

Outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques

Auteur : Stylianidis, Eleftherios

Promoteur(s) : Attia, Shady; Elsen, Catherine

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/4644>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil Architecte par Eleftherios Stylianidis

Promoteur : Shady Attia
Co-promoteur : Catherine Elsen
Jury : Stephan Hoornaert
 Sigrid Reiter
 Jacqueline Somma
Président du jury : Pierre Leclercq

Résumé

Ce mémoire de fin d'études a pour objectif premier de 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.

Plus précisément, ce travail s'intéresse à la première couche d'un projet architectural : la façade. Il s'agira de mettre en place un outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques.

La réflexion porte sur l'analyse des avantages, en termes de performances, que l'inspiration de la nature peut apporter aux différents projets. Les divers points forts sont traduits en critères qui sont comparés au fonctionnement biologique de la peau humaine afin de comprendre l'analogie peau-façade réalisée dans la littérature appuyant la réflexion.

En pratique, la méthodologie mise en place repose sur l'analyse de cas concrets (réalisations d'enveloppes biomimétiques) et sur des entretiens.

Le projet de recherche se base premièrement sur l'étude approfondie de six projets de façades biomimétiques réalisés, projets à grande échelle ou prototypes. L'analyse de leurs divers avantages performantiels permet la mise en exergue de critères inhérents à la conception de telles enveloppes. Ces premiers critères sont comparés à des critères ou cibles retrouvés dans des standards et autres normes afin d'appuyer leur pertinence. Ensuite, un premier outil d'aide à la conception est mis en place grâce à ces diverses données.

Dans une deuxième partie, des entretiens sont réalisés. Il s'agit de présenter l'outil à des experts concepteurs sensibilisés à la problématique du développement durable dans le but d'avoir un retour constructif avant sa mise au point. Il leur est également demandé de quantifier, sur une échelle allant de 1 à 5, les différents critères sélectionnés.

Les résultats montrent qu'il peut s'avérer pertinent de travailler des façades biomimétiques au vu des avantages que ces dernières présentent, selon la littérature, par rapport à des projets réalisés de manière « traditionnelle ». Le problème réside néanmoins dans la mise en œuvre d'un outil de ce type. En effet, les critères sont trop souvent soumis à la subjectivité de la personne et les projets peuvent s'avérer être très différents (climat, besoins), compliquant ainsi l'instauration d'une solution globale.

Abstract

The aim of this thesis is to highlight the interest of the biomimetic approach in architectural design. The latter is part of a current research context that aims to find innovative solutions in sustainable development in the building sector.

More precisely, this work focuses on the first layer of an architectural project: the facade. The aim is to setting up a decision support tool for the design of biomimetic facades.

Consideration is given on the analysis of benefits, in terms of performance, that the inspiration of nature can bring to different projects. The various strengths are translated into criteria that are compared to the biological functioning of human skin in order to understand the skin-facade analogy made in the literature.

In practice, the methodology established consists on the analysis of concrete cases (realizations of biomimetic envelopes) and on interviews.

The research project is based firstly on the in-depth review of six biomimetic facades (large-scale projects or prototypes). The analysis of their various performance advantages allows the highlighting of criteria inherent to the design of such envelopes. These first criteria are compared to criteria or targets found in standards in order to support their relevance. Then, a first support tool for the design is put in place thanks to these various data.

Secondly interviews are conducted. The aim is to introduce the tool to designers experts sensitized to the issue of sustainable development in order to have a constructive return before its development. They are also asked to quantify, on a scale of 1 to 5, the different criteria selected.

The results, according to the literature, show that it may be relevant to work with biomimetic facades in view of the advantages that they present compared to projects carried out in a "traditional" way. However, the problem lies in the implementation of such a tool. Indeed, the criteria are too often subject to the subjectivity of the person and the projects analyse can be very different (climate, needs) a global solution. That's why it seems complicate to find a global solution.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux promoteurs, Madame Catherine Elsen et Monsieur Shady Attia, pour le soutien et les conseils que ces derniers m'ont apportés tout au long de ce travail, mais également pour leur confiance et le suivi régulier dont ils ont fait preuve.

De plus, j'aimerais remercier Madame Chayaamor-Heil Natasha pour son investissement, ses précieux conseils et le temps qu'elle a pu me consacrer, afin de me guider dans mon travail et pour les opportunités qu'elle m'a offertes.

Je souhaiterais également remercier mes lecteurs et membres du jury, Madame Sigrid Reiter, Madame Jacqueline Somma et Monsieur Stéphan Hoornaert pour leurs conseils, mais également pour l'attention et le temps qu'ils consacreront à la lecture de ce mémoire.

Ensuite, mes remerciements iront aux 22 professionnels qui ont accepté de participer à l'enquête réalisée dans le cadre de ce travail, pour leur collaboration et le temps qu'ils ont pu me consacrer.

Enfin, mes derniers remerciements iront tout d'abord à ma famille, puis à mes amis, pour le soutien sans faille dont ils font preuve depuis tant d'années et leurs conseils. J'aurai également une pensée toute particulière à mon grand-père pour ses précieux conseils tout au long de mon apprentissage et pour son soutien.

Sommaire

Table des tableaux

Table des figures

Chapitre 1 : Introduction	1
Chapitre 2 : Etat de l'art.....	5
2.1. Origine du biomimétisme	5
2.2. Définitions	7
2.3. Exemples notables.....	8
2.4. Le biomimétisme : méthode et outils.....	15
2.5. Réglementation Internationale sur le biomimétisme.....	22
2.6. La Peau.....	23
2.7. Analogie Peau – Façade.....	26
2.8. Labels et Standards	28
Chapitre 3 : Méthodologie.....	38
3.1. Paradigme scientifique.....	38
3.2. Méthodologie appliquée au mémoire	39
3.3. Méthodologie : Analyse des cas - Sélection des critères de choix :	42
3.4. Méthodologie : Approche multicritère.....	43
3.5. Méthodologie : Enquêtes	46
Chapitre 4 : Résultats	52
4.1. Analyse des cas d'études	52
4.2. Résultats des entretiens.....	73
4.3. Synthèse des résultats.....	87
Chapitre 5 : Discussion des résultats	88
5.1. Discussion des cas d'études.....	88
5.2. Discussion de l'interview	90
5.3. Conclusion de la discussion.....	93
Chapitre 6 : Conclusion	95
6.1. Conclusion de la recherche.....	95
6.2. Limites de la recherche	96
6.3. Pistes pour de futures recherches.....	97
Bibliographie.....	98
Webographie	104
Annexes.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°1 : Labels pour matériaux	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°2 : Cas non retenus et images de cas	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°3 : Grille d'entretien.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°4 : Profil des personnes interviewées	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°5 : Résultats enquêtes	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°6 : Mots-clés question 1 et 2.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°7 : Paradigmes scientifiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Annexe n°8 : Poster SDB Lab	Erreur ! Signet non défini.

Table des tableaux

Tableau 1 : Fonctionnement de la peau des organismes et analogies architecturales - Adaptation de Gruber & Gosztanyi, 2010	27
Tableau 2 : CH2 - Fiche d'identité	52
Tableau 3 : Water Cube - Fiche d'identité	56
Tableau 4 : Esplanade Theater - Fiche d'identité	59
Tableau 5 : Biofaçade PBR - Fiche d'identité	62
Tableau 6 : One Ocean Pavillon - Fiche d'identité	65
Tableau 7 : HygroSkin - Fiche d'identité	68
Tableau 8 : Tableau synthétique des six cas étudiés	71
Tableau 9 : Synthèse Cas - Critères	72
Tableau 10 : Propositions de quantification - Critère 1	79
Tableau 11 : Propositions de quantification - Critère 2	81
Tableau 12 : Propositions de quantification - Critère 3	82
Tableau 13 : Propositions de quantification - Critère 4	83
Tableau 14 : Propositions de quantification - Critère 6	84
Tableau 15 : Propositions de quantification - Critère 7	85
Tableau 16 : Synthèse : Critères - Standards	87
Tableau 17 : Réponses question 4 et 5 (Reiter - Possoz)	1
Tableau 18 : Réponses question 4 et 5 (Hélium 3 - Huberty)	1
Tableau 19 : Réponses question 4 et 5 (Fizinger- De Herde)	1
Tableau 20 : Résultats question 4-5 (Bruyère - Attia)	1
Tableau 21 : Résultats question 4-5 (Bruyère - Attia)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 22 : Légende profil personnes interviewées	1
Tableau 23 : Réponses question 1 à 3 + Remarques (Mans – Fizinger)	1
Tableau 24 : Réponses question 1 à 3 + Remarques (Somma – Attia)	1
Tableau 25 : Recensement question 1	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 26 : Recensement question 2	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 27 : Paradigmes scientifiques (Guba & Lincoln, 1994)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 28 : Paradigmes scientifiques (Guba & Lincoln, 1994)	Erreur ! Signet non défini.

Table des figures

Figure 1 : Diagramme présentant la méthodologie du mémoire.....	3
Figure 2 : Outil envisagé.....	4
Figure 3 : La Sagrada Familia - Barcelone – Espagne tiré de Stott, 2017.....	8
Figure 4 : La Sagrada Familia - Imitation de l'arbre tiré de Demougeot, 2018.....	8
Figure 5 : La Tour Eiffel - Paris – France, tiré de Walsh, 2018.....	9
Figure 6 : La Tour Eiffel - Imitation de la structure osseuse du fémur, tiré de Abel, 2016.....	9
Figure 7 : Eastgate Center - Harare - Zimbabwe tire de EIDin & al., 2016, p.381.....	10
Figure 8 : Eastgate Center – Imitation du système de ventilation d'une termitière tiré de EIDin & al., 2016, p.381	10
Figure 9 : Eden Project - Cornouailles – Royaume-Uni, tiré de Mairs, 2015.....	11
Figure 10 : Eden Project – Vue intérieure, tiré de Mairs, 2015.....	11
Figure 11: Lavasa Hill Station – Inde, tiré de HOK, 2009.....	12
Figure 12 : Lavasa Hill Station – Inde, tiré de HOK, 2009.....	12
Figure 13 : Lily pad- projet de Vincent Callebaut tiré de Callebaut, 2011, p.12.....	13
Figure 14 : Lily pad – Imitation du nénuphar géant d'Amazonie.....	13
Figure 15 : Genève - Luc Schuiten tiré de Schuiten, 2015.....	14
Figure 16 : Bruxelles - Luc Schuiten tiré de Schuiten, 2017.....	14
Figure 17 : Conception biomimétique - Solution-Based adapté de El-Zeiny, 2012.....	15
Figure 18: Conception biomimétique - Nature-Based adapté de El-Zeiny, 2012.....	15
Figure 19 : Lentille de conception biomimétique selon biomimicry 3.8 (2015).....	16
Figure 20 : Trois niveaux d'imitation adaptée de Zari, 2007.....	17
Figure 21 : Le coléoptère namibien (gauche) - Le capteur de brouillard (droite) tiré de Chayaamor-Heil et al., 2018, p.8.....	18
Figure 22 : La Gherkin Tower (gauche) - L'éponge des mers (droite) tiré de) tiré de Chayaamor-Heil et al., 2018, p.7.....	18
Figure 23 : Régulation de la chaleur des pingouins empereurs (gauche) - Mise en pratique du concept dans un projet (fictif) de village tiré de Chayaamor-Heil et al., 2018, p. 11.....	19
Figure 24 : La peau de l'être humain – Coupe schématique tiré de Perrot, n.d, p.2.....	23
Figure 25 : La peau de l'être humain – Coupe schématique – Épiderme, tiré de Dréno, n.d., p.3.....	24
Figure 26 : La peau de l'être humain – Coupe schématique - Derme.....	24
Figure 27 : La peau de l'être humain – Coupe schématique - Hypoderme.....	25
Figure 28 : Niveaux de performances selon la PEB (gauche) - Calcul du niveau Ew (droite) (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015, p.4.1).....	29
Figure 29 : Partie de tableau provenant du Batex 2013 tiré de Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie, 2013, p.10.....	30
Figure 30 : Critères et pondérations de la méthode BREEAM tiré de BRE Global Limited, 201, p.22.....	32
Figure 31 : Représentation radar.....	40
Figure 32 : Représentation radar.....	44
Figure 33 : Fraction de la matrice d'évaluation d'après les principes du vivant appliquée à l'entreprise Interface® tiré de Allard, 2012, p.29.....	45
Figure 34 : Représentation des résultats sous forme de radar tiré de Allard, 2012, p.26.....	45
Figure 35 : CH2 (gauche) et l'analogie à l'arbre (figure à retrouver en annexe n°2) (droite).....	52
Figure 36 : CH2 - Façade Sud - Tours douches, tiré de DesignInc, 2013.....	53
Figure 37 : CH2 – Façade Ouest - Persiennes en position ouvertes, tiré de DesignInc, 2013.....	53
Figure 38 : CH2 – Façade Nord - Treillis en acier, balcons et jardins verticaux, tiré de DesignInc, 2013.....	54
Figure 39 : CH2 - Coupe de principe bioclimatique jour (gauche) et nuit (droite) tiré de DesignInc, 2013.....	55
Figure 40 : Water Cube tiré de Maneval, 2014.....	56
Figure 41 : Water Cube - Vue intérieure de la piscine principale tiré de Etherington, 2008.....	56
Figure 42 : Water Cube - Façade extérieure tiré de Maneval,2014.....	57
Figure 43 : Water Cube - Travail 3D par ordinateur tiré de Maneval,2014.....	57
Figure 44 : Water Cube - Construction - Structure métallique et pose de revêtement (source : archdaily.com)....	57
Figure 45 : Water Cube - Coupe de principe bioclimatique tiré de Gonchar, 2008, p.2.....	58
Figure 46 : Water Cube - Coupe 3D (source : archdaily.com).....	58
Figure 47 : Esplanade Theater - Analogie au fruit de Durian tiré de Radwan & Osama, 2016, p.185.....	59
Figure 48 : Esplanade Theater - Plan (source : archdaily.com).....	59
Figure 49 : Esplanade Theater - Vue extérieure – Nuit (source : archdaily.com).....	60
Figure 50 : Esplanade Theater - Zoom sur les panneaux d'aluminium (source :archdaily.com).....	60
Figure 51 : Esplanade Theater - Travail de façade - Ouvertures/Fermetures (source :archdaily.com).....	60
Figure 52 : Biofaçade PBR - Bâtiment CSTB (gauche) (Peter, 2016) - microalgue (droite).....	62
Figure 53 : Biofaçade PBR – Principes (pinterest.fr).....	62

Figure 54 : Biofaçade PBR - Principe bioclimatique tiré de Pruvost, 2014	63
Figure 55 : Biofaçade PBR - Mise en culture (gauche) - Panneaux de façade (droite) tiré de Lofgren, 2013	63
Figure 56 : One Ocean Pavillon tiré de SOMA, 2012	65
Figure 57 : One Ocean Pavillon - Vue 3D tiré de SOMA, 2012	65
Figure 58 : One Ocean Pavillon - Oiseau de paradis (gauche) - FE Simulation des lamelles (milieu) - Lamelles ouvertes/fermées (droite) tiré de Schleicher, 2011, p. 6.	65
Figure 59 : One Ocean Pavillon - Lamelles fermées, jour (gauche) - Lamelles ouvertes et éclairées, nuit (droite) tiré de SOMA, 2012	66
Figure 60 : One Ocean Pavillon - Coupe longitudinale tiré de SOMA, 2012	66
Figure 61 : Coupe de principe bioclimatique (gauche) - Vents dominants (droite) tiré de Transolar, 2012	66
Figure 62 : HygroSkin (Menges & al., 2013).....	68
Figure 63 : HygroSkin - Travail 3D paramétrique tiré de Krieg, Christian, Correa, Menges, Reichert, Rinderspacher & Schwinn, 2014, p. 65	68
Figure 64 : HygroSkin - Degrés d'ouverture fonction de l'humidité relative - Cône du conifère (gauche) - Cavité (droite) tiré de Reichert & al., 2015, p.52.....	69
Figure 65 : HygroSkin – Composants tiré de Menges, Krieg & Reichert, 2013	69
Figure 66 : HygroSkin - Cavités fermées (gauche) - Cavités ouvertes (droite) tiré de Krieg & al., 2014, p.62	70
Figure 67 : HygroSkin - Travail paramétrique (gauche) - Tests en conditions contrôlées (droite) tiré de Reichert & al., 2015, p.66.....	70
Figure 68 : HygroSkin - Coupe (gauche) - Plan (droite) (Menges & al., 2013)	70
Figure 70 : Nuage de mots - Question 1 : définition du biomimétisme	73
Figure 71 : Nuage de mots - Question 2 : Analogie Peau-Façade	75
Figure 72 : Représentation radar proposée.....	93
Figure 73 : Proposition postenquêtes de l'outil.....	93
Figure 74 : Eastgate Center - Fonctionnement interne (EIDin & al., 2016).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 75 : Le mur respirant - prototype réalisé (gauche) - coupe de principe (droite) (EIDin & al., 2016)....	Erreur ! Signet non défini.
Signet non défini.	
Figure 76 : Tableau des avantages et inconvénients du mur respirant selon (EIDin & al., 2016).....	Erreur ! Signet non défini.
Signet non défini.	
Figure 77 : Thermobimetal - Principe d'ouvertures en fonction de la température (gauche) et armoured corset project (milieu et droite) (Sung,n.d.)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 78 : TMB – Prototype - Bloom pavilion. Courtesy Brandon Shigeta (archdaily.com).....	Erreur ! Signet non défini.
Signet non défini.	
Figure 79 : CH2 - Explication du concept de l'arbre (Webb, 2005).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 80 : Poster.....	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 1 : Introduction

Les villes sont partiellement responsables du changement climatique, mais elles peuvent également constituer une partie de la solution (Kamal-Chaoui & Robert, 2009). Telle est la problématique qui nous occupe.

En effet, à l'heure actuelle, les villes sont les plus grandes consommatrices d'énergie et c'est pourquoi elles contribuent grandement à l'émission de gaz à effet de serre. Il est également important de signaler que les diverses autorités gérantes de nos villes ont le pouvoir de se saisir du problème et d'agir sur un des aspects : le bâti (Commission Européenne, 2011). Le Conseil européen estime que le secteur du bâtiment est responsable de 40% des consommations énergétiques et de 36% des émissions de CO₂. Au niveau de l'Union Européenne, des fonds sont déboursés dans le secteur du bâtiment afin d'y développer la recherche et l'innovation en matière de développement durable (Commission Européenne, 2014).

Il s'agit d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en développant des stratégies « passives » et « actives » lors de conceptions de projets architecturaux. L'objectif est de diminuer les consommations d'énergies en chauffage et refroidissement, de proposer des équipements efficaces au niveau énergétique et d'utiliser des ressources renouvelables (Stevanović, 2013). Cette diminution passe notamment par un travail de façades plus efficace, en travaillant avec des matériaux plus isolants, des sources d'énergies plus vertes, des technologies intelligentes, etc. (Lopez, Rubio, Martin & Croxford, 2016).

L'enveloppe du bâtiment est définie comme l'interface entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. Elle permet de contrôler la qualité des conditions intérieures, importantes pour le confort des personnes. Elle a donc un rôle de filtre qui permet de gérer les échanges et limiter les pertes d'énergies (Oral & Yilmaz, 2003).

Au vu de son rôle décisif, la façade a été le sujet d'un nombre important de recherches au niveau international. Ces dernières portent notamment sur la manière d'améliorer les performances de cette « peau » et d'ainsi mieux gérer les diverses pertes énergétiques qui peuvent lui être liées (Lopez, & al. 2016).

Un des champs de recherche en plein essor est le **biomimétisme**. Ce dernier est défini comme étant une science appliquée qui reprend des inspirations de solutions retrouvées dans la nature afin de répondre à des problématiques humaines (Benyus, 2011). En 2015, le biomimétisme est présenté par le conseil économique social et environnemental européen comme un champ de recherche intéressant avec l'architecture comme domaine d'application prometteur face aux enjeux du développement durable (Ricard, 2015).

