans le domaine créatif, mais depuis les années 90, un nouveau souffle en matière d'écoconception, et le biomimétisme en est un des leviers.

Dans ce chapitre, 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. Cette idéologie pluridisciplinaire, qui commence à bien s'établir dans certains domaines comme le design industriel, l'ingénierie et la manufacture, ou encore la médecine et la mode. Mais à l'heure où nous cherchons des solutions pour rebâtir un avenir plus durable, son application à l'architecture semble être une solution propice.

II.1. L'architecture et le développement durable

Une société se définit à travers sa construction au sens large du terme. L'architecture doit concilier plus que jamais les aspirations des individus et les contraintes collectives dans une pratique qui prend aussi en compte l'intérêt des générations futures. La construction au XXI^e siècle ne peut plus ignorer tout à la fois les limites physiques de la planète, les exigences sociales des populations urbaines croissantes, leurs attentes de sécurité et de confort, le rôle du bâti dans la culture, les contraintes fortes de l'environnement et de l'économie. Il s'agit de permettre au plus grand nombre d'accéder à l'architecture, pour mieux vivre et améliorer «le savoir-vivre ensemble». C'est la définition d'une dimension durable qu'il faut introduire dans l'acte architectural et dans la responsabilité des professionnels qui pensent et réalisent notre univers construit. À ce titre, l'architecte se revendique comme un expert qui délivre cette dimension durable de construction, tout en reconnaissant qu'il n'est qu'un des acteurs dans la chaîne de gestion de toute la construction, à l'écoute des autres, utilisateurs, organisateurs et constructeurs.

II.1.1. L'implication du développement durable en architecture

L'application du développement durable au secteur du bâtiment est définie par les professionnels dans la conférence Habitat II d'Istanbul en 1996. Parallèlement, la médiatisation des sommets internationaux et les scandales liés aux risques présentés par certains matériaux de construction, tel l'amiante, ont suscité l'intérêt croissant de l'opinion publique pour la préservation de l'environnement naturel et la création d'un cadre de vie saine et confortable.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

II.1.2. L'architecture durable

Selon Françoise-Hélène Jourda, architecte et spécialiste des bâtiments « verts » qui parle de l'architecture durable « Pas grand-chose. Je préfère parler d'architecture responsable. Cela implique de répondre aux besoins du présent sans mettre à mal la possibilité des générations futures de répondre à leurs propres besoins. Pour cela, il faut préserver les moyens laissés à leur disposition. On a été irresponsables pendant très longtemps ».

Alors on dit une architecture durable qui offre un confort optimal, tout en prenant en compte les considérations relatives à l'énergie. Il s'agit tout d'abord de limiter au maximum les pertes d'énergie. De point de vue énergétique, un bâtiment durable doit être bien isolé, étanche et bien orienté, d'une part. Et intégrer les nouveaux modes de production d'énergie, d'autre part.

II.1.3. La relation entre l'architecture et le développement durable

L'architecture est un pilier très important du développement durable. Elle réfléchit sur la conception de bâtiments, machines à vivre, qui occupe « durablement » l'espace et l'environnement. Comment concevoir un lieu durable agréable à vivre sans des impacts négatifs sur l'environnement ?

L'architecte doit faire preuve d'intelligence et de capacité d'imagination pour inventer et innover. Il doit veiller à l'imprévisible. Il doit avant tout être un créateur et un chercheur, en bref un artiste.

L'architecture durable est définie comme une architecture respectant les principes du développement durable. Le principe du développement durable consiste à développer ses activités en tenant compte de leurs impacts à court, moyen et long terme sur l'environnement, les conditions sociales et l'éthique à l'échelle mondiale. L'architecture durable est donc une architecture cherchant à concilier le progrès social, économique et la préservation de l'environnement. C'est une architecture qui propose le confort auquel notre société est habituée tout en réduisant son impact sur son environnement.

II.2. Vers une architecture biomimétique

S'inspirer du vivant pour concevoir et construire n'est pas nouveau, plusieurs types d'architectures à travers l'Histoire reflètent cette tendance, tels que : l'architecture vernaculaire, japonaise, solaire, organique ou encore biomorphique. Ces concepts convergent vers le biomimétisme.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

II.2.1. Architecture vernaculaire

L'architecture vernaculaire, basée sur l'autoconstruction, est une architecture propre à un territoire donné, une culture ou un pays. Comme le soutient l'architecte **Philippe Madec**, l'architecture vernaculaire présente un certain nombre d'avantages pour répondre aux enjeux liés à l'habitat aujourd'hui. Cette architecture s'appuie sur des principes respectueux de l'environnement et sur des règles de bon sens. Ses grands principes :

- Matériaux locaux et naturels.
- Main-d'œuvre et savoir-faire locaux.
- Choix stratégique de l'emplacement pour bénéficier au mieux des ressources naturelles du site.
- Architecture bioclimatique.
- Habitat évolutif et entretenu facilement.
- Habitat biodégradable.



Figure II.1 : Shibam au Yémen entièrement auto-construit (Source : <https://vernaculaire.com>)

II.2.2. Architecture solaire

Les Earthships de l'architecte américain **Michael Reynolds** sont les réalisations les plus illustratives de cette démarche. L'architecture utilise au maximum les apports solaires grâce notamment à une serre orientée plein Sud et l'utilisation de la terre comme masse thermique. Les plantes, un puits sur le toit et la chaleur des habitants et des activités ménagères complètent la régulation thermique à toute saison. Les premières maisons reposent sur trois principes :

- Matériaux abondants types terre ou recyclés.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

- Autonome et décorrélation des réseaux d'énergie et d'eau.
- Constructibles par tous (quel que soit le niveau de revenu ou d'expérience).

Au fur et à mesure, panneaux solaires, géothermie et autres équipements ont été intégrés pour accroître l'efficacité énergétique.



Figure II.2 : Une earthship au Stanmer Park à Brighton, Royaume-Uni (Source : www.wedemain.fr)

II.2.3. Architecture japonaise

Contrairement à l'architecture vernaculaire, l'architecture traditionnelle japonaise ne perçoit pas la nature comme une ressource ou une contrainte. Les roches, les arbres et les montagnes font l'objet de croyances qui affirment que ces éléments naturels sont habités par des esprits, appelés les « kami ». Ainsi, la nature contient une dimension spirituelle. Le « kekkai », l'espace entre les habitations construites par et pour les Hommes et ces éléments naturels animés par les « kami », cristallisent l'importance du lien entre l'intérieure et l'extérieur. Il permet l'équilibre entre l'architecture et la nature. Les jardins japonais, mondialement réputés, en découlent.



Figure II.3 : Intérieur de maison traditionnelle japonaise (Source : www.monplusbeauvoyage.fr)

II.2.4. Architecture écologique

Respectueuse des enjeux écologiques, elle émerge au XXe siècle et s'accroît à partir des années 70 lorsque les sommets mondiaux, les conférences et organismes à but non lucratifs donnent l'alerte sur l'urgence d'une prise de conscience et d'une transition des modes de vie. L'architecture écologique répond de façon transversale aux différents enjeux liés à l'eau, à l'information, à la santé, à l'équité, au bien-être et à l'identité. Elle lutte contre les atteintes à la nature et à la biodiversité notamment en intégrant la question de la nature en ville et en chassant les énergies fossiles du modèle urbain.

II.2.5. Architecture organique

Inventée par **Frank Lloyd Wright** en 1939, cette architecture repose sur une conception qui vise à intégrer complètement le bâtiment dans son environnement. Cet architecte américain considère que le bâtiment devrait se comporter comme un organisme vivant qui croît de l'intérieur vers l'extérieur et génère des flux organiques. Entre 1936 et 1939, l'architecte réalise La Maison sur la cascade en Pennsylvanie qui devient un exemple emblématique de ce type d'architecture.



Figure II.4 : Maison sur la cascade, architecte Frank Lloyd Wright (Source : www.apcor.pt)

II.2.6. Architecture biomorphique

Dans cette même démarche apparaît le biomorphisme. Il s'agit d'une conception influencée par des formes organiques des animaux/végétaux sans nécessairement une prise en compte de l'enjeu écologique. En 1994, l'architecte catalan, **Santiago Calatrava**, conçoit une nouvelle gare TGV au sein de l'aéroport de Saint-Exupéry, à Lyon, sous la forme d'un oiseau qui s'envole. Il est également possible de citer l'exemple de la Sagrada Família, réalisée par **Antoni Gaudi**. Dans un premier temps, l'idée de s'inspirer des arbres pour fabriquer les

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

piliers était purement esthétique. Il s'est ensuite rendu compte de la résistance permise par cette forme utilisant peu de matériaux.



Figure II.5 : Détail du toit de la Sagrada Familia, architecte Antonio Gaudi (Source : www.peretarres.org)

II.3. Origine de la conception biomimétique

La conception biomimétique prend ses racines dans la méthode « Bau-Bonik » qui est une nouvelle façon de concevoir, inventée en 2003. Cette dernière est née lors d'une étroite collaboration entre un biologiste, Monsieur Werner Nacthigall et un architecte, M. Göran Pohl. Le travail commun avait pour but de trouver des solutions lors de l'étude de la biologie et de les appliquer à l'architecture (Chayaamor- Heil et al., 2018).

Les deux précurseurs insistaient cependant sur le fait d'être prudent lors de la recherche d'inspiration biologique. En effet, les interprétations trop directes et les raccourcis sont à éviter pour ne pas avoir une fausse idée du fonctionnement du phénomène naturel. En 2010, Nacthigall propose une approche méthodique reprenant les premiers écrits de Janine Benyus. La première étape étant la recherche, ensuite l'abstraction pour finir par l'implémentation du phénomène naturel dans l'architecture (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Malgré cette méthodologie reconnue, l'architecte est toujours face à une tâche difficile. En effet, la nature est très vaste et donc il se doit de savoir où et quoi regarder, mais également comment reproduire la technique trouvée et perfectionnée par la nature pour l'inclure dans sa conception (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Ceci permet d'introduire les deux façons de réaliser des projets biomimétiques : la technique Top-Down ou Solution-based (Figure II.6) et la technique Bottom-up ou Nature-based (Figure II.7). La première propose de rechercher des solutions dans la nature lorsqu'un problème de conception se pose et la deuxième, à l'inverse, propose une étude en amont de certains processus naturels déjà perfectionnés durant des milliards d'années et ensuite de proposer une nouvelle conception en conséquence (El-Zeiny, 2012).

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

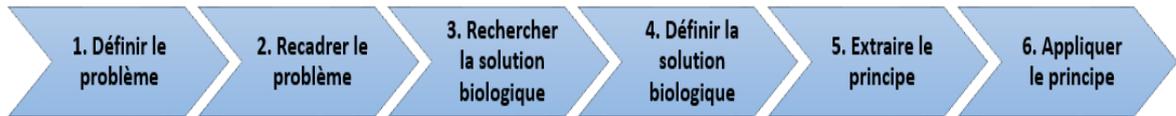


Figure II.6 : Conception biomimétique - Solution-Based (Source : El-Zeiny, 2012)



Figure II.7 : Conception biomimétique - Nature-Based (Source : El-Zeiny, 2012)

À l'image de la méthode Bau-Bonik décrite ci-dessus, la Guilde du biomimétisme a proposé, en 2003 également, de placer les biologistes autour de la « Table des Concepteurs » (Biologists at the Design Table (BaDT)). Ces scientifiques permettent de faciliter le travail des divers concepteurs en recherche de solutions innovantes et efficaces. Ils sont spécialement formés pour rechercher des analogies biologiques (Boks & Volstad, 2008).

Il est important de noter une autre façon de concevoir de manière biomimétique. En effet, la Guilde du biomimétisme a mis en place la « Lentille de conception biomimétique » (Biomimicry Design Lens). Cette dernière sert de guide à l'application des principes biomimétiques pour toute discipline et pour toute échelle avec pour but de reprendre des stratégies naturelles permettant de répondre au développement durable. Elle reprend six principes généraux, ces principes sont équivalents les uns par rapport aux autres et sont : s'adapter aux conditions changeantes ; être localement à l'écoute et réactif ; utiliser la chimie adaptée à la vie ; être efficace en ressources ; intégrer le développement à la croissance ; évoluer pour survivre (Ariffin & Gad, 2015).

Ces principes font, en partie, échos aux critères retrouvés dans le livre de Janine Benyus. La lentille de conception biomimétique est cependant bien plus développée. Selon l'environnementaliste américaine, il existerait 9 critères permettant de juger si le projet a été réalisé selon une philosophie « biomimétique ». Ces critères sont indicatifs, il ne s'agit donc pas de les remplir tous (Benyus, 1997).

- L'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable
- N'utiliser que l'énergie dont on a besoin
- La forme est adaptée à la fonction
- Recyclage de l'ordre de 100%
- Récompenser la coopération
- Parier sur la diversité
- Valoriser l'expertise locale

- Limiter les excès de l'intérieur
- Transformer les limites en opportunité

II.4. Les niveaux du biomimétisme en architecture

Par le passé, de nombreux architectes se sont inspirés de la Nature pour en reproduire les formes. Aujourd'hui, les concepteurs vont plus loin et tentent de copier non seulement l'esthétique du monde biologique, mais également ses fonctionnalités et bien d'autres dimensions environnementales. Mis en perspective des autres mouvements architecturaux, le biomimétisme est un mouvement singulier qui opère à la fois une forme de synthèse contemporaine des courants développés au cours du siècle et apporte de nouveaux savoir-faire. Loin d'être un simple courant formaliste, l'architecture biomimétique se perçoit véritablement comme une démarche de conception écologique au même titre que le bioclimatisme par exemple.

Le biomimétisme s'inscrit dans une philosophie consistant à dire que tout ce que nous concevons (objets, processus, etc.) doit en définitive s'accorder avec le règne biologique. « La vie est un modèle ». Mais faire « parler » la Nature nécessite au préalable d'identifier les problématiques propres à chaque site, à chaque projet pour pouvoir esquisser les qualités morphologiques recherchées, trouver les matériaux et systèmes adéquats.

Pour ce faire, quatre approches ou niveaux de conception intégrée des problématiques environnementales transparaissent à travers le biomimétisme architectural :

- L'approche formelle
- L'approche fonctionnelle
- L'approche écosystémique
- La bio-assistance

II.4.1. L'approche formelle

L'approche formelle que l'on pourrait dénommer biomimétisme morphologique est sans nul doute la partie la plus visible et appréhendable pour tout un chacun de l'imitation de la Nature. Les mouvements qui se sont inspirés de la Nature pour créer des formes architecturales sont nombreux. Ainsi, l'approche formelle n'est pas propre au biomimétisme mais elle en constitue l'un des maillons explicatifs et descriptifs.

La dimension morphologique n'est pas l'axe premier du biomimétisme, elle en serait plutôt une résultante. La forme est vue comme devant répondre à une (ou plusieurs) fonctions, répondant à une ou plusieurs problématiques architecturales (structurelles, etc.). Dans le

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

biomimétisme, la forme n'a pas de but purement stylistique, esthétique et symbolique ; c'est ce qui distingue le biomimétisme des courants strictement formalistes.

L'approche formelle peut être présentée sous trois dimensions :

- ✓ La dimension morphologique c'est-à-dire celle qui est liée à l'apparence et à l'esthétique architecturale
- ✓ La structure tant elle est un élément principal d'expression de la forme
- ✓ Les matériaux

II.4.1.1. La forme, l'apparence esthétique

Trois registres peuvent être identifiés pour caractériser les formes entretenant un lien avec la Nature :

A. **Les formes « inspirées »** : dans ce cas de figure, l'architecture se caractérise par quelques curvilignes fortes « faisant penser à » la Nature sans la représenter directement.

B. **Les formes « suggérées »** : la représentation végétale ou animale s'affiche plus lisiblement, telle l'architecture biomorphique ou bionique mais elle n'est point figurative. Plusieurs architectes reconnus ont adopté des formes animales pour donner une valeur symbolique à leurs œuvres. **Franck Gehry** a ainsi construit des bâtiments faisant penser au poisson : le village olympique de Barcelone pour sa forme et le musée Guggenheim de Bilbao pour la représentation d'écaillés. **Santiago Calatrava** a repris des formes d'oiseaux pour représenter l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry (allégorie de l'envol s'il en est) et le musée d'art de Milwaukee.

C. **Les formes « directes »** : l'architecture exprime explicitement la morphologie d'un organisme vivant. « The yellow lost dog » est un musée destiné à la ville perdue et aux cités englouties de Shanghai. Ce bâtiment conçu par l'architecte français **François Scali** a une forme animale évidente. Cependant, celle-ci, empreint d'une forte symbolique (dans le cas d'espèce, le chien est le symbole de l'abandon et de l'errance), ne vise pas à résoudre de problématiques environnementales. Or, le biomimétisme cherche à travers les spécificités morphologiques de l'animal ou du végétal à résoudre un problème architectural particulier (exemple : aérodynamisme du tour). En ce sens, la représentation formelle d'un organisme vivant n'induit pas un biomimétisme au sens donné dans les paragraphes précédents. A contrario, l'optimisation de la forme cherchant à répondre à une problématique s'inscrit dans une démarche biomimétique.



Figure II.8 : Le village olympique de Barcelone, architecte Franck Gehry (Source : www.architecturaldigest.com)



Figure II.9 : Aéroport Lyon Saunt-Exupéry, architecte Santiago Calatrava (Source : www.chauffeurlyon.com)



Figure II.10 : The yellow lost dog, architecte François Scali (Source : www.skyscrapercity.com)

II.4.1.2. La structure

Pour plusieurs architectes, la nature a été une source créative visant à résoudre des problèmes de structures, ils ont donc fait référence à la nature pour développer leurs systèmes constructifs.

L'architecte américain **Richard Buckminster Fuller** mentionnait dès la moitié du XX^{ème} siècle que les formes de la Nature sont des « **modèles merveilleux** » pour les structures. D'après lui, l'efficacité optimale résidait pour l'essentiel dans la technologie naturelle qui est par essence dynamique, fonctionnelle et légère.

L'architecte allemand **Frei Otto** était également fasciné par la résistance et la stabilité des structures tendues en tant qu'elles permettaient une stabilité maximale tout en offrant une structure ultra légère. Celui-ci a été précurseur de l'architecture bionique. Ces deux architectes ont démontré que les caractéristiques nécessaires à une structure telle que l'aspect économique, esthétique, fonctionnel et durable sont déjà présentes dans la nature.

Ils sont revenus aux formes élémentaires trouvées dans la Nature, source d'inspiration en matière structurelle, tel que **Fuller** qui s'est-il inspiré de micro-organismes planctoniques (les radiolaires et les diatomées). Il a interprété la « fatalité » de ces micro-organismes, qui est l'expression naturelle de la résistance, de la stabilité et de la légèreté des structures. Le pavillon américain de l'exposition universelle de 1976 à Montréal en est une illustration.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE



Figure II.11 : Pavillon américain de l'exposition universelle (Source : <https://en.wikipedia.org>)

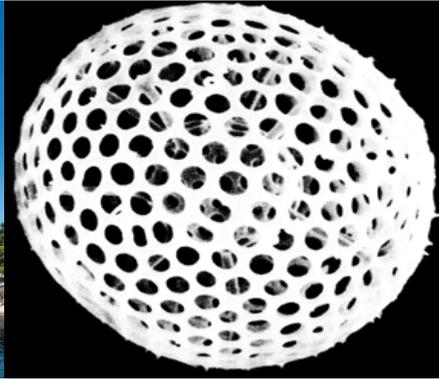


Figure II.12 : Structure d'un Radiolaire (Auloniahexagona) (Source : <http://www.microscopies.com>)

Avant lui, d'autres architectes ont résolu des problèmes de structures en s'inspirant des végétaux.

Le Crystal Palace est un bâtiment conçu par **Joseph Paxton** (1851) à Londres a réinterprété les propriétés d'une espèce de nymphéa (le Victoria d'Amazonie). Cet organisme sous son apparente fragilité possède un système de nervures radiales rigides et de fines nervures transversales. Paxton a reproduit ce principe avec des soutènements en fer, et les larges feuilles en des vitres de verre, pour créer un toit très léger et solide.

Le marché de Royan de **Louis Simon** et **André Morisseau** (1955) s'est inspiré de la structure des coquilles de mer pour leur structure ultra résistante. Celles-ci a ensuite été comme référence à de nombreux grands ouvrages (tel que le CNIT à la Défense). Leur forme permet malgré leur poids léger de supporter des pressions énormes.

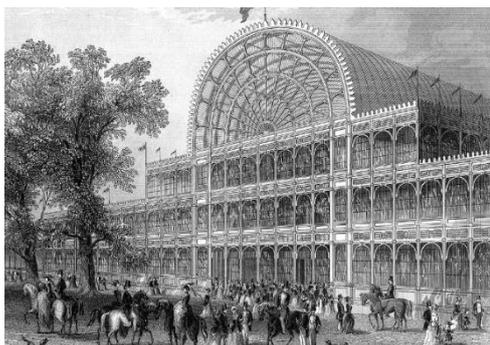


Figure II.13 : Le Crystal palace, architecte Joseph Paxton (Source : <https://craftasia.fr>)



Figure II.14 : Feuille de nymphéa (Source : <http://jpadalbera.free.fr>)

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE



Figure II.15 : Coquillage (Tridacne géant)
(Source : www.fondspatrimoniaux.laval.fr)

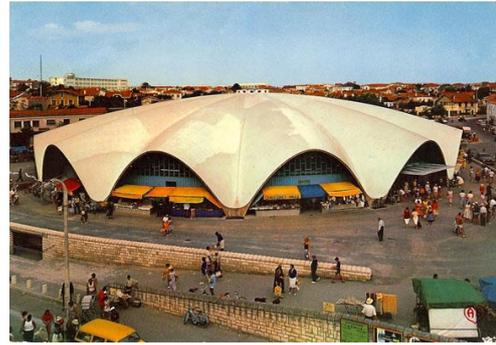


Figure II.16 : Le marché de Royan, architectes Simon et Morisseau (Source : www.c-royan.com)

L'architecte catalan Gaudi est sans doute l'un des précurseurs du biomorphisme et du biomimétisme dans le sens où on l'entend aujourd'hui. Il a, en effet, toujours cherché à innover en s'inspirant de la nature.

Sa plus grande œuvre encore inachevée, la Sagrada Familia (Figure II.17), est une basilique de Barcelone dont la construction a débuté en 1882. La volonté de l'architecte était de faire allusion à une forêt lorsque l'on pénètre dans le bâtiment. En effet, les colonnes « arborescentes » s'inspirent de l'arbre (élancées et se séparant en plusieurs branches) pour des questions structurelles et esthétiques (Figure II.18), ces piliers permettent non seulement d'utiliser moins de matériaux mais aussi d'améliorer la solidité de son ouvrage. Le plafond de la nef ressemble à des feuilles de palmier et de nombreuses statues d'animaux se retrouvent sur la façade (Stott, 2017).



Figure II.17 : La Sagrada Familia, architecte Antonio Gaudi (Source : <https://wallpapercave.com>)



Figure II.18 : La Sagrada Familia, imitation de l'arbre (Source : <http://www.loucamino.com>)

Enfin, l'exemple des structures anti-tremblement de terre des constructions est éloquent. En effet, l'architecte pour pouvoir répondre à ce problème de stabilité reprend le principe des nids d'abeille. Le frêtillement des abeilles à l'intérieur d'une ruche est équivalent, à l'échelle

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

humaine à de tremblements de terre. Les parois conçues par les abeilles offrent une grande rigidité pour une faible masse et permettent d'atténuer les vibrations.

La Nature est une inspiration plastique et structurelle évidente. **Frei Otto** disait que pour lui le vivant était une référence permanente, même s'il prit soin de se démarquer d'une imitation trop littérale de la Nature. Mais, ce qui lui semble le plus admirable, c'est l'économie rigoureuse du processus qui donne naissance à cette architecture du vivant. Par l'intermédiaire de la référence naturelle s'introduit une idée constitutive du biomimétisme et plus largement de l'architecture durable : l'économie de matière de l'objet prend racine dans l'économie des moyens qui servent à la réaliser. La bonne utilisation de la matière réduit les pertes en tout genre, cela révèle un autre principe de la Nature : « rien ne se perd ».

Ainsi, par exemple, au niveau structurel, les arbres privilégient une répartition équilibrée des charges et les rétablissent en cas de fissures ou de cavités, elle produit du bois supplémentaire pour réparer ses faiblesses et avoir une nouvelle répartition des contraintes. L'ajout de matière se fait là où les contraintes sont les plus fortes. L'arbre devient un modèle expert en résistance des matériaux et en autoréparation.

Tout comme les choix de forme et de structure ont un impact sur l'énergie consommée, la résistance, le rapport poids/performance, la répartition des charges sont essentiels pour le choix d'un matériau dans la conception. Le biomimétisme présente un intérêt dans le choix des matériaux et dans les techniques de réalisation, allant dans le sens de l'économie des ressources. La mimétique biologique s'inscrit aussi dans une imitation des procédés naturels de fabrication des matériaux.

II.4.1.3. Les matériaux

Dans le domaine de l'architecture, les matériaux jouent un rôle décisif concernant l'apparence et l'expressivité d'une construction. Ils sont le lien, l'intermédiaire entre l'homme et le bâtiment. Ils illustrent et explicitent la forme. Ils renseignent sur la construction et sa structure, et éveillent évidemment chez l'homme des sensations, des émotions... La Nature produit des matériaux hautement « intelligents » (production selon un modèle en circuit-court avec peu d'étapes intermédiaires de transformation, production ne nécessitant pas de quantité importante d'énergie, à température naturelle...), opérant des compromis entre propriétés physico-chimiques et fonctions (comportement mécanique, flexibilité-rigidité, densité, perméabilité...). Ainsi, les créations réalisées par la Nature garantissent la meilleure productivité en fournissant un moindre effort et en utilisant un minimum de matériel. Elles sont capables de se réparer (autoréparation), sont compatibles avec leur environnement (adaptation, non polluantes) et sont totalement recyclables (durabilité, renouvellement).

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

La plupart des matériaux naturels sont des composites, matériaux solides résultants de la combinaison de deux substances ou plus qui vont former une nouvelle substance ayant des propriétés supérieures à celles de l'élément d'origine. Jusqu'à présent les composites artificiels fabriqués par l'homme sont beaucoup plus sommaires et fragiles que ceux produits par la Nature. Par exemple, la toile d'araignée malgré sa finesse a des caractéristiques incroyables de résistance face à la tension tout en conservant une très forte souplesse, propriété non égalée par l'homme. La structure d'une toile d'araignée est optimisée pour couvrir la plus grande aire avec le moins de matière possible. Certains bâtiments s'inspirent grandement de cette structure ou présentent des similarités frappantes. Le Stade olympique de Munich de **Frei Otto** reprend ce principe.



Figure II.19 Parc Olympique de Munich, architecte Frei Otto (Source : <https://www.rtbf.be>)



Figure II.20 : Toile d'araignée posée sur l'herbe (Source : <https://biomimeticsite.wordpress.com>)

L'une des difficultés de la transposition des processus de fabrication naturelle en milieu humain est bien de reproduire les propriétés de la Nature. Cette dimension connexe à l'architecture est cependant à prendre en compte étant donné l'engouement actuel pour les matériaux sains et naturels. La question des matériaux imités de la Nature renvoie à l'une des sciences en développement : la chimie verte dont les productions seraient réalisées à l'eau ou à température ambiante, tel que le bio-ciment des structures coralliennes. Mais plus encore que le mode de fabrication, c'est la notion de pérennité, d'entretien et de maintenance des matériaux qui est posée. Quel que soit le milieu (Nature ou architecture), toute surface peut être endommagée par les chocs, la saleté, la lumière intense, etc. Le biomimétisme a donné un exemple :

- **Effet lotus et la peinture autonettoyante Lotusan®:**

L'entreprise de peinture allemande STO, spécialisée dans les solutions techniques d'isolation extérieure, a créé en 1999, grâce à l'un de ses chercheurs, une peinture qui s'inspire des principes des feuilles de lotus (rugosité et super-hydrophobie) : Lotusan, enduit pour

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

façades à capacité auto-lavable. Ces peintures permettent de garder un aspect mat et de limiter les effets de la pollution. Ce type de peinture est très utile sur des bâtiments souvent exposés à la pluie, difficilement accessibles et qui ont tendance à se salir facilement comme par exemple en ville, où la pollution urbaine dépose des particules noirs sur les façades des immeubles.

En l'espèce, à chaque fois qu'une particule de poussière se pose sur une lotus, elle fait automatiquement onduler la feuille qui redirige la particule vers un endroit bien spécifique. Les gouttes d'eau qui tombent sur les feuilles sont dirigées vers le même endroit afin de laver la particule de poussière. Cette peinture présente en effet des caractéristiques hydrophobes et lui confère une capacité hydrofuge importante (qui préserve de l'humidité). De cette manière, elle se nettoie très simplement avec l'eau qui emporte les poussières déposées sur la façade grâce au principe de l'hydrophobie.

Le Dr. Wilhelm Barthlott de l'Université de Bonn s'est également rendu compte que les feuilles (et de facto les façades) qui nécessitaient le moins de nettoyage étaient celles qui présentaient les surfaces les plus rugueuses.



Figure II.21 : Effet Lotus avec des gouttes d'eau tombent sur la surface
(Source : <https://pixabay.com>)



Figure II.22 : Façade sans et avec le revêtement autonettoyant
(Source : <http://facade-elephant.be>)

II.4.2. L'approche fonctionnelle

L'approche fonctionnelle est également appelée « comportementale » (en rapport avec la définition du comportement futur d'un bâtiment au regard de la Nature), selon cette approche l'optimisation des formes provient de l'inspiration des mécanismes de croissance en biologie et de la minimisation des contraintes. Chaque niveau fonctionnel biologique (moléculaire, cellule/tissu, organe, organisme) a des applications différenciées et reproductibles en architecture. Les bioniciens et les adeptes de l'architecture organique, par rapport aux courants purement biomorphiques, se réfèrent en partie à cette pensée en avançant que les constructions sont comme des organismes vivants.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

Le biomimétisme met en avant les fonctions et processus à la manière de la Nature c'est-à-dire faire les choses comme le feraient les organismes vivants (recueillir de l'énergie, recycler ses déchets, assainir ses eaux usées...). Ces principes ont des répercussions au niveau organisationnel. C'est à ce niveau du biomimétisme que se posent fréquemment les grandes problématiques architecturales telles que :

II.4.2.1 La thermique et la ventilation

Tout comme la peau animale ou végétale respire, l'enveloppe d'un bâtiment constitue une surface essentielle de perte d'énergie. Il s'agit de concilier à la fois les problèmes de chaleur et de renouvellement de l'oxygène (exemple : sortir l'air vicié sans perdre de chaleur, ou renouveler l'air sans rafraîchir). En suivant le biomimétisme, des projets architecturaux ont trouvé des solutions innovantes pour répondre à ces questions :

- Sans doute l'un des bâtiments biomimétiques les plus emblématiques réalisés, l'Eastgate Center (Figure II.22) de **Mick Pearce**, un centre commercial construit en 1996 à Harare au Zimbabwe, s'inspire de la structure et de la ventilation naturelle que l'on retrouve dans une termitière (EIDin, Abdou & Elgawad, 2016). La température africaine peut varier de 0°C à 40°C, ce qui a amené le termite à innover en matière de construction afin de maintenir une température constante à l'intérieur de son habitat. Cela se fait simplement par des murs isolés (épais) et une ventilation naturelle allant du point le plus bas au point le plus haut de la structure (EIDin & al., 2016). Grâce à un système de galeries qui assurent une très bonne ventilation, les termitières possèdent d'incroyables vertus thermiques. Pearce a donc décidé de reprendre certains de ces principes (Figure II.23) en proposant une peau avec une forte inertie thermique et un réseau de ventilation impressionnant composé de 48 cheminées. Grâce à cette ventilation passive, l'économie d'énergie en terme de ventilation est diminuée de pas loin de 35% par rapport à un système constructif traditionnel, soit une économie de budget estimée à 3,5 millions d'euros par an (Turner & Soar, 2008).
- « Le concombre » ou le « cornichon » de Sir **Norman Foster**, immeuble de bureau localisé à la City de Londres rappelle non pas la cucurbitacée comme le grand public s'en réfère mais l'éponge de verre, un animal marin constitué de verre ciselé (biosilice). La façade par sa forme et sa structure en treillis qui évoque l'exosquelette de l'organisme marin, permet de résoudre de manière similaire à l'animal les questions de circulation d'air et de ventilation. Le système aurait cependant été reproduit fortuitement sans recherche de biomimétisme alors que le fonctionnement écologique est bien présent.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE



Figure II.23 : Système de ventilation naturelle d'une termitière (Source : <https://spftpe.wordpress.com>)

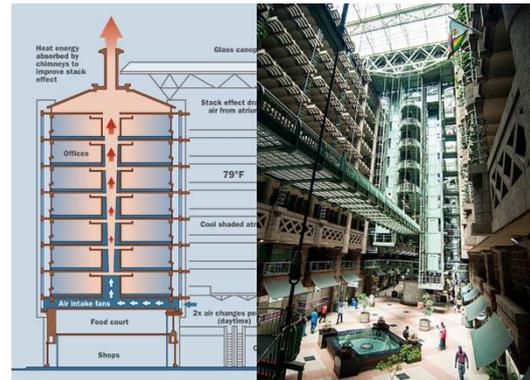


Figure II.24 : Fonctionnement de l'Eastgate Center, architecte Mike Pearce (Source : <http://era-kreativindustrie.eu>)



Figure II.25 : La Tour Swiss Re de Londres, architecte Norman Foster & éponge de mer (Source : <http://www.jmhdezhdez.com>)

II.4.2.2. L'aérodynamisme

Les constructions sont souvent aux prises avec les conditions météorologiques. Celles-ci ont des effets sur le bâti. Comme par exemple le comportement d'un bâtiment par rapport aux mouvements d'air (problèmes d'usage pour les personnes empruntant un couloir, voire des risques de stabilité d'une construction telle qu'une tour).

Lors de la conception du terminal international Waterloo de Londres, **Nicolas Grimshaw** and partners, se sont inspirés de la carapace en forme d'écailles du pangolin, un mammifère insectivore, pour résoudre des problèmes d'aérodynamisme. Pour assurer la flexibilité souhaitée à la construction, ils ont conçu un bâtiment capable de fléchir simultanément dans plusieurs sens : vers le haut, le bas mais aussi sur les côtés. Cette flexibilité a été obtenue par un système de panneaux de verre pouvant glisser le long de trois côtés, ce qui correspond à une solution similaire à la flexibilité des écailles du pangolin.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE



Figure II.26 : Le terminal international de Waterloo
(Source : <https://inspiration.detail.de>)



Figure II.27 : Le pangolin (Source : <http://ara87.canalblog.com>)

II.4.2.3. L'autosuffisance en ressources naturelles

Ce même architecte **Grimshaw** a une autre fois utilisé le biomimétisme pour le « théâtre de l'eau » à Las Palma, aux Canaries. Il avait constaté que la nécessité de l'eau potable est augmentée et qu'il Ya présence de mer immédiate, il est alors dit que l'on peut dessaler l'eau de mer pour en récupérer l'eau potable son équipement. Il s'est alors inspiré des techniques développées par un insecte du désert : le coléoptère sténocara pour récupérer l'eau. Il a créé un système alternant captation de l'eau de mer, évaporation conduisant à une désalinisation de l'eau, puis condensation pour récupérer l'eau douce.