Lors de conceptions inspirées de la nature, l'enveloppe d'un projet est très souvent comparée à la peau de l'être vivant. C'est pourquoi il s'agira de comprendre cette analogie souvent réalisée entre l'organe de protection des différentes espèces et la façade. La peau étudiée sera celle de l'homme. En effet, la peau de l'humain a été choisie, car la façade est, par certains auteurs, considérée comme notre 3^e peau, après l'organe biologique et les vêtements que nous portons (Gruber & Gostzonyi, 2010). Il paraissait donc adéquat de comprendre cette analogie et d'en ressortir les caractéristiques communes.

Le travail de façades biomimétiques est en plein développement et plusieurs concepteurs proposent déjà des projets réalisés selon cette approche. C'est ainsi que ce mémoire prendra la peine d'étudier en profondeur des cas d'étude d'enveloppes inspirées de la nature et dont la prouesse technique et les avantages énergétiques ont été soulevés par la littérature. Cette étude permettra de proposer un outil d'aide à la conception d'enveloppes biomimétiques soutenant le processus décisionnel sur base de plusieurs de critères. Ces critères seront basés essentiellement sur l'analyse performantielle des projets retenus, sur des standards et des labels, mais également sur l'analogie peau-façade. Des entretiens auprès d'experts concepteurs seront également menés afin d'aider à la réalisation de l'outil envisagé.

Le présent mémoire sera subdivisé en plusieurs chapitres : l'état de l'art, la méthodologie appliquée, les résultats, les discussions de résultats et une conclusion sur le travail réalisé.

I. État de l'art

Après l'introduction, ce deuxième chapitre permettra de mettre en place les bases de la conception biomimétique. Il y sera fait état de son origine et nous y retrouverons certaines définitions importantes dans le cadre de l'architecture telles que la bio-inspiration, le biomorphisme, la bionique et la biomimétique. Ensuite, nous étayerons ces définitions au moyen d'exemples de réalisations notables. L'étape suivante de l'état de l'art sera de montrer l'état actuel de la conception architecturale biomimétique en expliquant son origine, les différents niveaux d'imitation et les outils mis en place pour aider les concepteurs. Nous fournirons également des informations sur la réglementation internationale concernant le biomimétisme et ses champs d'application.

Par après, comme mentionné ci-dessus, nous explorerons en détail le fonctionnement biologique de la peau humaine et nous prendrons connaissance des caractéristiques communes qui existent avec la façade selon la littérature. Afin de clôturer ce chapitre, il sera question de décrire certains standards et labels qui permettent de rendre compte de la performance de bâtiments, notamment au niveau énergétique. En effet, cette section fera écho à la volonté première de ce mémoire, car elle permettra de montrer ce qui a déjà été réalisé dans la mise en exergue des qualités environnementales d'un projet. C'est ainsi que ces standards et leurs quantifications de critères permettront de renforcer la mise en place de l'outil d'aide à la décision dans le cadre d'une conception de façades biomimétiques qui est envisagé.

II. Méthodologie

Ce chapitre présentera la méthodologie qui aura été appliquée sur toute la durée de ce travail de fin d'études. Un paragraphe succinct sur le paradigme scientifique suivi sera présenté. Ensuite, un diagramme reprenant la méthodologie complète et une brève description des étapes clés seront proposés. Afin de compléter ce chapitre, il sera fait état d'une description plus complète des étapes importantes. Il sera ainsi question de la méthodologie concernant la sélection des critères de choix des projets qui ont été étudiés et leur analyse. Ensuite, nous passerons à une brève explication sur l'intérêt de l'approche multicritère qui a été la base même de l'outil et, enfin, nous présenterons les enquêtes qui auront été réalisées dans le cadre de la thèse. Ces dernières ont permis d'avoir un regard extérieur sur l'outil envisagé.

Un diagramme de la méthodologie est présenté à la page suivante. Notons que ce dernier sera expliqué plus précisément à la section 3.2 du travail.

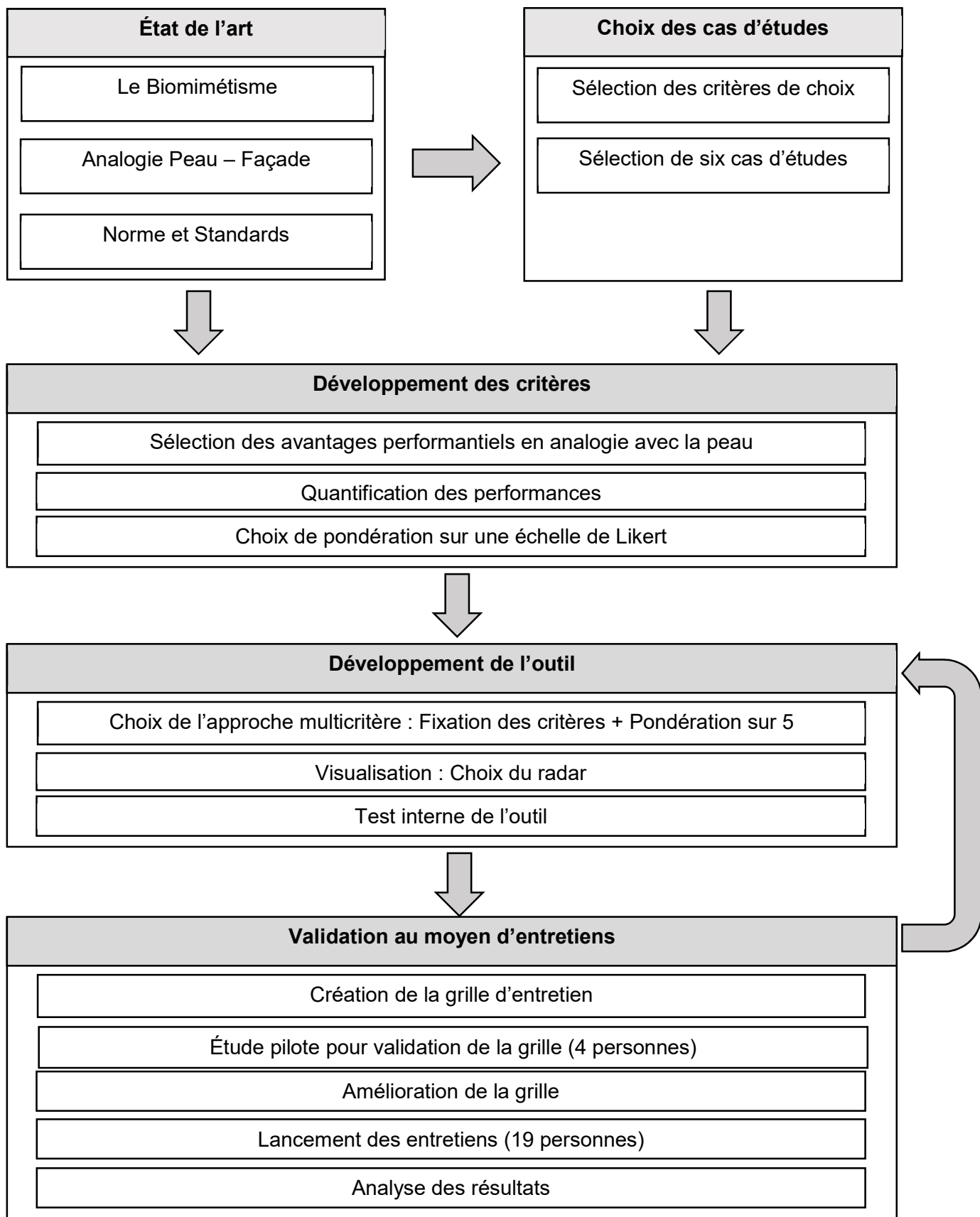


Figure 1 : Diagramme présentant la méthodologie du mémoire

III. Résultats

Dans le quatrième chapitre de ce mémoire, nous retrouverons les différents résultats. Ces derniers seront séparés en deux parties. Premièrement, l'analyse des cas d'étude choisis, à savoir celle du Council House 2 en Australie, du Water Cube en Chine, de l'Esplanade Theater à Singapour, du travail de Biofaçades sur le cas de la façade du Centre Scientifique et Technique du bâtiment (CSTB) en France, du One Ocean Pavillon en Corée du Sud et de l'Hygroskin, également retrouvée en France. Au moyen de ces cas d'étude et de l'état de l'art présenté, des critères caractérisant les façades biomimétiques seront développés. Ces derniers seront les matériaux biosourcés, la protection, la performance, l'isolation, le confort visuel et la maintenance.

En deuxième lieu, les résultats des divers entretiens menés seront également présentés. Les questions, au nombre de quatre, présentes dans le guide d'entretien seront analysées. Ces dernières permettent de rendre compte des connaissances d'experts sur le sujet du biomimétisme au moyen d'une simple définition. Ensuite, nous retrouverons des mots-clés qui ont été ressortis au moyen d'une analogie peau-façade. Par après, des critiques sur les premiers critères mis en place par les personnes enquêtées seront présentées. Finalement, une pondération leur a été demandée afin de mettre en œuvre l'outil désiré. La figure 2 ci-dessous montre le premier outil mis en place dans le cadre de ce travail. Nous y retrouvons 7 critères inhérents aux façades biomimétiques et une pondération de chacun allant de 1 à 5. Notons que les traits mauves et rouges sont placés à titre indicatif, représentant deux façades fictives répondants de manières différentes aux critères.

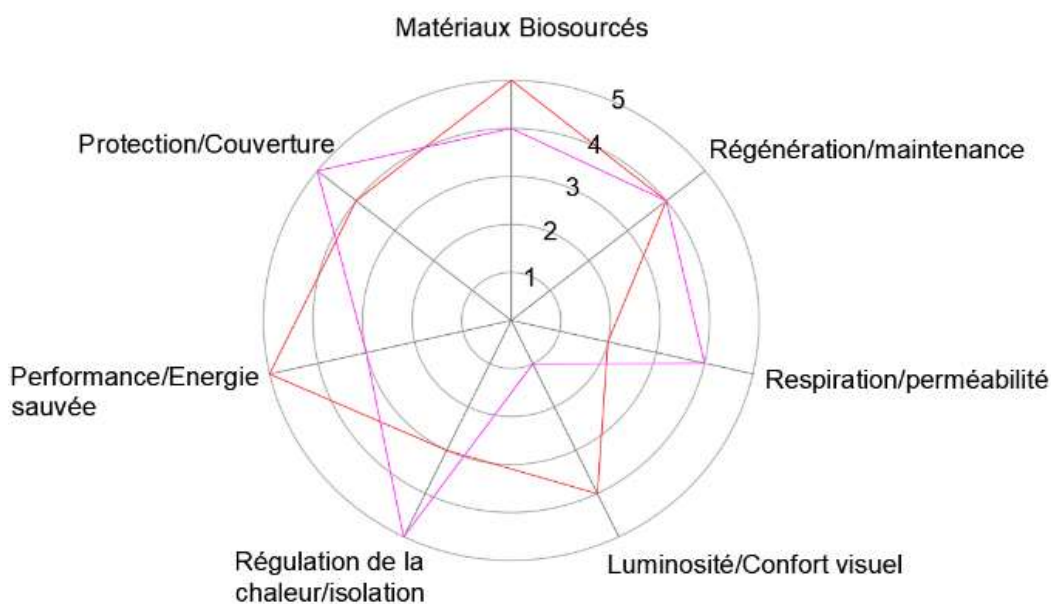


Figure 2 : Outil envisagé

IV. Discussions des résultats

Ce chapitre permettra d'avoir un retour sur les différents résultats obtenus. Il sera discuté des cas d'étude et du choix de ces derniers. De plus, nous retrouverons des pistes de solutions aux problèmes rencontrés dans ce mémoire afin de régler la quantification des critères qui s'est avérée compliquée. Ensuite, nous retrouverons une discussion des résultats de l'enquête, mais également du choix de l'entretien. Dans cette discussion, nous reprendrons les questions une à une afin d'en ressortir des réponses ayant attiré notre attention. Finalement, nous conclurons sur les résultats obtenus et sur la façon de réaliser l'outil d'aide à la conception.

Chapitre 2 : État de l'art

2.1. Origine du biomimétisme

Afin d'introduire le sujet qui nous occupe, commençons par développer un historique concis du biomimétisme. Son étymologie, sa première apparition et son évolution jusqu'au jour d'aujourd'hui.

L'étymologie du mot biomimétisme provient du grec ancien et des mots βίος *bíos* (vie) et μίμησις *mímêsis* (imitation). 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).

Otto Herbert Schmitt, biophysicien et inventeur américain du 20^e siècle, a été la première personne à utiliser le mot « biomimétisme » dans sa thèse de doctorat en 1958, terme qu'il inventa lui-même une année plus tôt (Chekchak & Lapp, 2011). Ce dernier était convaincu, comme beaucoup de ses pairs de l'époque, que l'enseignement que procurait la biophysique allait jouer un rôle prépondérant dans l'innovation moderne (Harkness, 2002). Pour rappel, la biophysique se définit comme une science qui se sert de la physique pour interpréter les phénomènes biologiques. Ensuite, le Major Jack Steel emploie à son tour un nouveau terme, la « bionique ». Il le décrit comme « *la science des systèmes qui s'inspirent dans une certaine mesure de la nature, ou qui présentent des caractéristiques de systèmes naturels ou les imitent* » (Kapsali, 2017).

Depuis, le biomimétisme a beaucoup évolué. Dans les années 70, l'association de deux scientifiques britanniques, George Jeronomidis, ingénieur de formation et Julian Vincent, zoologiste, a permis la création d'un premier centre de la biomimétique à l'université de Reading en 1991. L'interdisciplinarité des domaines est à l'origine de travaux importants de recherches dans le développement, notamment, de matériaux intelligents inspirés de la nature. C'est ainsi que les recherches universitaires ont été de plus en plus nombreuses avec un accroissement de 300% des articles annuels en l'espace de 15 ans (100 en 1990 et 3000 en 2013) (Kapsali, 2017). L'Angleterre a même pris l'initiative, en 2013, d'intégrer une introduction au biomimétisme dans le programme scolaire de jeunes adolescents âgés de 11 à 14 ans (Kapsali, 2017).

Janine Benyus vulgarise le terme et le rend populaire dans les années 80. Cette biologiste environnementaliste écrit l'ouvrage désormais bien connu : « *Biomimicry, Innovation inspired by Nature* » et propose de prendre la nature comme modèle, mesure et mentor. Cette dernière décrit parfaitement la discipline dans son livre, en ces termes : « *Une nouvelle science qui étudie les modèles de la nature puis imite ou s'inspire de ces idées et procédés pour résoudre des problèmes humains. (modèle)[...] 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 et ce qui dure. (mesure) [...] 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. (mentor)* » (Benyus, 2011 p.4).

La fondation américaine de Mme Benyus en 2006 (Biomimicry Institute) a été le point de départ de plusieurs autres initiatives nationales et internationales. Les pays asiatiques et les États-Unis sont les plus avancés dans le domaine. Il est tout de même à noter que les pays européens s'y consacrent de plus en plus. En effet, l'Europe, crée en 2010 une nouvelle association, Biomimicry Europa et le Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme (CEEBIOS) basé à Senlis, en France, deux ans plus tard (Chayaamor-Heil, Guéna & Hannachi-Belkadi, 2018). L'Allemagne reste toutefois, avec le Royaume-Uni et la Suisse, la plus performante en terme de recherches biomimétiques avec par exemple 100 millions d'euros investis par l'état allemand dans la R&D biomimétique (centres d'excellence dans le domaine des matériaux et structures bio-inspirés) depuis le début des années 2000 (Ceebios, 2013).

Le biomimétisme se développe dans un nombre très conséquent de domaines dans le secteur industriel. Ceci conduit à des innovations importantes, notamment dans le monde de la robotique, de l'informatique, des mathématiques, de la médecine, du biomédical, etc. , mais tient rarement compte des enjeux du développement durable, préoccupation importante des concepteurs contemporains

(Nachtigall, 2003). Dans le monde de l'architecture, le biomimétisme est perçu comme un moyen de répondre à ces derniers (Chayaamor-Heil & al., 2018).

Certaines autres initiatives ont également été prises en Europe. En effet, le mot biomimétisme étant considéré comme trop technique par certains, le « nature-based » (ndr. Basé sur la nature) est apparu et s'est développé en parallèle (Toxopeus & Polzin, 2017). Le but du nature-based est équivalent au biomimétisme. En effet, on recherche des solutions inspirées ou copiées de la nature afin de réduire des consommations d'énergies inutiles et une utilisation de ressources excessives. Cette démarche permet de faire progresser le domaine de la santé, de l'économie, la société et respecter l'environnement. On y note également l'importance de réfléchir aux solutions au niveau local (Potschin, & al. 2015).

Le biomimétisme, tel qu'on le connaît, est donc une discipline récente et de plus en plus étudiée. Comme remarqué ci-dessus, des recherches associées au biomimétisme, comme le nature-based, sont également en pleine émergence. Beaucoup de concepteurs voient cette façon d'imiter le fonctionnement de la nature comme une solution d'avenir durable. Il existe cependant plusieurs façons de copier la nature, et cela à différentes échelles, c'est ce dont nous allons discuter dans le chapitre suivant.

2.2. Définitions

Après la brève introduction au sujet global qu'est le biomimétisme, il paraît important d'expliciter certains termes souvent confondus avec la discipline et d'ainsi les distinguer. C'est ainsi que nous proposerons ici une synthèse claire des différentes disciplines prenant la nature comme source d'inspiration dans le cadre de l'architecture. Ces mots sont : bio-inspiration, biomorphisme, bionique et biomimétique.

La bio-inspiration est la discipline dite « générale ». Il s'agit de s'inspirer de la nature et de la biologie afin de répondre à des problématiques humaines (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Le biomorphisme est une conception qui est influencée de manière directe par les formes organiques animales (humaines également) ou végétales et prend ses racines dans le mouvement de l'Art Nouveau dès la fin du 19^e siècle. L'Art Nouveau est un mouvement « insolite » avec des formes fluides d'inspiration naturiste qui s'opposent aux matériaux rigides de l'ère industrielle tel que l'acier. Ceci sera dérivé en **zoomorphisme** (inspiration de l'animal dans sa forme) au début du 21^e Siècle grâce notamment à la liberté que va avoir l'architecte par l'intermédiaire de logiciels de modélisation et de calculs de plus en plus sophistiqués comme le Musée Guggenheim ou le Milwaukee Art Museum (Diner, 2007).

Le bionique fait la synthèse de ce que l'on peut trouver dans la nature et les applique dans des concepts et des technologies modernes de constructions. C'est un courant du design dont la composition et les lignes de force empruntent aux formes naturelles et biologiques. Ce dernier s'est développé à la fin du 20^e Siècle et fait opposition à l'architecture traditionnelle très angulaire. Un néologisme, **l'archiborescence**, construit avec le mot « architecture » et « arborescence » est utilisé pour nommer la composition d'une architecture dite « organique », s'inspirant des formes du vivant, mais également de son comportement (Sugar, Leczovics & Horkai, 2017).

Concernant la définition de la bionique, les définitions peuvent varier en fonction des auteurs. Certains considèrent que la différence entre la bionique et le biomorphisme est presque inexistante et n'en font qu'une seule et même discipline. Il est par contre à noter que la bionique n'imit pas uniquement les formes, mais introduit petit à petit les fonctionnements naturels afin de les inclure dans la conception. Le biomorphisme se montre quant à lui très ferme sur l'imitation pure de la forme naturelle.

Le biomimétique est une conception durable de l'architecture dont les solutions proviennent de la nature (Pawlyn, 2011). Les formes ne sont pas toujours répliquées. Cette discipline propose d'étudier et de comprendre les mécanismes naturels qui nous entourent et de les reproduire ou même de les améliorer lors d'une conception architecturale. C'est donc une activité pluridisciplinaire alliant l'étude du vivant et l'architecture (Chayaamor-Heil et al., 2018).