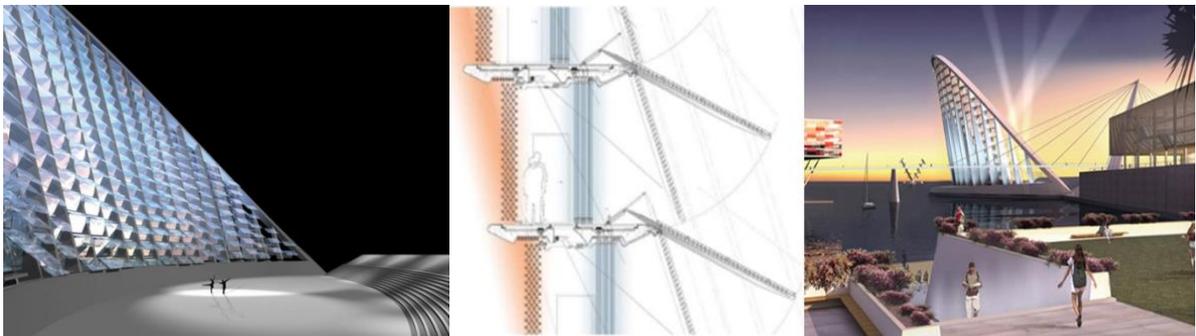


Figure II.28 : Théâtre de l'eau à Las Palma, architecte Nicolas Grimshaw
(Source : <https://stanleylungthesis.wordpress.com>)

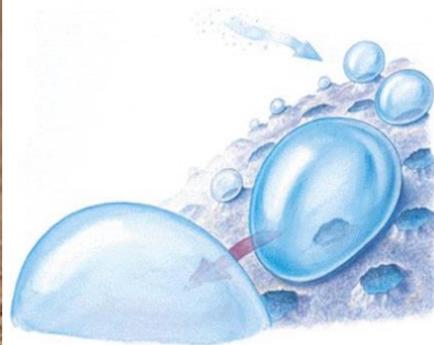


Figure II.29 : Le sténocara, insecte bioinspirateur du système de condensation du Water Theatre (Source : <https://www.scoop.it>)

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

Les exemples offerts par la Nature sont excellents et forment une source inépuisable pour des solutions architecturales. Cependant, les organismes vivants ne peuvent être regardés isolément, ils s'insèrent dans des contextes écologiques où ils jouent un rôle, une fonction spécifique.

II.4.3. L'approche éco systémique

La pérennité d'un système est dû aux relations qu'entretiennent les éléments entre eux. Ainsi, c'est la relation qui permet d'engager la durabilité. Par exemple, la production de déchets par certains organismes est utilisée par d'autres. Ce mode de relation permet d'engager un système basé sur la réciprocité et un fonctionnement en boucle. Ce niveau de la biomimétique s'inscrit clairement dans la théorie des systèmes dynamiques où les éléments ne sont pas figés mais évoluent en permanence. L'environnement est par essence dans un non-équilibre dynamique.

D'après les écologues, notre civilisation se comporte exactement comme un écosystème pionnier, dit de « Type I » dans la Nature, ces écosystèmes pionniers basés sur la compétition sont normalement minoritaires et éphémères. Ils apparaissent généralement après des événements ponctuels et créant de nouvelles surfaces à envahir (Incendie de forêt, glissement de terrain). Mais surtout, ils se caractérisent par une faible diversité, une utilisation gourmande des ressources (eau, éléments nutritifs...) favorisant une croissance rapide, préférant la quantité à la qualité, extrêmement prodigues en production de déchets et en utilisation d'énergie.

Parallèlement, les écosystèmes matures comme les forêts millénaires sont passés maîtres dans l'art d'optimiser plutôt que d'intensifier leur rendement. Ils recyclent leurs déchets, utilisent l'énergie et les matériaux efficacement et économisent l'habitat grâce à la diversification et à la coopération. Ces écosystèmes dits de « Type III » s'auto-organisent en une communauté intégrée et diversifiée d'organismes, avec le but commun de se maintenir en un endroit donné, utiliser le mieux possible les ressources disponibles, et surtout pouvoir le faire sur le long terme. L'approche biomimétique et le biomimétisme architectural se positionnent dans ce registre relationnel et de flux : faire en sorte qu'une construction évoluera le mieux possible dans son contexte, dans le respect de valeurs de durabilité.

Coopérer implique de pouvoir compter sur plusieurs espèces (ou fonctions). Les écologues ont mis en évidence la proportionnalité qui existe entre la diversité et la productivité d'un système, confirmant ainsi la thèse de **Darwin** selon laquelle, plus le nombre d'espèces est élevé, plus la coopération est efficace. Les scientifiques qui défendent le biomimétisme aimeraient voir ce principe de la diversité davantage se développer; afin

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

d'encourager les échanges entre les fonctions et les activités complémentaires, plus favorables à une consommation d'énergie réduite que l'autarcie.

Peu de projets architecturaux traduisent parfaitement ces principes. Quelques architectes utopistes répondent néanmoins à ce dessein. L'architecte belge, **Vincent Callebaut** est un des pionniers en biomimétisme et en résilience environnementale. La majorité de ses projets sont conçues en se projetant dans un avenir proche où les ressources naturelles sont épuisées, et se basent sur les leçons des écosystèmes : utiliser les déchets comme ressources, diversification et coopération, optimisation plutôt que maximisation, utilisation efficace de l'énergie, utiliser les matériaux avec parcimonie, acheter local, ne pas souiller son nid, ne pas épuiser ses ressources et se nourrir d'informations.

Les fermes urbaines verticales sont les projets les plus abouties en terme d'applications écosystémiques. **Vincent Callebaut** s'illustre encore parfaitement avec le Dragonfly à New York. Projet utopique pour certains, exemple futur d'un biomimétisme indirecte complet pour d'autres. Ce projet d'architecture nourricière favorable à l'utilisation des déchets biodégradables, viendrait s'implanter au fil de l'eau sur l'East River à New York entre l'île de Manhattan et le quartier du Queens. Il s'agit d'une tour avec un programme diversifié (logements, bureaux et fermes urbaines). Cette tour, prenant la forme d'une aile de papillon. La ferme verticale fonctionne comme un organisme vivant qui produit de l'énergie et auto-recycle toute l'alimentation.

Des voiles ultralégers de verre et d'acier reprennent les charges de l'édifice et sont directement inspirés de la structure des ailes de libellule. Autour de ces ailes, viennent s'arc-bouter deux anneaux habités dont l'exo-structure ciselée organiquement abrite des espaces inter-climatiques recevant les cultures agraires. L'ensemble forme une architecture double-peau » en résille de nid d'abeille qui exploite au maximum l'énergie solaire passive en accumulant l'air chaud l'hiver dans l'épaisseur de l'exo-structure et en rafraîchissant l'atmosphère par ventilation naturelle et par évapotranspiration des plantes têtées. Ces espaces tampons sont mis à profit pour repenser l'agriculture non plus en termes de superficies mais en termes de volumes. En effet, tandis que les sols nourrissent des vergers, chaque mur et chaque plafond sont métamorphosés en potagers tridimensionnels. Les jardins verticaux permettent de filtrer l'eau de pluie et les effluents des eaux usées domestiques des habitants de la tour. Les eaux récoltées subissent ainsi un traitement biologique approprié pour leur réutilisation agricole, apportant tout l'azote et une bonne partie du phosphore et du potassium requis pour la production des fruits, légumes et céréales.

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE



Figure II.30 : Dragonfly, un projet de biomimétisme écosystémique de Vincent Callebaut (Source : <http://vincent.callebaut.org>)

L'architecte belge **Vincent Callebaut** fait de nouveau parler de lui en livrant un schéma directeur pensé pour transformer une réserve militaire de Rome, en un éco système urbain auto-suffisant qui accueillerait la prochaine Cité des Sciences. Un projet architectural mettant au cœur de son développement, les énergies renouvelables. Fortement inspiré du "land-art" qui considère le paysage comme une œuvre d'art, les images de l'architecte belge sont toujours autant spectaculaires et semblent tout droit sorties d'un film de science-fiction. Les plantes y sont comestibles et auraient la faculté de s'autoproduire. Les toits et les balcons sont largement fournis en végétaux et les jardins et les potagers dominent entièrement la conception du site.



Figure II.31 : Les nouvelles propositions spectaculaires de Vincent Callebaut, pour la Cité des Sciences de Rome (Source : www.designboom.com)

Ce troisième niveau du biomimétisme enseigne que les principes du « vivant » peuvent être des règles de conception pour l'architecture (recours aux énergies gratuites, utilisation des rétroactions, circuits en boucle, recyclage ; promotion de la coopération ; absence de toxicité

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

rémante ou non biodégradable...). L'architecture n'est plus comprise comme un élément statique mais dynamique, le bâtiment devient facilitateur dans les relations avec son environnement.

Pour cette approche, plutôt que de parler biomimétisme, le terme d'écomimétisme paraîtrait plus adapté tant il s'agit de dépasser la logique d'un organisme vivant particulier pour s'inspirer des propriétés essentielles d'un ou plusieurs systèmes écologiques pour résoudre des problèmes humains.

II.4.4. La bio-assistance

La bio-assistance ou « bioprocessing » est le niveau ultime du biomimétisme où finalement l'homme est totalement en phase avec la Nature. Dans cette approche, il ne s'agit plus d'utiliser les recettes des organismes vivants (structures, matériaux, fonctionnement...) mais les organismes eux-mêmes. Quand la copie devient impossible, l'alliance entre l'homme et un autre organisme vivant peut devenir très bénéfique. Les applications correspondant à cette démarche sont rares mais elles offrent des perspectives intéressantes.

Les exemples en architecture sont pour l'heure quasi-inexistants. « L'auerworld palace » de **Marcel Kalberer** situé à Weimar construit sur la croissance des végétaux se rapprochent de cette acception, comme nombre de projets Land Art mais il ne s'agit pas de projets « habitables ». Ce sont dans les utopies que peuvent être recherchés les exemples. L'architecte belge **Luc Schuiten** est l'une des personnalités les plus engagées dans ce sens. Deux projets reflètent cette approche :

- **La cité des habitarbres**

Dans cette cité, les habitants ne sont plus des consommateurs de Nature, mais les acteurs d'un écosystème au même titre que les autres espèces animales et végétales. Du point de vue formel, les parois des façades sont constituées d'une peau bio-textile à base de protéines translucides inspirées de la chitine des ailes de libellules. Les dalles de sol et les parois intérieures sont réalisées en terre stabilisée par de la chaux, et armées de structures végétales. Les matériaux, choisis à jouer un rôle thermique en stockant les calories et en rediffusant la chaleur de la terre. La ventilation naturelle des édifices est calquée sur le modèle des termitières. Enfin, l'éclairage nocturne des habitations est produit par bioluminescence en imitant le procédé utilisé par les vers luisants ou certains poissons abyssaux.

- **La cité tressée**

Les constructions ont une structure basée sur un maillage végétal produit par les racines d'un figuier étrangleur ayant poussé sur un arbre support. Les parois extérieures des

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

logements sont en bio-textile, matériau comparable à celui des cocons des vers à soie ou ceux des toiles d'araignées. Ces matériaux semi transparents peuvent également capter l'énergie solaire pour fournir l'énergie nécessaire au chauffage et à l'électricité. La circulation dans la cité se fait par des passerelles surplombant la prairie sauvage, permettant ainsi aux cycles naturels de se poursuivre, de garder le sol meuble, d'irriguer et d'alimenter les arbres porteurs en nutriments provenant de la décomposition des déchets organiques.

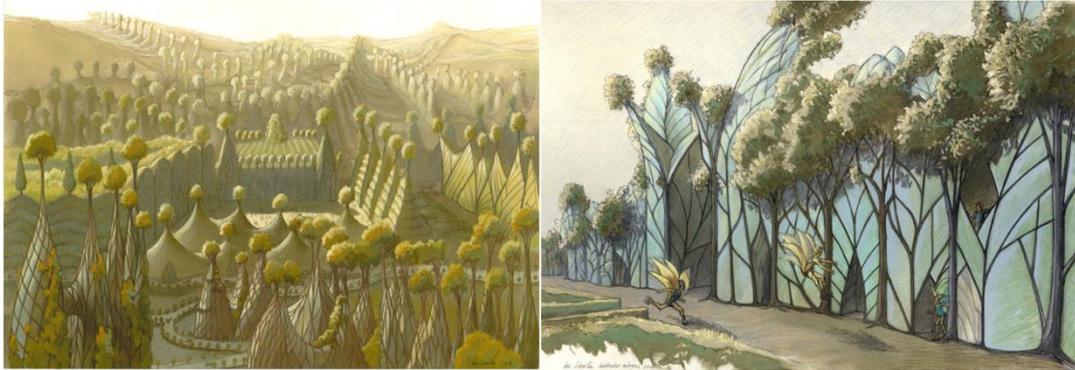


Figure II.32 : La cité tressée et la cité des habitarbres, architecte Luc Schuiten (Source : www.vegetalcity.net)

II.5. Outils pour le biomimétisme

Le biomimétisme en tant que transfert des stratégies de la biologie vers d'autres disciplines est un champ de recherche émergent qui a conduit à la définition de concepts significatifs durant les dix dernières années. Le développement de tels concepts est décrit par un processus biomimétique comprenant plusieurs étapes. Cependant, pour surmonter les défis et faciliter le parcours des différentes étapes, des outils ont été développés dans divers domaines, comme l'ingénierie, l'informatique et la conception industrielle (Fayemi *et al.*, 2016). Dans l'article « Biomimetics and its tools » (Fayemi *et al.*, 2016), les chercheurs présentent un panorama exhaustif de quarante-trois outils identifiés qui facilitent le processus de conception biomimétique. Actuellement, les outils ou bases de données les plus utilisés sont l'AskNature, le système Chakrabarti et le BioTriz (Boks & Volstad, 2008), ce à quoi nous pourrions ajouter le Natural language analysis et SAPHHIRE Model (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018). D'autres méthodes existent encore, mais ne seront pas développées. Parmi celles-ci, citons : IDEA Inspire permettant de trouver des références biologiques (Chakrabarti, Sarkar, Leelavathamma & Nataraju, 2005), le Functionnal Modeling, présentant des systèmes biologiques et leurs modes de fonctionnement intéressants à remettre en oeuvre dans le cadre de l'ingénierie (Nagel J., Nagel R., Stone & McAdams, 2010). De plus, on peut citer la méthode C-K que certains concepteurs biomimétiques utilisent. Cette dernière permet de

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

mettre en relation des concepts (C) et des connaissances (K) dans l'optique de générer des solutions de conceptions innovantes (Chayaamor-Heil et al., 2018).

La base de données **AskNature** est disponible en ligne pour les architectes ou autres concepteurs recherchant des informations relatives aux organismes vivants et à leurs capacités à répondre à un besoin (Deldin & Schuknecht, 2014). Ce portail de recherche public a été créé et mis à disposition par le Biomimicry Institute américain (Hooker & Smith, 2016). Une fois le mot-clé (la technique recherchée) entré dans le moteur de recherche, trois fiches s'offrent à nous. La première, descriptive, résume la stratégie adoptée par l'organisme concerné pour répondre au besoin. Ensuite, une galerie d'images nous est fournie pour finalement terminer par des commentaires d'internautes (AskNature.org).

Le **Natural language analysis** est une méthode développée par une équipe de recherche de Toronto visant à trouver des solutions biologiques afin de résoudre des problèmes dans le domaine de l'ingénierie (Chiu & Shu, 2007). Afin d'éviter tout raccourci en créant une base de données biologique uniquement pour des ingénieurs, l'approche prône une recherche en mots-clés décrivant la problématique. Ainsi, les résultats proposeraient des solutions provenant de l'étude du vivant (Shu, 2010). Il s'agit donc d'une méthode permettant de lier les domaines de la biologie et de l'ingénierie en donnant un ordre d'importance à des mots-clés générés par le programme (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Le **Chabrakarti system** cherche à aider le concepteur en lui fournissant des analogies biologiques ou artificielles. Pour ce faire, la méthode repose sur deux bases de données fonctionnant en parallèle (Kolle, 2005). La première décrit la façon dont se meuvent certains vivants (à l'image de poissons et de leurs nageoires, d'insectes volants...) et la deuxième décrit les mécanismes artificiels de systèmes tels que la transmission par engrenages, les aspirateurs... Un langage commun aux deux bases de données a été créé par les chercheurs afin de proposer un large éventail de solutions analogiques et alternatives pertinentes à la résolution d'un problème de conception (Chakrabarti & al., 2011). Les résultats ne montrent cependant pas si la plupart des solutions proviennent principalement des données tirées de l'étude du vivant ou des mécanismes artificiels, le langage commun ne les dissociant pas (Boks & Volstad, 2008).

BioTriz est une adaptation de la méthode TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) au biomimétisme (Glier, Tsenn, Linsey & McAdams, 2011). Cette méthode russe inventée en 1946 part du principe que lors de l'élaboration d'un nouveau produit, des analogies existent dans un produit déjà existant (Deimel, 2007). Elle est basée sur 39 paramètres de conception et 40 principes reconnus comme communs aux principales innovations (Terrier, Glaus &

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

Raufflet, 2017). Les concepteurs utilisant TRIZ définissent un problème de conception comme une contradiction entre différentes exigences. L'algorithme complexe derrière la méthode optimisera un paramètre parmi les 39 initiaux. La matrice de contradiction de TRIZ permettra au concepteur de retenir que certains principes innovants des 40 initialement définis permettent, in fine, de résoudre le problème déjà rencontré dans des conceptions antérieures (Glier & al., 2011).

C'est dans cette optique que la méthode BioTriz, développée à l'université de Bath, voit le jour (Bogatyrev & Bogaryteva, 2015). Elle est basée sur une analyse de 500 phénomènes biologiques et 270 fonctions offertes par la nature permettant d'implanter des concepts biomimétiques pour la conception de produits (Chayaamor-Heil et al., 2018). Elle se base non plus sur 40 principes, mais sur 6 (substance, structure, espace, temps, énergie et information) ce qui en facilite grandement son utilisation (Terrier, Glaus & Raufflet, 2017).

Le **modèle SAPPHiRE** a également été établi par Chakrabarti et a été mis en place dans le but de faciliter la compréhension de systèmes biologiques complexes (Chayaamor-Heil et al., 2018). Dans ce cas-ci, le modèle prend comme base 20 paires biomimétiques (le modèle naturel copié et le système technique dont l'analogie provient de ce même modèle naturel) (Chakrabarti et al. 2005) et permet d'en faire ressortir un niveau de biomimétisme. En effet, le modèle compare les paires biomimétiques entre elles et montre le nombre de similarités existantes au sein des paires étudiées (Sartori, Pal & Chakrabarti, 2010).

II.6. Réglementation internationale sur le biomimétisme

L'International Organization for Standardization (ISO) (en français « Organisation Internationale de Normalisation) a établi et publié 3 normes internationales, en 2016, concernant directement le biomimétisme. Les normes ISO 18547, 18458 et 18569.

- La norme « ISO 18547 : Biomimétisme – Matériaux, structures et composants biomimétiques » fournit un cadre au développement, à la caractérisation, à la mesure et à la pertinence de matériaux, de structures, de surfaces, de composants et des technologies de conception selon la philosophie biomimétique. Cette dernière spécifie également la méthodologie basée sur l'analyse des systèmes biologiques amenant aux analogies ou abstractions recherchées. Le processus de transfert de la biologie à la technologie est étayé d'exemples concrets (ISO, 2016).
- La norme « ISO 18548 : Biomimétisme – Terminologie, concepts et méthodologie » fournit un cadre pour les applications biomimétiques. Elle se présente comme un guide de conception et d'utilisation des méthodes biomimétiques explicitées en section 2.4.1

CHAPITRE II : LE BIOMIMÉTISME, UNE SOURCE POUR L'ARCHITECTURE DURABLE

(Nature-based / Solution-based). On y retrouve des définitions de nombreux termes, mais également un aperçu des champs d'application et de la différence qui existe entre les formes classiques de recherche et de développement et le biomimétisme. Les limites et le potentiel du biomimétisme en tant qu'approche et stratégie de développement durable sont démontrées (ISO, 2015).

- La norme « ISO 18549 : Biomimétisme – Optimisation Biomimétique » spécifie les domaines d'application des méthodes d'optimisation biomimétique portant sur des problèmes structuraux linéaires sous des charges statiques et de fatigue. Elle a pour objectif de familiariser les concepteurs, développeurs et ingénieurs à ces méthodes comme des outils d'optimisation (des durées de vies et d'allègement du poids) de structures ou de matériaux biomimétiques (ISO, 2015).

Conclusion

La Nature a toujours constitué une base de réflexion en matière de conception et d'architecture en particulier. Si s'inspirer de la Nature pour éco-concevoir des projets architecturaux n'est pas une nouveauté, le biomimétisme est l'un de ces nouveaux courants qui connaît un fort engouement depuis quelques années. L'attrait pour le biomimétisme architectural réside sans doute de son inscription dans l'architecture durable d'une part mais plus encore de sa considération pour les êtres vivants comme source d'enseignements (gestion durable des ressources naturelles, optimisation énergétique...).

L'attention portée aux formes, aux fonctionnements, aux relations entre les organismes vivants est la particularité du biomimétisme, laquelle constitue un guide dans la démarche architecturale. Au-delà, le biomimétisme rentre en écho avec les grands enjeux de société actuels intégrant désormais les problématiques environnementales. Il ne s'agit plus de considérer les ressources naturelles comme inépuisables mais de changer le regard sur elles pour apprendre à concevoir autrement. Apprendre de la Nature pour innover, réinventer nos systèmes de production et nos modes de vie (habiter, travailler, consommer...) sont autant de thèmes sur lesquels les architectes doivent se pencher ou sont confrontés de près ou de loin.

Introduction

Le changement climatique est un problème d'actualité, de plus en plus central dans les débats sur les transformations et la gestion des territoires, en particulier des territoires urbains, car il renforce les contraintes de chaleur et de sécheresse, notamment dans les villes qui n'ont pas le temps d'adapter leurs équipements à cette nouvelle donne climatique. Ces dernières années, de nombreuses études et accords internationaux ont été mis en place sur les répercussions du changement climatique à l'échelle du globe, mais peu d'éléments précis sont encore disponibles pour en comprendre les impacts dans différentes régions du monde comme en Méditerranée. C'est même l'une des régions du monde les plus impactées par le changement climatique. Elle n'échappe pas au phénomène d'urbanisation « galopante » qui touche l'ensemble de la planète depuis plusieurs décennies. Ses villes abritent aujourd'hui 70 % de la population méditerranéenne. Si le patrimoine urbain une richesse culturelle et économique, sa gestion pose de nombreux problèmes dans le cadre des effets possibles du changement climatique et les impacts sur les sociétés méditerranéennes et leur environnement naturel s'annoncent potentiellement désastreux, voire irréversibles.

La transition écologique vers un véritable modèle de développement soutenable implique que nous changions radicalement notre vision pour ne plus appliquer aux problèmes environnementaux des solutions de « bout de chaîne ». Aujourd'hui, les solutions proposées pour répondre aux changements climatiques, que ce soit au niveau mondial ou au niveau de la région méditerranéenne, relèvent principalement de la transition énergétique et ne reposent pas assez sur celles offertes par les écosystèmes. Pourtant, ces solutions fondées sur la nature jouent un rôle fondamental dans la captation et le stockage de carbone et offrent des opportunités réelles pour atténuer les effets des changements climatiques et des risques naturels.

« Certaines espèces existent depuis 300 millions d'années. Nous devons nous inspirer de leur capacité à durer dans le temps pour les villes de demain »

Olivier Allard

S'inspirer du vivant est une formidable opportunité pour nous ré-émerveiller et nous reconnecter à la nature. Le biomimétisme peut donc fournir un modèle puissant non seulement pour une utilisation plus efficace et efficiente des ressources, mais aussi pour la régulation thermique, l'approvisionnement en eau et la survie des écosystèmes tempérés dans le contexte du changement climatique dans la ville méditerranéenne, qui constitue un terrain

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

de jeu formidable d'innovations et d'expérimentations grâce à un socle naturel de grande valeur biologique et écologique.

Le présent chapitre a pour objectif de construire un état des lieux des réflexions sur les relations entre nature, urbanisme, architecture et changement climatique dans les villes méditerranéennes. Il présente le contexte particulier du bassin méditerranéen, et introduit, au regard de ses spécificités environnementales et sociétales, les implications du changement climatique et leurs conséquences sur les ressources naturelles et les activités humaines. Nous nous sommes ainsi attachés tout au long de ce chapitre de recherche à évaluer dans quelle mesure le concept du biomimétisme peut constituer une méthodologie de conception innovante qui donne des opportunités importantes dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques et de la réduction des risques naturels.

III.1. La méditerranée : un territoire riche et pluriel

La Méditerranée est unique par ses spécificités historiques et géographiques, ainsi que par son patrimoine naturel et culturel. Au carrefour de trois continents, avec l'Europe au Nord, l'Asie occidentale à l'Est et l'Afrique du Nord au Sud, elle constitue une zone d'échanges multiples et d'importance stratégique aussi bien au niveau régional que mondial. C'est également une zone où les grands déséquilibres planétaires (environnementaux, sociaux et économique) sont représentés de façon concentrée et exacerbée.

La mer Méditerranée occupe un bassin d'environ 2,6 millions de km², rassemble 75 bassins hydrologiques côtiers et regroupe 224 régions administratives côtières, avec un total de 46 000 km de littoral. Elle est bordée de 22 pays riverains, 23 en incluant le Royaume-Uni (à travers Gibraltar), répartis sur trois rives :

- La rive nord, qui regroupe notamment les pays membres de l'Union européenne (l'Espagne, la France, Monaco, l'Italie, Malte, la Slovénie, la Croatie, la Grèce) ainsi que la Bosnie-Herzégovine, le Monténégro et l'Albanie, auxquels peut donc être ajouté le Royaume-Uni;
- La Rive est avec Chypre, la Turquie, la Syrie, le Liban et Palestine ; et
- La Rive Sud qui regroupe cinq pays d'Afrique du Nord : l'Égypte, la Libye, la Tunisie, l'Algérie et le Maroc.

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

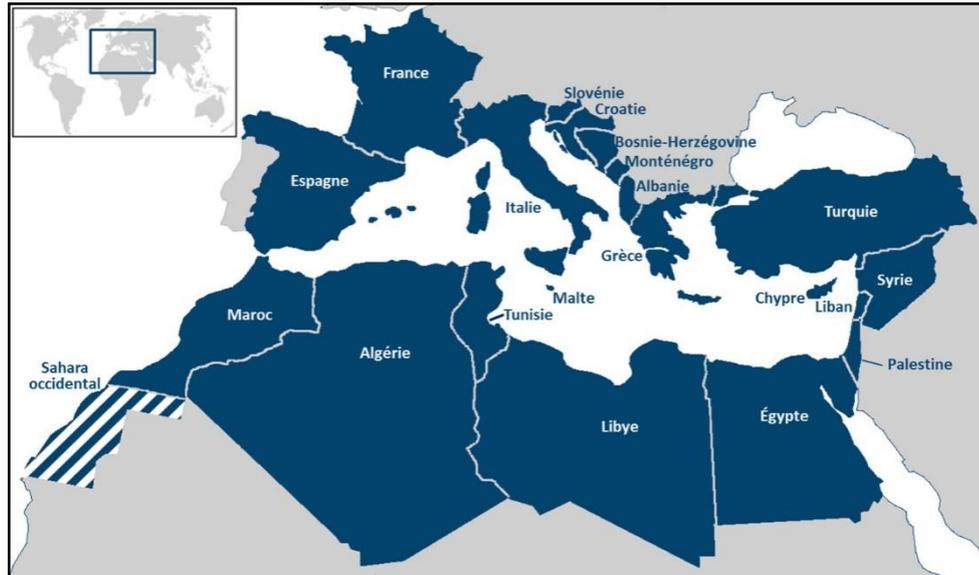


Figure III.1 : La mer Méditerranée et ses pays riverains (Source : <http://pairault.fr>)

Cet espace méditerranéen se caractérise aussi bien par la richesse et la diversité de ses paysages que par un environnement naturel exceptionnel doublé d'un climat unique qui contribuent à en faire une des premières destinations touristiques au monde. La Méditerranée accueille de nombreuses espèces endémiques et regroupe 4 à 18 % des espèces marines connues, alors qu'elle représente moins de 1% des zones couvertes par les océans et mers à l'échelle terrestre. Le bassin méditerranéen est également unique par ses spécificités historiques, son patrimoine naturel et culturel et le sentiment de ses habitants d'appartenance au « monde méditerranéen ». La Méditerranée n'est cependant pas uniforme, en témoigne les dichotomies pouvant exister entre les pays industrialisés du Nord et les pays dits en développement et émergents. La figure suivante reflète ces inégalités sur le plan économique, avec des niveaux de revenus par habitant 3 à 5 fois supérieurs dans les pays du sud de l'Europe (France, Italie, Espagne notamment), comparés aux autres rives.

Si d'importants progrès ont été réalisés au Sud et à l'Est au cours des vingt dernières années, des situations d'instabilité ainsi que des inégalités importantes persistent. Ces problématiques se retrouvent au cœur de la question climatique, qui exacerbe les déséquilibres en impactant de manière plus prononcée les pays dits en développement, qui disposent en outre de moyens limités pour y faire face.

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

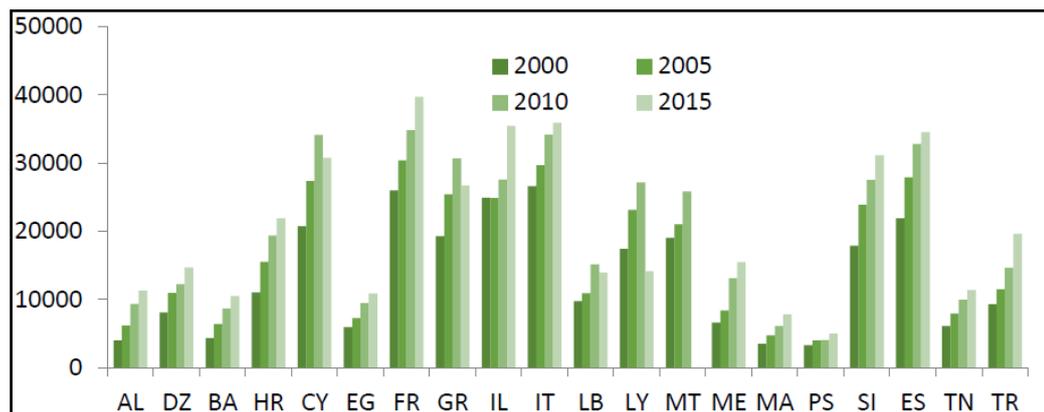


Figure III.2 : Produit Intérieur Brut par tête selon les pays en United States Dollars, 2000 à 2015
(Source : Bleu, édition 2016. D'après données Banque mondiale, World Development Indicators)

III.2. Des déséquilibres exacerbés par les changements climatiques

Le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) identifie le bassin Méditerranéen comme une zone particulièrement exposée aux changements climatiques, un des 25 « *hot spots* » au niveau mondial. Les zones littorales sont particulièrement affectées ; or, près de 150 millions d'habitants peuplent les régions côtières méditerranéennes et les bassins hydrologiques comptent approximativement 250 millions d'habitants, soit respectivement 33 % et près de 50 % de la population totale des pays riverains.

Le constat varie cependant très fortement entre la partie sud et est du bassin (allant du Maroc à la Turquie) et sa partie Nord (allant de la péninsule ibérique à la Grèce). En premier lieu, les pays situés sur la rive sud-est subissent et subiront des impacts plus marqués. Même si la dernière décennie a été la plus chaude jamais enregistrée pour l'ensemble du bassin méditerranéen ; le réchauffement a été beaucoup plus prononcé dans certaines régions, notamment en Afrique du Nord. En second lieu, le contexte de forte croissance démographique, de ressources naturelles limitées (eau, sols), d'urbanisation rapide et mal contrôlée, de moyens financiers restreints et d'impératifs sociaux de court terme réduit significativement la capacité d'adaptation des pays d'Afrique du Nord et de ceux du Machrek.

En matière d'émissions de gaz à effet de serre, à l'origine du réchauffement climatique, les plus gros émetteurs de la zone restent les pays du Nord (France, Italie, Espagne notamment), malgré une diminution des émissions depuis le milieu des années 1990 liées aux engagements de l'Union européenne dans le cadre des négociations climat (paquet climat énergie 2020). Dans le même temps, les émissions des pays de la rive sud-est du bassin Méditerranéen tels que le Maroc, l'Égypte, ou encore la Tunisie et la Turquie, ont augmenté assez rapidement, parallèlement à leur développement économique et leur croissance

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

démographique. Cette tendance pourrait se poursuivre, voire s'accélérer dans les prochaines décennies.

Pour faire face à ces défis aux multiples facettes, il semble urgent de renforcer les coopérations et participer à la mise en place d'une stratégie globale à l'échelle du bassin, avec des déclinaisons dans l'ensemble des secteurs clés (énergie, bâtiments, transports, industrie, agriculture, etc.).

III.3. Évolutions passées et futures du climat en Méditerranée

Le point commun des climats de tous les pays qui bordent le bassin méditerranéen est un fort ensoleillement et une tendance chaude, composée par un été très chaud et un hiver doux. Sa particularité est d'avoir une saison sèche durant la période chaude, alors que les précipitations sont plutôt regroupées en automne ou en hiver. Les rives sud et est subissent des températures plus élevées ainsi que des périodes de sécheresse plus intenses ; 80% du volume de leurs précipitations annuelles proviennent des pluies hivernales, contre 30% pour la rive nord.