L'architecture biomimétique cherche à développer une réelle interaction du bâtiment avec son environnement permettant au bâti d'être durable dans le temps et d'avoir un impact positif sur ce qui l'entoure. Cette synergie demande un travail collaboratif important entre architectes et biologistes (Gruber, 2011).

L'imitation de la nature se fait donc à différentes échelles. Le biomorphisme reste très sobre quant à son imitation et s'inspire unique des formes qu'il voit autour de lui. Ensuite, la bionique introduit quelque peu l'imitation des fonctionnements naturels. Le biomimétisme prône quant à lui une imitation du comportement et des mécanismes naturels.

2.3. Exemples notables

Il paraît important maintenant d'étayer ces définitions au moyen d'exemples. Les sept exemples qui suivent ont été choisis pour plusieurs raisons. Ils marquent des époques différentes, des architectes différents et des fonctions différentes. De plus, le niveau d'imitation de la nature diffère également. Ces exemples ont, de plus, une certaine importance dans le paysage architectural. On retrouve des monuments, des bâtiments emblématiques et des projets ou prototypes reconnus.

I. La Sagrada Familia

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 3), 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 4). 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 3 : La Sagrada Familia - Barcelone – Espagne tiré de Stott, 2017



Figure 4 : La Sagrada Familia - Imitation de l'arbre tiré de Demougeot, 2018

II. La Tour Eiffel

La Tour Eiffel (figure 5) est également une œuvre (insoupçonnée) de biomimétisme. Cette dernière a été réalisée pour l'exposition universelle de Paris en 1889. La Tour est réalisée en fer puddlé et est un point culminant du 7^e arrondissement de Paris, en bordure de la Seine. Elle est le symbole de la capitale française et un des monuments les plus visités en France et dans le monde. Elle a été le monument le plus haut du monde durant plus de 40 ans.

Gustave Eiffel, ingénieur français, a étudié la structure osseuse du fémur humain pour la conception de cette structure métallique de 324m de haut (figure 6). En effet, cet os est capable de supporter un poids de dix mille newtons en position verticale et sa structure en treillis osseux (nommés trébuches) permet une excellente répartition des charges (Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis, 2013).

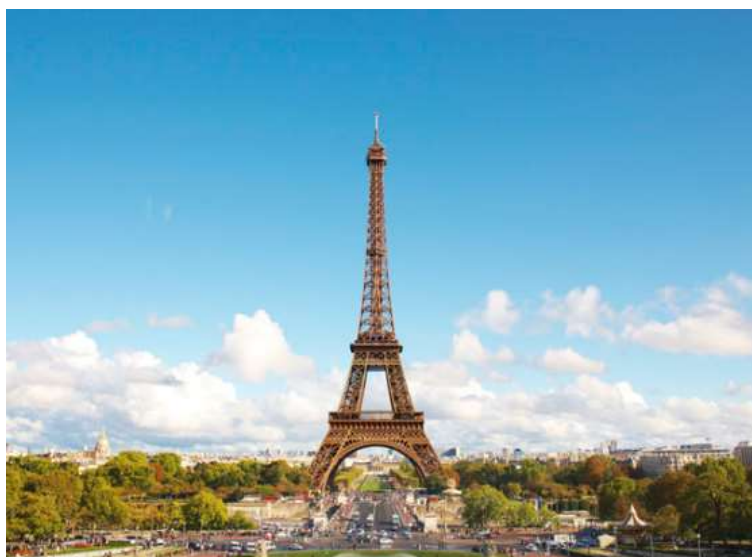


Figure 5 : La Tour Eiffel - Paris – France, tiré de Walsh, 2018

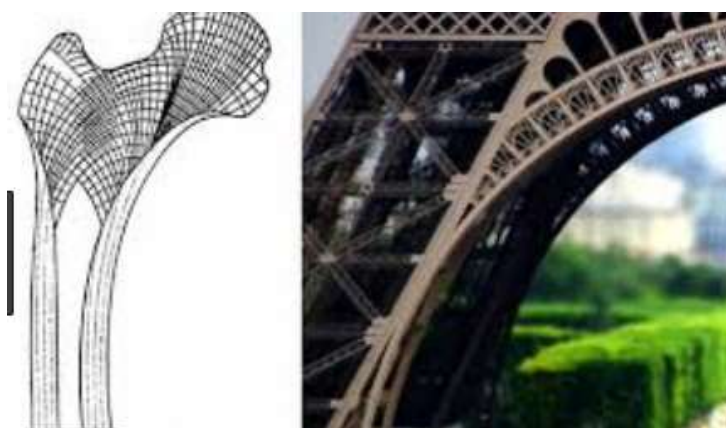


Figure 6 : La Tour Eiffel - Imitation de la structure osseuse du fémur, tiré de Abel, 2016

III. Eastgate Center

Sans doute l'un des bâtiments biomimétiques les plus emblématiques réalisés, l'Eastgate Center (figure 7) de Mick Pearce, 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).

Pearce a donc décidé de reprendre certains de ces principes (figure 8) 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).



Figure 7 : Eastgate Center - Harare - Zimbabwe tire de EIDin & al., 2016, p.381

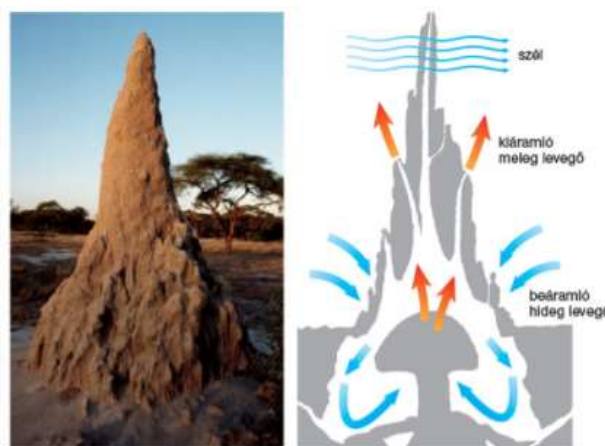


Figure 8 : Eastgate Center – Imitation du système de ventilation d'une termitière tiré de EIDin & al., 2016, p.381

IV. Eden project

Michael Pawlyn, l'un des architectes principaux du projet et un des précurseurs du biomimétisme moderne, a voulu démontrer la viabilité d'un projet dit « écosystémique » (la définition de ce terme sera explicitée clairement dans la section 2.4, point c).

Pawlyn et ses collègues proposent trois dômes en structure en nid d'abeille permettant d'accueillir trois environnements (figure 9). Dans chacune de ses « bulles », on retrouve une faune et une flore spécifiques aux trois climats : un climat tropical humide (figure 10), un climat chaud et sec et un climat tempéré. Ceci a notamment pour but de démontrer la viabilité des climats artificiels (Johnson, 2012).

Ces serres, très prisées par les touristes en Cornouailles au Royaume-Uni, ont un intérêt pédagogique sur la biodiversité et l'horticulture pour les futures générations (Blewitt, 2004).



Figure 9 : Eden Project - Cornouailles – Royaume-Uni, tiré de Mairs, 2015



Figure 10 : Eden Project – Vue intérieure, tiré de Mairs, 2015

V. Lavasa Hill Station

Le bureau international d'architecture HOK a reçu pas loin de trois Awards internationaux pour la complétion du master plan de Lavasa dans les montagnes de Sahayadri entre Mumbai et Pune (figure 10 et 11). Ce projet à grande échelle (8000 hectares) a pris sept ans à être mené. On y a entrepris une implantation de plus d'un million d'arbres (Rossin, 2010).

La culture sur brûlis, très répandue dans ces contrées, a eu pour conséquence un déboisement important. Ceci a eu deux répercussions majeures : une grande érosion des sols durant la période de moussons (3mois/an) et une évaporation rapide de grands volumes d'eau durant les périodes de sécheresse (9mois/an). Cette évaporation n'est pas anodine : elle amène une fluctuation de l'eau jusqu'à 9m (Taylor Buck, 2015).

La solution unique proposée par le bureau d'architecture a été de rétablir le climat humide initial de la région. Pour se faire, les architectes se sont inspirés de la forêt de feuillus comme modèle de construction pour conserver le sol, l'eau et minimiser l'érosion et l'évaporation. Ils ont ainsi replanté de nombreux arbres, mais également offert un système de récupération d'eau au moyen de réservoirs souterrains en vue des périodes de sécheresse, à l'image des racines de l'arbre et de son système de circulation (Rossin, 2010).



Figure 11: Lavasa Hill Station – Inde, tiré de HOK, 2009



Figure 12 : Lavasa Hill Station – Inde, tiré de HOK, 2009

VI. Lily Pad

Le Lily Pad (figure 13) n'est encore qu'au stade d'avant-projet et n'est pas encore réalisé. Il a tout de même été choisi dans le but de montrer, une fois de plus, que des architectes cherchent à innover en imitant la nature, et ce, pour des projets d'avenir. Ce projet est souvent cité comme un projet phare lorsqu'on parle de biomimétisme.

Le concepteur belge de cette ville flottante, Vincent Callebaut, est également un personnage incontournable dans le monde du biomimétisme architectural. Ce projet futuriste se présente comme une solution viable au changement climatique et la montée des eaux que nous connaissons (Callebaut, 2011).

Cette ville « amphibienne » pourrait abriter une cinquantaine de milliers de réfugiés climatiques. Elle développerait sa propre faune et flore autour d'un lagon central en récoltant les eaux de pluie. On pourrait y vivre, y habiter et s'y détendre en coexistence harmonieuse avec la nature (Pragout, 2009).

Le biomimétisme réside notamment dans cette nouvelle façon d'habiter en « communion avec la nature », mais également dans l'imitation (figure 14) du nénuphar géant d'Amazonie (Callebaut, 2011).



Figure 13 : Lily pad- projet de Vincent Callebaut tiré de Callebaut, 2011, p.12



Figure 14 : Lily pad – Imitation du nénuphar géant d'Amazonie

VII. La Cité Végétale

Comme dernier exemple important dans cette liste non exhaustive, il me paraissait important de citer la ville végétale de l'architecte utopiste belge, Luc Schuiten, autre figure emblématique du biomimétisme moderne (Hermann, 2011).

Cet architecte bruxellois propose, par ses scénographies d'architectures végétales, un monde et une vision différente de la ville que nous connaissons actuellement. Cette architecture ressemble à s'y méprendre à une forêt totalement végétalisée de bâtiments (Hermann, 2011).

Il est un fervent défenseur de l'archiborescence (une architecture sur le modèle de l'arbre) que l'on peut voir dans ses œuvres. En effet, pour lui, la nature se présente sous 3 formes : les arbres, les toitures et façades végétales, mais également les jardins et les espaces ouverts (Hermann, 2011).



Figure 15 : Genève - Luc Schuiten tiré de Schuiten, 2015

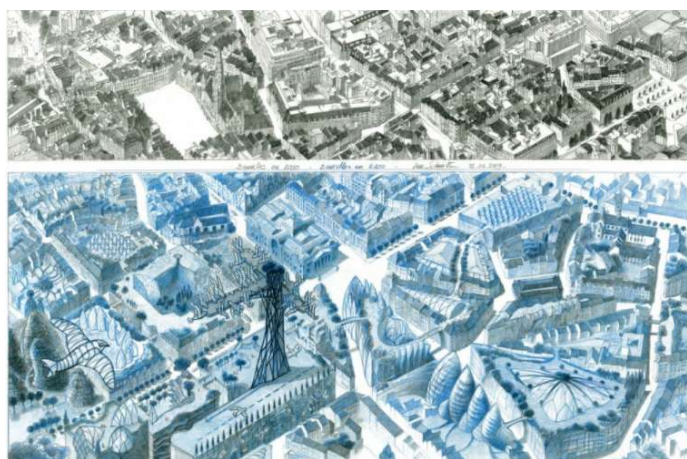


Figure 16 : Bruxelles - Luc Schuiten tiré de Schuiten, 2017

Les sept cas décrits plus haut ont permis de mettre en lumière un bref historique de projets, divers et variés, réalisés avec comme point commun l'imitation de la nature et les points positifs que cela pouvait amener en terme structurel par exemple, de performances (gain d'énergie, création de microclimats,...) ou encore de bien-être des habitants.

Afin de mieux recentrer le sujet, il paraît maintenant important de comprendre où en est le biomimétisme à l'heure actuelle, son évolution concernant la conception architecturale, les méthodes et les divers outils qui ont été développés. Cela sera l'objet du chapitre suivant.

2.4. Le biomimétisme : méthode et outils

Dans ce chapitre, il sera question d'un état des lieux de la conception biomimétique. Nous découvrirons l'origine de la conception biomimétique. Nous retrouverons également une description des différents niveaux d'imitation qu'il est possible de rencontrer en architecture biomimétique. De plus, il sera présenté des outils que l'on peut utiliser afin de faciliter la conception de projets de ce type.

I. 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 Nachtigall 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, Nachtigall 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 17) et la technique *Bottom-up* ou *Nature-based* (figure 18). 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).



Figure 17 : Conception biomimétique - Solution-Based adapté de El-Zeiny, 2012

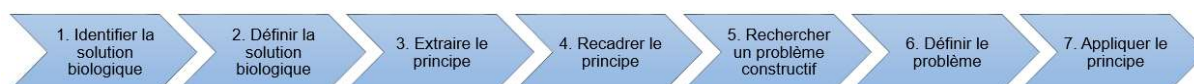


Figure 18: Conception biomimétique - Nature-Based adapté de El-Zeiny, 2012

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) (figure 19). 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 et vingt sous-principes. Ces principes généraux 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).

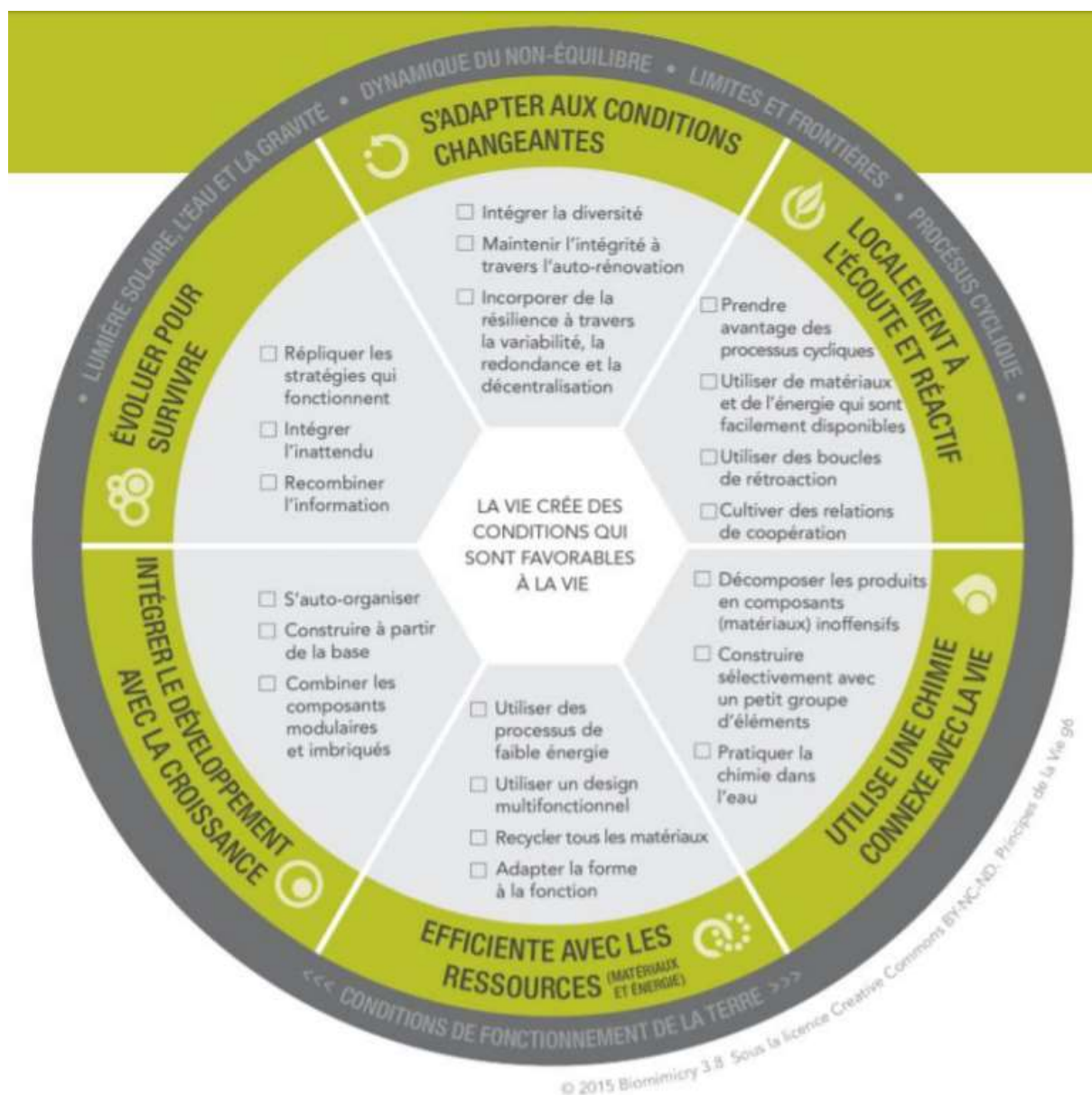


Figure 19 : Lentille de conception biomimétique selon biomimicry 3.8 (2015)

Ces principes font, en partie, échos aux critères retrouvés dans le livre de Janine Benyus. La lentille présentée ci-dessus 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

Ce premier état des lieux a pu montrer un bref historique de la conception biomimétique, les diverses façons d'imiter la nature, les diverses méthodologies employées et les premiers critères permettant de comprendre la philosophie biomimétique et son mode de conception. La lentille décrite ci-dessus est très importante dans le sens où elle permet de reprendre une série de critères et sous-critères importants pour les concepteurs. La prochaine étape dans l'investigation de l'état actuel du biomimétisme, après la méthode de conception, est maintenant le « niveau » d'imitation que l'on recherche. Ce dernier fait l'objet de la sous-section suivante.

II. Niveaux de biomimétisme

Après l'explication des différentes méthodes de conceptions biomimétiques et des premiers critères, il est important de s'intéresser aux niveaux d'imitations que le biomimétisme préconise. Dans les prochaines lignes, ces derniers vous seront décrits succinctement et seront étayés d'exemples afin d'en faciliter leur compréhension.

Il existe 3 niveaux d'imitation de la nature possible lors de conceptions biomimétiques (figure 20) (Aziz & El Sheriff, 2016). Le premier, le plus « superficiel », est le niveau de l'organisme. Le second est le niveau dit « du comportement » et le dernier, le plus complet est le niveau de l'écosystème (Zari, 2007). Selon Zari, cinq autres sous-niveaux sont à ajouter aux trois principaux : la forme, le matériau, la construction, le processus et la fonction (Chayaamor-Heil et al., 2018).

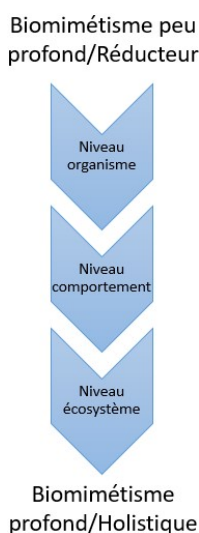


Figure 20 : Trois niveaux d'imitation adaptée de Zari, 2007

a. Niveau organisme

Ce premier niveau d'imitation est considéré comme plus superficiel. Le concepteur s'inspire de la forme et de la structure du vivant sans nécessairement entrer dans le détail du fonctionnement. Chaque être vivant s'est adapté d'une manière la plus optimale possible durant des millions d'années, c'est pourquoi leur morphologie est parfaitement adaptée à un environnement donné (Chayaamor-Heil et al., 2018). En résumé, le niveau organisme fait référence à un être spécifique en imitant une partie de cet animal ou toute sa structure physique (Zari, 2007).