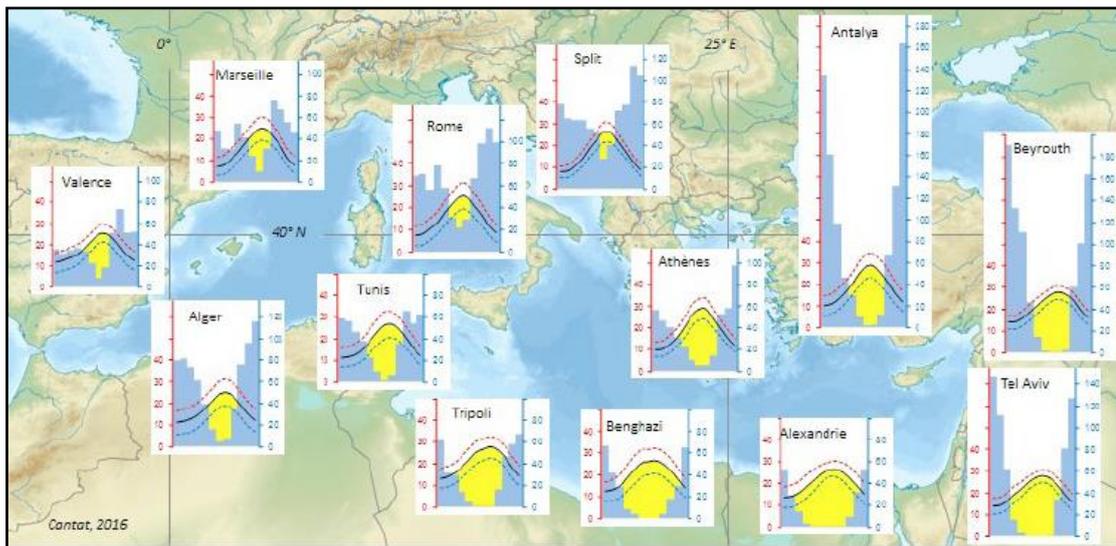


Figure III.3 : La diversité des climats autour de la mer Méditerranée. Diagrammes ombrothermiques de plusieurs sites littoraux (Sources : Climatebase ; weatherbase; climate-charts)

Cette situation est liée notamment à sa position à la croisée de deux régimes climatiques (aride en Afrique du Nord, tempéré en Europe), à ses spécificités géographiques (mer semi-fermée entourée de montagnes), mais aussi à un développement urbain intense sur les espaces côtiers, qui accroît bien souvent les vulnérabilités.

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

III.3.1. Un réchauffement qui s'accélère

Alors que la hausse moyenne des températures à la surface terrestre depuis la révolution industrielle est estimée à environ $0,85^{\circ}\text{C}$, certains pays riverains de la Méditerranée, et en particulier au Maghreb, ont subi une augmentation de température supérieure à 2°C lors du 20e siècle (voir figure ci-après).

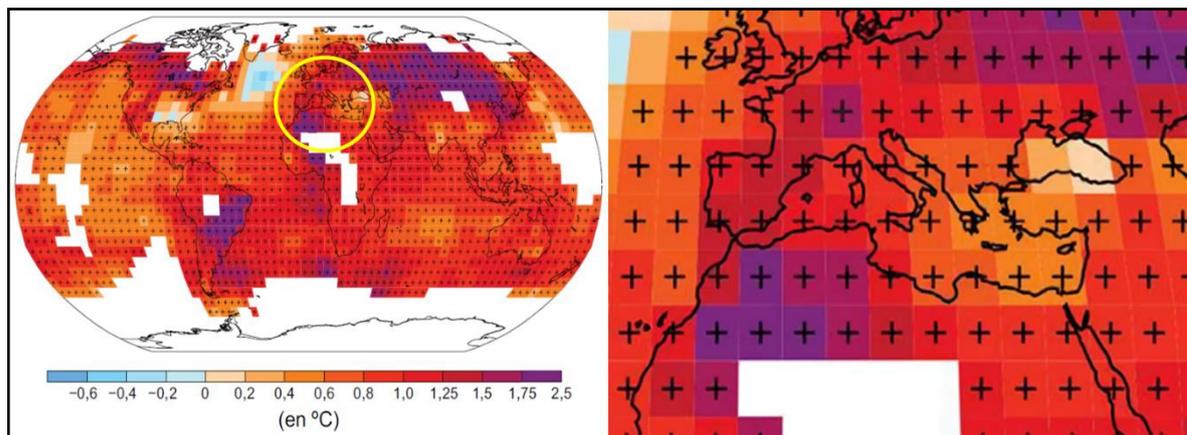


Figure III.4 : Évolution de la température à la surface terrestre, 1901-2012 (Source : Résumé du 5e rapport du CIEC, 2013)

Sous un scénario d'évolution moyenne des émissions de gaz à effet de serre (GES), le réchauffement du bassin méditerranéen pourrait atteindre, d'ici la fin du siècle, 4°C (bord de mer) à 5°C ou plus (notamment zones sahariennes et rive est) en été, 2°C à 4°C lors des autres saisons. Ces chiffres pourraient s'accroître d'un demi-degré dans un scénario de fortes émissions (Representative Concentration Pathways 8,5, ou RCP8,5), ou au contraire être réduits d'un degré dans un scénario bas carbone (RCP2,6). Le réchauffement sera dans tous les cas plus prononcé dans les terres qu'au niveau de la mer.

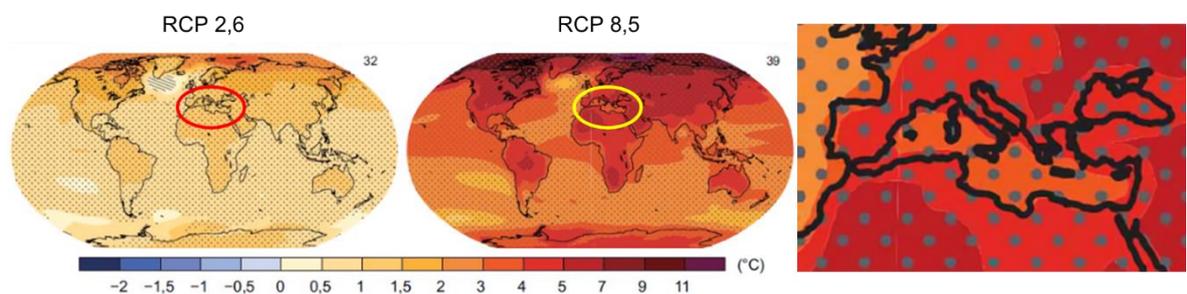


Figure III.5 : Variations moyennes des températures de l'air en été, 1986-2005 vs 2081-2100 (Source : Résumé du 5ème rapport du CIEC, 2013)

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

III.3.2. Des systèmes de précipitations altérés

Le niveau des précipitations a diminué sur une très grande partie du bassin durant la période 1951-2010, en particulier au Maghreb, en Espagne et sur la rive nord-est, avec des baisses pouvant localement atteindre 10 à 25mm/an par décennie.

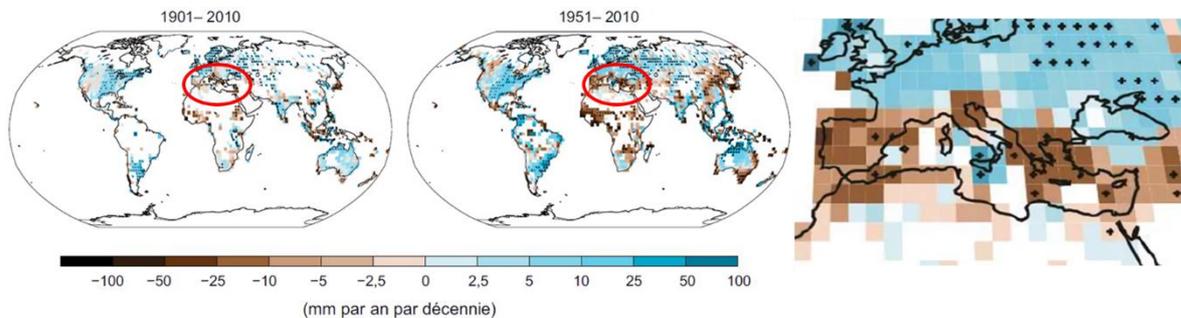


Figure III.6 : Changements observés des précipitations annuelles sur les terres émergées 2100 (Source : Résumé du 5ème rapport du CIEC, 2013)

Les scénarios prévoient, d'ici 2100, une réduction continue du volume de précipitations pouvant atteindre 40% selon les pays et les saisons, voire 50% dans certaines zones des rives sud et nord-est du bassin Méditerranéen. L'ampleur de ces réductions dépendra cependant de l'évolution globale des émissions de GES.

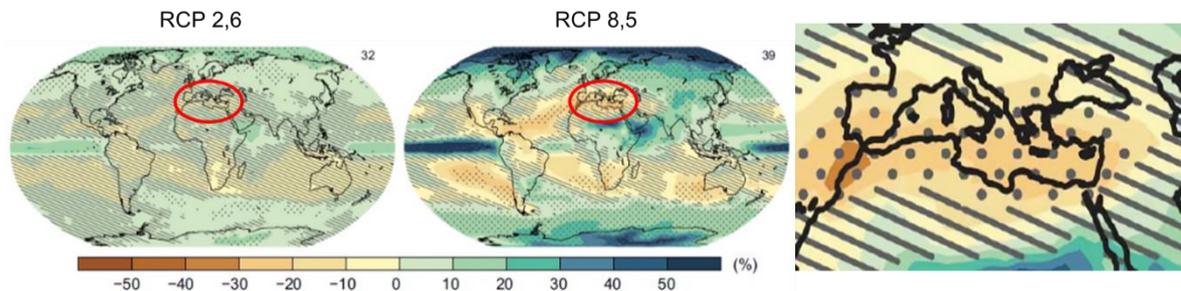


Figure III.7 : Évolution des précipitations moyennes entre 1986-2005 et 2081-2100 (Source : Résumé du 5ème rapport du CIEC, 2013)

III.3.3. Un cycle hydrologique perturbé

Le réchauffement, la baisse des précipitations ou encore un niveau d'évaporation plus élevé devraient impacter fortement les eaux en Méditerranée. Les conséquences indirectes liées aux effets des changements climatiques sur l'océan atlantique, les fleuves connectés (par exemple le Nil) ou encore la mer Noire, dont l'évaporation accrue pourrait entraîner un renversement des flux d'écoulement (depuis la Méditerranée vers la mer Noire), ne doivent pas non plus être négligées.

Comparé aux valeurs actuelles, il est estimé que le réchauffement des températures à la surface de la mer pourrait atteindre 1,5°C à 3,1°C d'ici 2100. Il devrait s'accompagner d'un

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

niveau de salinité plus élevé, bien que des incertitudes scientifiques importantes demeurent à ce sujet. Les eaux plus profondes pourraient se réchauffer de 0,9°C à 2,5°C d'ici la fin du siècle.

Ce réchauffement contribuera à la hausse du niveau de la mer sous l'effet de la dilatation thermique, combinée à la fonte des glaces terrestres au niveau mondial. Le dernier rapport du GIEC indiquait ainsi que le niveau des mers et océans s'était élevé de près de 20cm en moyenne au 20ème siècle. Cette tendance devrait se poursuivre et pourrait aller jusqu'à une élévation d'1m par rapport aux niveaux actuels d'ici 2100.

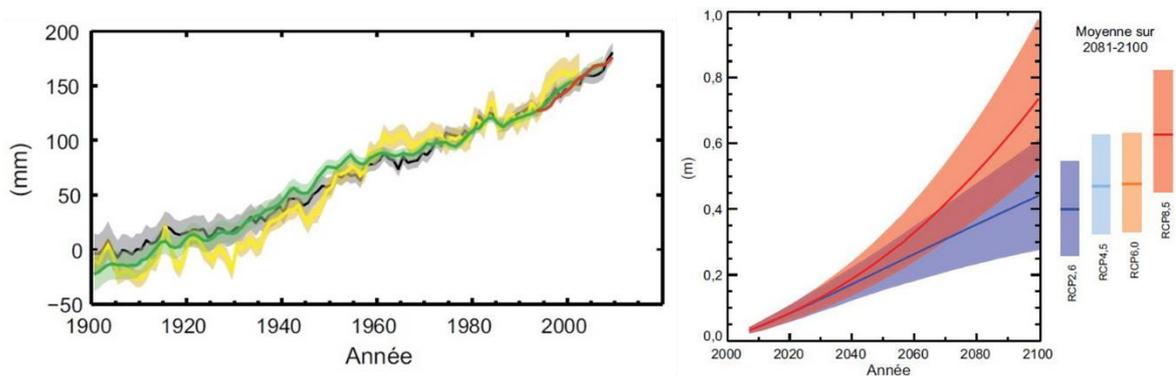


Figure III.8 : Hausse du niveau des mers, période 1900-2010 (observations), et 2010-2100 (projections)
(Source : Résumé du 5ème rapport du GIEC, 2013)

En Méditerranée, les scénarios prévoient généralement une élévation du niveau de la mer allant de 40cm à 1m10 d'ici à la fin de ce siècle21, avec des effets secondaires en matière d'ondes de tempêtes et de niveau des vagues. L'absorption accrue de dioxyde de carbone amènera par ailleurs une acidification de l'eau, avec des conséquences notamment sur les écosystèmes marins.

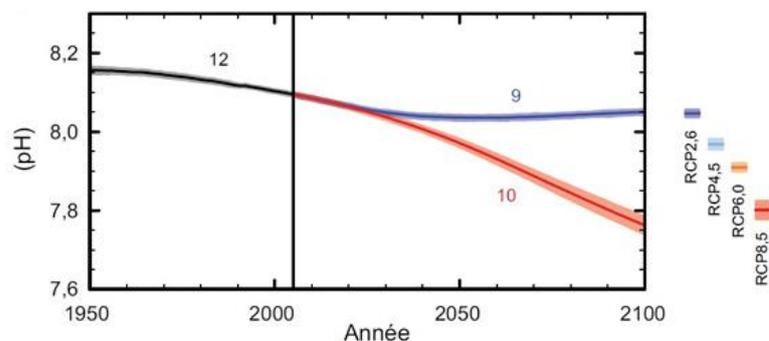


Figure III.9 : PH de la surface des océans à l'échelle mondiale (Source : Résumé du 5ème rapport du GIEC, 2013)

Au final, le scénario d'émissions moyennes RCP4,5 du GIEC prévoit que « d'ici 2100 les températures moyennes pourraient augmenter jusqu'à 7,5 °C et les précipitations

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

moyennes baisser jusqu'à 60 %. En ce qui concerne le niveau de la mer, une augmentation moyenne de 0,4 à 0,5 m est projetée pour la plus grande partie de la Méditerranée ».

III.3.4. Des événements climatiques extrêmes plus intenses et fréquents

Les changements climatiques devraient amener une intensification des événements climatiques extrêmes, tels que des pluies très intenses, des tempêtes et fortes houles, des vagues de chaleur ou encore des sécheresses. L'étude des tendances passées concernant les précipitations extrêmes ont mis en évidence des hausses, depuis 1950, de 8 à 25% sur l'ouest du bassin Méditerranéen, et de 4% par décennie dans certaines zones d'Afrique du Nord.

En termes prospectifs, les incertitudes demeurent sur les évolutions futures. Sous un scénario de réchauffement des températures moyennes de 2°C, les précipitations extrêmes (95e percentile) pourraient s'accroître de 10% par rapport aux niveaux actuels, avec des valeurs bien plus importantes localement (30% à 50% au sud de la France par exemple). Les projections montrent également un accroissement potentiel, avec de fortes disparités régionales, des vagues de chaleur, sécheresses et également des inondations, en particulier durant l'automne et sur la rive ouest (notamment Sud-Est de la France, Catalogne et région de Valence en Espagne).

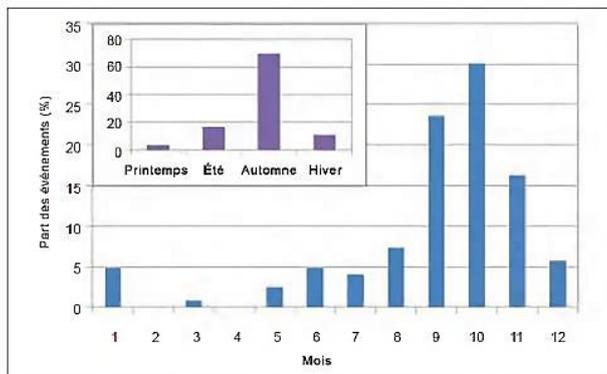


Figure III.10 : Distributions saisonnière et mensuelle des inondations sur la période 1940-2015 (Source : IRD (2016), traduction ENERGIES 2050)



Figure III.11 : Biot (Région PACA, France), après les inondations d'octobre 2015 (Source : <https://www.nicematin.com>)

III.4. Les impacts sectoriels du changement climatique dans la région méditerranéenne

Les impacts des dérèglements climatiques prennent des formes multiples et variées, sont parfois très localisés, et concernent un grand ensemble de domaines. Ils sont complexes à appréhender et requièrent des études et des simulations à des échelles spatiales réduites, associées à de forts degrés d'incertitudes.

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

Cette partie ne peut donc prétendre réaliser une revue exhaustive des risques associés aux changements climatiques impactant le bassin méditerranéen. Elle se propose néanmoins de mettre en avant certains des impacts physiques attendus dans les secteurs les plus touchés et de faciliter ainsi une meilleure compréhension des enjeux et identification des réponses à mettre en œuvre.

III.4.1. Impacts sur la biodiversité terrestre et marine

Bénéficiant d'une évolution géologique unique et compte tenu de la variété de ses conditions climatiques et hydrographiques, la Méditerranée est l'un des premiers réservoirs au monde en termes de biodiversité, dotée d'une grande variété d'espèces et d'une faune et flore endémique très importante. Bien qu'elle représente moins de 1% de la surface des mers et océans sur terre, elle abriterait 4 à 18% de toutes les espèces marines référencées.

Un déplacement vers le nord et en altitude des espèces a été observé au cours du 20^{ème} siècle. Cela est lié principalement à la migration de leur niche écologique. Un déplacement dans le temps est également observé pour les dates de migration de certains animaux, de récolte de certains fruits. De manière plus générale les cycles saisonniers d'un grand nombre d'espèces ont changé (pontes précoces par exemple). Parallèlement à ces changements, l'apparition et/ ou la recrudescence de parasites est à signaler. Toutefois, la conjonction de ces divers éléments laisse prévoir la disparition d'espèces animales et végétales et une baisse importante de la biodiversité. Les mammifères des régions de plaine en Méditerranée semblent particulièrement visés (entre 5 à 10 % des espèces menacées de disparition d'ici la fin du siècle).

Dans le milieu marin, la liste rouge dressée par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) indique que plus de 600 espèces de poissons marins sont recensées en mer Méditerranée. Il y est néanmoins déclaré que « *sur les 519 espèces et sous-espèces de poissons marins autochtones de la mer Méditerranée, 43 (~8%) sont considérées comme menacées au niveau régional (Catégories en danger critique d'extinction, en danger et vulnérable)* » ou encore que plus de la moitié des espèces de poissons marins présentes en mer Méditerranée est menacée. L'UICN indique par ailleurs qu'il existe un réel « *manque d'informations sur le statut de conservation de près d'un tiers des espèces de poissons marins autochtones de la mer Méditerranée, dont une grande proportion est endémique* ».

Cette richesse naturelle exceptionnelle est aujourd'hui non seulement menacée par les pressions anthropiques liées au développement économique, mais également par les changements climatiques, dont les conséquences peuvent prendre de multiples facettes : changements dans la disponibilité du plancton (à la base de nombreuses chaînes alimentaires),

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

dans la distribution et l'abondance des espèces marines, migrations des espèces animales et végétales, disparition d'espèces et d'habitats naturels, etc.

III.4.2. Impacts sur la production alimentaire

Plus grande aridité et salinité des sols, intensification des événements climatiques extrêmes, érosion liée à la hausse du niveau de la mer, diminution des réserves en eau ou encore prolifération des insectes nuisibles... Autant de facteurs qui devraient impacter de manière sensible la production alimentaire. Le GIEC estimait ainsi que, sur le continent africain, les rendements agricoles diminueraient sous l'effet des changements climatiques avec des pertes allant de 22% pour les cultures majeures et jusqu'à 25% pour le blé d'ici 2050. En parallèle, les problèmes de santé liés à la malnutrition ou à la propagation de vecteurs de maladies type paludisme risquent de s'accroître.

La pêche, qui subit déjà la surexploitation et les pollutions marines, devrait également être impactée par des changements dans la distribution et le stock disponible des espèces marines (lié au réchauffement de l'eau, aux changements de salinité, aux migrations, etc.). Les prises potentielles pourraient être ainsi réduites de 5% d'ici 2050 sous un scénario à fortes émissions (RCP8.5), avec un changement dans la composition des prises marqué notamment par la croissance d'espèces tropicales et invasives.

III.4.3. Impacts sur les activités touristiques

Le climat est une composante essentielle du choix de la destination pour les touristes internationaux. Si les vagues de chaleur et les températures estivales augmentent, l'attractivité des régions méditerranéennes pourrait diminuer au profit de régions plus septentrionales.

Ce secteur pourrait être impacté par la diminution de la biodiversité marine et terrestre, la multiplication des événements climatiques extrêmes ou encore la dégradation des infrastructures liée à la montée du niveau des eaux et à l'érosion côtière. Plusieurs études semblent ainsi indiquer qu'une hausse du nombre de touristes domestiques dans les pays de la rive nord peut être attendue, sous l'effet de la baisse des précipitations et de la hausse des températures.

Les pays des rives sud subiraient eux des baisses de fréquentation domestique pouvant atteindre plus de 10% des arrivées d'ici 2100, comparé à un scénario sans changements climatiques. Les arrivées internationales seraient beaucoup plus impactées avec des réductions dans la quasi-totalité des pays riverains, une nouvelle fois plus marquées dans les pays du sud et de l'est du bassin (baisses pouvant atteindre 40 à 50% des arrivées).

III.4.4. Impacts sur les ressources en eau

Déjà mises sous pression par la surexploitation et la pollution, les ressources en eau devraient être fortement impactées par les changements dans les systèmes de précipitation, l'évaporation plus élevée, l'intrusion d'eau saline liée à la montée du niveau de la mer, les sécheresses et vagues de chaleur, etc.

Une étude menée sur plusieurs bassins de taille moyenne en Catalogne a par exemple estimé des réductions potentielles des débits moyens de l'ordre 16 à 28% d'ici la fin du siècle, jusqu'à plus de 50% localement en automne. Une réduction de 40% des débits pourrait également avoir lieu en Italie du Sud, dans le bassin de Crati alors que la quantité d'eau disponible pourrait être réduite de 33 à 48% en Crète, selon d'autres études.

Ces changements dans la disponibilité de la ressource en eau devraient impacter des domaines connexes dont l'accès à l'eau potable, l'assainissement, la production agricole ou encore le secteur énergétique. Les effets « énergétiques » des sécheresses dans la région de Sao Paulo au Brésil (qui dispose d'importantes infrastructures hydroélectriques) illustrent certains des nexus existants entre les domaines de l'eau et de l'énergie. Soulignons ici que l'hydroélectricité est l'une des principales sources de production électrique renouvelable au sein de l'Union européenne et la Turquie figurait à la 7ème place des pays ayant ajouté le plus de capacités de production hydroélectrique (+0,8GW) en 2016 au niveau mondial.

III.4.5. Impacts sur la santé

Le secteur de la santé pourrait subir des pressions croissantes liées par exemple aux vagues de chaleur et événements climatiques extrêmes, aux effets des pollutions marines et terrestres, à la baisse de la production alimentaire, ou encore à l'expansion de certaines maladies infectieuses. Une étude menée sur les villes ayant un climat méditerranéen mettait ainsi en avant les impacts suivants :

- Augmentation des décès causés par des maladies cardiovasculaires et respiratoires, liée aux températures extrêmes amplifiées par l'effet d'îlot de chaleur urbain ;
- Morts directement liées à des événements climatiques extrêmes. Les inondations dans les Alpes Maritimes en octobre 2015, suite à de très fortes précipitations, avaient causé par exemple plus d'une vingtaine de décès ;
- Variabilité accrue des précipitations affectant la disponibilité en eau douce avec des impacts sur l'hygiène et les maladies transmises par l'eau ;
- Dégradation de la qualité de l'air liée aux changements de températures et précipitations, amenant des problèmes respiratoires variés ;

- Prolifération des maladies vectorielles ;
- Insécurité alimentaire liée aux événements climatiques extrêmes.

Ces quelques exemples non exhaustifs soulignent l'importance, mais également la complexité de la problématique climatique et de ses nombreux effets sur les systèmes environnementaux et humains. Cette thématique transversale est en effet susceptible d'affecter un ensemble très large de domaines. Il s'agit donc d'agir en amont de ces pressions et menaces, pour les réduire autant que pour éviter que de nouvelles n'apparaissent.

III.5. La Conception biomimétique pour l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets

Aux mesures que les effets du changement climatique augmentent, les politiques et les mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre doivent se développer rapidement. Cela sera particulièrement crucial dans l'environnement bâti, qui est non seulement l'en responsable d'au moins un tiers, voire davantage, des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), ce qui entraîne ce problème, il devra également s'adapter aux ses impacts.

Parallèlement à cela, la définition d'une architecture durable de pointe évolue rapidement. Viser la « neutralité » zéro impact sur l'environnement en termes d'énergie, de carbone, de déchets ou d'eau valent la peine cibles difficiles. Cependant, il devient évident que les bâtiments devront aller au-delà du fait d'avoir peu de conséquences négatives.

L'impact environnemental positif futur décrit la transition de la pratique conventionnelle vers l'architecture durable jusqu'à la conception avec un impact environnemental positif, qualifié par lui de restauration, ou design régénératif. En regardant dans le monde vivant, il peut exister des modèles qui peuvent être imités pour créer et maintenir un environnement bâti résilient et adaptable, et éventuellement améliorer sa capacité à contribuer à restaurer ou régénérer la santé des écosystèmes, le biomimétisme est le mot qui résume le mieux cette démarche nouvelle, qui propose de s'inspirer de la nature pour innover de façon durable.

III.5.1. L'architecture biomimétique

Le biomimétisme est l'émulation de stratégies vues dans le monde vivant comme base de la conception. C'est le mimétisme d'un organisme, son comportement ou tout un écosystème, en termes de formes, de matériaux, de construction méthodes, processus ou fonctions). C'est une source d'innovation, en particulier dans la création d'une architecture plus durable et potentiellement régénératrice.

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

De manière similaire au fonctionnement d'un écosystème par exemple, un bâtiment pourrait être conçu pour: produire de l'énergie et des nutriments (matériaux); air pur et eau; utiliser et transformer les déchets; et stocker le carbone dans un système complexe, adaptatif et cyclique.

À la recherche de plantes ou d'animaux hautement adaptables ou de ceux qui survivent dans des climats extrêmes ou à travers Les changements climatiques peuvent fournir des indications sur la manière dont les bâtiments peuvent ou doivent fonctionner. Examiner les qualités des écosystèmes qui leur permettent d'être résilients peuvent également offrir des pistes potentielles à suivre.

Cette démarche de conception et d'innovation est formalisée selon trois principales étapes au niveau normatif international :

- Analyse de systèmes biologiques
- Abstraction de ces systèmes en un modèle
- Application du modèle à un développement technique ou organisationnel

Ainsi, le biomimétisme est perçu comme un des leviers pour répondre aux enjeux sociétaux tels que :

- La conversion et le stockage des énergies renouvelables (photosynthèse artificielle, courants marins et aériens...);
- La valorisation du carbone via la transformation du CO₂ ou de la biomasse ou sa séquestration via la bio minéralisation ;
- La catalyse chimique (enzymes, atomes abondants, températures et pressions modérées, solution aqueuse...);
- L'élaboration de matériaux multifonctionnels, composites et hiérarchisés ;
- L'élaboration de systèmes de gestion de l'information (intelligence collective, réseaux de neurones) et de communication à haute sensibilité (vision, acoustique, chimique) et à faible consommation énergétiques ;
- Repenser des villes et architectures régénératives qui rendraient des services écosystémiques ;
- Les pratiques agronomiques respectueuses de l'environnement inspirées du fonctionnement des écosystèmes.

III.6. Le changement climatique et l'environnement bâti

Les changements climatiques qui affecteront l'environnement bâti sont nombreux et ont été explorés par plusieurs chercheurs. Les impacts varieront également considérablement en fonction de la qualité locale et de la densité de la construction existante.

L'environnement et les changements climatiques locaux spécifiques. Les impacts que le changement climatique aura sur l'environnement bâti sont à la fois directs et indirects. Les impacts directs affecteront la structure physique réelle de l'environnement construit. Les impacts indirects affecteront le contexte économique, social et environnemental que les constructions fonctionnent et aura donc également des incidences sur l'environnement bâti certains des principaux impacts directs qui apparaissent dans une étude de la recherche internationale¹ ont été résumés dans le tableau 1. Ces les changements climatiques devraient s'intensifier à l'avenir (GIEC, 2001). Ces facteurs suggèrent une réévaluation de l'environnement bâti existant et que la préparation d'adaptations ou d'ajouts peut être nécessaire.

III.6.1. Réponses au changement climatique dans l'environnement bâti

Comme le reconnaissent plusieurs sources, même si toutes les émissions de GES ont été immédiatement arrêtées, le climat les impacts des émissions passées seraient toujours ressentis. O'Connell et Hargreaves (2004) soulignent également qu'en dépit de traités internationaux tels que le protocole de Kyoto, les émissions mondiales de GES augmentent. Est-il donc important que les professionnels de l'environnement bâti puissent non seulement atténuer les causes de changement climatique, mais sont également capables de s'adapter aux impacts.

Les réponses au changement climatique dans l'environnement bâti se divisent en deux grandes catégories:

- Atténuer la cause du changement climatique en réduisant les émissions de GES.
- Adapter l'environnement bâti existant et futur aux impacts prévus du changement climatique.

Il existe déjà de nombreuses technologies et techniques de conception établies capables d'atténuer les causes de changement climatique, adaptation aux impacts ou au changement climatique et travail en vue de rétablir le fonctionnement sain des écosystèmes et des cycles biogéochimiques mondiaux (y compris le cycle du carbone). Estime qu'il est possible de réduire de 80% les émissions de carbone associées à l'environnement bâti. En utilisant les technologies actuelles. Le potentiel des techniques de conception bien connues pour réduire la

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MEDITERRANEENNES

dépendance aux ressources fossiles l'énergie dérivée du combustible, tel que l'architecture solaire passive, sont également bien compris et documenté. Cependant, de nouvelles techniques ou technologies capables d'atténuer les effets du changement climatique et de s'y adapter changement avec d'autres avantages significatifs peut être révélé par une étude attentive de la façon dont les organismes les écosystèmes qu'ils créent sont déjà capables de le faire. Le changement climatique est maintenant largement considéré comme le principal problème qui menace les écosystèmes et l'environnement urbain, le biomimétisme est venu dans ces dernières années pour réduire les émissions de gaz à effet de serre défi auquel l'humanité est confrontée pour ce siècle. Nous pensons que le biomimétisme a un potentiel énorme pour lutter contre certains des principaux problèmes soulevés par ce changement global.

III.6.2. Le Biomimétisme pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

Plusieurs exemples de nouvelles technologies illustrent le biomimétisme axé sur la réduction des émissions de GES, et peuvent être divisés en trois catégories :

La première approche consiste à imiter l'efficacité de la vie organismes et systèmes de transformation des matériaux et de l'énergie de manière à utiliser moins de ressources que ce que font généralement les humains. L'impulsion est qu'en étant plus efficace en énergie, moins de combustible fossile est brûlé et par conséquent, moins de GES sont émis dans l'atmosphère.

La deuxième approche consiste à concevoir de nouvelles méthodes de production d'énergie permettant de réduire la dépendance de l'homme à l'égard des combustibles fossiles, et donc d'empêcher l'émission de GES supplémentaires.

La troisième recherche dans le monde vivant des exemples de la manière dont des organismes ou des processus en leur sein peuvent séquestrer et stocker le carbone. Il en va de même avec l'intention de prévenir les GES émis par les activités humaines d'atteindre l'atmosphère et de provoquer un changement climatique supplémentaire.

III.7. Biomimétisme et alternatives énergétiques

Avec leurs différents niveaux de complexité et d'organisation, les systèmes naturels ont adopté des solutions énergétiques vers lesquelles convergent les stratégies encouragées par les pouvoirs publics :

- Une utilisation efficace : tout système vivant doit, pour sa survie, minimiser ses consommations. Ainsi, l'évolution a sélectionné les comportements, les voies métaboliques ou encore les systèmes de propulsion, les moins coûteux en énergie.

- Des sources renouvelables : la lumière du soleil est l'entrée principale d'énergie de toute la biomasse, puis convertie en éléments organiques par les plantes grâce à la photosynthèse.

- La diversité des ressources (rayonnement solaire pour les plantes, biomasse pour les prédateurs, etc.), des stocks (protéines, graisses...) et la gestion optimisée des réseaux de distribution, afin de s'adapter aux fluctuations environnementales (cycle diurne, saisons...) et à la disponibilité de nutriments.

III.8. Biomimétisme pour la séquestration du carbone

Le cycle du carbone fait partie des facteurs primordiaux pour le développement des êtres vivants sur Terre, puisque la vie est fondée sur l'utilisation de composés à base de carbone. Des programmes de recherche et industriels visent aujourd'hui à reproduire ou utiliser le fonctionnement de ces organismes pour « recycler » ou séquestrer le carbone atmosphérique ou dissout dans l'eau, entre autres :

- La chimie biosourcée, c'est-à-dire basée sur l'exploitation de matières premières issues de la biomasse.

- Les agrocarburants : la production de carburants à partir de la biomasse agricole (agrocarburants).

- L'activité des micro-organismes ou l'imitation de la photosynthèse (photosynthèse artificielle) pour la production d'hydrogène à partir d'eau et de chaînes carbonées à partir du CO₂ atmosphérique grâce à l'énergie solaire.

- L'accélération des processus de biominéralisation, en vue de réaliser du stockage de carbone à l'échelle des temps géologiques.

III.9. Biomimétisme pour la chimie douce et verte

La chimie du vivant est fondée sur des principes hautement conservés entre les espèces :

- Utilisation d'atomes abondants (principalement C, H, O, N, P, S)
- Réactions essentiellement basées sur l'énergie solaire
- Réactions réalisées à basse température et pression
- Réactions réalisées en solution aqueuse
- Recyclage métabolique
- Catalyse enzymatique
- Production de molécules biodégradables et biocompatibles

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MÉDITERRANÉENNES

- Pas de toxicité à long terme

Ces principes, connus depuis des décennies, convergent vers ceux annoncés en 1998 par Paul Anastas et J.C. Warner, à l'origine du concept de « chimie verte ».

De nombreux exemples de chimie bio-inspirée sont décrits dans la littérature, dont la plupart s'appuient sur le métabolisme cellulaire et la catalyse enzymatique, en particulier dans le domaine des biotechnologies.

III.10. Renouveau agricole

L'approche écomimétique consiste à observer et à imiter le fonctionnement des écosystèmes naturels afin de développer les agroécosystèmes durables. Ce n'est pas un type d'agriculture en soi, mais une approche qui se trouve dans différentes tendances agronomiques, y compris l'agriculture biologique et écologiquement intensive. Rapproché est basé sur des données scientifiques sur différents paramètres à optimiser : la biodiversité, la résilience, la productivité, la stabilité, l'auto-organisation.

Six principes définissent ainsi l'approche écomimétique :

- Utiliser les caractères fonctionnels complémentaires pour la productivité et la résilience ;
- Maintenir la fertilité des sols à travers la canopée ;
- Encourager la coopération entre les plantes avec des fonctions différentes ;
- Contenir les infestations de ravageurs à travers les niveaux / réseaux trophiques complexes ;
- Utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques pour la lutte antiparasitaire ;
- Reproduire la succession écologique après une perturbation.

III.11. Écomatériaux bio-inspirés

Les principaux défis concernant la conception des matériaux résident dans la conciliation

- De performances structurales élevées et, compte tenu du cycle de vie du produit ;
- D'un processus de fabrication respectueux de l'environnement en termes de consommation d'énergie et de ressources ;
- Le retrait des produits chimiques toxiques et rares desdits processus de fabrication.

La sélection naturelle des organismes vivants a permis de développer une vaste gamme de stratégies de production de matériaux compatibles avec les contraintes environnementales :

- Structures hiérarchisées ;
- Composites et interfaces ;
- Multifonctionnalité ;
- Croissance adaptative ;
- Autoassemblage ;
- Réactivité à l'environnement ;
- Autoréparation ;
- Fabrication à base d'énergie solaire ou autres ressources énergétiques facilement disponibles ;
- À basse température et pression ;
- Fondée sur un spectre étroit d'éléments abondants et disponibles localement ;
- Capacité à bioséquestrer le CO₂ ;
- Entièrement recyclable et biocompatibles ;
- Trois familles de polymères seulement pour tous les matériaux vivants.

Ces stratégies ont été largement imitées afin de construire des matériaux aux performances physiques élevées, par exemple les céramiques inspirées de l'ormeau, la production de soie d'araignée ou la production sol-gel du verre.

III.12. Économie circulaire

Un écosystème naturel est un système complexe d'interactions entre les organismes vivants et leur environnement. Ces interactions qui s'appuient sur des cycles fermés, des boucles de rétroaction, des redondances, des sous-systèmes sont la clé des performances des écosystèmes, en termes de production de biomasse, et d'efficacité de la gestion des ressources.

Dans les systèmes de production et de consommation humains, la standardisation et la spécialisation de chaînes industrielles linéaires, pour améliorer la performance et le débit, sont les modèles les plus couramment mis en place. Mais, dans de nombreux cas, c'est au prix d'une plus grande vulnérabilité, et une mauvaise optimisation de l'énergie et de l'utilisation des matériaux. Les principes de l'économie circulaire ouvrent une fenêtre pour la conception de systèmes de production territoriaux intégrés, renforçant la coopération et l'adaptabilité. Les approches territoriales, travaillant sur les ressources et les compétences disponibles, permettent la conception de « symbioses industrielles », imitant les interactions et les boucles fermées en place dans les systèmes vivants, conduisant à une augmentation radicale de la productivité et une diminution de la consommation des ressources naturelles.

III.13. Biomimétisme pour inspirer des villes durables

Les stratégies bio-inspirées appliquées à la construction des villes durables visent à repenser la ville comme un écosystème qui devrait fournir, à minima, les mêmes niveaux de performance écologique que l'écosystème natif.

Les stratégies bio-inspirées peuvent être utilisées pour :

- La gestion efficace de l'énergie (réduction de la consommation, augmenter la réutilisation, optimiser le stockage) ;
- Des essais de nouveaux matériaux biosourcés ou bio-inspirés pour la construction ;
- Le recyclage des matériaux, produits et services (économie circulaire, voir ci-dessous);
- La gestion bio-inspirée des flux ;
- De nouveaux concepts de mobilité ;
- La bioremédiation des sols pollués (phyto-remédiation ou myco-remédiation).

Dans cette nouvelle perspective de développement durable, les bâtiments et autres structures artificiels seraient localement adaptés et fonctionneraient comme des organismes ou des écosystèmes naturels, assurant l'accueil de la biodiversité, la capture, la purification et le stockage des eaux de pluie, la conversion de la lumière du soleil en énergie utilisable et celle du dioxyde de carbone en oxygène, la protection des sols contre l'érosion, l'élimination des déchets...

Conclusion

Le climat méditerranéen a subi des fluctuations importantes dues à des causes naturelles. Depuis le début de l'ère industrielle, l'évolution naturelle du climat est perturbée par les émissions mondiales de gaz à effet de serre liées aux activités anthropiques. L'évolution du climat et en particulier les tendances induites sur les valeurs extrêmes des paramètres météorologiques auront des impacts sur la ressource en eau, l'agriculture, la biodiversité, la forêt, mais aussi sur le confort thermique dans les habitations, et par conséquent, sur la demande énergétique ainsi que sur la santé des populations. Et même s'il reste de nombreuses incertitudes concernant l'ampleur du changement climatique, l'évolution et la variabilité du climat génèrent de nouvelles vulnérabilités, exacerbées dans les milieux urbains, souvent localisés en bordure littorale. Estimer ces vulnérabilités, les anticiper, les gérer sont des défis pour les scientifiques, mais aussi pour les architectes qui doivent proposer des solutions adaptées à l'échelle locale afin de construire une ville plus soutenable.

CHAPITRE III : LE BIOMIMÉTISME FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES VILLES MEDITERRANEENNES

Il apparaît que le biomimétisme a un fort potentiel en termes d'adaptation au changement climatique. Elle peut alors être une opportunité et une barrière essentielle face au développement de la menace de la géo-ingénierie. L'incorporation d'une certaine compréhension du vivant dans le design des bâtiments, outre les bienfaits physiques et psychologiques impactant positivement le bien-être et la productivité de leurs occupants, permettrait d'avancer vers une création d'un patrimoine bâti plus durable et régénératif c'est-à-dire notamment plus résilient.

Introduction

Après avoir compris la thématique nous allons commencer l'étape d'investigation, en débutant par la présentation de l'aire d'étude, c'est une approche contextuelle à travers laquelle nous avons essayé d'effectuer un examen détaillé de la macro au micro : en premier lieu, nous avons analysé les deux sites d'intervention la ville de Marseille au rive nord de la méditerrané et la ville de Jijel au rive sud, en passant de la ville jusqu'au quartier dans lequel la simulation sera concrétisée pour argumenter le choix de cette localisation, puis à partir de cela nous avons exécuté une analyse des deux échantillons choisis.

IV.1. Cas d'étude N°1 : Quartier Casino, Jijel, Algérie

IV.1.1. Présentation de la wilaya de Jijel

IV.1.1.1. Situation et limites

La Wilaya de Jijel est située au Nord-est de l'Algérie, comprise entre les méridiens 5° 25 et 6° 30 Est de Greenwich et entre les parallèles 36° 10 et 36°50 hémisphère nord et possède une façade maritime de 120 Km de façade littorale, elle est limitée :

- Nord par la mer Méditerranée.
- Sud-est par la Wilaya de Constantine.
- Sud-ouest par la Wilaya de Sétif.
- Est par la wilaya de Skikda

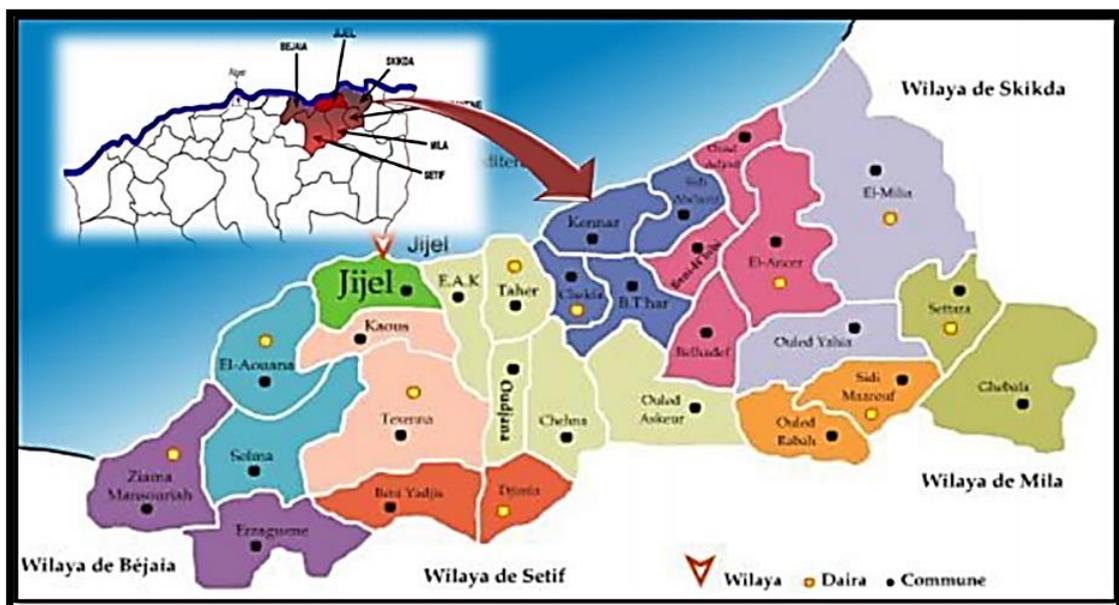


Figure IV.1 : Situation géographique de la wilaya de Jijel et ses limites (Source : wikipedia)

IV.1.2. Présentation du POS N°07 de quartier Casino

IV.1.2.1. Situation et limites

Le POS N°07 se situe à la sortie est de la ville de Jijel, sous forme d'une bande littorale située entre la mer et la RN 43. Il est limité au nord par la mer méditerranée, au sud par la gare routière, à l'est par la RN 43 et à l'Ouest par le POS N° 06.



Figure IV.2 : Vue aérienne sur le POS N°7 Casino (Source : Google Earth)

IV.1.2.2 Accessibilité

Le site est accessible depuis : le centre-ville, la gare et l'entrée est avec une possibilité d'accessibilité maritime.

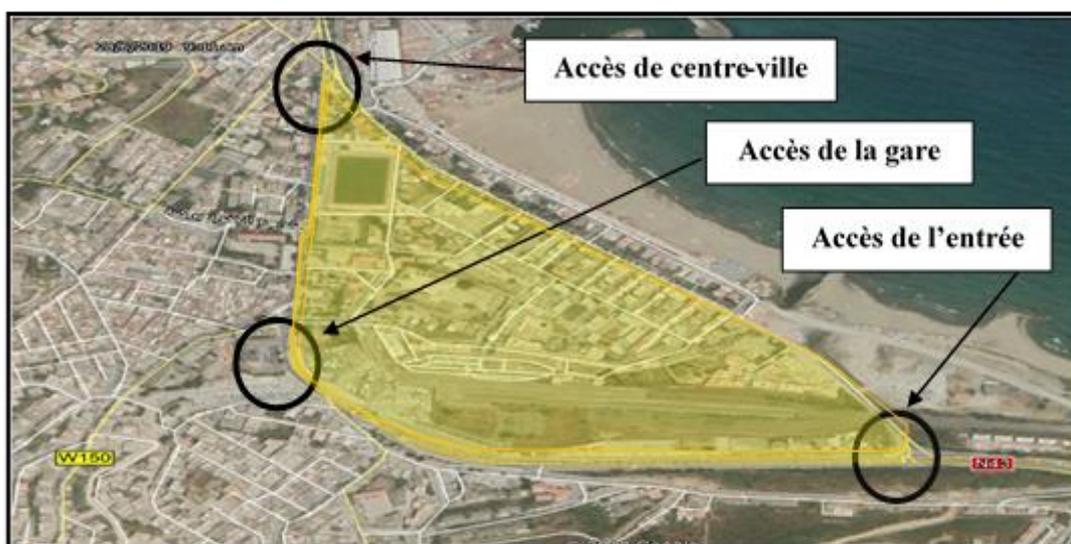


Figure IV.3 : Vue aérienne sur l'accessibilité de site (Source : Google Earth)

IV.1.2.4. Topographie

Le périmètre de POS 7 est caractérisé par un terrain pratiquement plat avec des pentes douces qui varient entre 0 et 5%.



Figure IV.4 : Coupes topographique du site d'étude (Source : Google Earth)

IV.1.3. Présentation de l'échantillon choisi

IV.1.3.1. Situation et limites

S'agissant de l'îlot étudié, nous avons retenu la partie sud-ouest de quartier Casino, cette zone qui se constitue de logements d'habitats collectifs, se compose de (11) bâtiments, dont quatre (04) surélevés sur une hauteur de R+5 et sept (07) ayant une hauteur de R+4. Elle est limitée au nord est par les anciens bâtiments de France, au nord-ouest par les maisons individuelles, au sud-ouest par le lycée Kaoula tunes, au sud est par les bâtiments EPLF.



Figure IV.5 : Vue aérienne sur l'îlot choisi (Source : Google Earth)



Figure IV.6 : Vue aérienne sur la partie choisie de l'îlot (Source : Google Earth)

IV.1.3.2. Critères de choix

- L'implantation quelconque des bâtiments ne semble pas présenter une disposition conçue dans l'objectif de donner aux espaces de site une configuration claire, significative et adapté au climat. De là cette disposition des bâtiments a engendré des espaces quelconques, de par leurs formes, leurs positions ainsi que leurs surfaces, ils dénotent par ailleurs une absence de maîtrise de l'aménagement et participent à la dépréciation de la qualité de l'environnement. L'ambiance dans les espaces extérieurs est déterminée par un certain nombre de facteurs tel que l'absence de la végétation qui agit comme un véritable climatiseur urbain.

- Sa proximité de la mer méditerranéenne. Il est soumis à un climat méditerranéen avec des variations saisonnières marquées par Surchauffe des températures en été chaud, un hiver froid et taux d'humidité très élevé.

- Sa situation dans le centre-ville connaissant la formation de l'îlot de chaleur urbain.



Figure IV.7 : Vues des bâtiments collectifs de Casino (Source : Auteur)

IV.2. Microclimat de Jijel

La région de Jijel se caractérise par un climat méditerranéen, elle fait partie du littoral marin (zone A), pluvieuse et froide en hiver, chaude et humide en été.

IV.2.1. Températures de l'air

La saison très chaude dure 3 mois, du 23 juin au 24 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 27 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 11 août, avec une température moyenne maximale de 30 °C et minimale de 22 °C.

La saison fraîche dure 4 mois, du 28 novembre au 29 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 18 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 19 janvier, avec une température moyenne minimale de 8 °C et maximale de 16 °C.

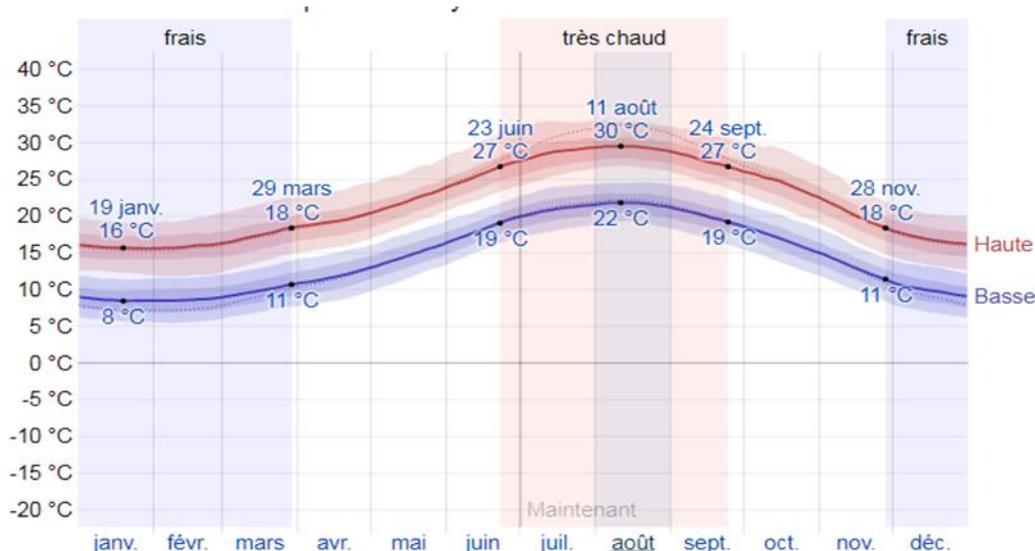


Figure IV.8 : Température moyenne maximale et minimale de la ville de Jijel
(Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.2.2. Humidité

Le niveau de confort est estimé selon l'humidité sur le point de rosée, car il détermine si la transpiration s'évaporera de la peau, causant ainsi un rafraîchissement de l'organisme. Les points de rosée plus bas sont ressentis comme un environnement plus sec et les points de rosée plus haut comme un environnement plus humide. Contrairement à la température, qui varie généralement considérablement entre le jour et la nuit, les points de rosée varient plus lentement. Ainsi, bien que la température puisse chuter la nuit, une journée lourde est généralement suivie d'une nuit lourde.

La ville de Jijel connaît des variations saisonnières extrêmes en ce qui concerne l'humidité perçue.

La période la plus lourde de l'année dure 4,5 mois, du 2 juin au 16 octobre, avec une sensation de lourdeur, oppressante ou étouffante au moins 21 % du temps. Le jour le plus lourd de l'année est le 13 août, avec un climat lourd 82 % du temps.

Le jour le moins lourd de l'année est le 11 décembre, avec un climat lourd quasiment inexistant.

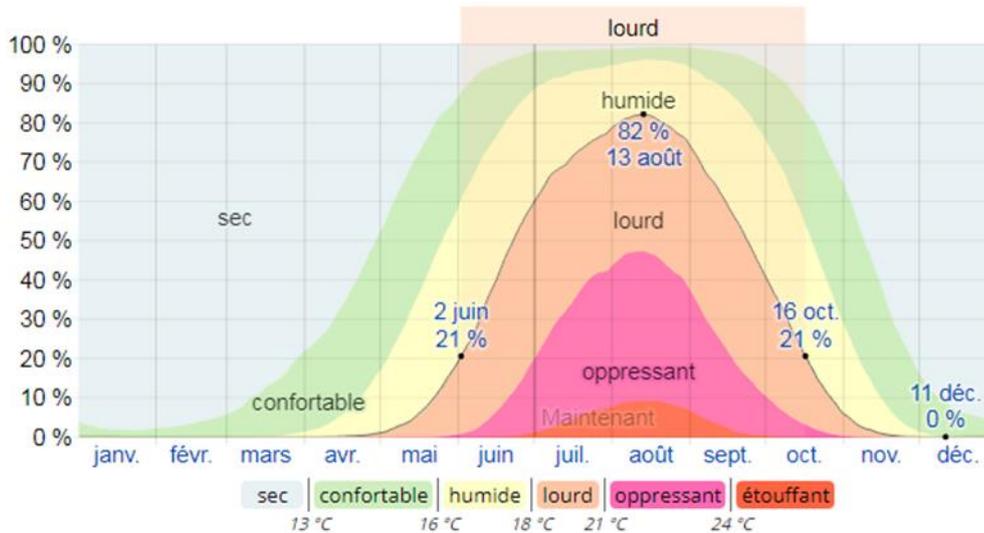


Figure IV.9 : Pourcentage de temps passé dans divers niveaux de confort selon l'humidité, catégorisés par le point de rosée (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.2.3. Le Vent

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 Mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Jijel connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 5,4 mois, du 30 octobre au 12 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 14,1 kilomètres par heure. Le jour le plus venteux de l'année est le 20 décembre, avec une vitesse moyenne du vent de 17,4 kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure 6,5 mois, du 12 avril au 30 octobre. Le jour le plus calme de l'année est le 6 août, avec une vitesse moyenne horaire du vent de 10,8 kilomètres par heure.

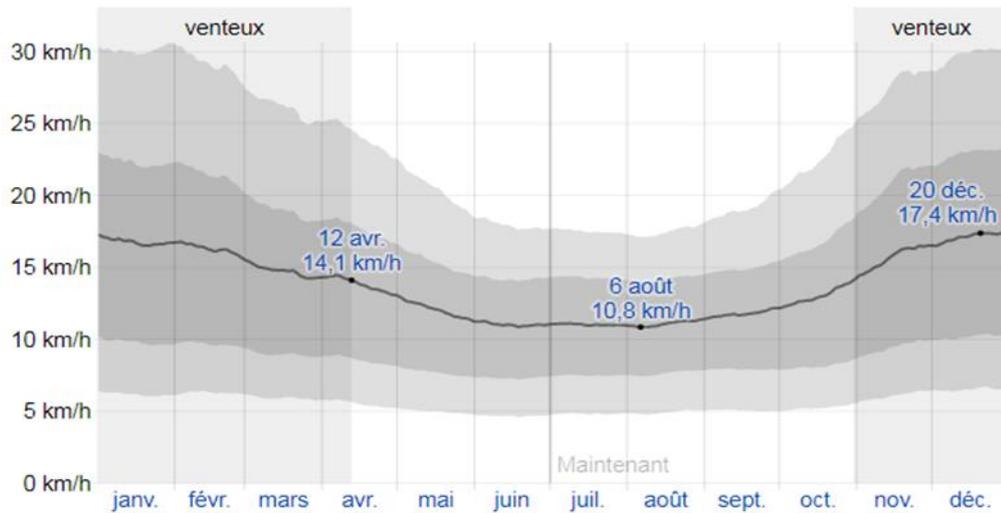


Figure IV.10 : Vitesse moyenne du vent (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.2.4. Les précipitations

Le jour de précipitation est un jour au cours duquel on observe une accumulation d'eau ou mesurée en eau d'au moins 1 millimètre. La probabilité de jours de précipitation à Jijel varie au cours de l'année.

La saison connaissant le plus de précipitation dure 8,2 mois, du 10 septembre au 15 Mai, avec une probabilité de précipitation quotidienne supérieure à 16 %. La probabilité de précipitation culmine à 29 % le 17 décembre.

La saison la plus sèche dure 3,8 mois, du 15 mai au 10 septembre. La probabilité de précipitation la plus basse est 3 % le 15 juillet.

Pour les jours de précipitation, nous distinguons les jours avec pluie seulement, neige seulement ou un mélange des deux. En fonction de ce classement, la forme de précipitation la plus courante au cours de l'année est de la pluie seulement, avec une probabilité culminant à 29 % le 17 décembre.

CHAPITRE IV : PRESENTATION DU CAS D'ETUDE



Figure IV.11 : Le pourcentage de jours durant lesquels divers types de précipitation sont observés, excepté les quantités traces (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.3. Microclimat de Jijel (Période du 21 juin 2018)

IV.3.1. Température, humidité, point de rosée

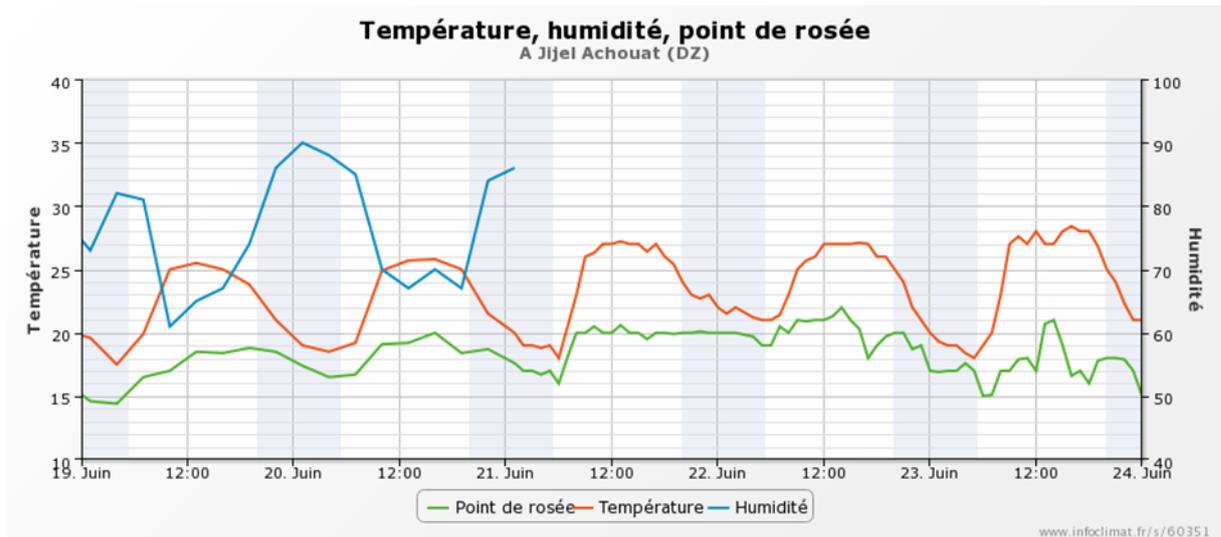


Figure IV.12 : Moyennes mensuelle de la température, l'humidité, point de rosée absolue, pour la du 21 juin période 2018 (Source : Station météorologique El-Achouat de Jijel)

IV.3.2. Le vent

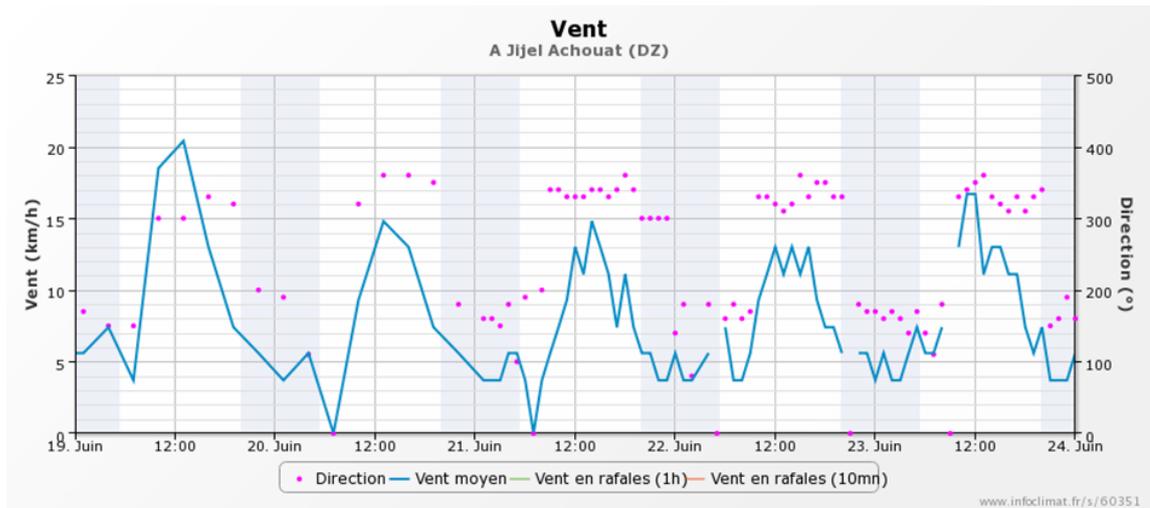


Figure IV.13 : La vitesse annuelle des vents pour la du 21 juin période 2018 (Source : Station météorologique El-Achouat de Jijel)

IV.3.3. Les précipitations

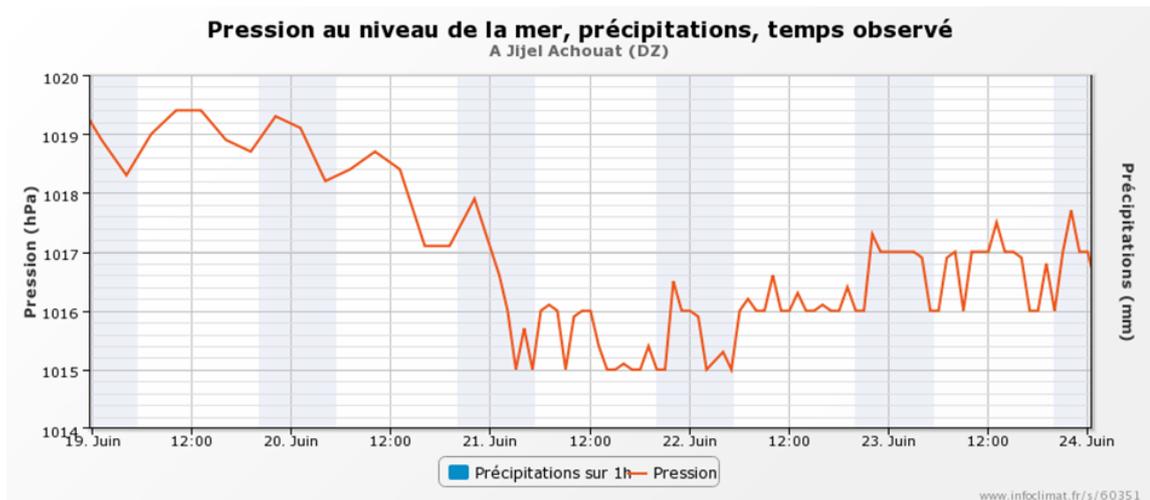


Figure IV.14 : Pluviométrie et pression au niveau de la mer pour la du 21 juin période 2018 (Source : Station météorologique El-Achouat de Jijel)

IV.4. Cas d'étude N°2 : Quartier de Canet, Marseille, France

IV.4.1. Présentation de la ville de Marseille

Marseille est une ville méditerranéenne situé au sud-est de la France, chef-lieu du département des Bouches-du-Rhône et de la région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur.

- Marseille est bordée par la Méditerranée à l'ouest.
- enserrée par les massifs de l'Estaque et de l'Étoile au nord.
- le massif du Garlaban à l'est.

- le massif de Saint-Cyr et le mont Puget au sud-est.
- le massif de Marseilleveyre au sud.

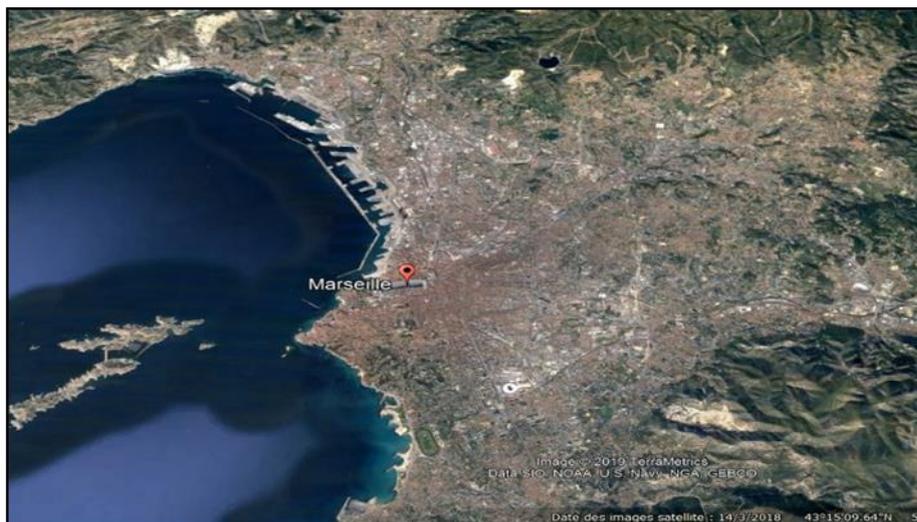


Figure IV.15 : Vue aérienne sur la ville de Marseille (Source : Google Earth)

IV.4.2. Présentation de quartier Le Canet

Le quartier Canet est situé au 14^e arrondissement de Marseille, dans une zone arrière portuaire, à l'époque endroit stratégique pour le transport maritime industriel, jusqu'au transfert de ce dernier vers le port de Fos sur mer. Ce qui a conduit le Canet vers un « délaissement » progressif par les pouvoirs publics.



Figure IV.16 : Vue aérienne sur le quartier de Canet (Source : Google Earth)

Initialement constitué de grandes propriétés verdoyantes (bastides) et de chemins ruraux, le paysage du Canet a subi l'industrialisation et la réalisation des grands axes de circulation entraînant des ruptures écologiques, sociales et économiques, Canet a une situation particulière, enclavement et fragmentation.

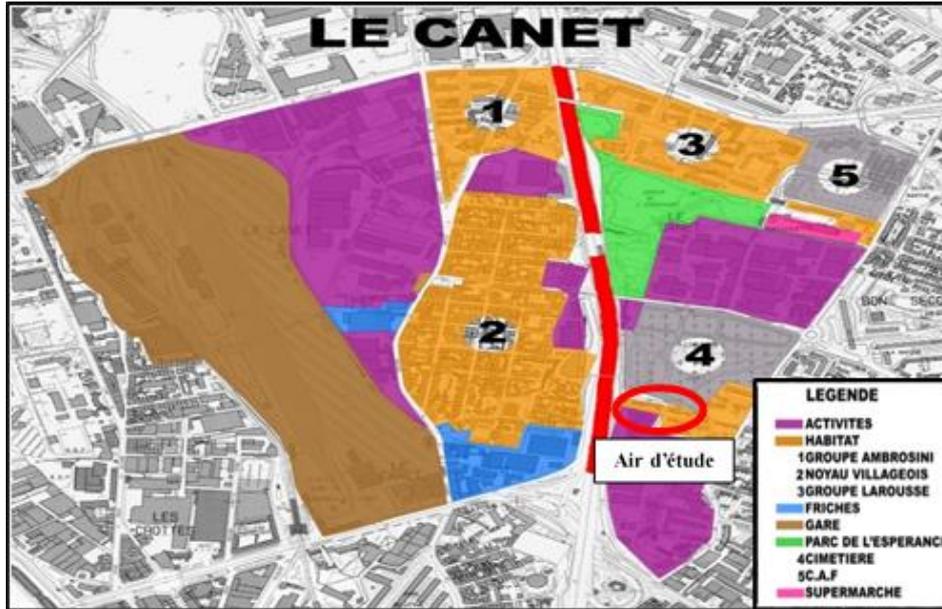


Figure IV.17 : Quartier de Canet (Source : travail pratique de SAFRI Saïd)

IV.4.3. Présentation de l'échantillon choisi

Nous avons choisi comme assiette d'étude un îlot qui contient des logements d'habitat collectif (cité deux quartier) afin d'effectuer notre simulation et notre intervention. Il se compose de (09) bâtiments en R+3.



Figure IV.18 : Vues aériennes sur l'îlot choisi (Source : Google Earth)

IV.4.3.1. Critères de choix

- La forme d'urbanisation qui rassemble ou celle de l'Algérie nous pousser d'étudier une autre ville méditerranéenne qui a un cachet urbain commun.
- A la ville de Marseille, les conséquences du changement climatique sont particulières du fait des interactions entre la surface urbaine et la couche limite atmosphérique la morphologie de la ville peut en effet modifier certains paramètres climatiques, En milieu urbanisé, l'ambiance climatique des rues, des places, des parcs, résulte non seulement du climat local mais aussi des modifications que l'ensemble des édifices environnants et des aménagements engendre (perturbation du régime d'ensoleillement, modification du rayonnement du sol et des parois, modification de l'exposition aux vents dominants, production de chaleur de source anthropique).
- La disposition des blocs des bâtiments d'échantillon choisis suit une urbanisation classique des formes cubique plus ou moins fonctionnelle.
- Sa situation géographique à la région sud de Provence-Alpes-Côte d'Azur, la zone la plus vulnérable au changement climatique en France.

IV.5. Microclimat de Marseille

IV.5.1. Température

La saison chaude dure 2,9 mois, du 15 juin au 10 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 25 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 5 août, avec une température moyenne maximale de 29 °C et minimale de 20 °C.

La saison fraîche dure 3,9 mois, du 18 novembre au 14 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 15 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 15 janvier, avec une température moyenne minimale de 4 °C et maximale de 11 °C.