De nombreux exemples peuvent être cités pour ce niveau. Parmi ceux souvent mentionnés dans la littérature, il y a l'imitation des microbosses du coléoptère namibien et la Corbeille de fleurs de Vénus. La première, l'imitation du coléoptère namibien et de sa carapace (figure 21), a été utilisée pour la conception de capteurs de brouillard du Centre Hydrologique de l'Université de Namibie de KSS Architectes (Chayaamor-Heil et al., 2018). La deuxième, a été une des inspirations de la bien connue Gherkin Tower de Foster & Partner's dont la Corbeille de fleurs de Vénus (éponge des mers) (figure 22). En effet, elle a permis de mettre en place la conception de la structure. L'éponge des mers a une structure filamenteuse qui permet d'amener une certaine légèreté tout en assurant une stabilité impressionnante (Rao, 2014). Dans cette section, nous pourrions rajouter la Tour Eiffel et la Sagrada Familia déjà citées à la section 2.3.



Figure 21 : Le coléoptère namibien (gauche) - Le capteur de brouillard (droite) tiré de Chayaamor-Heil et al., 2018, p.8



Figure 22 : La Gherkin Tower (gauche) - L'éponge des mers (droite) tiré de) tiré de Chayaamor-Heil et al., 2018, p.7

b. Niveau comportement

Ce deuxième niveau, celui du comportement, demande une étude plus poussée de l'organisme choisi. L'être vivant n'est pas nécessairement imité dans sa manière d'être ou dans son aspect physique, mais bien dans la manière dont il se comporte et s'adapte à une situation donnée dans un endroit et climat donné (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Ce niveau comportement est sans doute le plus étudié à l'heure actuelle, mais également le plus prometteur en terme de conception. Plusieurs architectes se sont prêtés à l'exercice d'une étude poussée d'un organisme vivant leur permettant de trouver des solutions lors de la conception de bâtiments (Chayaamor-Heil et al., 2018). Parmi ceux-ci, nous pouvons citer une fois de plus l'Eastgate Center de la section 2.3, mais également le Council House de Melbourne (CH2), qui sera détaillé plus longuement dans une section ultérieure (4.1), mais qui utilise également l'imitation de la termitière pour son système de ventilation (Zari, 2007). À cela, ajoutons le système de régulation thermique des pingouins empereurs et manchots papous étudiés dans le cadre de conception de prototypes de façades (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Un nouveau concept scientifique a été établi à propos des êtres vivants capables de contrôler directement ou indirectement les flux de ressources vers d'autres espèces, à l'image des pingouins manchots cités ci-dessus. Ces animaux procèdent à des adaptations dans leurs organismes, dans leur comportement ou de leurs systèmes. Ces derniers sont appelés des « ingénieurs des écosystèmes » (Rosemond & Anderson, 2003). Les humains sont considérés comme des ingénieurs des écosystèmes efficaces pour leur adaptation mécanique aux diverses conditions extérieures, mais également pour leur capacité à étudier ce qui les entoure et ainsi y trouver des solutions à leurs propres problématiques quotidiennes (Zari, 2007).

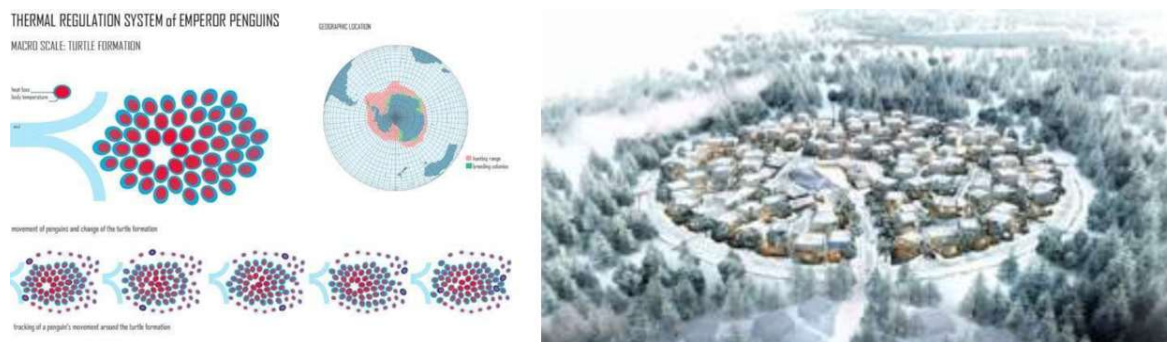


Figure 23 : Régulation de la chaleur des pingouins empereurs (gauche) - Mise en pratique du concept dans un projet (fictif) de village tiré de Chayaamor-Heil et al., 2018, p. 11.

Comme expliqué ci-dessus, les pingouins empereurs sont de bons ingénieurs des écosystèmes (figure 23). En effet, ces derniers ont la capacité de réguler leur chaleur interne lorsqu'ils se mettent en « formation tortue » comme le montre le schéma ci-dessus. Ainsi, en se regroupant en cercle, ils se réchauffent mutuellement en échangeant de la chaleur. C'est ainsi qu'un projet de village propose d'imiter ce principe en positionnant une centaine de maisons de façon circulaire. Des dizaines de maisons sont regroupées afin de maximiser les échanges de chaleur et ainsi diminuer les besoins de chauffage (Chayaamor-Heil et al., 2018).

c. Niveau écosystème

Enfin, le troisième et dernier niveau est considéré comme l'imitation la plus aboutie lors d'une conception biomimétique. Il s'agit d'étudier des écosystèmes naturels et donc d'en comprendre les différentes interactions entre espèces et environnements. Ces interactions leur permettent de produire, *in fine*, un écosystème durable (Chayaamor-Heil et al., 2018) et de les intégrer à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Pour rappel, un écosystème désigne un « système formé par un environnement (biotope) et par l'ensemble des espèces (biocénose) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent » (Larousse, dictionnaire français, écosystème).

Le terme « écomimétisme » est une autre façon de décrire ce niveau. Deux auteurs proposent deux définitions différentes. La première est « une façon d'imiter des écosystèmes lors de la conception » et la deuxième parle d'« une forme de conception durable du biomimétisme cherchant le bien-être des personnes vivant dans l'écosystème plutôt que le pouvoir, le prestige ou le profit » (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Cette approche révèle plusieurs avantages. Le premier est que l'on peut travailler à ce niveau de mimétisme en conjonction avec les deux niveaux inférieurs (organisme et comportement). De plus, il est possible d'incorporer cette conception écosystémique avec d'autres bâtiments conçus de manière durable, sans pour autant qu'ils soient biomimétiques (Zari, 2007). Finalement, l'avantage le plus intéressant de cette approche est l'impact positif qu'aurait le bâtiment sur les alentours (Reap, Baumeister & Bras, 2005). En effet, ce dernier serait capable de fonctionner de manière autonome et durable à l'image des animaux et plantes qui génèrent des déchets pouvant constituer un apport pour d'autres espèces vivantes qui les entourent (Chayaamor-Heil et al., 2018).

Les exemples de ce genre de conceptions sont rares à l'heure actuelle et sont souvent au stade de prototypes ou d'idées encore au stade de schémas. Parmi les exemples notables de la section 2.3, la Lavasa Hill station et l'Eden Project font partie de ce niveau d'imitation et ont été réalisés. Ces derniers ont permis de recréer un nouvel écosystème à un endroit donné. Le LilyPad et les cités végétales de Luc Schuiten font également l'objet d'une imitation écosystémique, mais sont encore au stade de croquis/prototypes. La première se veut être une ville autosuffisante, dans le sens où elle pourrait produire sa propre nourriture et subvenir aux besoins de ses habitants. M. Schuiten préconise dans ses projets lui aussi des systèmes de villes autosuffisantes en reprenant des villes actuelles et changeant leur mode de fonctionnement en incluant des mécanismes naturels.

Après avoir expliqué les différents niveaux d'imitation selon la littérature, il est important de se rendre compte que l'imitation de la nature, à différentes échelles, n'est pas chose aisée. C'est ainsi que les scientifiques et autres chercheurs ont investigué la manière de rendre ce travail plus simple en proposant divers outils d'aide à la conception biomimétique, retrouvés dans le chapitre suivant.

III. Outils pour le biomimétisme

Comme annoncé, ce chapitre dressera un état des lieux des divers outils existants, mis en place dans le but d'aider à la conception biomimétique. Certains ont été établis spécifiquement pour le biomimétisme, d'autres ont été adaptés afin de répondre aux besoins du concepteur. Le chapitre décrira succinctement certains outils pour ensuite passer à une brève description plus précise d'autres relevés comme importants selon la littérature et pour leur utilisation fréquente.

Le champ de recherche sur le biomimétisme gagne en importance, et cela, depuis près d'une décennie maintenant. Ce transfert de stratégies du monde naturel vers des disciplines humaines se réalise en plusieurs étapes comme énoncé en section 2.4 paragraphe II (Chayaamor-Heil et al., 2018). Plusieurs outils ont été développés afin de faciliter la démarche (Boks & Volstad, 2008). Une étude a été réalisée en 2016 et les chercheurs ont identifié une quarantaine d'outils différents, basés sur des critères qualitatifs, qui auraient pour but de faciliter le processus de conception biomimétique. Parmi les critères qualitatifs mentionnés, on retrouve par exemple l'année de développement, l'accessibilité aux outils, la facilité des étapes, leurs contributions au développement durable ou autres (Fayemi, Maranzana, Jacobs, Wanieck & Zollfrank, 2016). Actuellement, selon MM. Boks et Volstad, 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 SAPHIRE Model (Chayaamor-Heil et al., 2018). Toutes ces méthodes seront détaillées dans ce chapitre. 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 Fonctionnal Modeling, présentant des systèmes biologiques et leurs modes de fonctionnement intéressants à remettre en œuvre 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 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 & 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 SAPHIRE** 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).

Les outils clôturent le chapitre concernant l'état actuel du biomimétisme en architecture. Les outils précités avaient pour but de montrer les outils utilisés le plus fréquemment, selon Boks & Volstad (2008), lorsque des concepteurs cherchent des solutions dans la nature afin de résoudre leurs problèmes.

Afin de placer un cadre réglementé, des organisations internationales se sont intéressées au biomimétisme après son récent développement. Ceci est développé dans la section suivante.

2.5. Réglementation internationale sur le biomimétisme

Comme remarqué dans le chapitre précédent rassemblant l'état de la conception biomimétique au niveau architectural, la discipline a beaucoup évolué au cours du 21^e siècle. C'est pourquoi des réglementations ISO sont apparues afin de placer des bases communes reconnues au niveau international. Ces normes ont été établies très récemment. Le but ici est de faire un rapide constat de ce qui a été déclaré par l'organisation internationale. Ces dernières reprennent succinctement ce qui a déjà été expliqué dans la section précédente.

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 (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 de la biomimétique 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).

2.6. La Peau

Comme annoncé dans l'introduction du présent travail, les recherches et les conceptions biomimétiques en architecture se sont concentrées, à l'heure actuelle, sur l'interface entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. En effet, la plupart des réalisations biomimétiques concernent les façades et son analogie entre la peau du vivant et la façade du bâtiment. C'est pourquoi il s'agit, dans ce chapitre, de comprendre l'intérêt grandissant que portent les divers concepteurs à cette couche biologique et se concentrer sur celle de l'être humain. En effet, on qualifie souvent l'architecture comme une troisième peau, après les vêtements et la peau de l'homme. On parle plus précisément de la façade d'un bâtiment, qualifiée également d'enveloppe ou de peau en anglais (=skin), qui protège l'être humain d'un environnement extérieur qui pourrait lui être hostile (Gruber & Gostzonyi, 2010).

C'est dans cette optique que des recherches ont été réalisées afin de trouver des comparaisons fonctionnelles qu'il pourrait y avoir entre l'étude biologique de la peau humaine et son fonctionnement et les besoins d'une façade d'un bâtiment.

D'un point de vue biologique, la peau de l'être humain est composée principalement d'eau (70%) et de protéines (27%). Le reste étant complété par un faible pourcentage de lipides (2%) et d'oligo-éléments (1%). La peau pèse entre 4 et 10 kilos pour un corps humain adulte, soit entre 5 et 10% du poids total d'un adulte pesant 75 kilos (Charraud & Valdelièvre, 1981).

La peau est composée de trois couches superposées, en allant de l'extérieur vers l'intérieur, on a successivement, l'épiderme, le derme et l'hypoderme (figure 24). Elle est considérée comme un tissu de revêtement très souple (étirable et élastique), résistant et imperméable. C'est également une couche de protection contre les chocs, les agressions physiques ou chimiques, la pollution, les rayons ultraviolets... (Dréno, 2009).

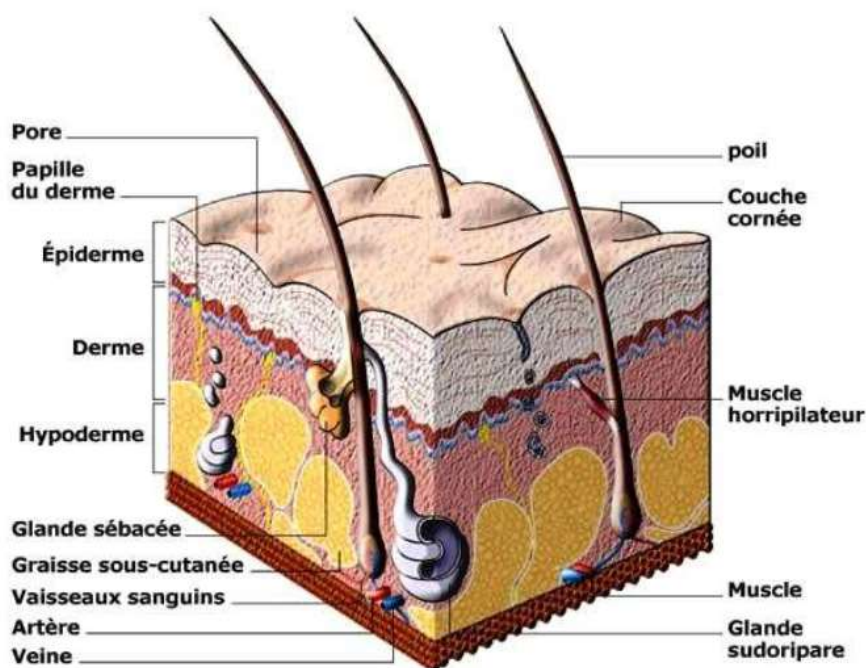


Figure 24 : La peau de l'être humain – Coupe schématique tiré de Perrot, n.d, p.2.

L'épiderme, couche extérieure de la peau humaine, est composé de quatre sous-couches différentes (*stratum corneum*, *lucidum granulosum*, *spinosum* et *basal*) (figure 25). Cette couche est considérée comme imperméable, très résistante, mais également dotée d'une certaine souplesse. Cet organe vivant se régénère perpétuellement. C'est dans l'épiderme que l'on trouve les mélanocytes, donnant la pigmentation de la peau, mais également les cellules de Langerhans, provoquant les réactions de défenses (contre les allergies...) (Dréno, 2009).

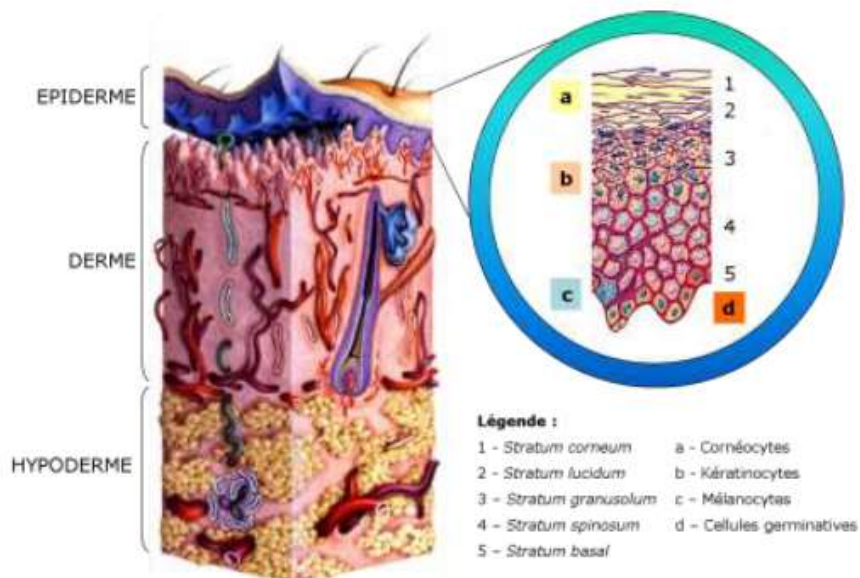


Figure 25 : La peau de l'être humain – Coupe schématique – Épiderme, tiré de Dréno, n.d., p.3

La partie interne, conjonctive et nourricière de la peau s'appelle le derme (figure 26). Elle est composée de trois sous-couches (*stratums papillaires, réticulaires et profonds*). C'est à l'intérieur de cette partie interne que l'on retrouve les capillaires sanguins qui apportent les nutriments et l'oxygène ; les vaisseaux lymphatiques qui permettent le transport des cellules de défense immunitaire ; les glandes cutanées, sécrétant la sueur et le sébum, et les follicules pileux à l'origine des poils et des cheveux. Tout comme l'épiderme, le derme est un organe vivant, imperméable, résistant et souple. Il est composé à 80% d'eau et est quatre fois plus épais que sa couche supérieure. Les stratums papillaires permettent la thermorégulation du corps (Dréno, 2009).

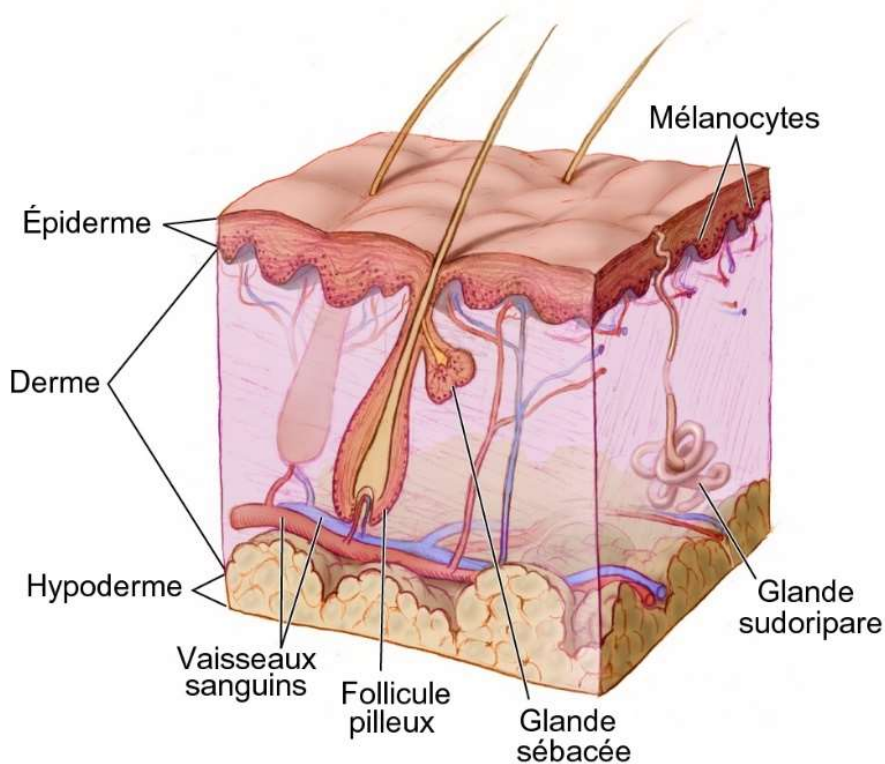


Figure 26 : La peau de l'être humain – Coupe schématique - Derme

La dernière couche et la plus profonde de la peau humaine est l'hypoderme (figure 27). On y retrouve des cellules de soutien et surtout les cellules graisseuses. Cette partie est souple et déformable et sert de réserve énergétique. De plus, la fonction isolante de l'hypoderme permet une régulation thermique en minimisant les flux de température avec l'extérieur (Dréno, 2009).