CHAPITRE IV : PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

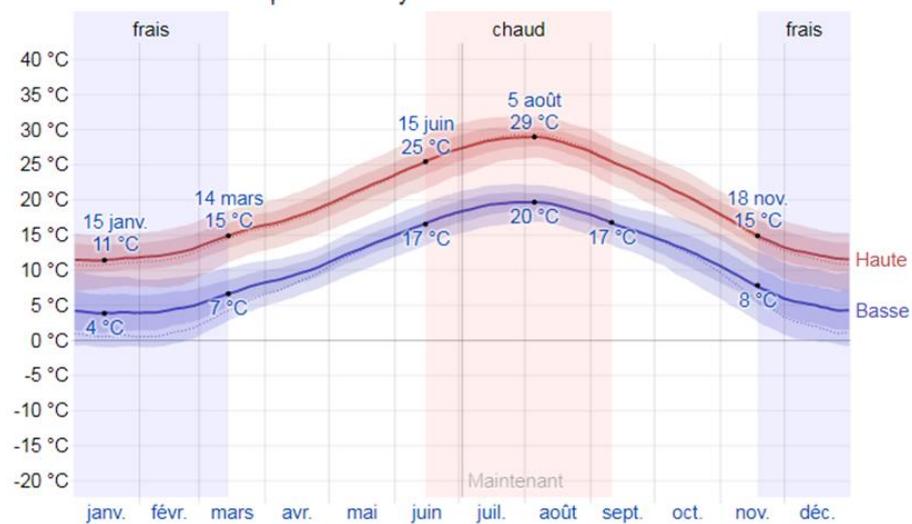


Figure IV.19 : Température moyenne maximale et minimale de la ville de Marseille (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.5.2. Humidité de l'air

Marseille connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne l'humidité perçue.

La période la plus lourde de l'année dure 3,3 mois, du 18 juin au 28 septembre, avec une sensation de lourdeur, oppressante ou étouffante au moins 6 % du temps. Le jour le plus lourd de l'année est le 6 août, avec un climat lourd 26 % du temps. Le jour le moins lourd de l'année est le 8 décembre, avec un climat lourd quasiment inexistant.

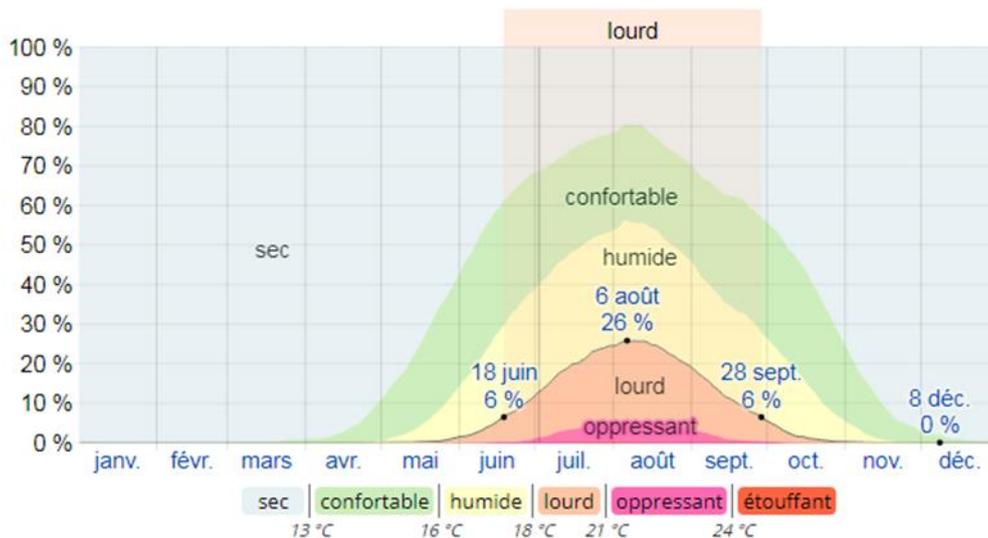


Figure IV.20 : Pourcentage de temps passé dans divers niveaux de confort selon l'humidité, catégorisés par le point de rosée. (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.5.3. Les vents

La vitesse horaire moyenne du vent à Marseille connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 6,8 mois, du 7 octobre au 30 avril, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 19,0 kilomètres par heure. Le jour le plus venteux de l'année est le 19 février, avec une vitesse moyenne du vent de 21,4 kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure 5,3 mois, du 30 avril au 7 octobre. Le jour le plus calme de l'année est le 11 août, avec une vitesse moyenne horaire du vent de 16,6 kilomètres par heure.

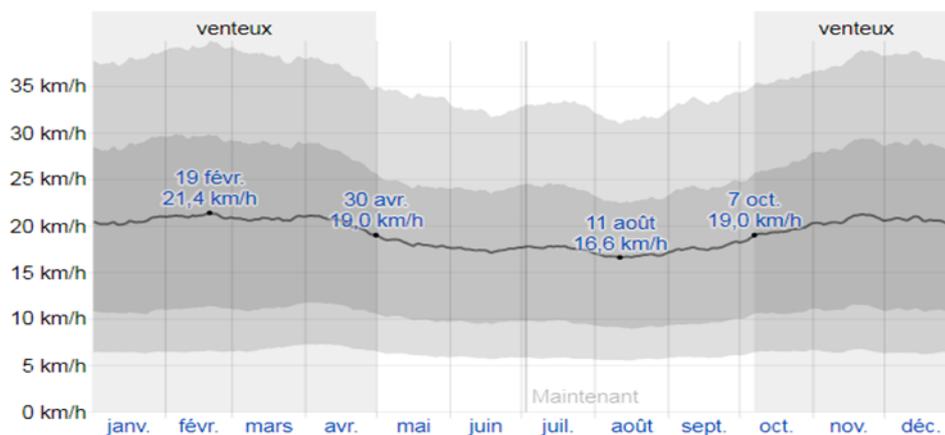


Figure IV.21 : Vitesse moyenne du vent (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.5.4. Les précipitations

La saison connaissant le plus de précipitation dure 8,2 mois, du 6 septembre au 14 mai, avec une probabilité de précipitation quotidienne supérieure à 15 %. La probabilité de précipitation culmine à 25 % le 25 octobre.

La saison la plus sèche dure 3,8 mois, du 14 mai au 6 septembre. La probabilité de précipitation la plus basse est 5 % le 13 juillet.

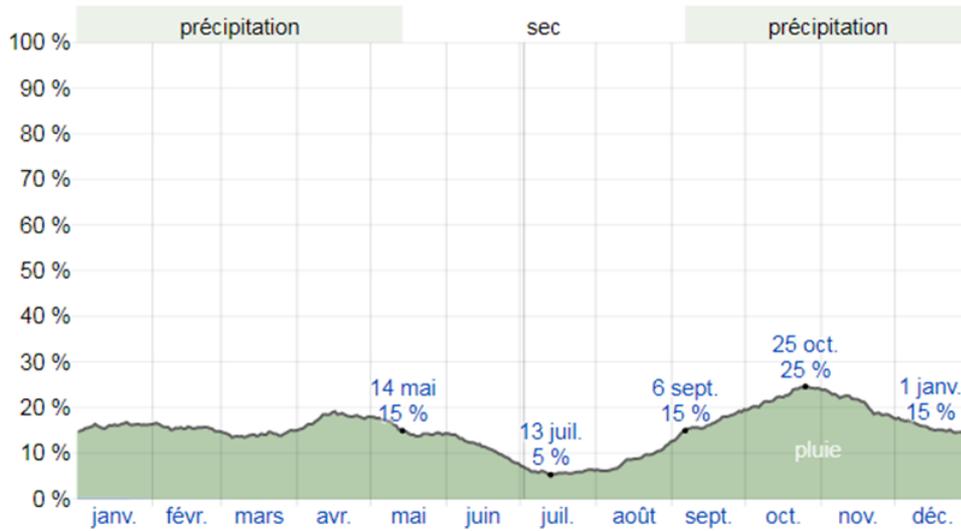


Figure IV.22 : Le pourcentage de jours durant lesquels divers types de précipitation sont observés, excepté les quantités traces (Source : <https://fr.weatherspark.com>)

IV.6. Microclimat de Marseille (Période du 21 juin 2018)

IV.6.1. Température, humidité, point de rosée

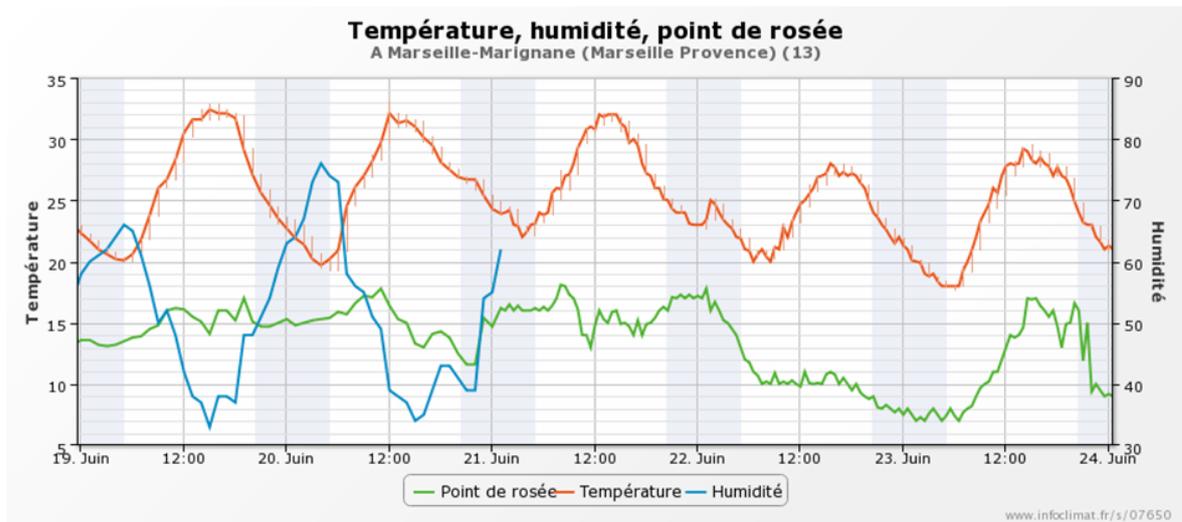


Figure IV.23 : Moyennes mensuelle de la température, l'humidité, point de rosée absolue, pour la du 21 juin période 2018 (Source : Station Marseille- Marignane)

IV.6.2. Le vent

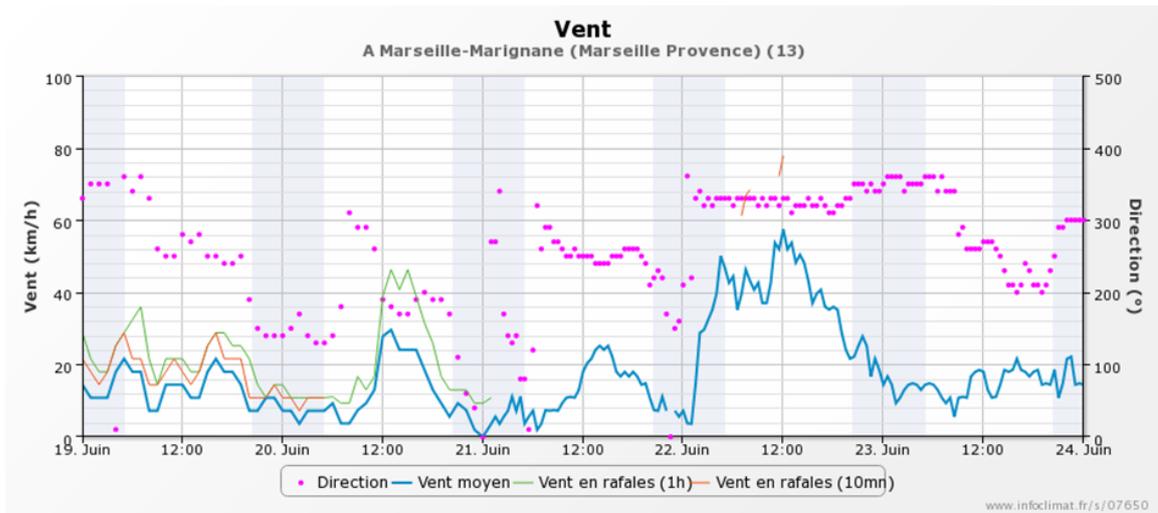


Figure IV.24 : La vitesse annuelle des vents (Source : Station météorologique Marseille- Marignane)

IV.6.3. Les précipitations

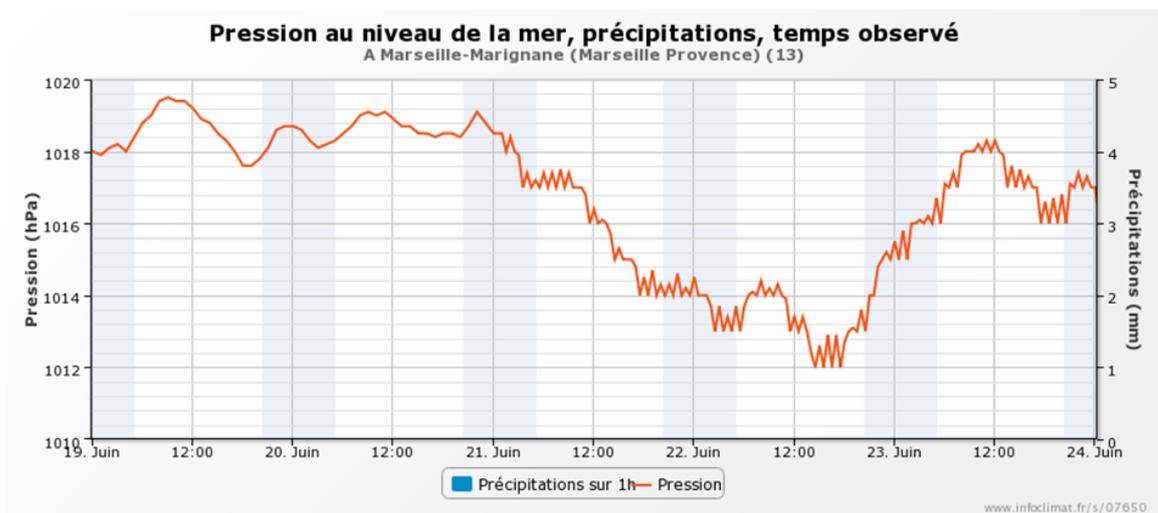


Figure IV. 25 : Pluviométrie et pression au niveau de la mer pour la du 21 juin période 2018 (Source : Station Marseille- Marignane)

Conclusion

Dans ce chapitre nous allons présenter les deux cas d'étude concernant la ville de Jijel en Algérie et la ville de Marseille en France, qui ont été choisies comme assiettes d'étude. Jouant d'une situation stratégique et dotée d'un climat méditerranéen, ces dernières, par leurs configurations spatiales et géographiques, sont considérées comme des milieux particulièrement vulnérables aux changements climatiques. Les conséquences des variations climatiques en Méditerranée suscitent l'intérêt scientifique, Ces critères vont soutenir notre travail de recherche qui tient compte du climat et ses problèmes dans cette région.

Introduction

Ce chapitre, dédié à la simulation numérique, explique la méthodologie de travail suivie et l'outil utilisé pour le recueil des résultats afin de répondre à la problématique posée et les hypothèses suggérées, mais aussi pour mettre en évidence de nouveaux éléments qui pourraient apporter un plus dans notre recherche.

Au cours de notre travail de recherche, nous avons rencontré beaucoup de difficultés sur le plan de disponibilité des outils de la simulation dans le domaine du biomimétisme, et ce à cause de la complexité des formes biomimétiques. En matière de recherche comme d'enseignement supérieur, aucune cartographie complète des laboratoires, des structures universitaires ou des formations impliquées dans le biomimétisme n'a été établie à ce jour. Ce qui rend notre travail pratique difficile à réaliser. On a perdu beaucoup de temps dans la recherche d'un logiciel de simulation approprié. Au début, notre choix portait sur Solène microclimat qui est un outil de simulation numérique permettant de modéliser le climat urbain à l'échelle du quartier. Il est développé au CRENAU, laboratoire de l'école d'architecture de Nantes, cet outil permet de poser les questions de l'aménagement urbain. Malheureusement, et suite aux divers contacts avec ce laboratoire, le résultat était en vain. Car, les responsables de ce laboratoire nous confirmaient que cet outil n'est pas disponible dans les sites pour le télécharger. Enfin, et malgré ses limites sur le plan interface géométrique, le logiciel sur ENVI-met version 4.4 a été choisi. Ce logiciel nous permettait d'avoir des résultats rapprochés à la réalité.

V.1. L'outil ENVI-met (Environmental Meteorology)

V.1.1. Présentation du logiciel ENVI-met

Développé par M. Bruse dès 1995 au sein de l'Université de la Ruhr à Bochum, ENVI-met 4 demeure le seul logiciel permettant une simulation microclimatique réaliste à l'échelle du quartier grâce à sa possibilité d'intégrer un grand nombre de phénomènes physiques comme l'écoulement de l'air entre les bâtiments, l'impact de la végétation et des surfaces d'eau sur le microclimat, et les échanges entre les surfaces du sol et les murs des bâtiments. L'effet de la bioclimatologie et le dégagement des polluants est aussi intégré dans le modèle.

Sebastian Huttner dans sa thèse de doctorat (Huttner, 2012) présente les différentes exigences pour une modélisation précise de la physique de la couche limite d'une zone urbaine :

- La taille de la grille de discrétisation spatiale du modèle doit être relativement petite pour intégrer les bâtiments dans le calcul. Ainsi, la taille de la grille doit être inférieure ou égale à 10 m.
- L'équilibre énergétique de toutes les surfaces doit être pris en considération dans le modèle.
- La simulation des propriétés physiques et physiologiques des plantes doit être incluse.
- Le calcul des processus atmosphériques doit être pronostique et transitoire.

Le modèle tridimensionnel ENVI-met est parmi les rares modèles qui prennent en considération toutes ces exigences et celui-ci fournit des résultats dont la précision a été confrontée à plusieurs reprises à des résultats expérimentaux.

Ce modèle tridimensionnel permet de modéliser une scène urbaine avec une résolution spatiale ajustable allant de 0.5 à 10 m et un pas de temps variant entre 1 et 10 secondes pour une durée spécifique de 24 à 48 heures (Maleki, et al., 2014). Les principaux systèmes formant le modèle sont : le sol, la végétation, l'atmosphère et le bâtiment.

ENVI-met permet la modélisation de différents types de sols pour chaque cellule de la grille. Pour les sols minéralisés, le transfert de chaleur est seulement pris en compte alors que pour les sols naturels les transferts de chaleur et de vapeur d'eau sont pris en compte dans la modélisation. Le flux radiatif net, le flux turbulent de chaleur et de vapeur, et la conduction de chaleur dans le sol, permettent de calculer la température de surface de sol. Le modèle lui-même permet de déterminer l'albédo du sol naturel en fonction de l'angle solaire incident et de la quantité de l'eau dans la couche supérieure du sol.

Concernant la végétation, le logiciel permet de modéliser différents types d'arbres en trois dimensions tout en calculant le bilan de masse et d'énergie pour chaque cellule de la grille de végétation. De même, ENVI-met considère dans sa modélisation, l'ombre portée des arbres et le coefficient d'atténuation des rayonnements solaires qui dépend essentiellement de la densité de la surface des feuilles.

Toutefois, ce logiciel présente tout de même deux inconvénients évidents. Tout d'abord, il ne permet pas d'effectuer de bilan énergétique des bâtiments. Le second point faible d'ENVI-met 4 est que le temps de calcul est extrêmement grand. En effet, on a besoin plus qu'une douzaine de jours pour le calcul d'une journée type à l'aide d'un ordinateur puissant. De même ENVI-met ne permet pas de prendre en considération les apports de chaleur liés aux activités humaines (chaleur des moteurs, chaleur rejetée par les splits...)

V.1.2. Modèle physique décrit par ENVI-met

Les principales variables calculées par ENVI-met sont : la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité de l'air, la température et l'humidité du sol, la turbulence, les flux radiatifs, la dispersion des gaz et des particules dans l'environnement.

Il permet l'étude et la comparaison, à une échelle microclimatique, des surfaces artificielles (bâtiments) et de la végétation dans des rues, dans des cours privées ou dans des espaces verts publics. Ce modèle tridimensionnel résout les équations classiques en fonction du temps, et simule les modifications « fortes » du vent (limites solides), comme celles dues aux murs, et les modifications plus « faibles » (barrières poreuses), comme celles dues à la végétation. Il est composé d'un **modèle atmosphérique** (équations de Navier-Stokes en condition non-hydrostatiques et incompressibles, approximation de Boussinesq, modèle de clôture de turbulence d'ordre 1.5), d'un **modèle de sol** (température, humidité, eau), d'un **modèle de surface** (bâtiments) et d'un **modèle de végétation**. La Figure V.1 illustre les sous-modèles d'ENVI-met utilisés pour le calcul de ces variables.

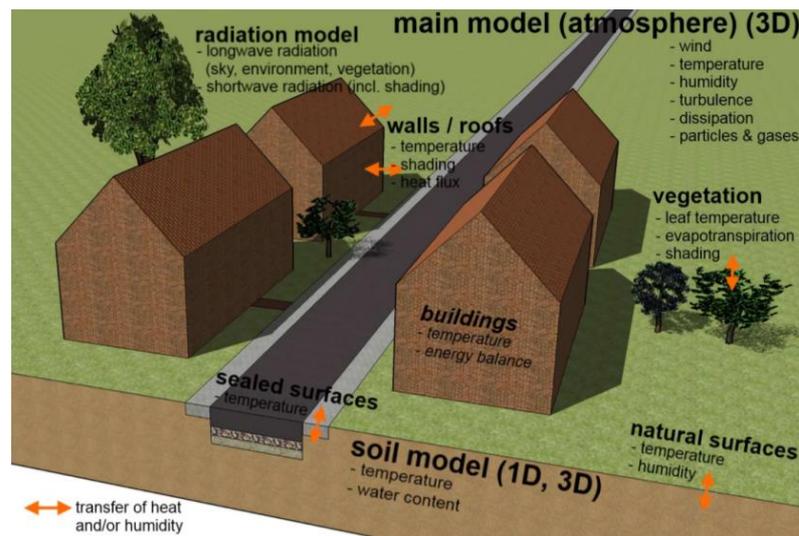


Figure V.1 : Plan montrant les sous-modèles d'ENVI-met (Source : Huttner, 2012)

V.1.3. Avantages identifiés de la version 4.4 d'ENVI-met

La version 4.4 d'ENVI-met présente plusieurs avantages et des améliorations par rapport aux versions précédentes.

Un nouveau modèle de calcul de la température des façades et des toitures a été développé dans cette version d'ENVI-met. Contrairement à l'ancien modèle qui se base sur le bilan énergétique en régime permanent, ce modèle appelé le « modèle des 3 nœuds » permet le calcul énergétique en régime transitoire. Ce nouveau modèle se base sur les travaux de (Terjung & O'Rourke, 1980) qui ont montré que le modèle transitoire donne des résultats plus

CHAPITRE V : METHODE D'INVESTIGATION

fiables que ceux du régime permanent. Le tableau de la Figure V.2 montre la différence entre les deux versions d'ENVI-met dans le calcul de la température des façades/toitures. Les propriétés physiques qui sont prises en considération dans le calcul du nouveau modèle sont : la réflectivité, l'absorption, la transmission, l'émissivité, le coefficient de transfert de chaleur, la capacité calorifique spécifique et l'épaisseur du mur.

	V 3.1	V 4.4
Reflectivity	✓	✓
Absorption	✓	✓
Transmission	✗	✓
Emissivity	✗	✓
Heat transfer coefficient	✓	✓
Specific heat capacity	✗	✓
Thickness of wall	✗	✓
Variable temperature inside building	✗	✓
Set properties for each façade element separately	✗	✓

Figure V.2 : Tableau montrant la différence de calcul de la température des façades entre la version 3.1 et la version 4.4 d'Envimet (Source : Huttner, et al., 2009)

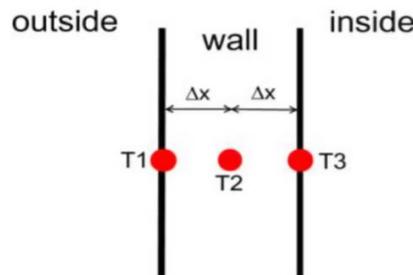


Figure V.3 : Schéma du modèle des 3 nœuds (Source : Huttner, 2012)

D'autre part, la version 4.4 présente un modèle complet 3D alors que les versions précédentes utilisent un modèle 2.5D c'est-à-dire pour chaque cellule de la grille on peut fixer seulement les valeurs des couches inférieures et supérieures d'un bâtiment ou d'une plante. Ainsi l'élément ou le bâtiment étudié sera présenté avec plus de précision ; par exemple chaque façade peut avoir ses propres matériaux de constructions et l'architecture des bâtiments sera plus proche de la réalité, en intégrant les balcons et les fenêtres. Le modèle tridimensionnel des plantes est aussi intégré à la place des simples plantes colonnes.

ENVI-met 4.4 offre aussi une nouvelle fonction appelé « Simple paroi » ou « Single Wall » en anglais. Cette fonction permet d'ajouter dans la modélisation un mur simple ou un

obstacle qui ne font pas partie des bâtiments du modèle. Ces murs ont les mêmes propriétés physiques des murs ordinaires, transmettent des rayonnements et font des obstacles qui bloquent le vent. La principale différence est que ces murs sont très fins et non isolés, ils présentent ainsi une distribution homogène de température.

Enfin, ENVI-met version 4.4 permet de forcer les valeurs des conditions aux limites du modèle. L'importance de ce forçage est la possibilité de comparer les résultats des simulations numériques avec des données météorologiques mesurées. (Huttner, 2012) indique que les paramètres qui peuvent être forcés sont : la vitesse horizontale du vent, la direction du vent, la température potentielle de l'air, l'humidité spécifique, les flux radiatifs à courtes longueurs d'ondes directs et diffus, les rayonnements à grandes longueurs d'ondes entrant, la couverture nuageuse et la concentration des particules et des gaz.

Pour les variables atmosphériques ayant un profil vertical comme la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité spécifique, il suffit de préciser les valeurs au sol ($z = 0$) et au limite supérieure ($z = 2500$ m). Ensuite ENVI-met permet par extrapolation de déterminer les valeurs des variables à différentes hauteurs de la grille.

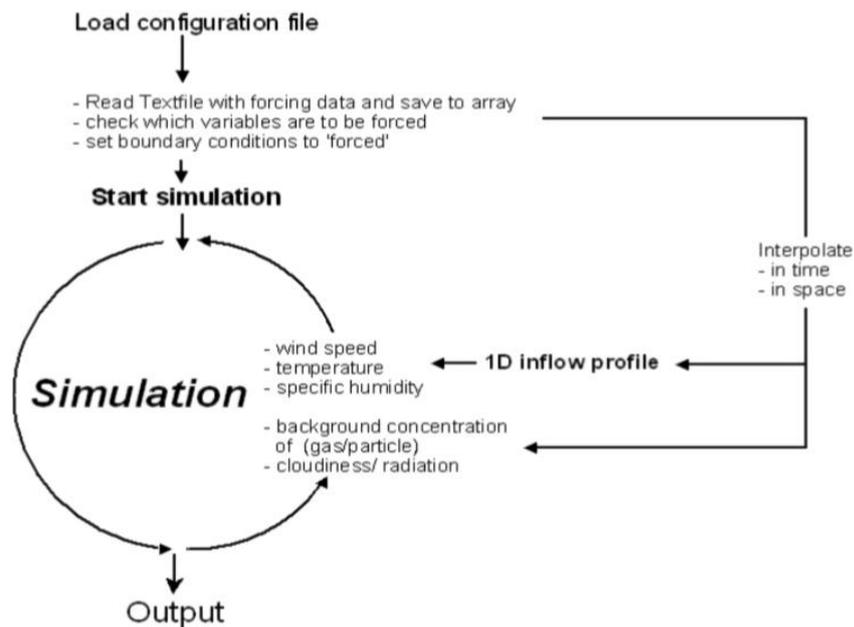


Figure V.4 : Schéma montrant l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met (Source : Huttner, 2012)

V.2. Déroulement de la simulation

La modélisation et la simulation microclimatique ont été réalisées pour une journée chaude de l'été. Elles se sont déroulées pendant la journée du 21/06/2018 la plus longue journée de l'année. Nous avons effectué une simulation de deux cas d'étude précédemment

CHAPITRE V : METHODE D'INVESTIGATION

présentés dans le 4^{ème} chapitre (Cas d'étude N°1 : Casino, Jijel, Algérie et Cas d'étude N°2 : Le Canet, Marseille, France), dans le but est de vérifier l'évolution de certains paramètres. De ce fait, ces deux îlots choisis ont été soigneusement dessinés suivant une échelle convenable. La modélisation géométrique est réalisée à la main par la saisie de pixels (x, y et z); la maille définie est de 40x40x20 pixels dont chaque pixel correspond à une résolution réduite 3m x 3m x 3m (dx=3 m, dy=3m et dz=3m). Les dimensions et les hauteurs des constructions ainsi que la végétation ont été reportées afin de pouvoir reproduire la réalité du terrain. Les paramètres obtenus sont : la vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité relative. Ces paramètres sont déduits par ENVI-met et lus par Leonardo. Ce sont les conditions générales dans lesquelles la simulation a été élaborée.

Tableau V.1 : Paramètres utilisés pour le lancement de la simulation

Situation	Casino, Jijel, Algérie Latitude : 36.82 °N Longitude : 5.77 °E	Le Canet, Marseille, France Latitude : 43.32 °N Longitude : 5.38 °E
Journée de simulation	Le 21 juin 2018	Le 21 juin 2018
Durée de simulation	De 10:00h à 22:00h (12 heures)	De 10:00h à 22:00h (12 heures)
Vitesse du vent à une altitude de 10 m	4 m/s	5 m/s
Direction du vent	340° (par rapport aux données introduites dans le logiciel)	275° (par rapport aux données introduites dans le logiciel)
Température initiale de l'atmosphère	27.20 °C	26.40 °C
Humidité relative à une altitude de 2m	73%	79%

Les quatre scenarios sont décrits là-dessous avec leurs fichiers d'entrée (.IN) :

V.2.1. Cas d'étude N°1 : Casino, Jijel, Algérie

V.2.1.1. Scénario N°1 (Cas de base)

Le cas de base correspond à un cas de référence qui maintient la programmation initiale d'îlot. Dans ce cas, nous maintenons notamment la conception architecturale et urbaine et la configuration paysagère de la végétation. Dans ce scénario, on remarque que la végétation est presque inexistante, la surface végétalisée totale représente 3 % de la surface totale du modèle, ces surfaces sont constituées des petits palmiers (Le Sabal minor Pers), de même aucune surface d'eau.

Le tableau V.2 résume l'albédo des surfaces bâties, des routes et des pavements ; ces valeurs sont déjà définies dans la base des données d'Envi-met et seront utilisées dans notre

calcul. Malgré l'imprécision et l'incertitude des valeurs exactes d'albédo des surfaces du quartier étudié, notre choix paraît réaliste et compatible avec les couleurs grises des façades et des toitures observées sur le site.

Tableau V.2 : Albédo des différentes surfaces du modèle simulé

Surface	Murs extérieurs	Toiture	Route en asphalte	Trottoirs en béton	Sol
Albédo	0.3	0.3	0.2	0.3	0.0

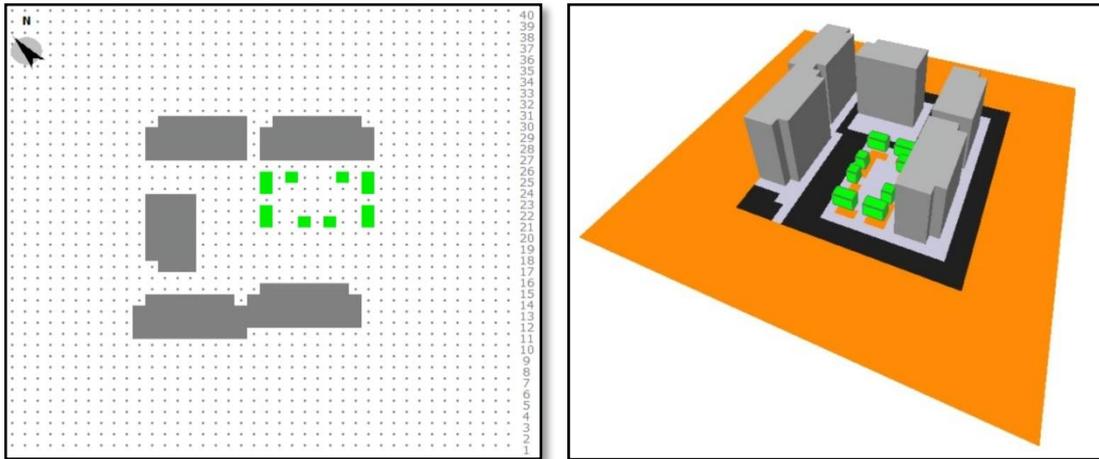


Figure V.5 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°1 : à gauche vue en 2D, à droite vue en 3D

V.2.1.2. Scénario N°2 (Modèle vert)

Les effets de la végétation sur les paramètres microclimatiques (Température de l'air et humidité relative) sont étudiés dans ce scénario. Le but est de mettre en évidence le pouvoir de rafraîchissement urbain de la végétalisation sur une typologie d'îlot comme celui que nous étudions, îlot très peu végétalisé initialement. Les types des végétaux utilisés sont : les herbes (hauteur = 0.5 m, albédo = 0.2), les arbres (hauteur = 15m, albédo = 0.5) ainsi que des toitures vertes au niveau des habitats (hauteur = 0.45m, albédo = 0.3).

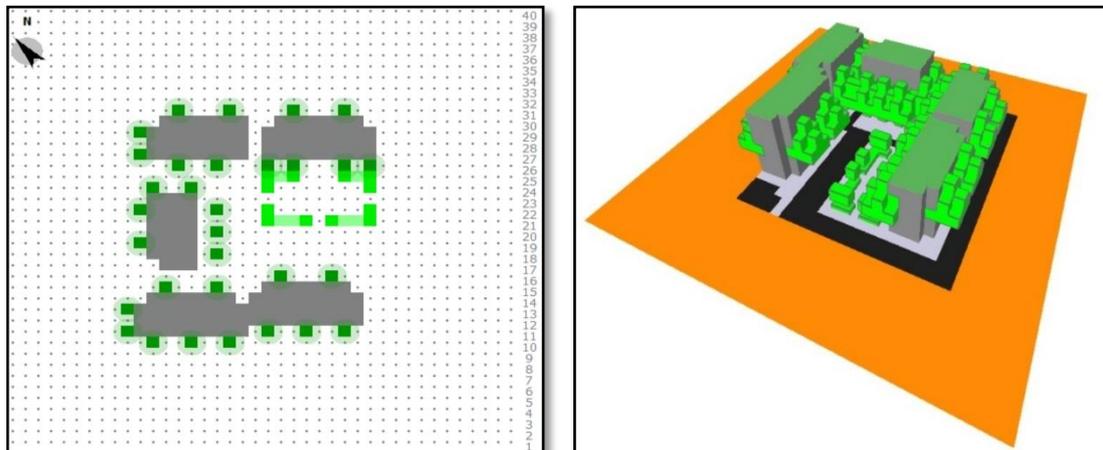


Figure V.6 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°2 : à gauche vue en 2D, à droite vue en 3D

V.2.2. Cas d'étude N°2 : Le Canet, Marseille, France

V.2.2.1. Scénario N°3 (Cas de base)

Ce scénario correspond à l'état actuel de l'îlot, cela revient à dire que la simulation a pour but de vérifier les paramètres relatifs au confort thermique de l'îlot à l'état brut sans les éléments susceptibles de l'améliorer. Dans ce scénario, comme dans le cas précédent de Jijel, on remarque que le quartier est très peu végétalisé, la surface totale de la zone verte représente 2 % de la surface totale du modèle, de même l'absence totale des surfaces d'eau ainsi que la présence des matériaux aux albédos différents (Tableau V.2).

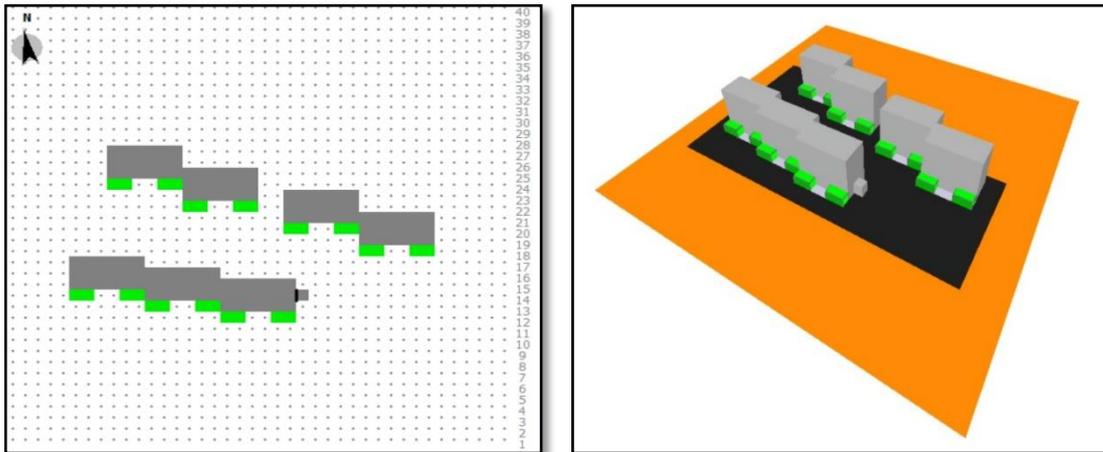


Figure V.7 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°3: A gauche vue en 2D, à droite vue en 3D

V.2.2.2. Scénario N°4 (Modèle fluide semi-blanc)

Le vent représente un élément assez perceptible du microclimat urbain, il exerce une grande influence sur le confort thermique. Son mouvement dépend en grande partie de la nature du cadre bâti et des formes urbaines. Tout d'abord, l'intérêt de notre travail dans ce scénario est de mettre en évidence l'effet de la géométrie du plan de masse et la disposition des formes bâties les unes par rapport aux autres sur l'amélioration des conditions du confort thermique vis-à-vis de l'écoulement du vent dans des microclimats urbains extérieurs. Pour y parvenir, nous avons apporté des modifications au niveau du quartier concernant la forme et la disposition des bâtiments en adoptant des formes fluides séparées inspirées de la nature au lieu de formes régulières adhérentes ordinaires en gardant l'alignement initial.

Puis, étant donné que la configuration initiale du quartier est très minéralisée, il est important de travailler sur les caractéristiques thermiques des matériaux recouvrant les bâtiments et les rues de ce quartier. Ce scénario présente ainsi l'effet du changement de l'albédo sur les paramètres microclimatiques dans le but d'identifier son pouvoir de rafraîchissement au niveau du quartier. Donc, le modèle fluide/semi-blanc est également défini par le changement de l'albédo uniquement pour les routes, les trottoirs et le sol du

quartier ; les façades des bâtiments n'ont pas été modifiées par rapport au cas initial. Le revêtement des routes est modifié en adoptant l'asphalte à texture rouge à la place de l'asphalte ordinaire, ayant un albédo plus élevé. L'albédo de l'asphalte rouge est de 0.5 alors que celui de l'asphalte ordinaire est de 0.2. De même, un revêtement plus clair est choisi pour les trottoirs en utilisant un béton plus clair ayant un albédo de 0.8 au lieu de 0.3. Une partie du sol est aussi modifiée en adoptant un sol limoneux non scellé ayant un albédo de 0.2 au lieu de 0.0. Le tableau V.3 montre l'albédo des routes des trottoirs et des sols pour le modèle semi-blanc et le modèle initial.

Tableau V.3 : Albédo des surfaces modifiées dans le modèle fluide semi-blanc

Modèle	Surface	Albédo
Modèle Initial	Route en asphalte	0.2
	Trottoirs en béton (dirty concrete)	0.3
	Sol limoneux	0.0
Modèle fluide/semi-blanc	Route en asphalte rouge	0.5
	Trottoirs en béton clairs	0.8
	Sol limoneux non scellé	0.2

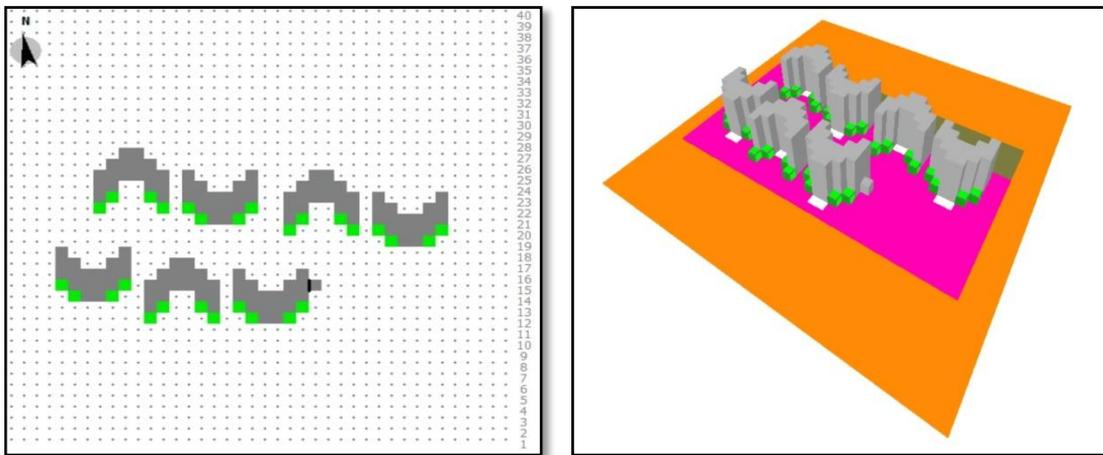


Figure V.8 : Fichier d'entrée (.IN) pour le scénario N°4 : à gauche vue en 2D, à droite vue en 3D

Conclusion

Dans le présent chapitre dédié à la présentation de la méthode de recherche à l'aide d'un logiciel d'informatique Envi-met 4.4, les différentes caractéristiques des deux sites d'intervention ainsi que les divers scénarios de simulation qui forment la base de recueil des résultats ont été élaborés. Le choix des outils et méthodes d'investigation permettent l'analyse et le calcul facile et confident de notre étude.

Introduction

Ce chapitre présente les divers résultats de simulation et leur interprétation. Quatre scénarios pour deux cas d'étude différents ont été élaborés et calculés pour la saison estivale. Des comparaisons entre ces scénarios ont été faites. Les paramètres introduits dans le calcul sont : l'albédo des sols des routes des pavements et celui de la végétation ainsi que la géométrie urbaine. Et ce afin de vérifier les hypothèses posées, et clarifier l'effet de ces paramètres sur l'amélioration des conditions microclimatiques dans les villes méditerranéennes. Nous essayerons également d'interpréter les sorties de simulation retenues par Envi-met et lues par le programme Léonardo.

VI.1. Présentation et interprétation des résultats obtenus

A partir des résultats obtenus pour chaque pixel de notre grille d'analyse, il nous a été possible de générer des rendus graphiques, par heure et par variable climatique (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, etc.). Cela nous a permis de comprendre l'évolution spatiale et temporelle des phénomènes climatiques.

Les résultats obtenus de la simulation en utilisant le logiciel Envi-met 4.4 concernent deux paramètres qui sont : la température de l'air et l'humidité relative pour le cas d'étude N°1 et trois paramètres qui sont : la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent pour le cas d'étude N°2.

Pour mieux comprendre les phénomènes étudiés, nous avons pris deux moments différents du jour :

- Pendant la journée à 15 heures après midi : les conditions climatiques présentent un changement remarquable.
- Pendant la nuit à 21 heures : l'effet de l'ICU commence à se manifester après quelques heures du coucher de soleil.

Les valeurs de température de l'air ainsi que d'humidité relative et de vitesse du vent sont prises du même point ($x= 22, y= 32, z= 2$) pour le scénario N°1 et le scénario N°2, et du même point ($x= 28, y= 17, z= 2$) pour le scénario N°3 et le scénario N°4.

Les coupes horizontales sont prises à une hauteur de 1.5 m à partir du sol. Les coupes verticales sont prises comme suit :

- Cas d'étude N°1 : selon l'axe NE-SO.
- Cas d'étude N°2 : selon l'axe Nord-Sud.

VI.1.1. Variations de température et de l'humidité de l'air pour le scénario N°1

A. Température de l'air

La température de l'air est un paramètre important à évaluer, car il représente la température ambiante qui règne en ces espaces, ce qui permettra plus loin d'estimer le confort thermique des piétons.

▪ A 15 heures

Les résultats de Leonardo indiquent que la couleur chaude exprime le taux le plus élevé de température de l'air. Cette couleur est remarquable du côté Est jusqu'à Ouest et due à la chaleur emmagasinée par les surfaces ayant des albédos faibles précisément (Figure VI.1).

Les températures de l'air atteignent des valeurs élevées puisque les matériaux ont stocké suffisamment de chaleur pour se réchauffer, après l'exposition au rayonnement solaire pour une longue période. Les rayonnements solaires ont été absorbés et non réfléchis.

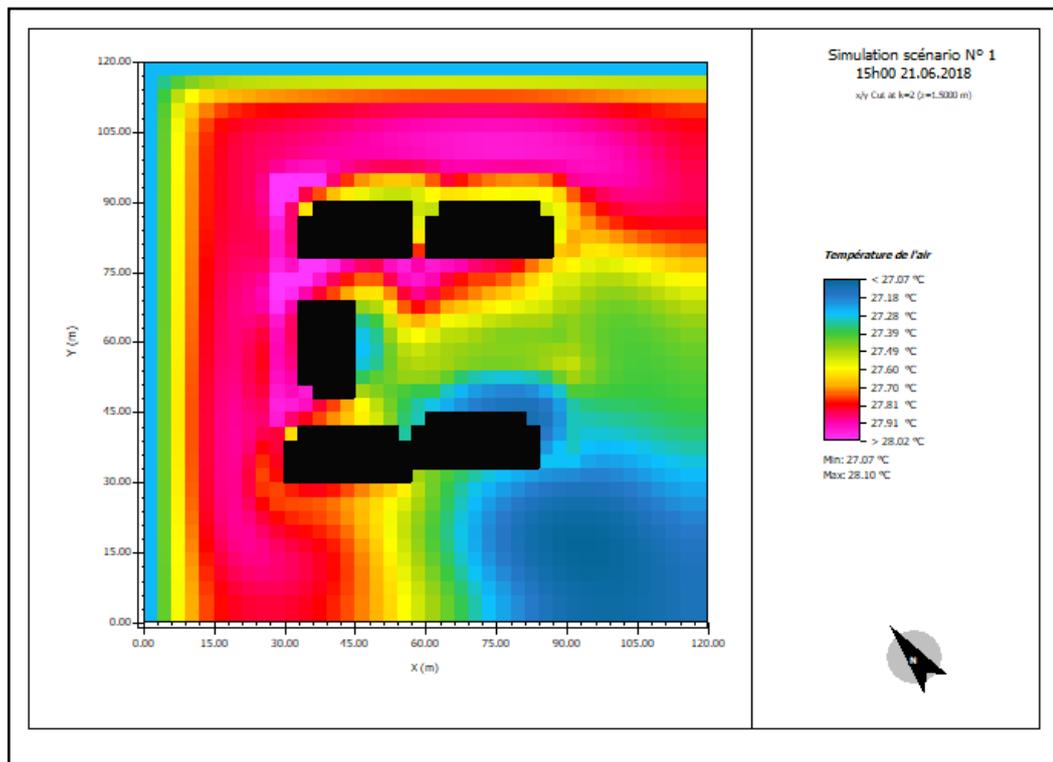


Figure VI.1 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°1

La valeur maximale de température de l'air est enregistrée pendant l'après-midi à 15 heures, en ayant pour valeur 28.10°C sur les chaussées recouvertes d'enrobé autour des blocs. La valeur minimale de température de l'air enregistrée à cette heure est 27.07°C car les rayons solaires n'ont pas encore atteint le côté Ouest, par conséquent les matériaux gardent leur fraîcheur ainsi qu'ils sont protégés par l'ombrage des bâtiments. Des températures plus basses peuvent être vérifiées au cœur de l'îlot, en raison du faible facteur de vue du ciel local et des effets de masques solaires.

▪ A 21 heures

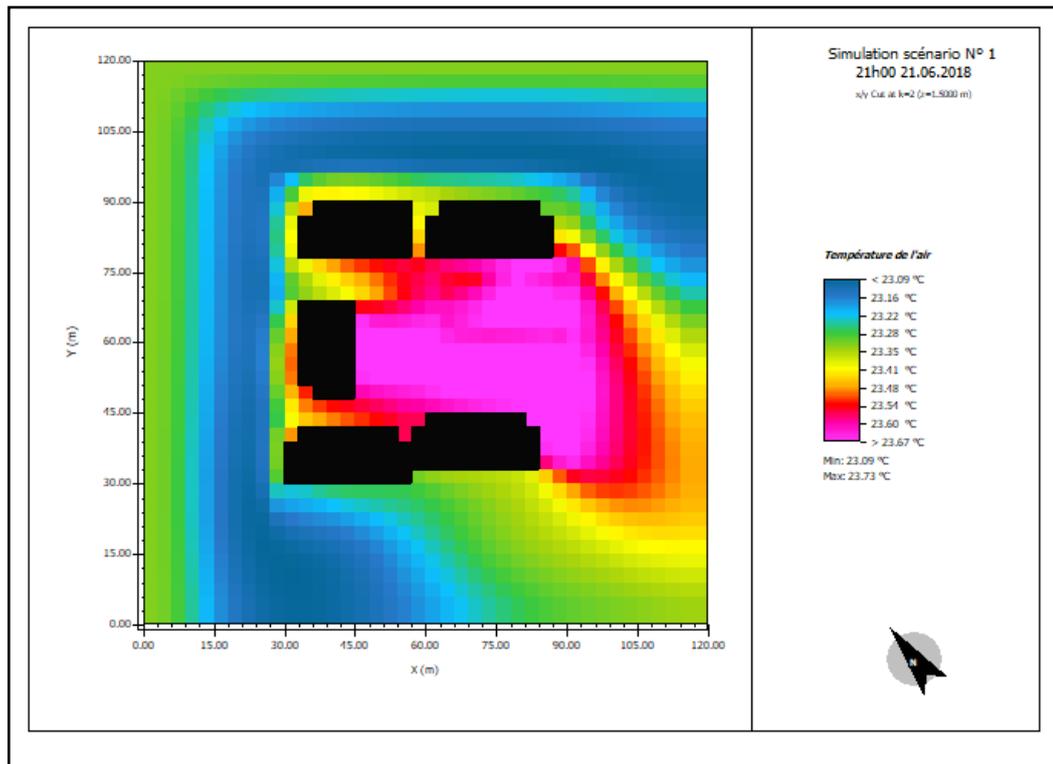


Figure VI.2 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°1

Comme prévu, l'effet est inversé au cours de la nuit. Contrairement aux résultats enregistrés à 15 heures après midi, les valeurs minimales de température de l'air sont enregistrées pour les matériaux à faible albédo (Figure VI.2). Cela s'explique par le dégagement de la chaleur stockée, pendant toute la nuit, par ces matériaux qui commencent à se refroidir et par conséquent diminuer la température de l'air. Par ailleurs, les valeurs maximales de température de l'air enregistrées sont justifiées par le retard constaté concernant l'opération d'emménagement de chaleur pour les endroits concernés et donc la perte de chaleur sera effectuée dans les heures prochaines.

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

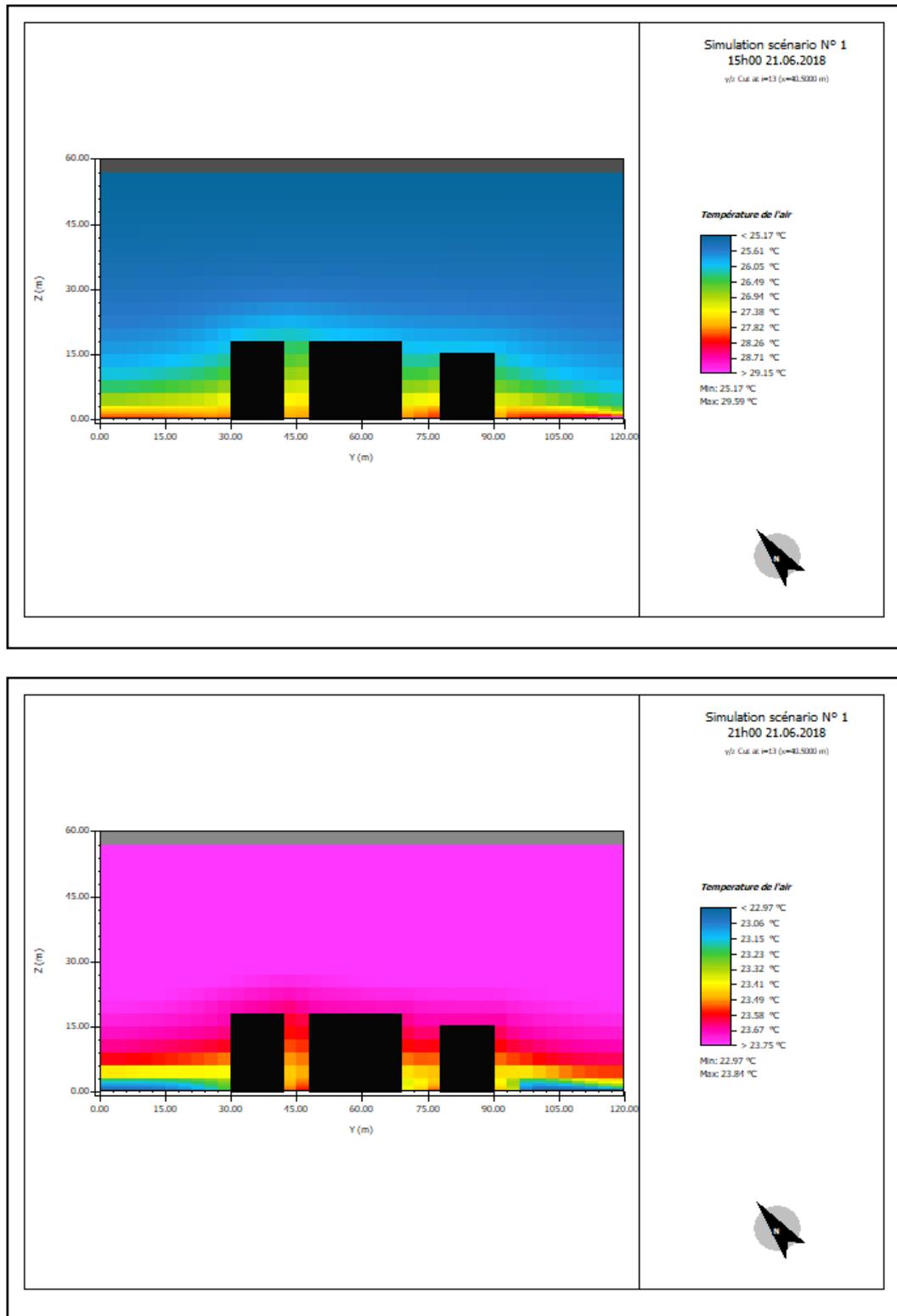


Figure VI.3 : Coupes verticales présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°1. Au-dessus la coupe à 15h, au-dessous la coupe à 21h

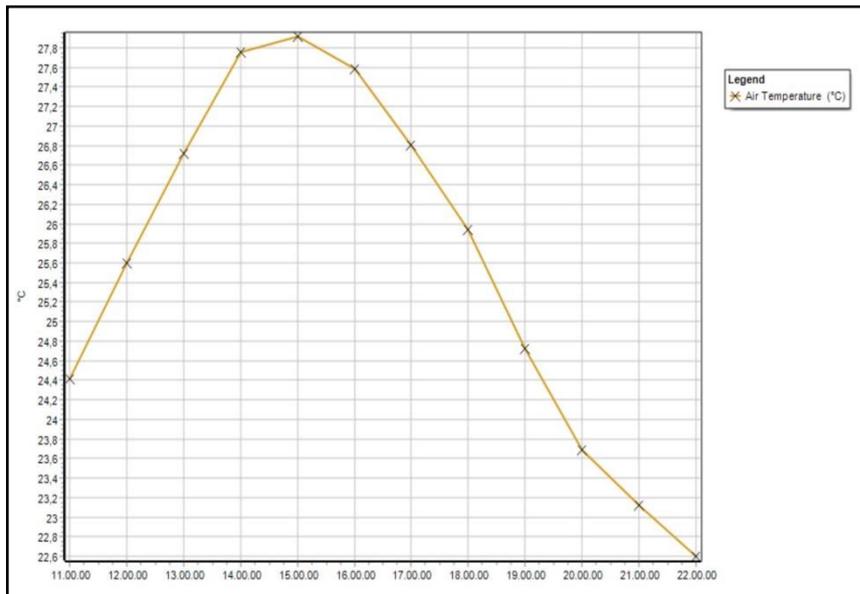


Figure VI.4 : Graphe de température de l'air de scénario N°1

On peut remarquer une hétérogénéité importante de la température entre le jour et la nuit. En effet, le phénomène de l'ICU apparait à partir de l'après-midi où les températures sont maximales (27.90°C) et s'étale pendant toute la nuit jusqu'au lever de soleil: les surfaces absorbantes ayant stocké de la chaleur pendant le jour commencent à la perdre progressivement sous forme de rayonnement infrarouge, engendrant une hausse de température aux niveaux supérieurs de l'atmosphère, contrairement au jour (Figure VI.3). Cela permettra à ces matériaux de garder leur température fraîche pendant le matin et donc le refroidissement de l'air.

B. Humidité relative

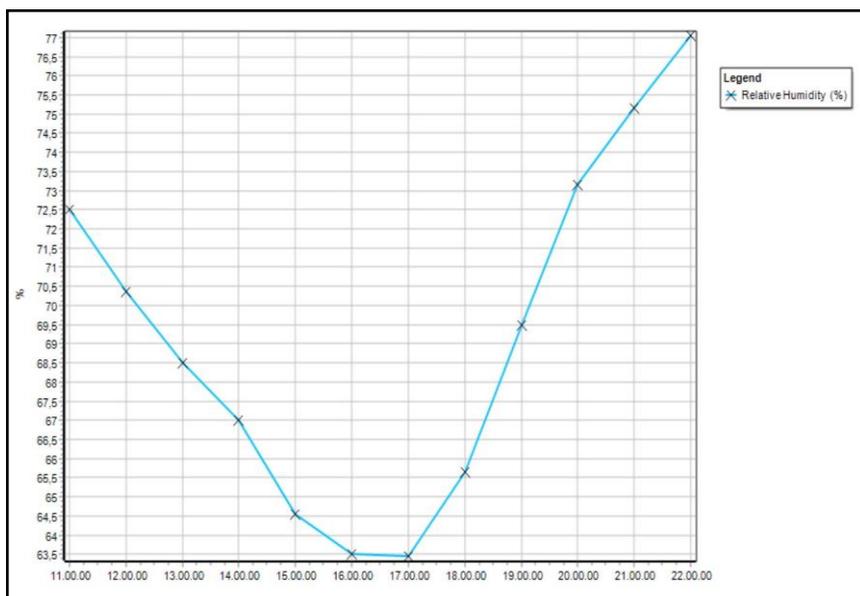


Figure VI.5 : Graphe d'humidité relative pour le scénario N°1

L'humidité relative est inversement proportionnelle avec la température de l'air. La valeur maximale enregistrée est 77 % à 22 heures, et la valeur minimale est 63.45 % à 17 heures.

VI.1.2. Variations de température et de l'humidité de l'air pour le scénario N°2

A. Température de l'air

▪ A 15 heures

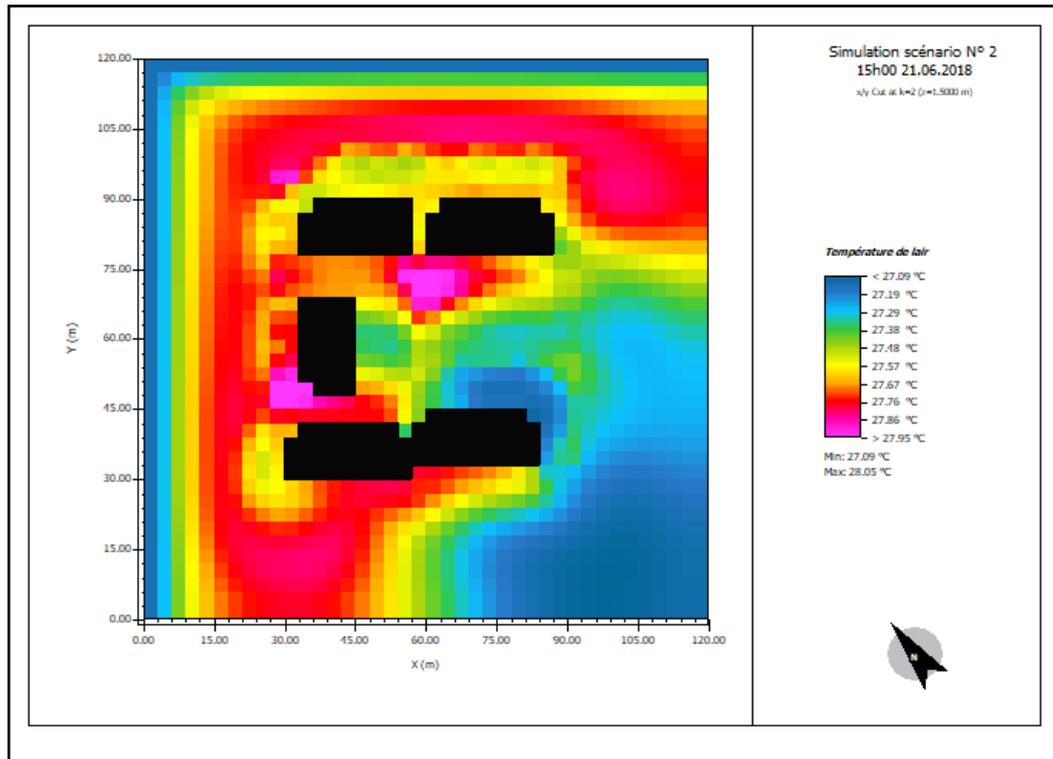


Figure VI.6 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°2

En faisant la comparaison avec les résultats du scénario N°1, on constate un refroidissement de température de l'air dans les endroits où nous avons intégré la végétation (Figure VI.6). Cette dernière a une capacité importante à intercepter les rayons solaires ainsi que sa contribution à protéger les surfaces du réchauffement grâce à son ombrage. La quantité de chaleur emmagasinée sera inférieure à celle dans le premier cas et par conséquent les températures de l'air seront réduites. La valeur maximale de température de l'air dans ce scénario est 28.05°C et la valeur minimale de température de l'air enregistrée à cette heure est de 27.09°C.

▪ A 21 heures

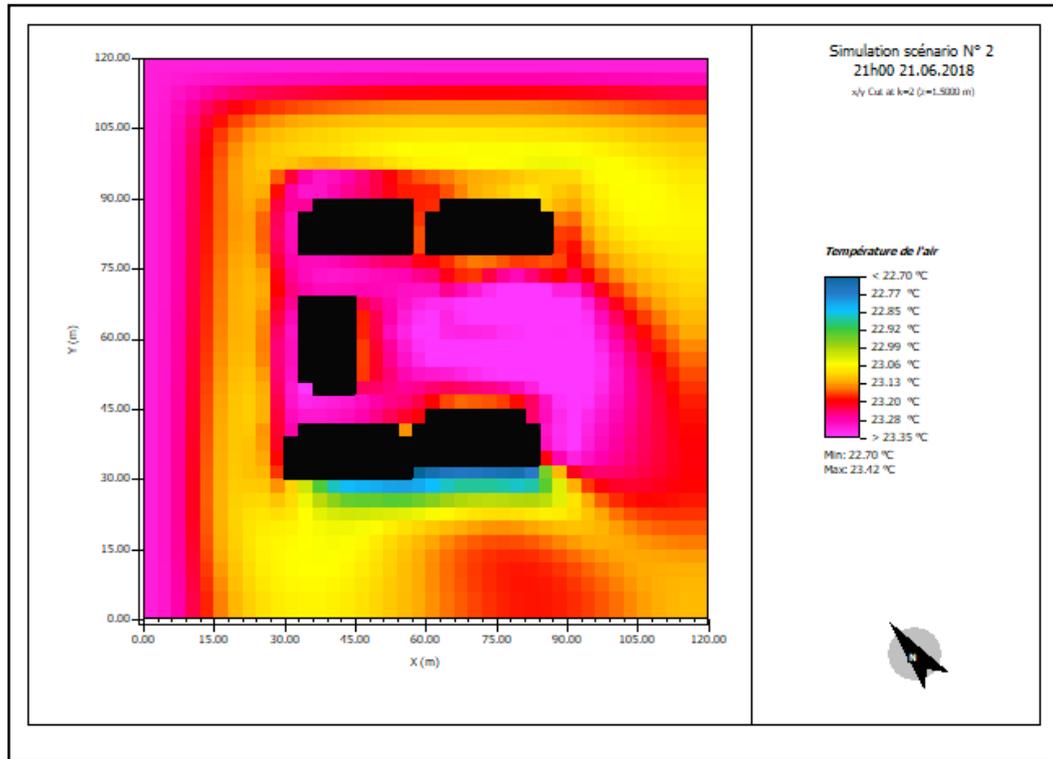


Figure VI.7 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°2

Les températures de l'air enregistrées (Figure VI.7) pendant la nuit sont également inférieures à celles du scénario N°1. Cela est justifié par l'effet de la végétation qui a permis de stocker puis libérer moins de chaleur que le scénario N°1. La valeur maximale de température de l'air enregistrée est 23.42°C et la valeur minimale est 22.70°C.

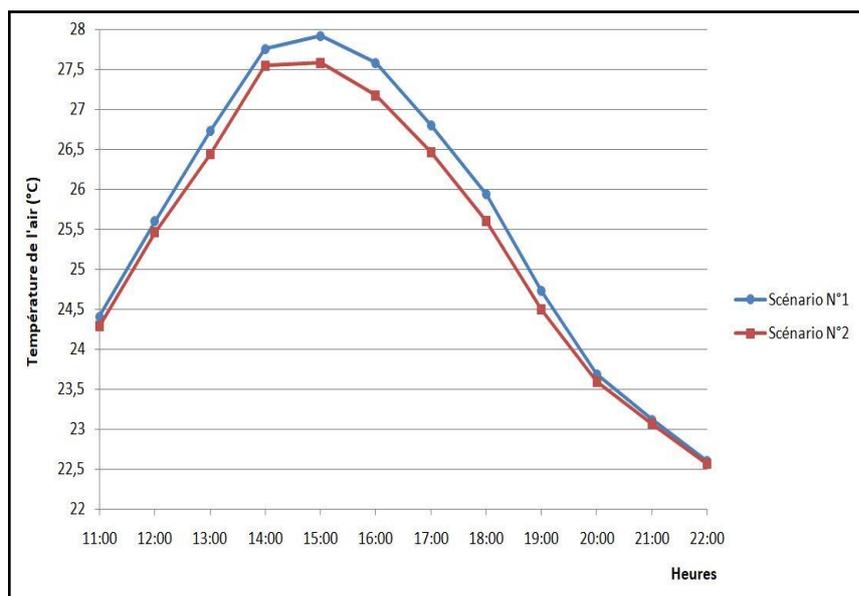


Figure VI.8 : Graphe de la température de l'air pour le scénario N°1 et le scénario N°2

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

Le graphe de température de l'air représentant le scénario N°1 et N°2 (Figure VI.8) montre une chute de valeurs de températures dans le scénario N°2. L'écart maximum est 0.34 °C (de 14 heures à 16 heures : La période où les surfaces sont réchauffées complètement) entre les températures avant et après l'implantation de la végétation. Ce résultat revient au rôle efficace de la végétation dans l'atténuation de la température de l'air ambiant.

Un écart clair de température de l'air de 0.2°C est constaté au niveau des couches d'air qui se sont refroidies en jour (Figure VI.9), et une différence de 0.09°C en nuit (Figure VI.10).