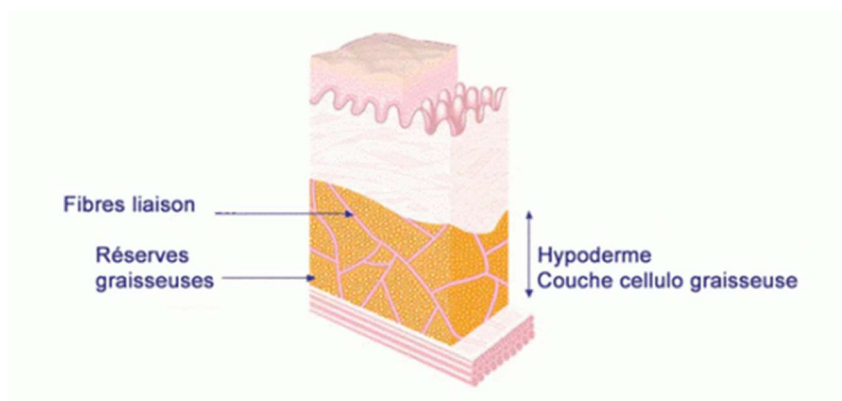


Figure 27 : La peau de l'être humain – Coupe schématique - Hypoderme

Les poils et les glandes cutanées sont ce qu'on appelle des « annexes » de la peau. Il y a en moyenne une douzaine de poils par cm^2 de peau et ils ont un rôle très important dans la régulation thermique. Les glandes cutanées sont quant à elles présentes dans toute la peau. Il en existe deux sortes, les glandes sébacées et les sudoripares. Les premières sécrètent un liquide permettant de protéger la couche extérieure de la peau et de la renforcer en l'imperméabilisant. Les secondes sécrètent quant à elles la sueur (Dréno, 2009).

Physiologiquement, la peau est un organe protecteur (physique, chimique et biologique), thermorégulateur, sensoriel et métabolique. Elle est considérée comme un organe « de relation sociale » et de communication. Dans le même sens, l'aspect physique, passant beaucoup par la peau, elle revêt une certaine importance dans l'estime de soi (Dréno, 2009).

Certains organismes procèdent à des échanges gazeux à travers leur peau, à l'image des lombrics et des sangsues. Ce n'est par contre pas le cas pour les humains. En effet, aucun échange d' O_2 ne se réalise à travers notre peau (Dréno, 2009).

Pour finir, les facteurs hygiéno-diététiques sont : une hydratation régulière de la peau et une pratique du sport fréquente. Il faut également éviter tout polluant à l'image du tabac ou toute autre substance toxique. Finalement, il faut veiller à avoir une alimentation équilibrée et une exposition au soleil mesurée (Dréno, 2009).

2.7. Analogie Peau – Façade

Les aspects fonctionnels liant la peau et la façade sont multiples : les ouvertures et les fermetures, les protections mécaniques (intempéries...), les protections contre les radiations, contre les substances indésirables ou encore contre d'autres organismes... (Gruber, 2011). L'aspect le plus important reste néanmoins les différents échanges de matières et d'énergies (échange d'air, d'eau, de nutriments) permettant de maintenir le métabolisme et donc la vie. À ce titre Gruber et Goszontoyi (2010) proposent un tableau récapitulatif reliant les fonctions communes entre la peau et l'architecture dans le tableau 1.

Les comparaisons entre la peau et la façade d'un bâtiment sont déjà nombreuses. Certains chercheurs définissent cette dernière comme « une frontière à travers laquelle le bâtiment interagit avec son environnement » (Rankouhi, 2012). À l'image de la peau de l'être humain qui a pour but de protéger et réguler le corps, cette couche extérieure permet de maintenir des conditions optimales au bon fonctionnement intérieur (Radwan & Osama, 2016). Kieran insiste sur le fait que c'est au niveau de la façade que la plupart des échanges d'énergies et de matériaux se réalisent, mais que c'est également au moyen de cette peau extérieure que l'identité du bâtiment peut ressortir (Kieran & Timberlake, 2004).

Toujours à l'image de la peau, la façade établit une frontière entre l'extérieur et l'intérieur, recouvrant ainsi le squelette et régulant les organes. L'image du squelette correspond à la structure du bâti et celle des organes se trouve être la plomberie, le réseau électrique et toute la mécanique nécessaire au confort interne des occupants (Radwan & Osama, 2016). Cette « peau » agit comme un filtre, jugeant ce qu'il est bon ou non de faire entrer ou sortir (Yowell, 2011).

Ce filtre n'est pas un élément statique, mais un élément qui s'adapte aux diverses conditions extérieures qu'il rencontre (Badarnah, Nachman & Knaack, 2010). À ce titre, les architectes étudient de plus en plus la manière dont les conditions climatiques et environnementales ont influencé les caractéristiques physiologiques des êtres vivants afin d'en ressortir des stratégies de conceptions innovantes et durables (Heil & Montas, 2016).

Cet aspect adaptatif retrouvé dans la nature permet ainsi de trouver de nouvelles solutions architecturales. Le défi du concepteur est donc de transformer ces stratégies adaptatives en solutions technologiques efficaces pour l'enveloppe du bâtiment (Gruber & Gosztonyi, 2010). Le bâtiment, à terme, serait ainsi capable de se comporter comme un système vivant actif et pourrait gérer, entre autres, l'air, l'eau, la lumière et la température, tous importants à sa « survie » (Heil & Montas, 2016).

La fonction naturelle de la peau amène donc de nombreuses analogies avec la couverture du bâtiment. La principale reste l'importance qu'elle a dans la création d'un environnement intérieur sain. Les différences résident dans le type de matériau et le type d'environnement que cette dernière crée (Gruber, 2008). Yeang suggère une différenciation dans les gammes de confort à l'intérieur du bâtiment en fonction du type de fonction et des utilisateurs. Ceci déterminera le niveau de différence entre les conditions extérieures et intérieures que l'architecte doit imposer pour chaque cas de figure lors de conceptions architecturales (Yeang, 1999).

Fonction	Fonction de la peau	Au moyen de	Analogie architecturale
Construction	Structurel	Carapace / structure interne	Structure du bâtiment
Protection	Protection des organes internes	Couches souples ou tendues	Enveloppe du bâtiment
	Protection mécanique	Couche souple ou tendue	Couche extérieure rigide
	Autoréparation	Couche souple ou tendue	Matériaux autonettoyants/Auto régénérant
	Protection contre les radiations	Couche souple ou tendue	Protection UV
	Isolation	Poils	Isolation thermique
Échange	Sensibilité	Divers capteurs sensoriels	Capteurs
	Récolte d'énergie	Chaleur et d'énergie solaire	Panneaux solaires thermiques et photovoltaïques
	Contrôle de l'air échangé	Oxygène et de dioxyde de carbone	HVAC
	Thermorégulation		Équilibre thermique
	Échange de substances	Nutriments	Filtres
	Eau et humidité - Transpiration	Eau	HVAC
Signaux	Apparence extérieure	Couleurs, matériaux	Identité/communication
	Signalement	Changements de couleur	Identité/communication
Stockage	Stockage d'énergie	Énergie thermique	Stockage de chaleur
	Stockage d'énergie chimique	Gras, sucre	Stockage d'énergie
	Stockage d'humidité		Stockage d'eau

Tableau 1 : Fonctionnement de la peau des organismes et analogies architecturales - Adaptation de Gruber & Gosztonyi, 2010, p.505

2.8. Labels et Standards

Le biomimétisme cherche constamment des solutions dans la nature dans le but d'améliorer les performances d'un bâtiment. Ceci se remarque notamment dans l'analogie peau-façade réalisée ci-dessus. Nous le remarquons également dans beaucoup de travaux biomimétiques comme il en a été fait état dans la section 2.4. Or, dans le monde de la construction, des labels et différents standards ont été établis permettant de rendre compte de performances de projets en les quantifiant au moyen de critères pondérés. Cette approche fait écho à la volonté de ce mémoire de mettre en place un outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques au moyen de critères inhérents à ces façades.

Dans cette section de l'état de l'art, il vous sera introduit différents standards et labels permettant de quantifier les performances énergétiques de parois et de projets en règle générale. Il s'agira également de prendre connaissance de labels reflétant la qualité environnementale de matériaux. Ces diverses certifications ont été choisies pour leur emploi en Belgique ou à grande échelle au niveau international. Il sera fait, dans ce chapitre, une brève description de ces derniers et de leur approche de quantification. Il est à noter que les bâtiments ciblés dans ces certifications sont des bâtiments publics, les logements n'ont pas été pris en compte.

I. La Certification des Performances Energétiques du Bâtiment (PEB) dans le cadre de Bureaux-Services-Enseignement (BSE)

La PEB en Wallonie consiste à évaluer de manière globale la performance énergétique du bâtiment selon une méthode de calcul préétablie afin d'établir des normes encourageant le respect de l'environnement et permettant de diminuer les consommations énergétiques. La certification est un document qui doit être réalisé par un certificateur énergétique agréé par la Wallonie. Il se base sur des données qu'il récolte lors de la visite d'un bâtiment. Le but est de rendre compte de la performance énergétique via plusieurs indicateurs. De plus, des mesures d'améliorations peuvent être proposées (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015).

Lors du calcul de cette performance énergétique dans le secteur des bâtiments de type BSE, plusieurs facteurs de consommations sont pris en compte (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015) :

- Les besoins nets en énergie pour le chauffage
- La consommation finale pour l'éclairage
- La consommation finale pour le refroidissement
- La consommation finale pour les auxiliaires
- La consommation finale pour l'humidification

Après un certain nombre de calculs, le résultat final rend compte des consommations d'énergie primaire de l'unité PEB, soit du bâtiment. L'énergie primaire est « *l'énergie directement prélevée à la planète (pétrole, gaz, uranium...), qui après transformation, permet d'obtenir une énergie utilisable dans le bâtiment (mazout, gaz, électricité...)* ».

Il est important de noter également que ces calculs donnent une consommation théorique dans des conditions standardisées définies au préalable. C'est pourquoi la consommation réelle de l'unité étudiée sera forcément différente du résultat obtenu. De plus, le nombre et le comportement des occupants ne sont jamais pris en compte (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015)

Les conditions standardisées prennent en compte quatre éléments importants (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015) :

- Confort (Moyenne de 18°C pour la température d'un logement)
- Qualité de l'air (Taux de renouvellement d'air pris en compte)
- Besoins en eau chaude sanitaire
- Panneaux solaires et cogénération

Plusieurs définitions sont à retenir permettant de rendre compte de la performance énergétique d'une façade. Ces dernières sont : le niveau d'isolation K et le niveau de consommation d'énergie primaire (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015).

Le niveau d'isolation thermique globale K est un indicateur de la performance énergétique de l'enveloppe du volume protégé (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015, p. 4.5).

Le niveau de consommation d'énergie primaire, niveau E_w , est calculé pour une unité PEB. Il est le rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire de l'unité et une consommation annuelle d'énergie primaire de référence, multiplié par 100 (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015, p. 4.6).

À l'exception des bâtiments industriels, un système de ventilation complet est obligatoire pour tous les bâtiments neufs et assimilés ainsi que tous les bâtiments faisant l'objet d'un changement d'affectation.

Pour ces bâtiments, le responsable PEB doit spécifier d'abord un des 4 types de ventilation utilisés ainsi que les différents débits prévus et installés dans les différents locaux (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015, p. 4.9).

La procédure réglementaire PEB concerne UNIQUEMENT les actes et travaux soumis à permis (d'urbanisme ou unique).

NATURE DES TRAVAUX SOUMIS À PERMIS		Valeurs U	Niveau K	Niveau E_w	Consommation spécifique	Ventilation (1)	Surchauffe
		U	K	E_w	E_s	V	S
Procédure AVEC responsable PEB	R Habitations Appartements			80	130 kWh/m ² ·an	Annexe C2	< 6.500 Kh
	BSE Bureaux Services Enseignement	$\leq U_{max}$ et/ou $\geq R_{min}$	$\leq K35$ + nœuds constructifs			Annexe C3	
	A Hôpitaux Horeca Commerces Hébergement collectif						
	I Industriel		$\leq K55$ + nœuds constructifs				
	Rénovation importante (3)	uniquement pour éléments modifiés et neufs				(2)	

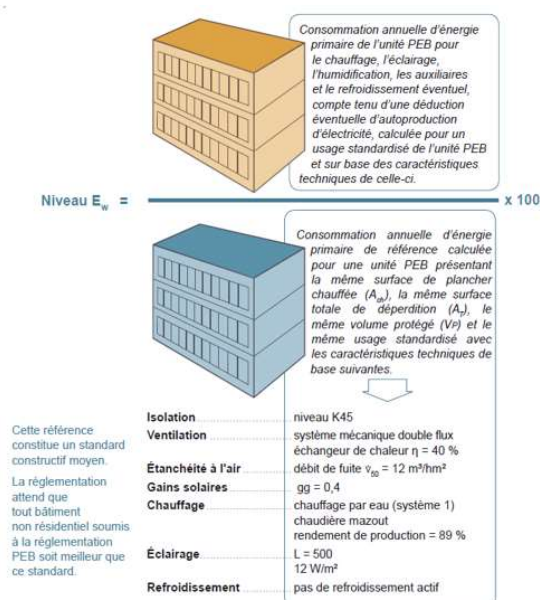


Figure 28 : Niveaux de performances selon la PEB (gauche) - Calcul du niveau E_w (droite) (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015, p.4.1).

La figure 28 présentée ci-dessus rend compte des différentes valeurs minimales que le bâtiment doit obtenir lors de l'inspection par le certificateur PEB. Nous retiendrons principalement le niveau d'isolation K et le niveau E_w , tous deux définis ci-dessus. La valeur U étant reprise dans le niveau K et les autres valeurs ne concernant pas (encore) les bâtiments de type BSE. La figure en partie droite démontre le calcul à réaliser pour connaître le niveau E_w . Nous pouvons noter, de plus, que le niveau d'isolation est calculé sur base de 3 paramètres (Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie, 2015) :

- Coefficients de transmission thermiques des différentes parois
- De la surface totale de déperdition
- Volume protégé

La certification PEB a été un sujet de discussion fréquent lors des interviews réalisées dans le cadre de ce travail. En effet, certains critères présents dans l'outil envisagé sont quantifiables au moyen de la méthode présentée ci-dessus. De plus, la PEB est très présente en Wallonie, c'est pourquoi les experts concepteurs wallons y font référence fréquemment lorsqu'il s'agit de rendre compte de performances énergétiques dans le cadre du bâtiment.

II. Critères de sélection de l'appel à projets « Bâtiments exemplaires Wallonie », 2013 (Bâtiments non résidentiels, bureaux-services-écoles)

L'objectif premier de ce type d'annexe technique est d'aider à définir des lauréats à projets « Bâtiment exemplaires de Wallonie », le Batex. Cette annexe a été mise en place par les autorités wallonnes afin de promouvoir la construction et la rénovation de bâtiments selon une approche durable et respectueuse de l'environnement. Le Batex a été cité par un bureau d'architecture, Hélium3 lors de l'enquête qui a été réalisée, car ils l'utilisent souvent et que les critères sont équivalents à ceux développés dans ce travail.

Il s'agit d'évaluer le projet par le biais d'une série de critères définis sur 4 thématiques principales. Les lauréats reçoivent des subsides en fonction du projet et de sa qualité. Les différents critères sont (Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie, 2013, p.8).

- **Thématique "performance énergétique et confort"**
 - o Thème 01 : performance énergétique
 - o Thème 11 : confort
 - o Thème 12 : suivi des consommations
- **Thématique "qualité environnementale"**
 - o Thème 02 : choix des matériaux durables
 - o Thème 03 : gestion durable de l'eau
 - o Thème 04 : mobilité douce
 - o Thème 13 : biodiversité
 - o Thème 14 : chantier vert
 - o Thème 15 : gestion des déchets
- **Thématique "qualité architecturale"**
 - o Thème 05 : intégration – densification urbaine et rurale
 - o Thème 06 : qualité des espaces – architecture
 - o Thème 07 : accessibilité et adaptabilité PMR
 - o Thème 08 : modularité – flexibilité
 - o Thème 16 : mutualisation des biens et services
- **Thématique "reproductibilité et innovation"**
 - o Thème 09 : rentabilité
 - o Thème 10 : reproductibilité des solutions techniques
 - o Thème 17 : innovation

Pour chaque thème précité, il existe différents sous-thèmes. Ces sous-thèmes comportent des critères permettant de remplir les objectifs du thème principal dont il est question. Le Batex donne une description des différents objectifs à atteindre, la manière de les remplir et des méthodes de calcul. Ce document ne permet pas d'outrepasser les normes en vigueur (Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie, 2013).

Pour chaque critère des sous-thématiques, il existe des performances minimales et/ou des performances à valoriser (figure 29). Il est à noter que les 17 thèmes sont considérés comme importants. De plus, certains thèmes contiennent des performances minimales à respecter, d'autres non. Le thème « performance énergétique » a quant à lui une importance toute particulière et est repris en partie dans figure 30 ci-dessous (Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie, 2013).

Thématique "performance énergétique"	Performance minimale ?	Performance à valoriser ?
01 Performance énergétique		
01-1 Performance énergétique globale		
01-1-1 Niveau E_w	OUI	OUI
01-2 Limitation des besoins en énergie		
01-2-1 Isolation thermique	OUI	OUI
01-2-2 Etanchéité à l'air	OUI	OUI
01-2-3 Besoins Nets en Energie pour le chauffage	OUI	OUI
01-2-4 Limitation des besoins en énergie pour le refroidissement	OUI	OUI
01-3 Recours aux énergies renouvelables		

Figure 29 : Partie de tableau provenant du Batex 2013 tiré de Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie, 2013, p.10.

III. Standard Well

Le Standard Well est un référentiel international plaçant la santé et le bien-être des personnes au centre même d'une conception architecturale. En règle générale, l'approche du « WELL Building Standard® » permet de tenir compte de la santé et du comportement des usagers du bâtiment, allant de l'aménagement à l'exploitation du projet (International Well Building Institute, 2018).

Ce standard se base sur des mesures de performances au terme de la construction, mais également sur l'évolution des performances sur toute la durée de vie du projet. Il existe de nombreux thèmes abordés : l'air, l'eau, la nourriture, la lumière, le sport, le confort et l'esprit. Parmi ceux-ci, retenons surtout la lumière, faisant référence au confort visuel, le confort, faisant référence au confort en règle général d'un usager dans une pièce et l'air, faisant référence à la qualité de l'air (International Well Building Institute, 2018).

Ces thématiques, au nombre de sept, sont déclinées au travers de pas loin de 102 critères. Ces derniers sont organisés autour de « prérequis » et « d'optimisations ». Les premiers sont considérés comme des facteurs clés de confort et de bien-être, tandis que l'optimisation fait référence à des éléments de conception ou autres stratégies optimisant la prise en compte de ces facteurs clés (International Well Building Institute, 2018).

Actuellement le référentiel s'applique essentiellement aux immeubles de bureaux. Il s'applique aux bâtiments non aménagés, aux aménagements intérieurs, aux nouvelles constructions ou rénovations lourdes, mais également aux bâtiments existants. Le Well Standard va également être développé pour les logements collectifs, les commerces, les bâtiments scolaires et les bâtiments de cafétéria et de restauration dans les années à venir (International Well Building Institute, 2018).