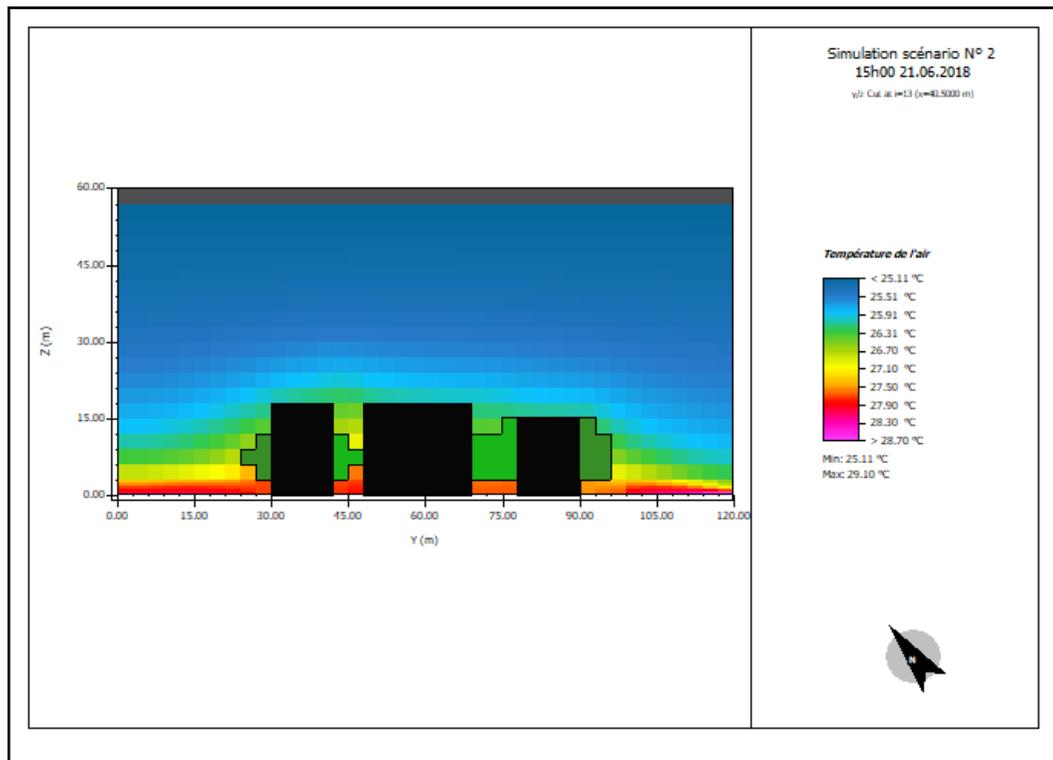


Figure VI.9 : Coupe verticale à 15h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°2

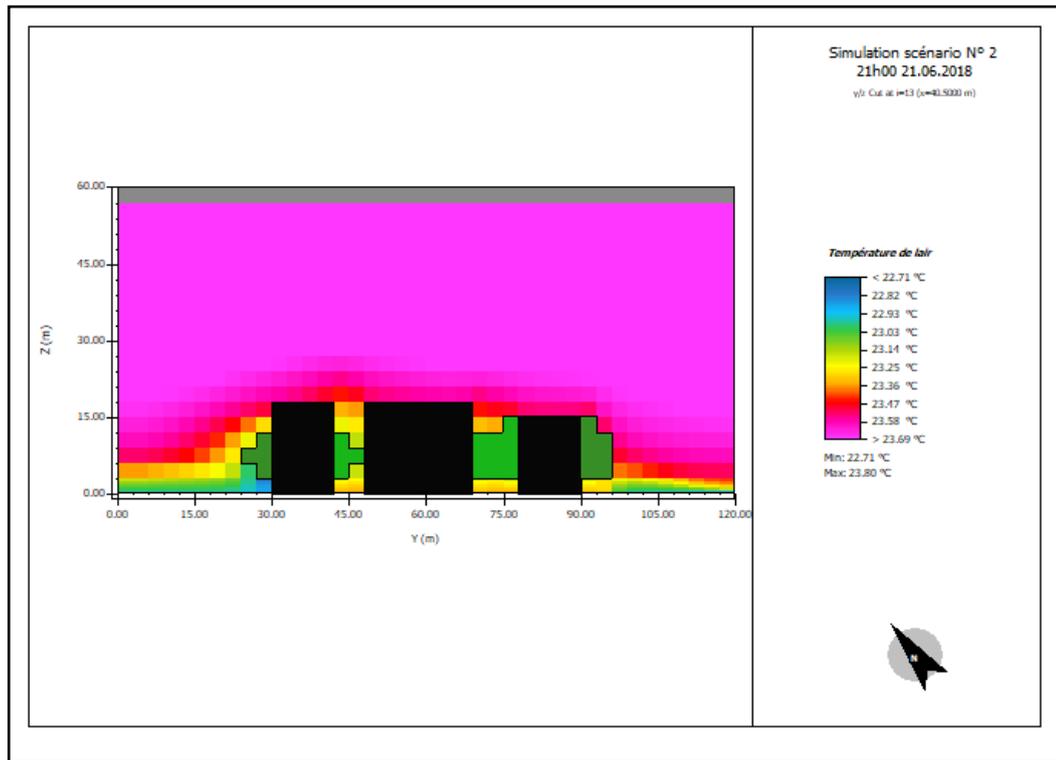


Figure VI.10 : Coupe verticale à 21h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°2

B. Humidité relative

Le graphe de l'humidité relative représentant le scénario N°1 et N°2 montre un écart qui atteint la valeur de 1.84 % (de 15 heures à 17 heures). Les valeurs d'humidité sont supérieures à celle du scénario N°1. Ces valeurs, qui dépendent de la température de l'air, sont accentuées dans ce cas par le phénomène de l'évapotranspiration des végétations.

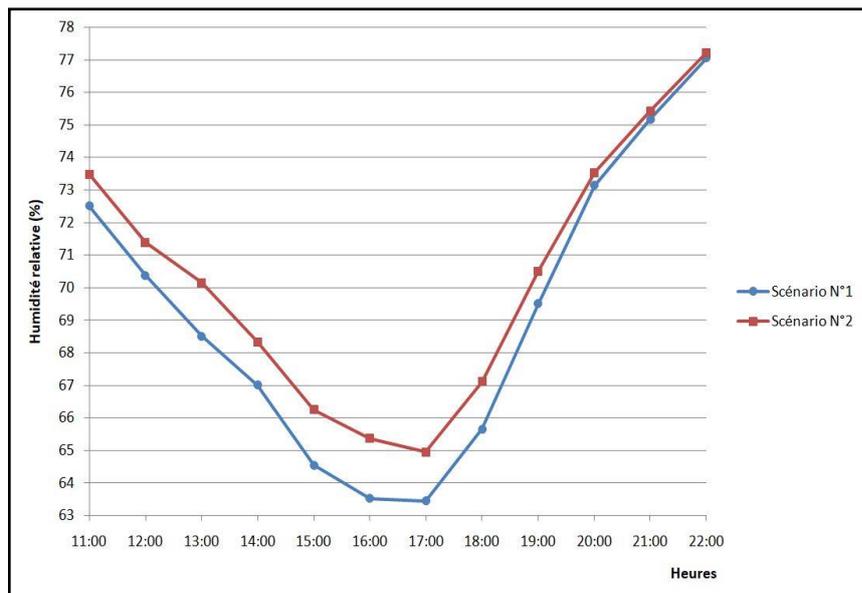


Figure VI.11 : Graphe de l'humidité relative pour le scénario N°1 et le scénario N°2

VI.1.3. Variations de température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent pour le scénario N°3

A. Température de l'air

▪ A 15 heures

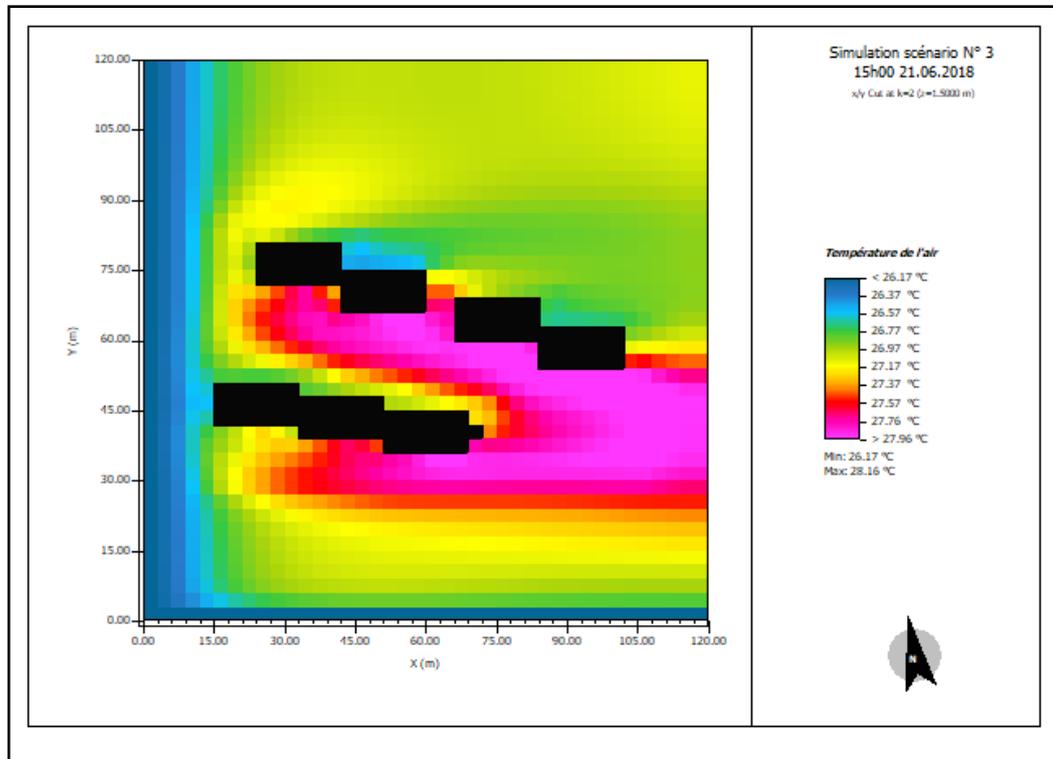


Figure VI.12 Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°3

La Figure VI.12 décrit la variation de la température de l'air ambiant pour le scénario N°3. Pendant la journée, les températures de l'air sont beaucoup plus élevées au cœur de l'îlot ou se trouve une large surface couverte d'enrobé. La valeur maximale est enregistrée pendant l'après-midi à 15 heures, en ayant pour valeur 28.16°C au niveau de la chaussée à albédo 0.2. La valeur minimale de température de l'air enregistrée à cette heure est 26.17°C tout autour de l'îlot.

▪ A 21 heures

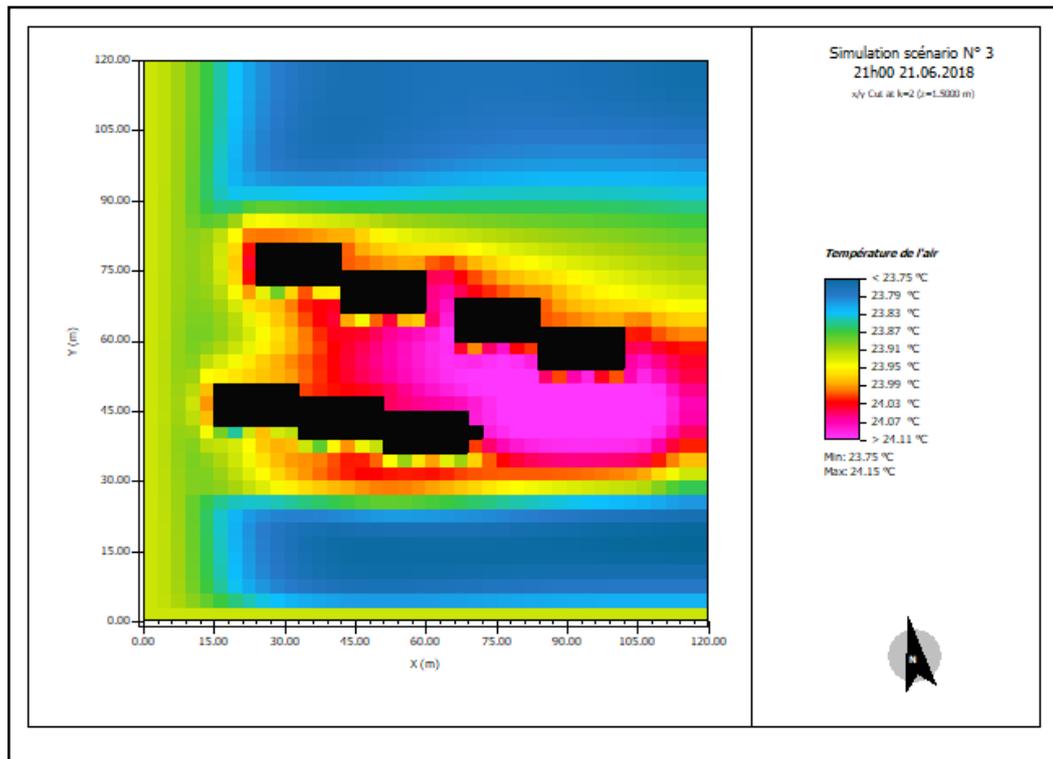


Figure VI.13 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°3

L'effet inverse peut être mis en évidence la nuit. La température de l'air dans le périmètre extérieur est beaucoup plus faible la nuit : malgré la forte minéralisation du sol, toute la chaleur accumulée dans la journée peut être dissipée relativement facilement cause d'une forte ouverture au ciel de la structure qui entoure les bâtiments. Par ailleurs, les valeurs maximales de température de l'air enregistrées à l'intérieur de l'îlot sont justifiées par le retard constaté concernant l'opération d'emmagasinement de chaleur pour les endroits concernés cela est due à l'absence totale de masque solaire pendant toute la durée de la simulation mais aussi l'absence de source potentielle d'évaporation (eau) ou d'évapotranspiration (végétation).

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

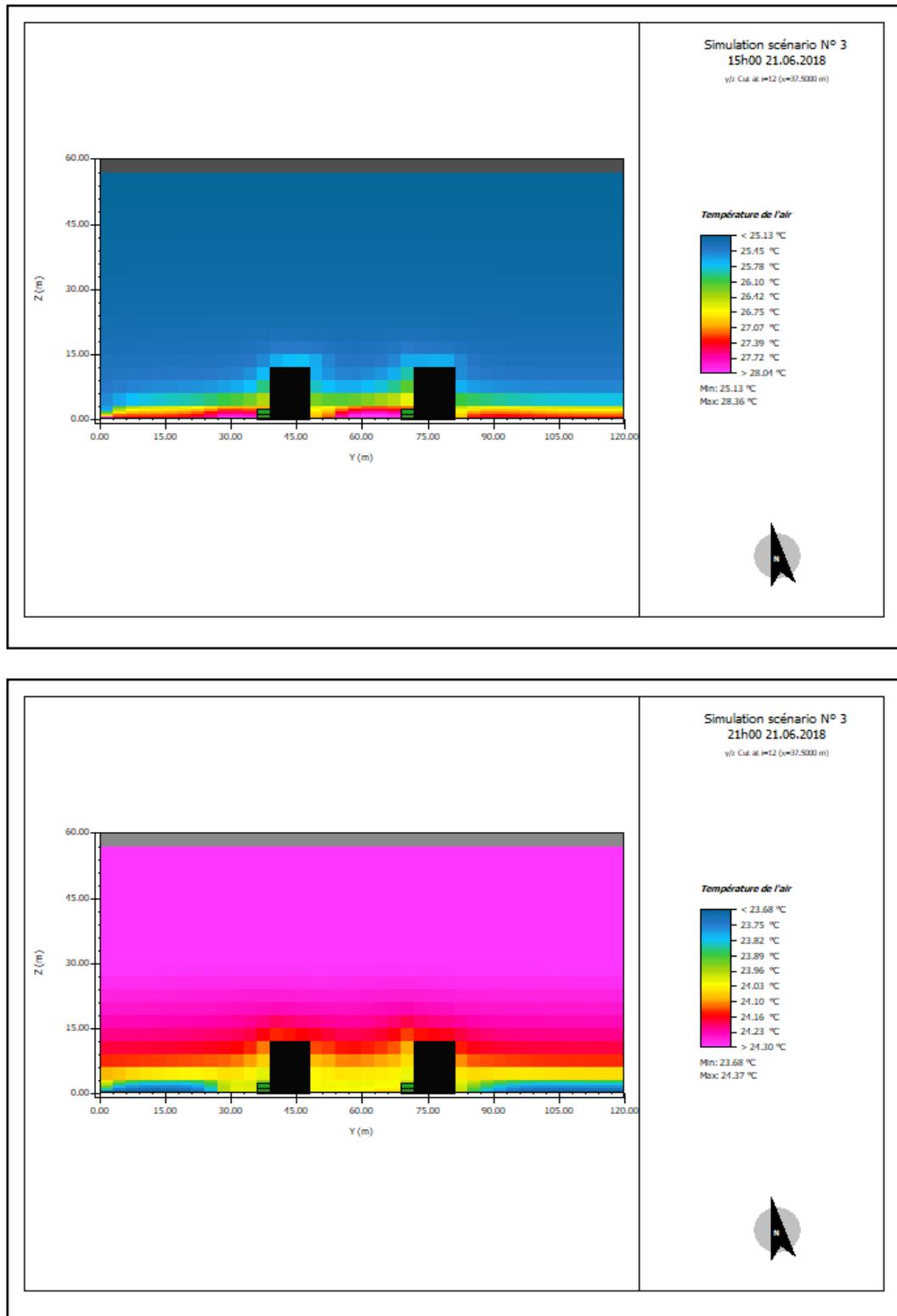


Figure VI.14 : Coupes verticales présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°3. Au-dessus la coupe à 15h, au-dessous la coupe à 21h

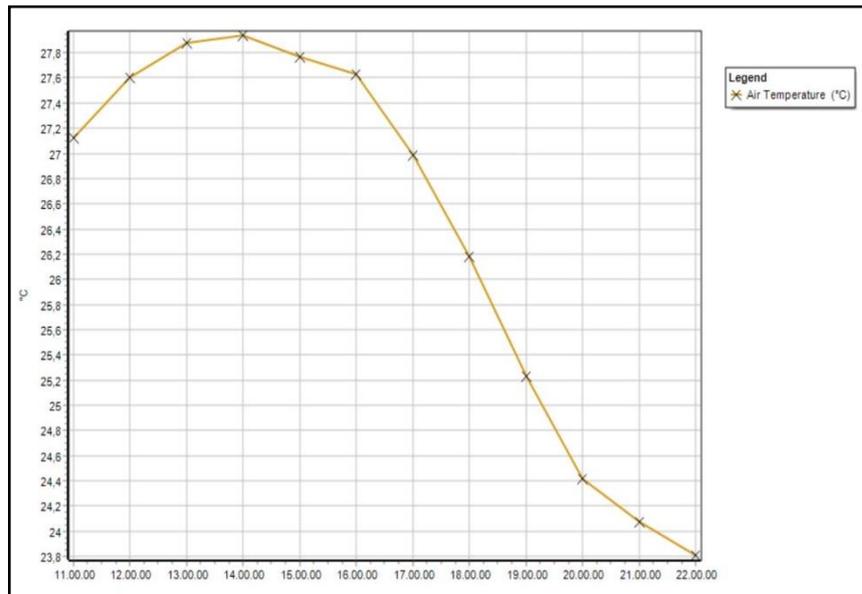


Figure VI.15 : Graphe de température de l'air de scénario N°3

L'évaluation de la température de l'air permet d'estimer le confort thermique dans l'îlot. Dans ces résultats nous pouvons vérifier qu'il existe une grande hétérogénéité des températures de l'air qui subissent une inversion entre le jour et la nuit (Figure VI.15). D'après le graphe (une courbe en cloche), on remarque une augmentation des températures de l'air entre matinée et après-midi. La température progresse jusqu'à atteindre son maximum (27.9 °C) à 14 heures, pour ensuite décroître jusqu'à atteindre la valeur minimale de cette période (23.8 °C) à 22 heures.

B. Humidité relative

L'humidité relative dépend toujours de la température de l'air, on remarque que les points qui ont enregistré les températures les plus élevées, développe les humidités les plus basses (par rapport à notre cas d'étude). La valeur maximale enregistrée est 72.43 % à 22 heures, et la valeur minimale est 54.74 % à 13 heures.

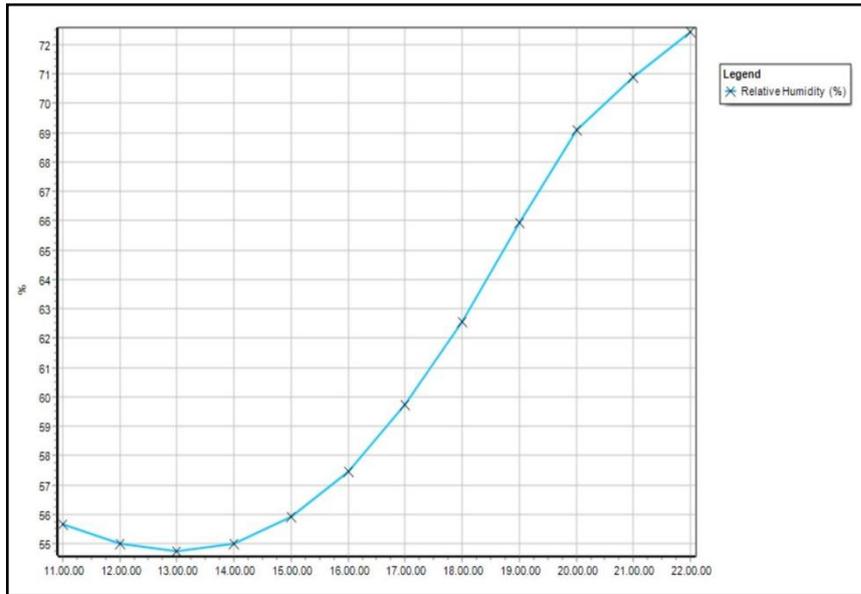


Figure VI.16: Graphe d'humidité relative pour le scénario N°3

C. Vitesse du vent

L'effet du vent sur le confort thermique est généralement divisé en deux catégories: il peut être mécanique lorsque les vitesses du vent dépassant les 5m/s, au-dessus de cette valeur l'effet est considéré thermique. L'effet thermique consiste en l'augmentation du transfert de chaleur entre l'air et le corps humain ainsi accélération du refroidissement. Comme il aide le corps à dissiper tous les gains thermiques acquis par l'augmentation de la convection et l'évaporation.

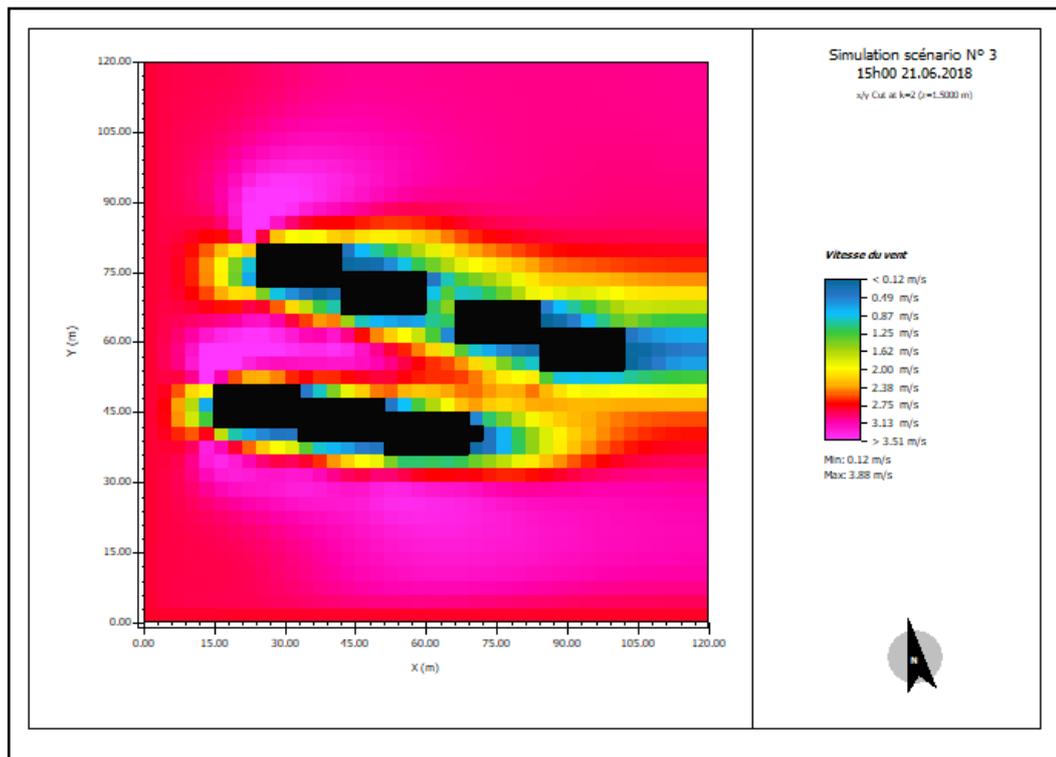


Figure VI.17 : Coupe horizontale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°3

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSION

La figure VI.17 illustre le parcours des vitesses du vent pour le scénario N°3 pendant l'après-midi à 15 heures. La dégradation des couleurs illustre la progression de la vitesse du vent. On remarque que la couleur rose qui correspond à la vitesse maximale enregistrée (3.88 m/s) à l'extérieur, alors que valeurs les plus basses sont enregistrées au cœur de l'îlot tout autour les bâtiments où on remarque une couleur bleue qui correspond à une vitesse de 0.12 m/s. Nous pouvons déduire que les espacements qui existent entre les bâtiments déterminent le niveau d'exposition au vent dans l'entité urbaine. Ces espacements conditionnent le niveau d'obstruction au vent d'un bâtiment par d'autres éléments environnants ; ces obstructions sont plus grandes à mesure que les espacements sont réduits et donc le potentiel de ventilation se réduit davantage avec la diminution des espacements.

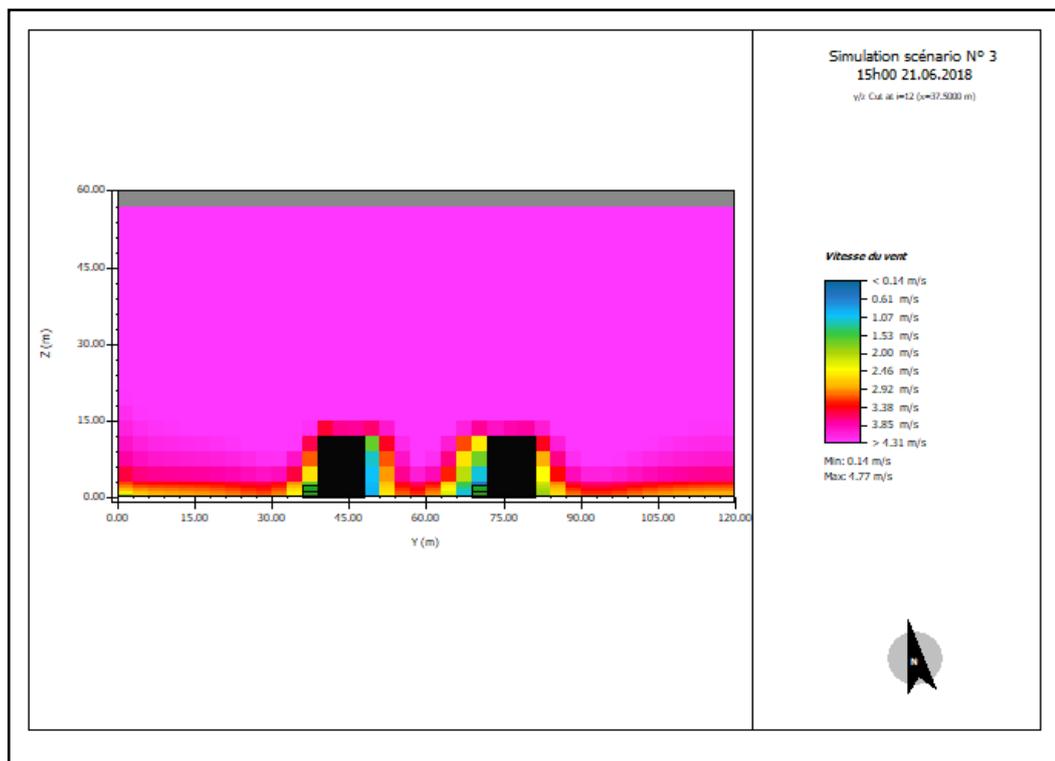


Figure VI.18 : Coupe verticale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°3

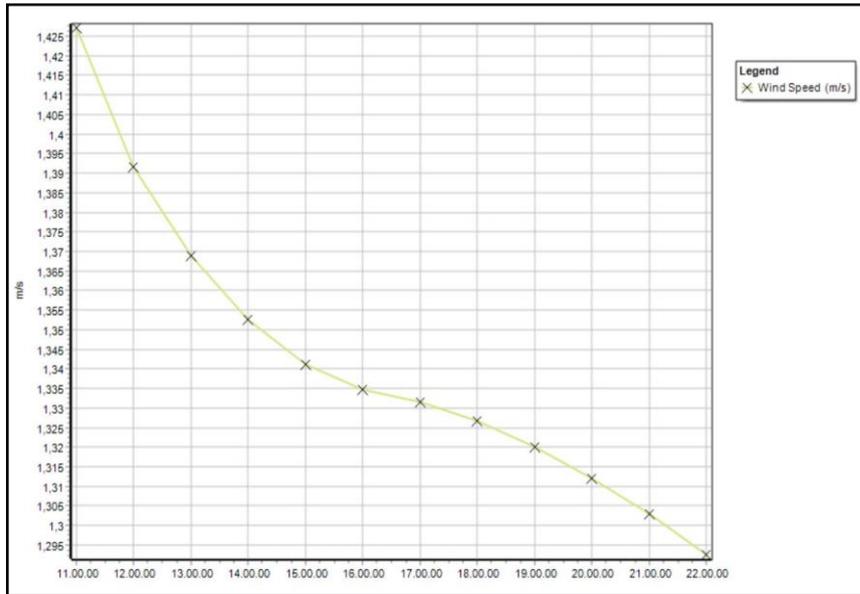


Figure VI.19 : Graphe de la vitesse de vent pour le scénario N°3

Le graphe (figure VI.19) illustre la variation journalière de la vitesse du vent dans un point de mesure choisi sur site. D'après le graphe, on remarque une diminution des vitesses du vent entre matinée et nuit. La vitesse atteint son maximum (1.43 m/s) à 11 heures, pour ensuite décroître jusqu'à atteindre la valeur minimale (1.29 m/s) à 22 heures.

VI.1.4. Variations de température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent pour le scénario N°4

A. Température de l'air

▪ A 15 heures

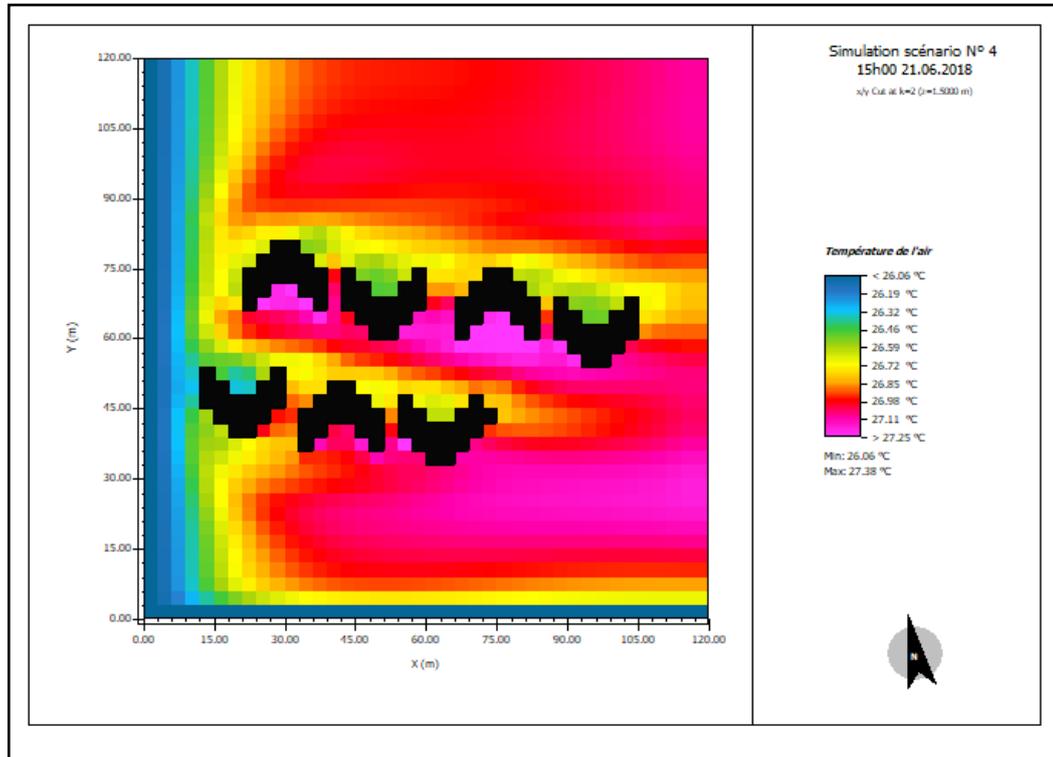


Figure VI.20 : Coupe horizontale à 15h présentant les températures de l'air pour le scénario N°4

En faisant une comparaison avec les résultats du scénario N°3, on remarque une diminution de température d'air expliquée par le changement des albédos faibles des matériaux par des albédos plus élevés (Figure VI.20). Ces matériaux ont une capacité plus importante que les premiers à réfléchir les rayons solaires. La quantité de chaleur emmagasinée sera inférieure à celle dans le premier cas et par conséquent les températures de l'air seront réduites. La valeur maximale de température de l'air dans ce scénario est 27.38°C et la valeur minimale de température de l'air enregistrée à cette heure est 26.06°C.

▪ A 21 heures

Les températures de l'air enregistrées pendant la nuit sont également inférieures à celles du scénario N°3 (Figure VI.21). Cet écart est justifié par les quantités de chaleur libérées par les matériaux dans l'environnement qui sont inférieures à celles du scénario N°3. La valeur maximale de température de l'air enregistrée est 24.11°C et la valeur minimale est 23.74°C.

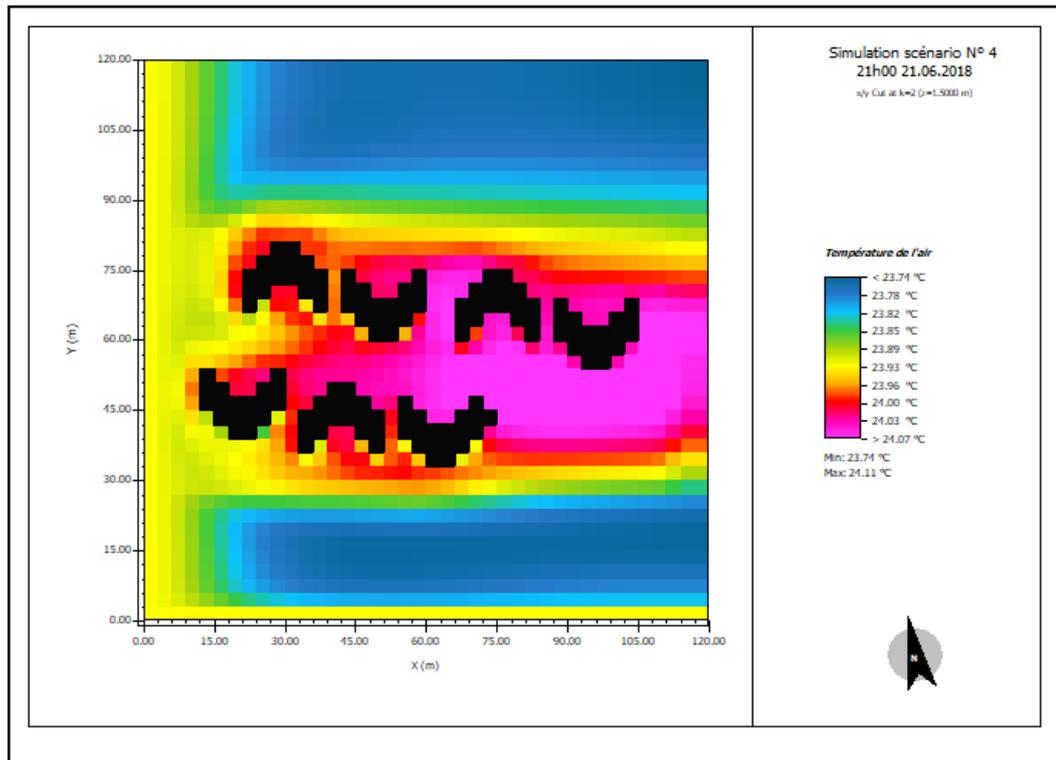


Figure VI.21 : Coupe horizontale à 21h présentant les températures de l'air pour le scénario N°4

Un écart de température de l'air de 0.4°C est constaté au niveau des couches d'air en jour (Figure VI.22), et une différence de 0.06°C en nuit, qui se sont refroidies légèrement (Figure VI.23).

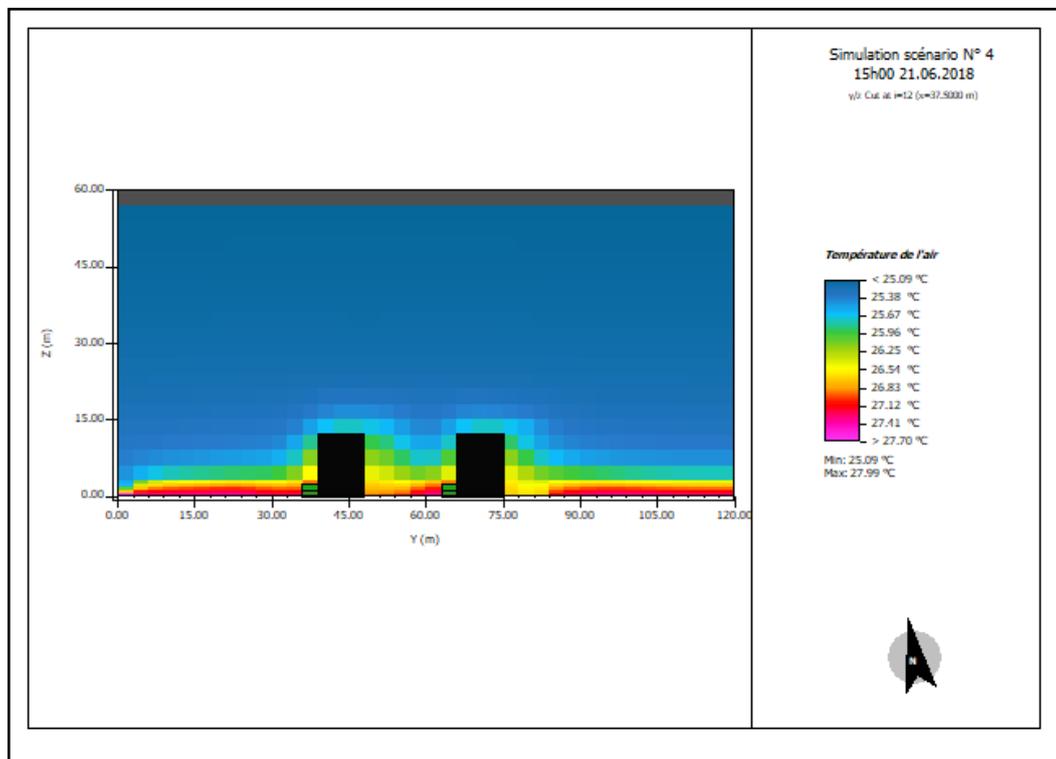


Figure VI.22 : Coupe verticale à 15h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°4

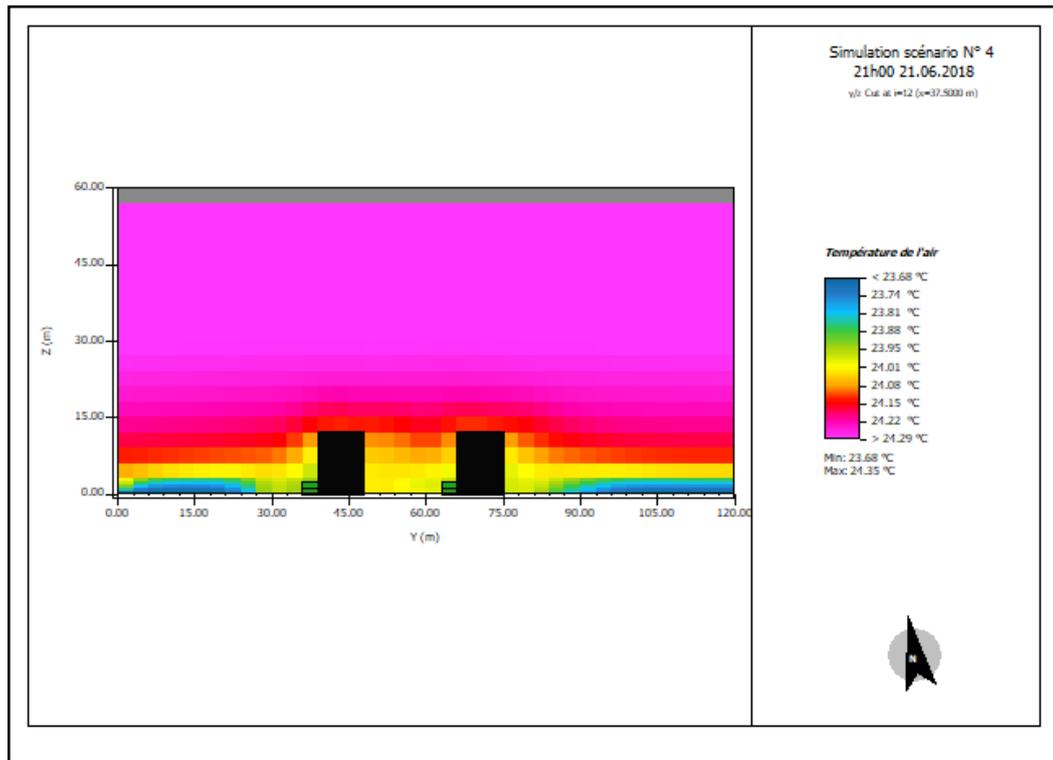


Figure VI.23 : Coupe verticale à 21h présentant les températures des couches d'air pour le scénario N°4

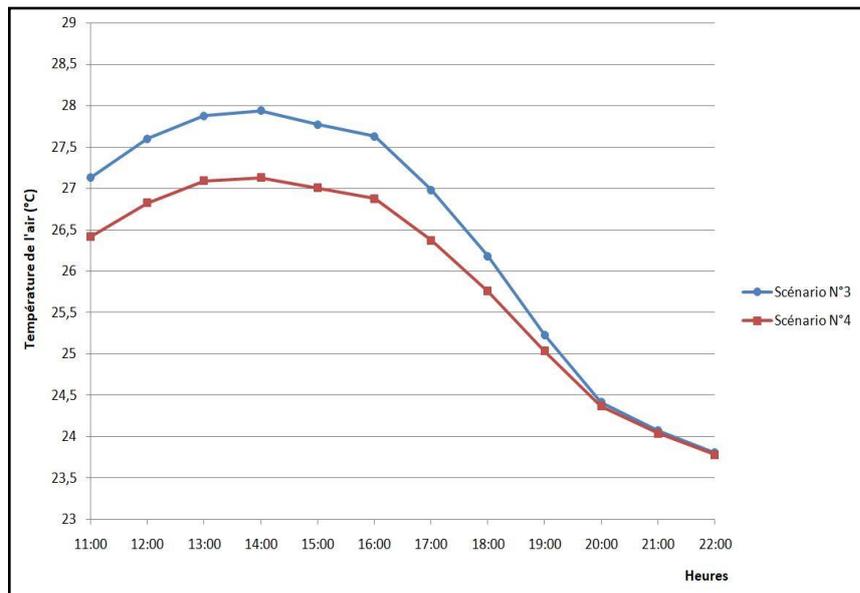


Figure VI.24 : Graphe de la température de l'air pour le scénario N°3 et le scénario N°4

A. Humidité relative

Le graphe de l'humidité relative représentant le scénario N°3 et N°4 (Figure VI.24) montre l'écart de 2,41 % à 15 heures et l'écart de 1,41 % à 18 heures. En effet l'humidité relative dépend uniquement de la température de l'air et varie également en fonction d'elle. L'influence des variations des températures sur l'humidité relative peut être très importante.

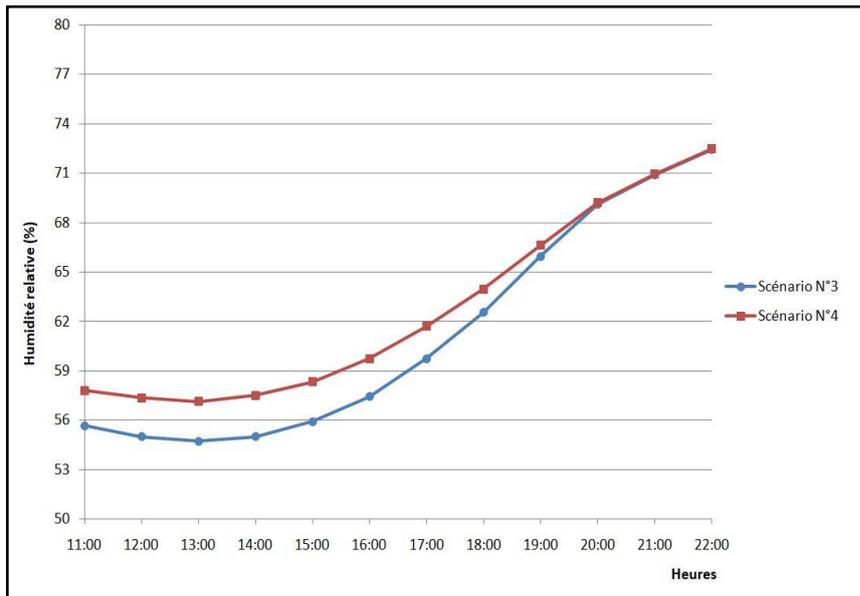


Figure VI.25 : Graphe de l'humidité relative pour le scénario N°3 et le scénario N°4

C. Vitesse du vent

En ce qui concerne les effets aérauliques et en faisant la comparaison avec les résultats du scénario N°3 on peut observer que l'adoption des formes inspirées de la nature et la séparation des bâtiments mitoyens en gardant l'alignement initial (le plan de masse devient fluide et plus éclaté que le troisième scénario) induit des modifications dans le profil de vitesse du vent. Sur la carte présentée ci-dessous (Figure VI.26), pour une heure de la journée (à 15h), nous pouvons remarquer que cette variante produit une augmentation moyenne importante de la vitesse du vent par rapport au projet de base.

La valeur maximale de la vitesse du vent dans ce scénario est 4.35 m/s et la valeur minimale enregistrée à cette heure est de 0.02 m/s. La variation de l'écoulement du vent, sa stabilité, son accélération et sa déviation dépend fortement de la disposition des bâtiments au niveau du plan de masse, leur forme, leur géométrie, et les espacements entre eux.

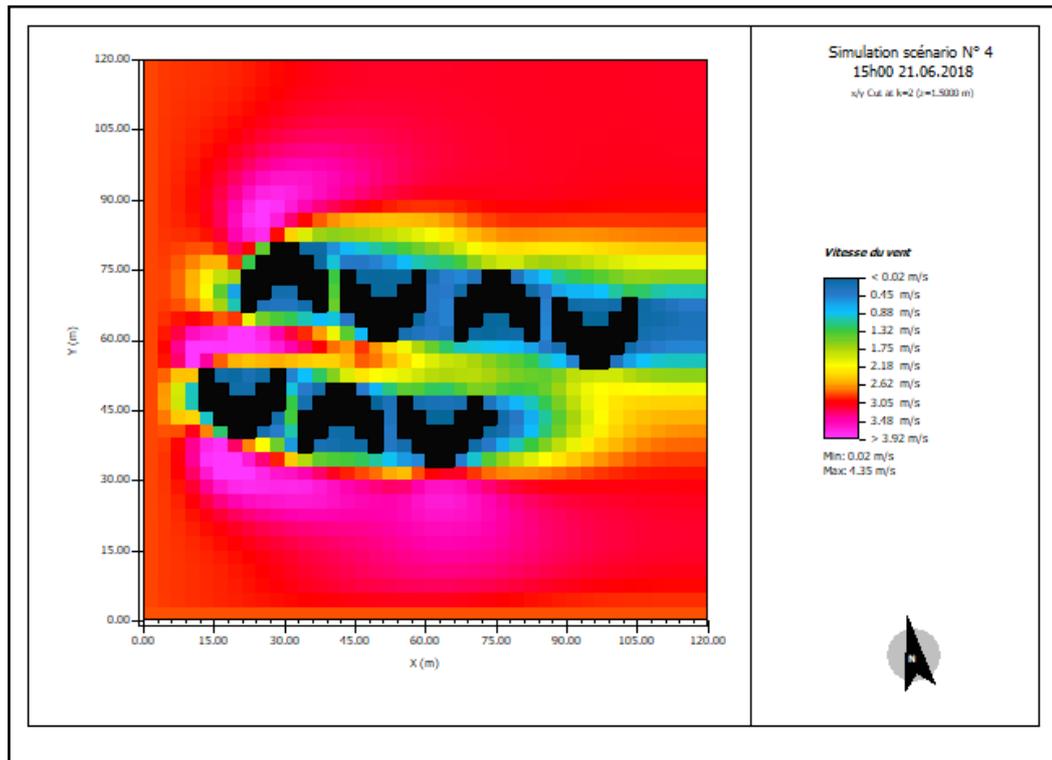


Figure VI.26 : Coupe horizontale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°4

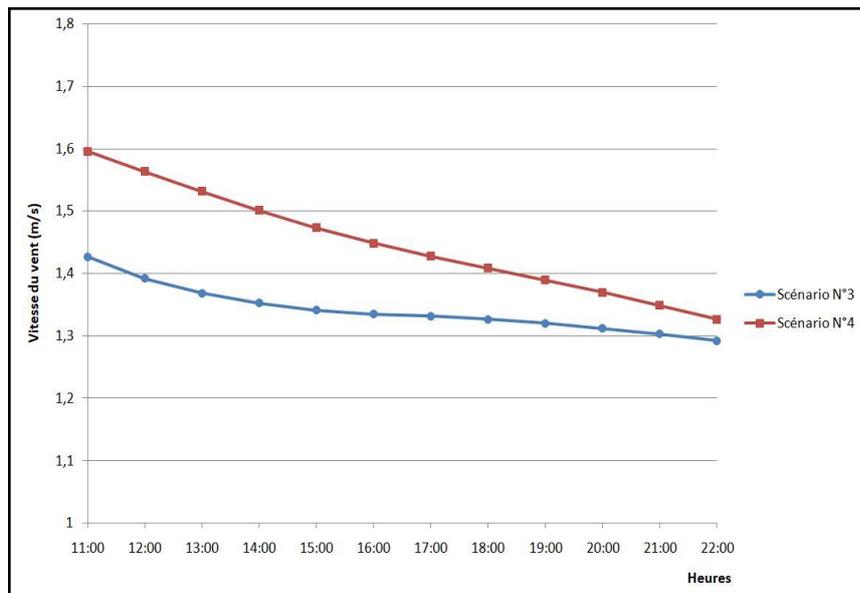


Figure VI.27 : Graphe de la vitesse du vent pour le scénario N°3 et le scénario N°4

Le graphe de la vitesse du vent représentant le scénario N°3 et N°4 (Figure VI.27) montre une augmentation de valeurs de vitesse du vent dans le scénario N°4. L'écart maximum est 0.17 m/s entre les vitesses avant et après les modifications.

Un écart clair de la vitesse du vent de 0.2 m/s est constaté au niveau des couches d'air (Figure VI.28).

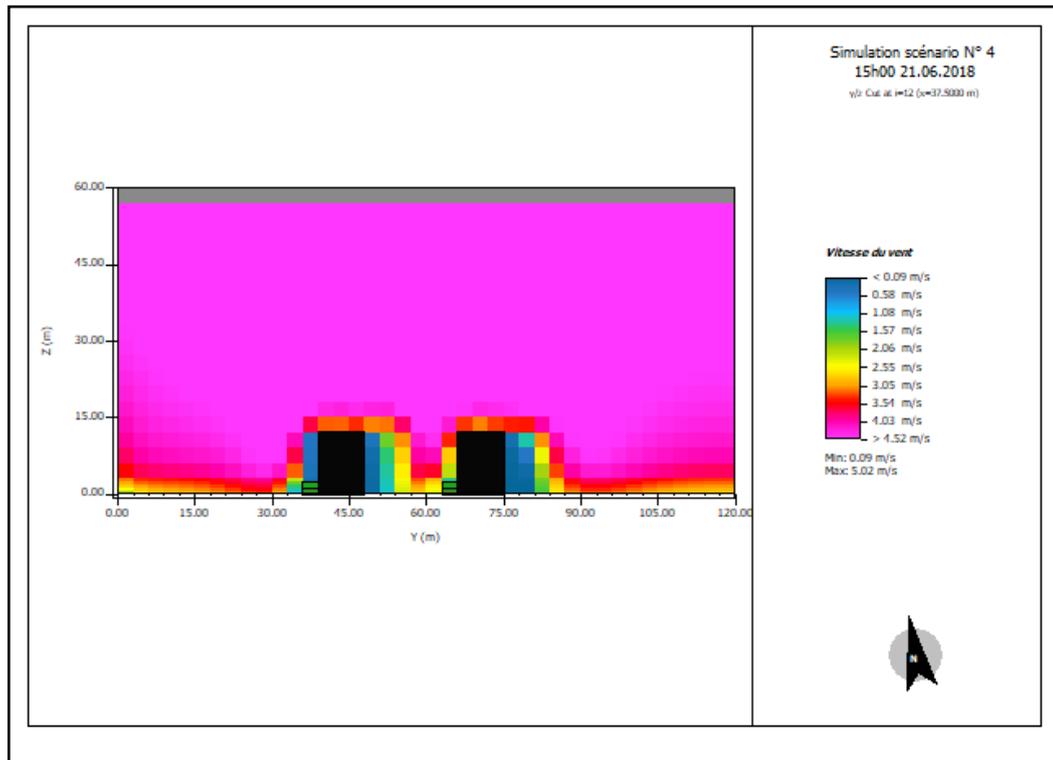


Figure VI.28 : Coupe verticale à 15h présentant la vitesse du vent pour le scénario N°4

Conclusion

Le but principal de ce chapitre était d'atteindre les objectifs visés au départ de la recherche, et de réviser en parallèle les hypothèses préalablement établies. Les résultats paraissent très logiques et conformes à nos hypothèses.

D'après les différents résultats obtenus, nous avons observé que la température de l'air à l'état initial était élevée pour les deux cas d'étude. L'augmentation de la masse végétale et le changement des albédos des surfaces horizontales et verticales ont amélioré les conditions microclimatiques, que ce soit au niveau de l'air ambiant ou de l'air dans les couches supérieures au-dessus des bâtiments. Cette étude s'intéresse aussi aux effets du vent sur et autour des bâtiments ayant des formes inspirées du monde vivant au lieu de formes régulières ordinaires sur l'amélioration des conditions du confort thermique dans un environnement climatique purement méditerranéen.

On a conclu que la démarche biomimétique avec ses solutions fondées sur la nature représente des opportunités importantes pour répondre aux enjeux climatiques au sein des villes du bassin méditerranéen. Elle constitue, en effet une méthodologie de conception compatible avec la biosphère pour rendre ces villes moins vulnérables aux évolutions climatiques.

CONCLUSION GENERALE

L'aménagement urbain doit pouvoir s'inspirer de la nature. 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. Il ouvre aussi une voie vers un nouvel équilibre entre les techniques modernes et l'environnement dans un développement durable. C'est la façon qui nous aidera à prolonger la vie sur la Terre dans la loi naturelle.

Dans notre étude de cas sur la ville de Jijel en Algérie et la ville de Marseille en France, nous pouvons affirmer pour les échantillons traités qu'il existe une relation entre les caractéristiques urbaines du site et la variation des conditions microclimatiques. Ceci peut être généralisé pour l'ensemble des villes méditerranéennes. Nous cherchons à proposer des dispositifs urbains compatibles avec le tissu existant. L'objectif de notre recherche consiste à créer des microclimats favorables afin d'améliorer les conditions du confort thermique. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une méthode structurée en deux étapes principales : une évaluation microclimatique de scénarios variés, et une évaluation de leur impact sur le confort thermique extérieur.

Les recommandations agissent principalement sur les conditions climatiques environnantes des bâtiments, ainsi que sur leur enveloppe extérieure ayant un contact direct avec les radiations solaires. Nul doute que les apports du biomimétisme sont déjà source d'inspiration dans la mise en œuvre des solutions très efficaces vis-à-vis la lutte contre le changement climatique. Dans l'ensemble, trois solutions majeures sont proposées. La première est d'augmenter la masse végétale en milieu urbain qui repose sur la plantation d'arbres et l'aménagement d'espaces verts ainsi que l'utilisation des toitures vertes, celui-là a permis de créer des conditions de confort thermique extérieures clémentes. La deuxième est de changer l'albédo pour les routes, les trottoirs et le sol en remplaçant les surfaces foncées par des surfaces claires et réfléchissantes et la troisième consiste à apporter des modifications concernant la forme et la disposition des bâtiments en adoptant des formes inspirées de la nature contrairement aux formes existantes qui ont un cachet moderne.

L'application de ces mesures permet une diminution des températures et favorise une ventilation extérieure naturelle offrant des espaces extérieurs confortables. Ils permettent également d'améliorer la qualité de l'air, la santé des populations et de modifier l'urbanisation du territoire.

Enfin, nous pouvons dire que la démarche biomimétique peut aider envisager les villes méditerranéennes d'une façon radicalement différente, avec le biomimétisme le vivant propose des solutions qui vont rarement beaucoup plus loin que les gains marginaux en durabilité. Le concept de biomimétisme en architecture et en aménagement est un succès

CONCLUSION GENERALE

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.

Ce concept valorisant l'efficacité et l'organisation des espaces de vie ne doit pas être perçu comme marginal. Il doit plutôt être vu comme une démarche complémentaire pour une société plus équilibrée visant l'amélioration continue et non la croissance infinie grâce à une nouvelle façon de penser et de créer. En étant conscient de l'état actuel de la planète, en connaissant sa capacité à comprendre les faits dans leurs moindres détails et à mettre toute sa science et sa technologie en œuvre pour tendre vers des solutions, il ne fait pas de doute que l'être humain peut résoudre les problématiques environnementales, sociales et économiques auxquelles il se confronte actuellement. Le « bon sens » issu de la « recherche et du développement » que la nature effectue depuis des milliards d'années est à portée de main et doit inspirer dès maintenant les innovations favorisant un milieu de vie durable pour les générations futures. Il reste à être cohérent et à passer à l'action.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Badarnah Kadri, L. 2012. *Towards the LIVING envelope: Biomimetics for building envelope adaptation.* , Delft University of Technology.
- BAHAMON A., 2007. *L'architecture animale, analogie entre le monde animal et l'architecture contemporaine*, Edition l'inédite, collection analogies.
- Bar-Cohen Y, *Biomimetics—using nature to inspire human innovation, Bioinspiration & Biomimetics*, Vol.1, N.1, 2006b.
- BEN MANSOUR, O. ,2015. *Biologie et Architecture*, DPLG Ecole Nationale d'Architecture de Rabat, Maroc. [En ligne], PDF.URL : https://issuu.com/bomniadocs/memoire_ba_bo (consulté le 05/02/2019).
- Benyus, J.M., 1997. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. William Morrow.USA.
- Benyus, J.M., 2011 ,*Biomimétisme, Quand la nature inspire des innovations durable*, Ed. Rue de l'échiquier, Paris.
- Bernadette Bensaude,V, H. A., Yves ,B et al, "*Chemists and the school of nature* , ." New Journal of Chemistry, 262 002,: 1-5. [En ligne], URL : https://issuu.com/bomniadocs/memoire_babo. (Consulté le 14/03/2019).
- BERNARD, M,F ,et al ,automne 1987, Architectures naturelles, questions 9, Ed. Marc LACOUR, Bruxelles.
- Bille, R., A. Magnan, et al. 2009. *La Méditerranée au futur: des impacts du changement climatique aux enjeux de l'adaptation*.
- Briche, E., O. Cantat, et al. 2017. *Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée*.
- CHAPELLE, Gauthier, 2011, *le vivant comme modele*, la voie du biomimétisme, Ed. Rue de l'échiquier, Paris.
- Dominique Gauzin ,M, 2001. *l'Architecture écologique, 29 exemples européens*, paris.
- Duraiappah, A.K. et al., 2005. *Ecosystems and human well-being*, [En ligne], URL : <http://www.who.int/entity/globalchange/ecosystems/ecosys.pdf> \n<http://www.loc.gov/catdir/toc/ecip0512/2005013229.html>. (consulté le 22/04/2019).
- Durand, H., et al, *Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers*, Études et documents Commissariat général au Développement durable, 2012. (Consulté le 15/04/2019).
- Fabienne, M.-W. *le bio mimétisme, la Nature formidable source d'inspiration*.
- Fayemi P E, et al, *Contextualisation des outils biomimétiques afin de développer une nouvelle méthodologie*, CONFERE, Biarritz, 2013.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Guillot, A. and J.-A. Meyer, 2008. *La bionique: Quand la science imite la nature*, Dunod.
- heradia,N., 2014.*le biomimétisme en architecture réflexion sur une démarche constructive en pleine émergence* .mémoire de master en architecture.
- Hermine, D, 2012 .*Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, p., leviers ; Études et documents 72*. [En ligne], Document PDF URL http://ceebios.com/wp-content/uploads/2017/06/2012_ED72-biomim%C3%A9tisme.pdf.
- K. Wanieck, et al, *Biomimetics and its Tools, Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, vol. 6, no. 2, pp. 53–66, Jun. 2017
- Laria, S,. 2008. *L'avenir en Méditerranée se jouera dans les villes. Annales des Mines- Responsabilite et environnement*, ESKA.
- Lepora F, Verschure P, et al, *The state of the art in biomimetics, Bioinspiration & Biomimetics*, Vol.8, N.1, 2013.
- Michael ,J. 2014, *Biomimicry: Using Nature as a Model for Desig*. Masters Theses, University of Massachusetts Amherst
- Nicolas, B, Stéphane, G. *Biomimétisme L'innovation, c'est la vie*. [En ligne] ,URL : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5183/5183-180-p40.pdf>
- Pawlyn, M., 2011. *Biomimicry in Architecture*.RIBA Publishing.UK.
- Pedersen Zari, M., 2017. "Biomimetic Urban Design: Ecosystem Service Provision of Water and Energy. Buildings." 7, 21
- Pedersen Zari., 2006. *Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability*. SB07 conference Paper number: 033, New Zealand.
- Pedersen Zari., 2014. *Ecosystem processes for biomimetic architectural and urban design*. Architectural Science Review,pp.1–14. [En ligne]: <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2014.968086>.
- Pierre, E.2016, *Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances*. Thèse pour obtenir le grade de docteur délivré par l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Rahmouni, B.2015.*le biomimétisme dans l'architecture*. [En ligne], URL : <https://fr.calameo.com/read/0046394157c180ee367d8> .(Consulté le 7/03/2019).
- Sanchez, C., H. Arribart, et al. 2005. "Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems." *Nature materials* 277.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Speck O et al, *Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments*, Bioinspiration & Biomimetics, Vol.12, 2017.
- Stylianidis, E. 2018. *Outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques*. Master en ingénieur civil architecte, université de Liège.
- Timothy, A. *The Integration of biomimicry into a built environment design process model : An alternative approche tolards hydro-infrastructure*.
- Vincent J F.V, et al, *Biomimetics : its practice and theory*, Journal of The Royal Society Interface,3, 471-482, 2006.
- Zhai, Z., Previtali, J.M., 2010. *Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation*. *Energy Build.* 42, pp357-365.

Les sites :

- Site 1 : <tps://ceebios.com/> (consulté le 15/02/2019).
- Site 2 : <https://www.iucn.org/fr> (consulté le 03/04/2019).
- Site 3 : <https://iprem.univ-pau.fr/fr/index.html> (consulté le 10/04/2019).
- Site 4: <http://www.voirvert.ca>. (consulté le 16/04/2019).
- Site 5 : www.suden.org/fr/wp-content/uploads/2009/12/Architectes-et-DD-2004. (consulté le 22/05/2019).
- Site 6 : <http://www.femise.org/> (consulté le 22/05/2019).

RESUME

La Méditerranée fait partie des zones géographiques les plus impactées par le problème des changements climatiques. Ce phénomène commence à avoir des répercussions préoccupantes et qui sont annoncées comme potentiellement dramatiques voire irréversibles. En l'occurrence ; La hausse des températures ainsi que les dérèglements associés en matière de précipitations, de cycles hydrologiques ou encore d'intensité et fréquence des événements climatiques extrêmes. Il nous faut cependant nous adapter à ce changement inexorable pour en atténuer au maximum ces impacts. Le vivant a fait la preuve, en 3,8 milliards d'années, de son efficacité et de son adaptabilité. L'homme a toujours cherché à imiter ses formes, ses matériaux ou ses procédés. Aujourd'hui, grâce au développement des sciences et au moment de s'engager dans les transitions écologiques et énergétiques, cette ambition se transforme. L'ouverture de nouveaux champs d'exploration nous amène à réaliser dans la nature des découvertes inattendues, à la fois efficaces et durables. Le biomimétisme est le mot qui résume le mieux cette démarche nouvelle, qui propose de s'inspirer de la nature pour innover de façon durable. Dans cette dynamique environnementale, nous avons établi cette recherche, dans l'optique d'améliorer les conditions d'occupation des espaces urbains extérieurs, et de remédier à l'inconfort lié à la hausse des températures dans les villes méditerranéennes, notamment la ville de Jijel en Algérie et la ville de Marseille en France, par l'évaluation de potentiel du biomimétisme dans l'atténuation des changements climatiques dans l'environnement bâti on adoptant des solutions prometteuses inspirées de génie du vivant. Nous avons essayé de trouver le moyen pour améliorer les conditions microclimatiques dans le contexte méditerranéen à travers les divers scénarios qui ont été élaborés et calculés pour la saison estivale. Ils ont été modélés et simulés par le logiciel Envi-met version 4.4. Les différentes simulations ont montré que l'implantation des arbres et l'utilisation des toitures vertes ainsi que le changement des albédos des surfaces et de la géométrie de plan de masse ont amélioré les conditions thermiques du milieu. Les résultats obtenus à travers cette méthode ont révélé que l'intégration de biomimétisme à l'échelle architecturale et urbaine est d'un grand soutien à la conception durable. Elle contribue également aux possibilités d'avoir de bonnes conditions microclimatiques dans les villes méditerranéennes.

Mots clés : Biomimétisme, changement climatique, villes méditerranéennes, microclimat, génie du vivants, innovation durable.

ABSTRACT

The Mediterranean is one of the most affected geographical areas by the climatic changes problem. This phenomenon has begun to have serious repercussions, which are announced as potentially dramatic or even irreversible. For example; the rise in temperatures and associated disturbances in precipitation, hydrological cycles or the intensity and frequency of extreme weather events. We should, however, adapt to this inexorable change to minimize these impacts. The living has proved, in 3.8 billion years, its effectiveness and adaptability. Man has always tried to imitate his forms, his materials or his processes. Today, due to the development of science and the moment of engaging in ecological and energetic transitions, this ambition is changing. The opening of new fields of exploration leads us to realize in nature unexpected discoveries, both effective and sustainable. Biomimicry is the word that best summarizes this new approach, which proposes to take inspiration from nature to innovate in a sustainable way. In this environmental dynamic, we have established this research, with a view to improve the occupancy conditions of the outer urban spaces, and to remedy the discomfort related to the rise in temperatures in the Mediterranean cities, in particular the city of Jijel in Algeria and the city of Marseille in France, by assessing the potential of biomimicry in mitigating climate change in the built environment adopting promising solutions inspired by the genius of the living. We have tried to find a way to improve microclimate conditions in the Mediterranean context through the various scenarios that have been developed and calculated for the summer season. They were modelled and simulated by the Envi-met version 4.4 software. The different simulations showed that the implantation of trees and the use of green roofs as well as the change of surface albedos and ground plane geometry improved the thermal conditions of the environment. The results obtained through this method revealed that the integration of biomimicry at the architectural and urban scales is of great support to sustainable design. It also contributes to the possibilities of having good microclimatic conditions in Mediterranean cities.

Key words: Biomimicry, climate change, Mediterranean cities, microclimate, genius of the living, sustainable innovation.

ملخص

منطقة البحر الأبيض المتوسط من المناطق الجغرافية الأكثر تأثراً بالتغيرات المناخية. أصبحت لهذه الظاهرة انعكاسات مثيرة للقلق، والتي يقال عنها أنه من المحتمل أن تكون كارثية، وحتى لا رجعة فيها. وبوضوح، ارتفاع درجات الحرارة وكذلك التذبذبات المتعلقة بها، فيما يخص التساقطات والدورات الهيدرولوجية أو كذلك شدة تردد الحوادث المناخية الاستثنائية. يجب علينا إذن التكيف مع هذا التغير الذي لا مفر منه كي نقلص من أثاره لأقصى حد. الكائن الحي برهن على مدى 3.8 مليار سنة عن نجاعته وتكيفه، يحاول النسان دوماً أن يقلد أشكال وموارد وطرق هذا الكائن الحي. اليوم وبفضل تطور العلوم وقبيل الانطلاق في الانتقالات الايكولوجية والطاقوية، يتبلور هذا الطموح في انفتاح حقول جديدة للبحث والدراسات، تؤدي بنا إلى تحقيق اكتشافات غير متوقعة في الطبيعة والتي تكون فعالة ومستدامة في نفس الوقت. المحاكاة الحيوية هي الكلمة التي تلخص على أحسن وجه هاته المنهجية الجديدة، التي تقترح الاستلهام من الطبيعة للابتكار بطريقة مستدامة. في إطار هاته الحيوية البيئية، قمنا بهذا البحث بهدف تحسين وتطوير ظروف استغلال الفضاءات العمرانية الخارجية و معالجة الانزعاج الراجع الى ارتفاع درجة الحرارة في المدن المتوسطة وبالخصوص مدينة جيجل بالجزائر ومدينة مرسيليا في فرنسا، وذلك بتقييم إمكانيات المحاكاة الحيوية في تخفيض التغيرات المناخية في المحيط العمراني باتباع حلول واعدة مستوحاة من عبقرية الكائن الحي. لقد حاولنا إيجاد الوسيلة التي تسمح بتحسين الظروف المناخية محدودة النطاق وذلك على مستوى الحوض المتوسطي من خلال مختلف السيناريوهات التي أعدت ودرست في فصل الصيف، بحيث تم وضع نماذج رقمية ومحاكاتها عن طريق برنامج Envi-met 4.4. أبرزت مختلف الفرضيات أن زرع الأشجار واستعمال الأسطح الخضراء والتغيرات في صفة السطح وهندسة مخططات الكتل، قد ساهمت في تحسين الظروف الحرارية في هذا الوسط، النتائج المتحصل عليها بهذه الطريقة أبرزت بأن إدماج المحاكاة البيئية على المستوى المعماري والعمراني، يمكن لها أن تكون بمثابة دعم كبير للتصاميم المستلهمة من الطبيعة، كما وتساهم كذلك في إمكانية الحصول على ظروف مناخية أفضل.

الكلمات المفتاحية: تقليد الطبيعة، تغير المناخ، مدن البحر المتوسط، المناخ المحلي، عبقرية الكائن الحي، الابتكار المستدام.