Il est à noter que ce standard permet d'obtenir 3 niveaux de certifications, à savoir le WELL « Silver », « Gold » et « Platinum ». Les objectifs en terme de santé ou de bien-être pouvant différer d'un projet à l'autre, une certaine flexibilité est octroyée lors de la sélection des optimisations. Le premier niveau est obtenu lorsque le projet a atteint tous les prérequis applicables. Le niveau supérieur, le gold, est donné aux projets dont tous les prérequis applicables ont été atteints et dont 40% des optimisations possibles ont été réalisées. Le niveau Platinum est équivalent au second à ceci près que le pourcentage d'optimisations est doublé (International Well Building Institute, 2018).

L'outil envisagé reprend, une fois de plus, certaines des thématiques développées dans le cadre de ce standard, que nous avons mis en exergue ci-dessus. Notons qu'une personne a fait référence à ce standard lors de la quantification des critères communs qui sont développés dans l'outil d'aide à la décision développé.

IV. Méthode BREEAM

La méthode BREEAM (British Research Establishment Environmental Assessment Method) est un référentiel de construction durable britannique fortement utilisé au niveau international. Il sensibilise l'utilisateur à la gestion environnementale du bâti en règle générale (BRE Global Limited, 2014).

Cette sensibilité permet la remise en question du comportement des différents utilisateurs, améliorerait leur productivité et réduirait le coût d'exploitation. *In fine*, ceci apporterait une plus-value au bâtiment lors de sa remise en vente ou de sa location. La méthode est un moyen de négociation avec les futurs locataires/propriétaires et leur permet de se rendre compte des diverses qualités environnementales et des performances du projet, mais aussi de leur certifier la conformité du bien avec les normes en vigueur (BRE Global Limited, 2014).

Cette méthode d'évaluation comporte plusieurs familles de critères que vous retrouvez à la figure 30 (BRE Global Limited, 2014):

Environmental section	Weighting		
	Fully fitted out	Shell only	Shell and core only
Management	12%	12.50%	11%
Health and Wellbeing	15%	10%	10.50%
Energy	15%	14.50%	15%
Transport	9%	11.50%	10%
Water	7%	4%	7.50%
Materials	13.5%	17.50%	14.50%
Waste	8.5%	11%	9.50%
Land Use and Ecology	10%	13%	11%
Pollution	10%	6%	11%
Total	100%	100%	100%
Innovation (additional)	10%	10%	10%

BREEAM Rating	% score
OUTSTANDING	≥ 85
EXCELLENT	≥ 70
VERY GOOD	≥ 55
GOOD	≥ 45
PASS	≥ 30
UNCLASSIFIED	< 30

Figure 30 : Critères et pondérations de la méthode BREEAM tiré de BRE Global Limited, 201, p.22

La figure 30 ci-dessus explique que lors de l'étude globale du bâtiment, chaque famille de critère a une pondération qui lui est propre en fonction de l'importance que lui donne la méthode. Le pourcentage de points perçu au final par rapport au total de points disponibles permet de classer le niveau de performance du cas étudié.

Les critères matériaux, énergie, santé et bien-être et innovation, développés dans la méthode font partie des critères également développés dans l'outil envisagé dans ce travail. De plus, la méthode BREEAM a été citée à maintes reprises dans les entretiens réalisés, que vous retrouverez à la section 4.2.

V. Label HQE

Le label français « Haute Qualité Environnementale » (HQE), a pour but d'être une marque « commerciale » de référence dans le cadre du développement durable. En effet, il cherche à limiter les impacts environnementaux lors de la conception ou la rénovation de bâtiments voire de quartiers/villes (Certivéa, 2015).

Afin d'être conforme au label HQE, il faut que le projet de construction obtienne au minimum 7 cibles au niveau dit « de base », 4 au niveau « performant » et 3 au niveau « très performant », parmi les 14 cibles listées ci-dessous. Ces cibles sont détaillées dans le guide pratique du référentiel HQE avec des méthodes de calculs et des lignes de bonne conduite à respecter afin d'atteindre chacun des niveaux de performances précités (Certivéa, 2015, p.14).

- **Les cibles d'éco-construction**
 - o Relation harmonieuse avec l'environnement
 - o Les choix de procédé et de produit de construction intégré à un processus d'éco-construction
 - o Chantier à faible nuisance (sonore, déchet et pollution)
- **Les cibles d'éco-gestion**
 - o Énergie
 - o Eau
 - o Déchets d'activité
 - o Entretien
- **Les cibles de confort**
 - o Hygrothermique
 - o Acoustique
 - o Visuel
 - o Olfactif
- **Les cibles de santé**
 - o Conditions sanitaires des espaces
 - o Qualité de l'air
 - o Qualité de l'eau

La plupart des cibles de ce label français aident à la mise en place de l'outil d'aide à la décision recherché. En effet, les cibles de santé, de confort et d'éco-gestion font sont en partie repris dans les premiers critères établis afin de mettre en place l'outil. Notons dès à présent que ce label a également été cité plusieurs fois lors des entretiens menés auprès d'experts concepteurs. Nous retrouverons les résultats de l'entretien mené en section 4.2.

VI. LEED

Le Label LEED, Leadership in Energy and Environmental Design, est un programme de standardisation nord-américain développé dans les années 2000. Il est équivalent à HQE et à BREEAM développé plus haut et permet de sensibiliser les concepteurs et les clients au respect de l'environnement dans le secteur de la construction.

LEED prend en compte plusieurs cibles principales dans lesquelles chaque critère permettant de remplir la cible est pondéré. Le nombre de points possible est de 100 dans la version 4.1. Il existe quatre graduations en fonction du score final : « Certifié » (40-49 points), « Argent » (50-59 points), « Or » (60-79 points) et « Platinum » (80-100) (U.S. Green Building Council, 2018).

Les cibles principales sont (U.S. Green Building Council, 2018):

- Localisation et transport
- Site durable
- Efficacité au niveau de l'eau
- Énergie et atmosphère
- Matériaux et ressources
- Qualité environnementale intérieure
- Innovation dans le design et procédé de conception

Notons qu'il existe deux grilles de cotation différentes. La première fait état du bâtiment dans sa globalité et la seconde de l'environnement intérieur uniquement. La seule différence réside dans le nombre de points attribués à chaque cible et le fait que le thème « site durable » n'existe que lorsque le bâtiment en lui-même est considéré. Chaque critère est noté et certifié par l'USGBC (US Green Building Council) ou par un organisme indépendant, le GBCI (Green Buildings Certification Institute) sur base de méthodes de calculs préétablies. (U.S. Green Building Council, 2018).

Certains des critères cités, à savoir les matériaux et ressources et le critère concernant l'énergie et l'atmosphère sont deux cibles importantes au niveau du travail de façades biomimétiques qui permettront de compléter l'outil d'aide à la décision envisagé. À cela, ajoutons la qualité environnementale intérieure, liée au confort et l'innovation dans le design et dans le procédé de conception, proche des innovations proposées lors de conceptions biomimétiques. Le label LEED lui aussi cité à plusieurs reprises lors des entretiens que nous retrouverons à la section 4.2.

VII. Indicateur UDI (Useful Daylight Illuminance – Eclairage naturel de confort).

Contrairement aux autres sous-sections, celle-ci introduira un indicateur permettant de quantifier le confort visuel à l'intérieur d'une pièce. Il ne s'agira donc pas ici d'approches regroupant plusieurs cibles différentes, mais bien d'une approche unique quantifiant le confort des usagers en termes d'éclairage. Cet indicateur est mentionné ici pour son utilisation fréquente, mais également, car il a régulièrement été cité lors de l'enquête qui a été réalisée dans le cadre de ce travail et dont il sera question dans les chapitres suivants .

L'indicateur UDI comble les insuffisances d'un autre facteur, le DA (Daylight Autonomy) qui permet d'évaluer les bienfaits de la lumière du jour et de son impact sur l'économie d'énergie. Ce dernier ne donnait cependant aucune indication sur une quelconque notion de confort visuel des occupants par manque de moyens de quantifications (Vangeloglou & Rasmussen, 2015).

L'éclairage naturel de confort donne des seuils hauts et bas d'éclairage sur base de résultats sur terrain et de diverses enquêtes dans des bureaux. UDI indique le nombre de fois que l'éclairage artificiel est utilisé lorsque l'éclairage naturel est insuffisant, mais aussi la fréquence d'éclairage naturel satisfaisant ou encore lorsque l'éclairage génère une gêne, un inconfort (Vangeloglou & Rasmussen, 2015).

Des logiciels de simulation du type *Velux Daylight Visualizer*, *Radiance* ou *Daysim*, fournissent des valeurs d'éclairage indiquant les situations d'inconfort tout en évaluant les gisements d'économie de l'éclairage artificiel (Vangeloglou & Rasmussen, 2015).

Il est à noter qu'actuellement le facteur UDI est utilisé fréquemment lors de quantification de critères de nombreuses méthodes d'évaluation de labels tels que BREEAM ou DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (=Société allemande pour la construction durable). Mais cette dernière est difficilement applicable à l'international, dans des pays où l'éclairage naturel est supérieur comme dans les pays chauds (Vangeloglou & Rasmussen, 2015).

VIII. Labels pour matériaux

Il existe de nombreux labels concernant les matériaux et d'après la norme ISO 14020 « Environmental labels and declarations » il en existerait de 3 types différents. Leurs caractéristiques sont reprises dans le tableau ci-dessous. Notons la définition d'un label comme une « étiquette ou marque spéciale créée par un syndicat professionnel et apposée sur un produit destiné à la vente, pour en certifier l'origine, en garantir la qualité et la conformité avec les normes de fabrication. » (Larousse, Dictionnaire français, Label).

Avant de commencer par les différents types de label, notons qu'il existe une classification nommée NIBE, souvent utilisée lorsqu'il s'agit de regarder la qualité environnementale d'un produit de construction. Ce dernier qui n'est pas un label à proprement parler, mais une classification écologique de matériaux de constructions développées par un bureau d'ingénieur néerlandais. L'idée est de soumettre des matériaux à une analyse de cycle de vie et de tenir compte de données mesurables (consommation d'énergie, émissions) et de données qualitatives (dommages causés au paysage, nuisances, santé...) afin de les classer. Ainsi, NIBE permet une comparaison chiffrée de matériaux dans le domaine de la construction. Il est important de noter qu'une analyse de cycle de vie est une méthode permettant d'évaluer un bilan environnemental d'un matériau sur base de plusieurs critères et de plusieurs étapes tout le long de son cycle de vie (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009).

Les labels de type I sont basés sur des critères fixes. Ces critères sont basés sur constatation des aspects et des critères écologiques et sont élaborés par des instances publiques ou privées. Ces derniers étudient le cycle de vie complet du matériau sans nécessairement avoir à utiliser la méthode « analyse du cycle de vie ». L'Ecolabel Européen, le label Blaue Engel et le label Naturplus sont les plus connus (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009). Ces derniers sont à retrouver en **annexe n°1**.

Les labels de type II sont quant à eux basés sur un critère dominant majoritairement. Ce dernier est le plus souvent l'aspect écologique, la consommation énergétique pour son emploi, la possibilité du recyclage ou non ou encore l'économie d'eau. La façon de quantifier et de classer les matériaux est souvent inhérente au pourcentage de matériau recyclable à partir duquel lesdits matériaux sont fabriqués. Le problème est le faible nombre de contrôles et donc la crédibilité du label (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009).

Pour finir, les labels de type III donnent une quantification sur l'impact écologique de matériaux. Pour ce faire, une approche « analyse de cycle de vie » (ACV) est réalisée. Les informations données par le producteur ou le distributeur sont cette fois vérifiées par des tiers. Après une ACV, la comparaison des matériaux entre eux ne peut se faire que lorsque l'analyse est identique. Or, plusieurs mêmes matériaux sont utilisés dans de nombreuses applications différentes et sont donc soumis à des analyses différentes. Nous retrouvons dans ce genre de labels les « environmental product declarations » (EPD) qui comportent des données écologiques sur base, une fois de plus, d'ACV, mais également de critères imposés par groupe de produits (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009).

La comparaison des labels entre eux n'est pas aisée. En effet, la pertinence de chaque label est directement liée à la sévérité des critères et à la bonne mise en œuvre des divers contrôles qualité. En tant que consommateur ou professionnel de la construction, les labels de type I sont les plus utilisés. Par exemple, le Natureplus est utilisé le plus souvent pour ses critères sévères en matière d'environnement et de santé (Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009).

IX. Conclusion

Ces différents standards permettent de distinguer des façons de quantifier les performances d'un projet, et ce, sur base de plusieurs critères différents. Dans le cadre de ce travail, seulement certains critères seront gardés et seront discutés dans les sections 4 et 5 ci-dessous. Cette partie de l'état de l'art a donc pour but de montrer l'existence de ces outils et leurs façons de travailler. Il est important de noter que nous reviendrons sur ces labels et standards qui ont été importants lors de l'établissement des critères inhérents aux façades biomimétiques en section 4.2.

Chapitre 3 : Méthodologie

Le présent chapitre traitera de la méthodologie employée dans le cadre de ce mémoire. Nous allons commencer par une rapide explication du paradigme scientifique suivi pour ensuite enchaîner sur la méthodologie détaillée dont il a été question. Cette dernière sera décrite succinctement en premier lieu pour ensuite passer en revue, de manière plus approfondie, chaque point important pour la bonne réalisation du travail.

3.1. Paradigme scientifique

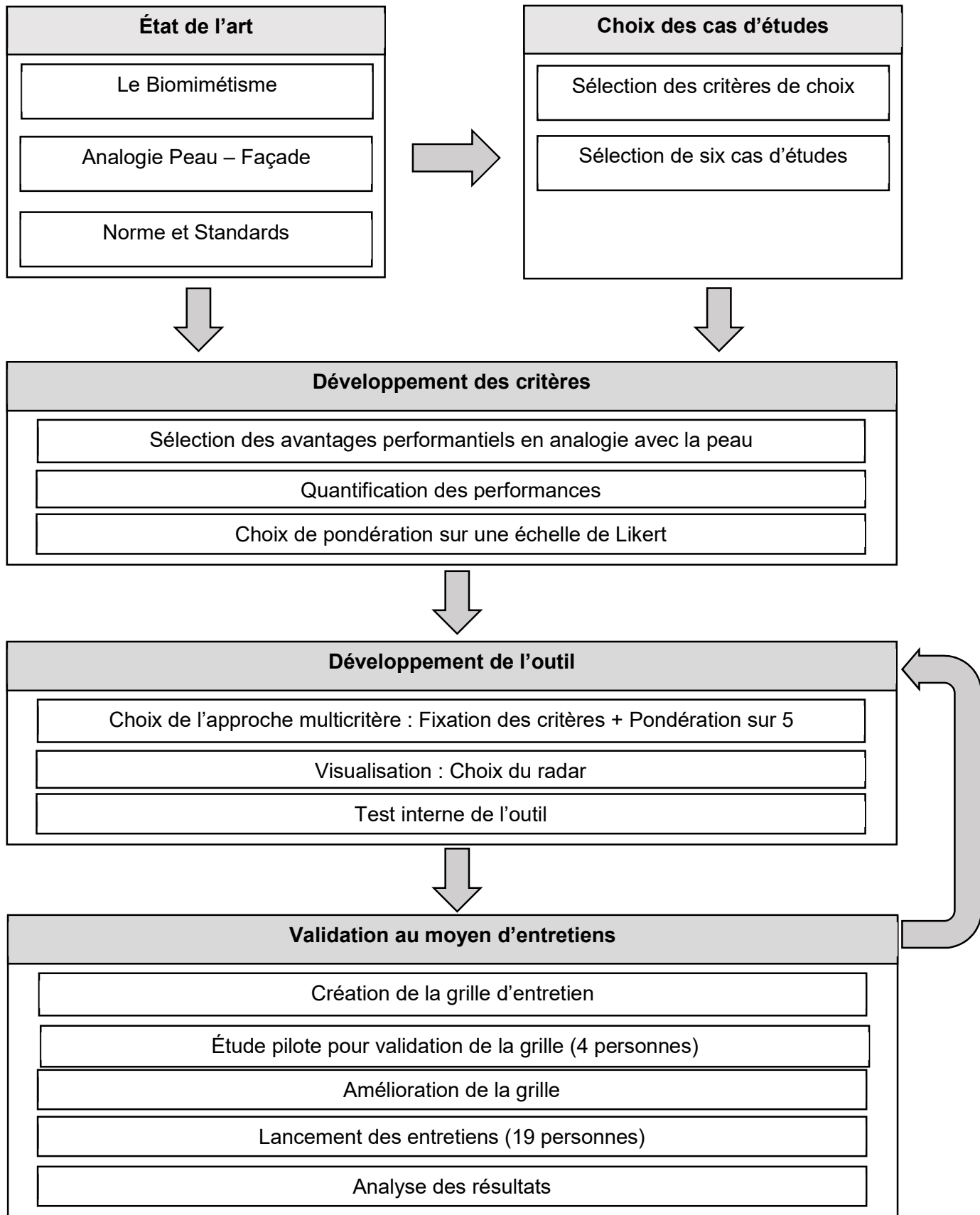
*« Le terme de paradigme, mis en avant par **Thomas Samuel Kuhn**, en 1962, dans *La structure des révolutions scientifiques*, est maintenant couramment employé pour désigner une manière de voir ou une méthode à suivre. Pour Kuhn, il s'agit de l'ensemble des principes et méthodes partagés par une communauté scientifique. C'est un modèle à suivre qui, pour un temps, fait autorité, puis sera remplacé par un autre. »* (Juignet, 2015, p. 1).

Parmi les différents paradigmes (positiviste, postpositiviste, « Critical theory et al » et constructiviste, que vous pouvez retrouver en **annexe n°6**), la position privilégiée est la « constructiviste ». En effet, la méthode employée lors de l'élaboration du TFE a été la discussion avec différents experts concernés de près ou de loin par le biomimétisme afin de délimiter un sujet de plus en plus précis. Les entretiens menés dans le cadre de ce travail ont également été un point prépondérant du travail, permettant de recueillir des données intéressantes sur le sujet.

Il est à noter que le but du TFE a été de réaliser une recherche exploratoire qualitative. Comprenons par là que l'objectif était de montrer l'état actuel du biomimétisme ; mais également d'analyser des cas d'études permettant de se rendre compte des qualités et des défauts que cette approche peut avoir lors de conception de façades.

3.2. Méthodologie appliquée au mémoire

Ci-dessous, nous retrouvons un diagramme explicitant la méthodologie appliquée dans ce mémoire et les étapes clés à sa bonne réalisation. Il sera ensuite fait état d'une description succincte des grandes étapes reprises dans les encadrés.



I. Choix des cas d'étude

L'étape réalisée en parallèle à l'état de l'art a été la recherche de cas d'étude permettant d'établir les critères de performance liés aux façades biomimétiques. Pour ce faire, des critères de choix ont été établis. Une fois ces critères remplis, les cas d'études étaient retenus. Au total, six cas ont été analysés dans le but d'avoir une certaine représentativité des façades biomimétiques réalisées à l'heure actuelle.

II. Développement des critères

L'étape suivante a permis le développement des différents critères de performance. Cette dernière a été menée au moyen de l'étude biologique de la peau (section 2.6 de l'état de l'art) et de son analogie à la façade de bâtiments, retrouvée à la section 2.7, mais également au moyen de l'investigation approfondie des divers cas que vous pourrez retrouver à la section 4.1. Ensuite, l'étude de normes et autres standards, retrouvés également dans l'état de l'art (2.8), a été un support supplémentaire aux premiers critères fixés. En effet, ils ont permis de vérifier leur pertinence en investiguant des quantifications éventuelles que l'on aurait pu retrouver. Il a également été question de manière récurrente des standards lors des enquêtes réalisées dans le cadre de ce travail. Après cette investigation, la manière de pondérer ces critères a été étudiée.

III. Développement de l'outil

Afin de mettre en place l'outil (figure 31), le choix s'est porté sur une approche multicritère. Lors de cette sous-étape, des critères et une pondération allant de 1 à 5 ont été fixés et placés dans un outil en forme de radar. Les différents critères sont présentés ci-dessous et seront justifiés dans la section 4.1.

- Les matériaux biosourcés
- La protection / couverture
- La régulation de la chaleur / isolation
- La performance / énergie sauvée
- La respiration/ perméabilité
- La luminosité / confort visuel
- La régénération / maintenance

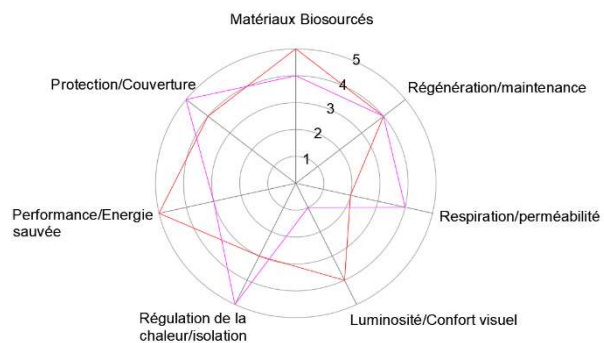


Figure 31 : Représentation radar

Le choix du radar a ensuite été établi. En effet, la volonté de placer tous les critères de performances sur le même pied a été exprimée dès le début du travail. Il est ensuite à noter que le but du radar n'était pas d'avoir un heptagone (7 critères) inscrit dans le cercle, étant conscient que certains critères pouvaient être contradictoires. Les traits rouges et violets sont purement fictifs et à titre indicatif.

Afin de clôturer la première phase de cette étape, un testing interne a été réalisé. Ce dernier avait pour but de vérifier la lisibilité et la compréhension de l'outil. C'est ainsi qu'une confirmation a été demandée de la part des deux promoteurs, mais également de condisciples et autres personnes extérieures ne connaissant pas le travail en cours, afin d'avoir un avis le plus objectif possible.

IV. Validation au moyen d'enquêtes

L'étape sans doute la plus longue a été la validation de l'outil présenté ci-dessus au moyen d'enquêtes auprès d'experts concepteurs. Cette étape importante a permis de mettre en lumière les divers points forts et faibles du travail en cours. Une grille d'entretien a donc été réalisée et soumise à des experts concepteurs sensibilisés à un des points clés du biomimétisme, à savoir le développement durable.

Les questions ont porté notamment sur la connaissance du sujet, le biomimétisme. Mais également sur l'analogie peau – façade voulue dans ce projet et les critères de performances qui pouvaient en ressortir sur base d'avis personnels. Ensuite, les critères retrouvés dans l'étape « développement des critères » ont été critiqués et remis en question. Il a finalement été question du cœur même du TFE, à savoir la volonté de mise en place d'un outil d'aide à la conception de façades biomimétiques. C'est ainsi qu'il a été demandé aux personnes enquêtées de pondérer les critères que vous retrouvez ci-dessus.

Afin de mener à bien cette étape, l'enquête a tout d'abord été testée sur un échantillon de 4 personnes, afin de mettre en exergue les défauts éventuels. Après cette étude pilote, la grille d'entretien est corrigée. Ensuite vient le cœur même de l'étape : les entretiens. Ces derniers ont été réalisés auprès de 19 personnes considérées comme experts concepteurs : des chercheurs dans le domaine de l'architecture, des professeurs, des architectes indépendants et des consultants.

Chaque entretien a ensuite été analysé en profondeur afin de faire ressortir les remarques importantes permettant d'améliorer l'utilisation de l'outil. Les divers experts ont eu l'occasion de critiquer les critères mis en place et de choisir la manière de les pondérer. Cette quantification avait pour but de fixer des critères et une pondération claire permettant, *in fine*, une amélioration de l'outil.

Dans les sous-sections ci-après, il sera question d'une explication approfondie des points clés de la méthode appliquée dans ce mémoire.

3.3. Méthodologie : Analyse des cas - Sélection des critères de choix :

Le choix des cas d'analyse a été soumis à plusieurs critères de validation. Ces derniers sont :

- Le biomimétisme
 - o Logiquement, le bâtiment doit être conçu selon la philosophie biomimétique, présentée dans l'état de l'art section « Le Biomimétisme, méthode et outils ».
- Analogie Peau – Façade
 - o L'analogie peau-façade est un point clé du travail. Le mot « façade » explique que le choix se portait uniquement sur les façades travaillées de manière biomimétique, donc inspirées de la nature et de son fonctionnement. Le mot « peau » inclut l'analogie voulue entre la peau du vivant et la façade du bâtiment.
- Représentatif
 - o Le projet choisi se doit d'être représentatif dans le sens où il aurait une place importante dans le pays, ou amènerait à une avancée technique reconnue selon la littérature.
- Diversité
 - o Ce critère a pour but de proposer une diversité de projets. En effet, ces derniers peuvent être des prototypes en phases expérimentales ou des projets déjà reconnus. Ils doivent être en fonction (bureaux, divertissements...) ou être des projets d'exposition. Les façades peuvent être adaptatives ou non. Par le mot adaptatif, il est entendu une adaptation automatique de la façade en réponse à l'environnement extérieur afin de réguler l'environnement interne.
- Informations
 - o Le nombre d'informations trouvées est un point important. En effet, l'objectif est de recueillir des projets assez documentés afin de les inclure dans l'étude. Par documentation, on entend des informations liées aux performances énergétiques qu'amènent ce genre de façades, aux divers plans, témoignages...

C'est ainsi que 6 cas d'études en sont ressortis après de nombreuses recherches et de lectures d'articles faisant état du biomimétisme en architecture :

- La Biofaçade PBR, retrouvée en France
- L'Hygroskin, retrouvé également en France
- Le Council House (CH2), de Melbourne, en Australie
- Le WaterCube, stade olympique des jeux de Pékin
- L'Esplanade Theater, bâtiment emblématique de Singapour
- Le One Ocean Pavillon, projet d'exposition de l'Expo Yeosu 2012 en Corée du Sud.

Ces derniers seront décrits dans la section « Résultats », sous-section « Cas d'études ». Notons que les cas d'étude cités proviennent de pays différents. La volonté première était de choisir des cas proches des régions belges, malheureusement ces derniers étant rares et mêmes inexistantes (le plus proche se trouve tout de même en France), le choix s'est alors porté sur des cas internationaux.

Il est à noter cependant que trois cas intéressants n'ont pas été retenus dans l'étude : l'Eastgate Center, l'Armoured Corset Project et le modèle du mur respirant, retrouvés en **annexe n°2**). Les raisons sont :

- Trop peu de données concernant la façade ont été trouvées. Les données doivent concerner notamment les performances du bâtiment en termes d'énergie sauvée, de ventilation, de lumière naturelle... Mais aussi concernant les matériaux et la maintenance.
- Malgré la conception du bâtiment de façon biomimétique, la façade n'est que trop peu décrite ou trop peu traitée.
- Les articles retrouvés ne sont pas assez nombreux que pour nous permettre d'avoir une vue objective des performances de la façade.
- La façade n'est pas encore réalisée ou le prototype n'est pas assez développé.

3.4. Méthodologie : Approche multicritère

Le développement des critères fait partie de la section « Résultats ». Dans cette section, les six cas précités dans la section précédente seront analysés en profondeur afin d'identifier les divers gains énergétiques au niveau de la façade, amenés par l'emploi du biomimétisme. Ces avantages seront couplés aux normes et standards trouvés dans l'état de l'art afin d'en ressortir des critères clés en terme de conception de façades biomimétiques. Le but était de mettre en relations ces différents critères, c'est pourquoi une approche multicritère a été choisie.

Lors d'une conception architecturale, il existe un certain nombre de décisions prises durant le processus de conception qui conduisent finalement à une réalité construite. L'approche multicritère est une technique très utile et de plus en plus utilisée ces dernières années. Elle permet de réunir des informations variées dans le but de concevoir un bâtiment qui se veut complexe (Harruttugil, 2011). Cette méthode est devenue une des plus intéressantes dans l'analyse d'optimisation (Padadopoulos et Karagiannidis, 2008). Cette approche est intéressante, car elle permet de renforcer les prises de décisions en donnant au concepteur un outil complet, méthodique et systématique.

C'est dans cette optique qu'il a été décidé de mettre en place un outil d'aide à la décision reprenant ce type d'approche.

D'après Schärli (1999), il existe 4 fondamentaux à l'approche multicritère (Fernandez, 2010) :

- Choix de plusieurs critères
- Choix de critères généralement en « conflit ».

Les critères ne se complètent pas nécessairement, au contraire, des critères peuvent être contradictoires.

- Rôle d'arbitre

Cette approche ne sert pas à trouver une solution la plus optimisée possible, mais plutôt à trouver des compromis lors de la réalisation d'un projet

- Critères avec différentes valeurs

Les valeurs des critères doivent différer dans le but d'atteindre une réponse « équilibrée », donc réaliste et acceptable.

Après la rapide description de cette méthode d'analyse et d'aide de prise à la décision, intéressons-nous à l'objectif réel d'une telle approche. Roy Bernard (1989), propose 4 utilisations possibles de ce type d'approche :

- Choisir la meilleure alternative ou un nombre limité d'alternatives parmi un certain nombre de possibilités.
- Classer des alternatives selon leur qualité de réponse à un problème donné (de la meilleure à la moins bonne)
- Ranger les alternatives en groupes prédéfinis.
- Comprendre les aspects principaux des alternatives trouvées et de les décrire selon ces aspects.

Dans le cadre de ce travail, retenons principalement la première utilisation citée.

Une manière de présenter les résultats d'une approche multicritère est le diagramme de Kiviat, aussi nommé graphique en radar ou graphique en étoile (figure 32). En effet, ce type de graphique en deux dimensions permet de rendre compte rapidement de plusieurs résultats différents et de les comparer. Il s'agit simplement de réaliser un graphique à plusieurs axes partant d'un point unique. Chaque axe correspondant à un critère quantifié et pondéré sur une échelle prédéterminée.

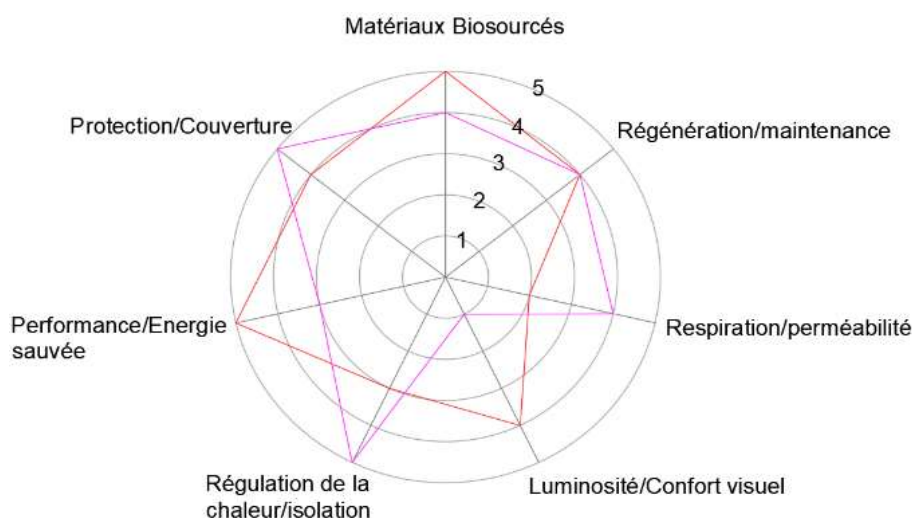


Figure 32 : Représentation radar

Le choix d'une telle représentation est dû parti pris de ne pas pondérer les critères entre eux. En effet, la volonté première est de ne pas comparer les critères, en retirant, par exemple, une importance quelconque des uns par rapport aux autres. Il s'agit donc de considérer les critères à importance égale, à l'image du Batex, décrit dans l'état de l'art.

En effet, l'objectif est donc simplement de rendre compte d'une performance globale. De nombreuses approches multicritères prônent la pondération de chaque critère et de les classer par ordre d'importance. Ainsi, un critère prenant le pas sur l'autre peut rapporter plus de points sur un score final. Ce score reflète alors la performance du projet étudié. Ce genre d'approches multicritères se retrouve notamment dans les différents labels retrouvés à la section de 2.8 de l'état de l'art. Parmi ceux-ci, citons BREEAM, LEED et HQE.

L'utilisation ici de l'outil est autre. En effet, le choix des critères est tel qu'il est difficile de les pondérer les uns par rapport aux autres au vu de l'importance qu'ils ont dans la conception d'une façade en règle générale. L'objectif est de mettre en exergue une performance globale de la façade étudiée au moyen de l'outil via des critères qui pouvaient s'opposer, mais d'égale importance lors d'une conception de façade biomimétique.

V. Exemple d'approche multicritère et de représentation en radar :

Un exemple d'approche similaire a été retrouvé dans la littérature et faisait directement écho à ce travail. En effet, il s'agit d'une approche multicritère dont les critères sont d'égales importances. Cet exemple a été retrouvé dans une thèse dont le but était de proposer une méthodologie, sur base des concepts biomimétiques, qui permettrait de faciliter l'emploi du biomimétisme en règle générale dans les entreprises. Ceci aurait pour objectif de réduire l'impact de ces dernières sur l'environnement en catalysant des innovations qui se veulent durables (Allard, 2012).

L'outil mis en place sert à trouver, parmi plusieurs solutions possibles, le procédé le plus optimisé, à l'image de mon objectif premier qui est de rendre compte de la performance d'une façade et d'en montrer la manière de l'améliorer. C'est ainsi qu'en utilisant l'outil, il serait possible de prendre une décision plus éclairée après analyse des différentes alternatives. L'auteur la décrit comme « une rationalisation élémentaire de l'acte de décision, qui la ramène à une dimension calculable » (Allard, 2012, p.20).

Comme annoncé, les critères sont tous affectés du même coefficient, et sont donc tous d'égales importances. Ces critères sont ici les principes du biomimétisme selon la littérature et plus spécifiquement le livre de Benyus, *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature*, 1997. L'outil veut être complémentaire à l'analyse du cycle de vie du matériau et ainsi fournir une méthode, systématique et reproductible, d'évaluation des impacts environnementaux de produits, comme montré dans la figure ci-dessous (Allard, 2012).

Notons que la méthode a été appliquée à une société nommée Interface®. Dans la figure ci-dessous (figure 33), partie d'un tableau étant dans l'article, nous retrouvons premièrement le critère principal (la stratégie d'optimisation) et les sous-critères inhérents. On retrouve ensuite les coefficients d'importance (tous égaux à 1), la note attribuée à chaque critère (allant de 0 à 1) et des commentaires (Allard, 2012).

		Coéf	Note	Chiffres communiqués par Interface® pour 2010
Stratégie d'optimisation	Conception multifonctionnelle	1	1	Les dalles sont facilement transportables, modulables, permettent la rétention des poussières fines, l'isolation thermique et phonique (voir texte).
	Forme adaptée à la fonction	1	1	Imite les poils microscopiques (setae) des doigts des geckos qui offrent une adhérence très élevée avec divers supports
	Recyclabilité	1	1	Les dalles détachables peuvent être renvoyées à Interface® après usage ou lors de détérioration

Figure 33 : Fraction de la matrice d'évaluation d'après les principes du vivant appliquée à l'entreprise Interface® tiré de Allard, 2012, p.29

Le graphique en radar a été la représentation choisie pour représenter les résultats. La note de 0 à 1 a été transformée en pourcentage. Dans la figure 34, nous retrouvons 6 critères établis par l'auteur et un exemple d'utilisation au sein de la société Interface® et de sa gamme de produits InterfaceFLOR®. Nous pouvons noter qu'il a été décidé, ici, de proposer une note « neutre » à 40%. L'auteur n'explique malheureusement pas le pourquoi des critères, hormis qu'ils prennent leurs sources dans le livre de Benyus. De plus, son choix de pondération et sa volonté du neutre aux 40% n'ont également pas été justifiés. Il a par contre été clairement établi dans l'article que le but n'est pas de juger le produit en lui-même, mais bien de mettre en exergue certaines « lacunes » améliorables au niveau de son fonctionnement. Le choix de l'entreprise n'a pas été anodin non plus. Le biomimétisme étant le facteur principal de l'outil, le choix s'est porté sur une des entreprises les plus avancées dans le domaine (Allard, 2012).

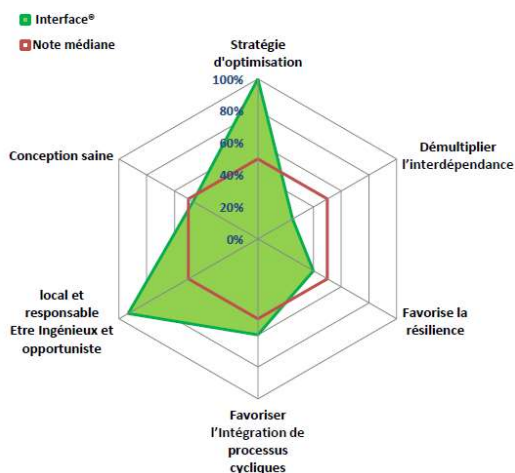


Figure 34 : Représentation des résultats sous forme de radar tiré de Allard, 2012, p.26

Cet exemple reflète en plusieurs points, l'approche et l'outil envisagés dans le cadre du mémoire. La différence réside dans le domaine d'application (matériaux pour l'exemple – façades biomimétiques dans ce travail). Même si l'approche biomimétique est respectée, nous ne retrouvons pas d'analogie peau-façade réalisée dans ce travail. Notons également que des enquêtes auprès d'experts concepteurs ont été réalisées ici, contrairement à l'exemple présenté ci-dessus. Les entretiens effectués ont permis de valider ou non le premier outil. L'explication de ces derniers fait l'objet du chapitre suivant.

3.5. Méthodologie : Enquêtes

Dans cette section, il s'agira d'expliquer la manière dont les diverses enquêtes ont été menées en faisant un rapide état de l'art selon l'UX (User Experience = Expérience d'Utilisateur) design qui est un ensemble de normes et de bonnes pratiques permettant de concevoir un produit, mais également l'expérience de son utilisation. L'ambition ultime en tant qu'un « UX designer » est de concevoir un produit qui réponde très exactement aux besoins et aux attentes de l'utilisateur afin d'optimiser son expérience. Il s'agit donc d'expliquer les modalités de l'interview réalisée et d'explicitier précisément le pourquoi de chaque question en détaillant le grille d'entretien prévue.

I. L'entretien

L'entretien est une des techniques d'enquête les plus répandues en sciences humaines et sociales. Il s'agit d'avoir une approche « non directive ». Cette approche est la base même de manipulation de l'entretien dans le domaine de la recherche. Pour sa bonne réalisation, l'interviewer doit adopter une attitude comprenant 3 dimensions (Gronier & Lallemand, 2016) :

- L'empathie
- L'acceptation inconditionnelle
- La non-directivité.

Lors d'entretiens en personne, les données récoltées sont qualitatives. Elles se déroulent dans l'environnement dit « naturel » des participants ou dans tout autre lieu calme et intimiste permettant de réaliser un dialogue en face à face (Gronier & Lallemand, 2016).

Concernant la sélection et le recrutement des participants, le nombre de personnes à interroger n'est pas établi clairement dans la littérature. Malgré cela, il est souvent conseillé d'avoir une dizaine de participants (Guest, Bunce & Johnson, 2006 & Baccino, Bellino et Colombi, 2004). Il est également intéressant de varier les profils des candidats (sexe, âge, métier...) De plus, lorsque la plupart des réponses données lors des diverses interviews se rejoignent, l'enquête peut prendre fin c'est ce qu'on appelle le critère de saturation (Gronier & Lallemand, 2016).

L'entretien est donc une méthode de recueil de données dite « qualitative ». Contrairement aux données « quantitatives » qui donnent des informations numériques ou statistiques, les données qualitatives permettent d'avoir des informations descriptives. L'interrogatoire porte essentiellement sur les expériences, les attitudes et les comportements. C'est ainsi que cette technique d'enquête permet d'explorer de manière approfondie les diverses attitudes, opinions et préférences des personnes interrogées (Gronier & Lallemand, 2016).

II. La passation

Lors de la passation, soit lors du déroulement de l'entretien à proprement parler, on peut dégager 5 étapes clés : l'introduction, l'échauffement, le corps, la rétrospective et la clôture. Un entretien dure en général entre 45 et 90 minutes par participants en fonction du nombre de questions. Il peut cependant être plus court (Gronier & Lallemand, 2016).

L'introduction est très courte et dure à peu près cinq minutes. Il s'agit d'accueillir le participant et de le mettre en confiance. Ensuite, il faut un consentement et une demande de permission d'enregistrer et de faire apparaître leur identité dans l'écrit. En effet, afin de récolter au mieux les résultats et de ne pas les fausser en prises de notes qui peuvent s'avérer approximatives, un enregistrement de la personne est primordial (Gronier & Lallemand, 2016).

L'étape suivante est équivalente à la première en termes de durée, à savoir cinq à dix minutes. Dans cette dernière, l'interviewer s'introduit de manière plus précise en expliquant ce qu'il fait et la raison de cet entretien via l'explication du travail qu'il est en train de réaliser. Ensuite, il passe aux premières questions d'ordre général, sans entrer dans le vif du sujet (Gronier & Lallemand, 2016).

Le corps de l'entretien est l'étape la plus importante. Il occupe environ 80% de la durée totale et c'est à ce moment que les questions clés sont posées. Après ce dernier vient l'étape dite de « rétrospective », où l'on réalise une synthèse rapide de l'entretien en reprenant les idées générales qui en sont ressorties. Enfin, la dernière étape est la clôture qui permet de savoir si le participant n'a rien à ajouter ou s'il veut formuler des remarques générales concernant le travail, pour finalement le remercier de sa participation (Gronier & Lallemand, 2016).

Lors de la passation, l'interviewer se doit d'avoir une attitude neutre afin d'éviter toute influence sur les réponses des participants. Il est important de faire preuve d'empathie, mais surtout d'être à l'écoute et de laisser la personne poursuivre jusqu'au bout de son idée, et ce, même si cela s'éloigne quelque peu du sujet. C'est en effet à l'interviewer de recadrer le sujet par la suite. Pour avoir une bonne attitude, il faut éviter de donner des conseils au participant, émettre des jugements ou encore interpréter les réponses (Gronier & Lallemand, 2016).

Deux types d'intervention sont recensés afin de mener à bien l'interview : les consignes et les relances. Les premières permettent de rappeler le sens de la question afin de ne pas s'en écarter. Pour cela, il faut garder un guide d'entretien clair. Il faut également savoir faire preuve de flexibilité quant au rythme des questions. En effet, il ne faut pas couper la personne si cette dernière anticipe une question prévue pour plus tard. Les relances permettent de rebondir sur des informations données par le participant et de les approfondir, même si le sujet s'écarte quelque peu du sujet principal (Gronier & Lallemand, 2016).

III. La grille d'entretien

La grille d'entretien utilisée lors d'une enquête est de type « d'administration indirecte ». Elle requiert la présence de l'enquêteur lors de chaque interview et c'est notamment pour cela que l'échantillon de participants est fortement réduit. Les différentes grilles sont remplies pendant ou juste après chaque tête-à-tête entre l'enquêteur et l'enquêté (Gronier & Lallemand, 2016).

Pour la bonne réalisation de l'interview, il existe quatre étapes clés. Ces dernières sont : La réalisation des actions préalables, l'élaboration et l'administration, le traitement et pour finir la rédaction du rapport des interviews menées.

La réalisation des actions préalables à l'élaboration de la grille est évidemment la définition de l'objet de l'entretien. Ici, il s'agissait de connaître l'avis des différents participants sur la philosophie biomimétique appliquée au cas concret des avantages performantiels des façades biomimétiques au niveau du développement durable. Pour ce faire, il faut réaliser un inventaire des moyens disponibles concernant le temps, les moyens, le budget... Dans ce cas-ci, le temps était assez court : 2 mois et les moyens étaient limités. Pour finir, il faut choisir la population et construire son échantillon. Le choix s'est porté sur une population hétéroclite. En effet, une parité homme-femme était recherchée, mais également des profils divers concernant leur métier et leur background (Gronier & Lallemand, 2016).

L'étape suivante est l'élaboration et l'administration de la grille d'entretien. Cette dernière comprend tout d'abord le projet de l'interview et sa mise en forme. Ensuite, un test de la grille doit être réalisé via un pilote. Pour ce faire, quatre individus ont été interrogés en conditions réelles afin de voir la clarté des différentes questions. La question 5 posait le plus de problèmes, mais sa résolution sera explicitée dans le paragraphe ci-après. Une fois les derniers réglages réalisés, l'interview est finalisée et les entretiens sont lancés. Au total, 23 individus ont été interrogés (Gronier & Lallemand, 2016).

Ensuite vient le traitement des données. Pour ce faire, un codage de chaque entretien a été réalisé au moyen d'un tableur Excel afin de mettre en relation rapidement les différentes réponses. Les réponses non claires ont été réécoutées au moyen de l'enregistrement réalisé durant chacun des entretiens (Gronier & Lallemand, 2016).

Les questions étant variées et les réponses reçues étant qualitatives, le rapport a été réalisé notamment au moyen de nuages de mots reprenant les mots-clés des diverses réponses. Ceci permet d'analyser visuellement les tendances et les réponses récurrentes aux questions de définitions et de critères (Gronier & Lallemand, 2016).

IV. Détail de la grille d'entretien

Après les grandes étapes réalisées lors de l'élaboration de l'entretien selon l'UX design, rentrons dans le détail de ce dernier en décrivant, question par question, le but de chacune d'entre elles. Nous verrons par la suite, dans les résultats, les différentes réponses apportées par les experts concepteurs interviewés.

Dans cette interview, il existe deux types de questions majeures : les questions fermées et ouvertes. La première demande une réponse de type « Oui/Non » ou une quantification chiffrée voire même une donnée qualitative. Les questions ouvertes portent quant à elles sur des définitions.

a. Prise de rendez-vous

La première étape après la réalisation de la grille d'entretien a été la prise de rendez-vous. Les prises de contact se sont entièrement réalisées par mail. La plupart des réponses étant positives, les prises de rendez-vous ont été immédiates, souvent dans la semaine qui suivait. Des relances ont été prévues dans le cas d'une absence de réponses.

Les rendez-vous pouvaient se réaliser via Skype, par téléphone ou en personne. Il a été décidé d'éviter un maximum les rendez-vous par téléphone et un seul a été réalisé de la sorte. Concernant les rendez-vous Skype, ces derniers se réalisaient en partage d'écran et en vidéoconférence afin de se rapprocher au mieux de l'entrevue en tête à tête. Deux ont été réalisées de cette manière. Finalement, les entrevues en personne sont comptées se nombre de 19. Les profils des personnes interrogées sont à retrouver en **annexe n°4**.

b. L'introduction

Durant l'introduction, la première question est posée à savoir :

1. *Avant de commencer, seriez-vous d'accord que votre nom apparaisse dans la rédaction de mon travail ?*

Cette dernière a pour but d'avoir le consentement de la personne interrogée, mais me permettait également de lui demander sa permission de l'enregistrer.

c. L'échauffement

Cette deuxième étape reprenait la question suivante :

2. *Avez-vous déjà entendu parler de biomimétisme dans le cadre de l'architecture ? Pourriez-vous définir cette discipline avec vos propres mots ? Connaissez-vous des exemples construits en Belgique ou ailleurs ?*

Cette dernière permet d'introduire le sujet global du travail, à savoir le biomimétisme dans le cadre de l'architecture. Il s'agit, via cette question, de connaître la position de chacun et sa connaissance de la discipline via des mots clés, mais également via des exemples construits ou non. Il est également possible de donner comme réponse des architectes faisant écho au biomimétisme. Sachant que les exemples de construction ou de projets biomimétiques dans les régions belges sont très limités, la possibilité de réponse au niveau international est également proposée. Le but de la question 2 est également de renforcer la propre connaissance de l'enquêteur sur le sujet et d'avoir une vision différente du biomimétisme vu par des concepteurs et des chercheurs qui ne sont pas spécialisés dans ce domaine.

d. Le corps

Lors de cette étape importante, les trois dernières questions ont été posées. Il s'agit de questions clés visant le sujet précis du TFE, à savoir : la comparaison entre la peau du vivant et la façade du bâtiment, les critères de performances de façades et leurs pondérations.

3. *Mon sujet fait plus précisément référence à la conception de façades biomimétiques (adaptatives ou non), qui exploite souvent l'analogie entre la peau du vivant et la façade. Sachant cela, de quoi, selon vous, faudrait-il tenir compte lors de la conception de façades biomimétiques ?*

La 3^{ème} question ci-dessus est posée dans le but d'introduire le sujet précis : la comparaison entre la peau du vivant et la façade du bâtiment. Via des mots clés, la position de chaque personne interrogée est connue. Elle permet de renforcer la suite des questions en leur proposant de réaliser, sans préparation préalable de définir des critères clés à la conception de façades biomimétiques. Le but est de garder à l'esprit l'analogie biologique et constructive. Ceci permettait de connaître l'avis global des personnes interviewées et d'avoir des idées supplémentaires de critères peut-être non traités.

4. *Après plusieurs lectures sur le sujet, j'ai pris la liberté de définir certains critères clés à la conception de façades biomimétiques, listés ci-dessous, en m'inspirant de la peau du vivant et des besoins généraux d'une façade. Il est à noter que cette façon de concevoir est une manière différente de répondre aux divers enjeux du développement durable dans le secteur du bâtiment.*

Voici ces critères :

- a. Matériaux biosourcés : Cycle de vie, énergie grise consommée
- b. Protection/couverture : Pourcentage d'ouverture, protection contre la chaleur (rayons solaires)
- c. Performance/énergie sauvée : Pourcentage d'énergie sauvée
- d. Respiration/perméabilité : Taux d'air renouvelé, qualité de l'air à l'intérieur
- e. Régulation de la chaleur/isolation : Performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur
- f. Luminosité/confort visuel : Pourcentage de lumière artificielle sauvée, Taux d'ouverture
- g. Régénération/maintenance : Facilité de maintenance du bâtiment, coût de la maintenance

- i) *Voyez-vous d'autres critères, ou sous critères à ceux précités ?*
- ii) *Pourriez-vous les classer dans l'ordre d'importance selon vous ?*

La question 4 fait directement référence au sujet du travail. Ici le but est de ne pas se cantonner au biomimétisme uniquement, mais d'introduire le sujet du développement durable dans le secteur du bâtiment. Il ne faut cependant pas s'éloigner de l'analogie peau-façade, mais il était possible de la nuancer quelque peu. Lors de la lecture de la question, les personnes interviewées prennent connaissance des différents critères définis personnellement après analyses de cas et lectures de normes et de labels. Le but est de critiquer ces derniers, remarquer des erreurs ou des approximations dans leurs descriptions. Ils ont la possibilité de les rassembler, de les modifier et de les coupler. Les descriptions personnelles peuvent également être modifiées ou nuancées.

Ensuite, la sous-question « i » amène la possibilité de proposer d'autres critères éventuels importants aux yeux des concepteurs interviewés lors de la réalisation de façades à hautes performances. La sous-question ii, quant à elle, laisse la possibilité de classer les critères afin de voir quels critères seraient toujours mis en avant par les concepteurs et lesquels seraient considérés comme secondaires. Ceci permet de mettre une priorité sur des critères à traiter dans le cas où certains seraient trop difficilement quantifiables ou seraient simplement à supprimer.

5. *Afin de réaliser au mieux mon travail, je me dois de pondérer chaque critère afin de comparer des façades et de rendre compte de leur performance. Faisant l'hypothèse que chaque critère devra être pondéré sur une échelle de 1 à 5: quelles seraient, selon vous, les valeurs les plus adaptées à associer à chacun de ces 5 points ?*

Exemple pour le critère performance :

Mauvais (1/5) : 0-15% énergie sauvée

Ok (2/5) : 15-30% énergie sauvée

Bon (3/5) : 30-45% énergie sauvée

Très bon (4/5) : 45-60% énergie sauvée

Excellent (5/5) : 60-85% énergie sauvée

Il s'agit ici de quantifier les critères précités. La quantification porte sur les critères qui ont été établis après la question 4, ceux de base auraient donc pu être modifiés et la question s'adaptait en conséquence.

La quantification, qualitative ou quantitative, était laissée au choix. De plus, l'échelle 1 à 5 est également non fixée, mais était encouragée. En effet, l'échelle de 1 à 3 et l'échelle de 1 à 7 sont des possibilités éventuelles, mais la première est trop réductrice tandis que la deuxième paraît trop complexe à remplir dans son entièreté. C'est pourquoi l'entre-deux est choisi.

L'exemple choisi est à titre purement indicatif, la réponse ne se veut pas réaliste. Cet exemple permet simplement d'expliquer l'échelle mise en place et le type de réponse attendu. Afin d'expliquer le but de la question, une représentation de l'outil envisagé, sous forme de radar, était également proposée dans la grille d'entretien. Cet outil est présenté à la figure 33, p.44 notamment.

Comme annoncé dans la méthodologie globale du TFE, une étude pilote a été réalisée dans l'optique de montrer les défauts éventuels de l'entretien et de pouvoir ainsi le corriger en conséquence. Cette étude est décrite dans la section suivante.

V. Étude pilote

Lors de l'étude pilote, quatre personnes ont été interviewées afin de mettre au point la grille d'entretien. Deux personnes faisaient partie de la filière ingénieur architecte de l'université de Liège (un professeur et un assistant) et deux étaient des personnes extérieures. La différence de profil avait pour but de mettre en exergue les divers défauts de l'entretien vu par des personnes au background différent.

Il s'est avéré que la plupart des questions étaient claires. La plus compliquée à comprendre a cependant été la dernière question. En effet, elle précédait la question 4 demandant de prendre connaissance et de critiquer les critères mis en place. Ces derniers étaient numérotés de « a » à « g ». La 4^{ème} question comportait une sous-question demandant aux interviewés de classer les critères selon leur ordre d'importance. Ensuite, nous enchaînions sur la cinquième et dernière question, dont l'exemple décrit était également numéroté au moyen de lettres allant de « a » à « e ».

- a. 0-15% énergie sauvée
- b. 15-30% énergie sauvée
- c. 30-45% énergie sauvée
- d. 45-60% énergie sauvée
- e. 60-85% énergie sauvée

Ceci faussait la compréhension et il des explications supplémentaires étaient toujours demandées. Cette 5^{ème} question a donc été améliorée dans sa présentation. Notons de plus que la sous-question 4. ii a été abandonnée.

- *Mauvais (1/5) : 0-15% énergie sauvée*
- *Ok (2/5) : 15-30% énergie sauvée*
- *Bon (3/5) : 30-45% énergie sauvée*
- *Très bon (4/5) : 45-60% énergie sauvée*
- *Excellent (5/5) : 60-85% énergie sauvée*

De plus, il a souvent été demandé durant les entretiens d'expliquer exactement le but du travail de fin d'études, afin de mieux comprendre l'intérêt de l'interview. C'est pourquoi le temps a été pris, avant chaque entretien, d'expliquer l'objectif global du travail au moyen d'une rapide présentation PowerPoint tout en faisant attention à ne pas influencer la personne sur les thèmes abordés durant l'interview.

Au vu du peu de changements réalisés après cette étude pilote, les résultats de ces quatre entretiens seront traités au même titre que les 18 autres réalisés dans ce travail.

Chapitre 4 : Résultats

Dans cette section, les différents résultats provenant des sections précédentes seront présentés. En effet, il sera question de l'analyse des différents cas d'étude permettant de comprendre la genèse des critères établis. Il s'agira ensuite de s'intéresser aux résultats de l'enquête réalisée. Celle-ci expliquée dans la section 3.5 : Méthodologie : Enquêtes. Le chapitre « résultats » ne fait état que des réponses données et des résultats d'analyse des six cas d'études en essayant d'être le plus objectif possible. Mon avis et mon interprétation n'apparaîtront que dans le chapitre suivant dédié aux discussions.

4.1. Analyse des cas d'études

Ce premier chapitre permettra de présenter succinctement les six cas retenus dans mon étude. Pour rappel, la manière de procéder au choix des cas d'études est présentée dans la section 3.3 de la méthodologie. La présentation commencera par une brève fiche d'identité reprenant les caractéristiques principales de l'ouvrage, à savoir les architectes, la localisation, l'année d'inauguration, mais également la fonction, le nombre de m² et le prix du projet. Enfin, nous retrouverons l'approche biomimétique et l'inspiration biologique dont il a été question lors du design du bâtiment. Dans le corps du texte, une brève explication du projet sera présentée pour ensuite passer aux avantages environnementaux et diverses remarques que j'ai trouvées intéressantes.

I. Cas 1 : Council House 2 (CH2)

Architectes	Mick Pearce et DesingInc
Localisation	Melbourne, Australie
Inauguration	2006
Fonction	Immeuble de bureaux
Surface	12536 m ² sur 10 étages
Prix	52 millions de dollars
Approche Biomimétique	Solution – Based
Inspiration	Arbre et termitière

Tableau 2 : CH2 - Fiche d'identité

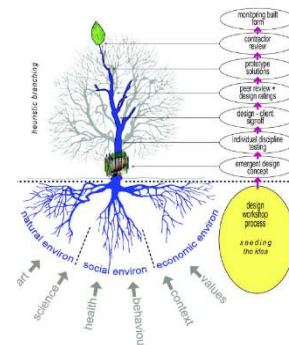


Figure 35 : CH2 (gauche) et l'analogie à l'arbre (figure à retrouver en annexe n°2) (droite)

Ce projet est un projet caractérisé de « lighthouse », défini comme un projet durable et efficace tout en faisant attention au bien-être des employés. Pour ce faire, le biomimétisme a joué un rôle prépondérant lors de sa conception. La façade a été inspirée de l'arbre (figure 35) et les techniques internes du bâtiment, le chauffage et l'HVAC ont été conçus selon les principes de fonctionnement de la termitière. En effet, Mick Pearce, architecte associé du projet, avait déjà utilisé cette analogie dans le projet de l'Eastgate Center, déjà décrit dans la section 2.3 de ce mémoire. Le but de ce projet est de lier le bâtiment avec son environnement extérieur et les organismes vivants autour de lui (Webb, 2005).

Concernant la façade, la partie Ouest joue le rôle de l'épiderme de l'arbre. Ce dernier crée un microenvironnement semi-fermé permettant de contrôler les rayons solaires directs et donc l'éblouissement. La façade Est fait office de façade « technique », incluant les circulations verticales et les techniques de type conduits, écrans solaires, compartiment feu,... et est inspirée du derme de l'arbre. Elle est conçue au moyen d'un cadre d'acier pour assurer sa légèreté (Webb, 2005). Pour rappel, les termes dermes et épidermes sont décrits 2.6 de l'état de l'art, faisant état de la peau biologique de l'homme.

La ventilation a été placée au niveau des façades Nord et Sud afin de canaliser au maximum l'air. Les cheminées placées au Nord sont noires et permettent ainsi une absorption optimale de chaleur au vu de la forte présence du soleil dans ces régions. Ainsi, l'air entrant est réchauffé en partie. Concernant la façade Sud, une technique de refroidissement de l'air a été mise en place. En effet, 5 « tours douches » ont été placées en façades. Ces dernières permettent de refroidir l'air intérieur au niveau bas, comme le montre le schéma ci-dessous (figure 36). L'eau nécessaire au système provient des eaux usées de la ville, elle est triplement filtrée, et permet de subvenir aux besoins en eaux de ces

douches, mais également aux besoins des toilettes et des jardins suspendus de la façade Nord (Webb, 2005).

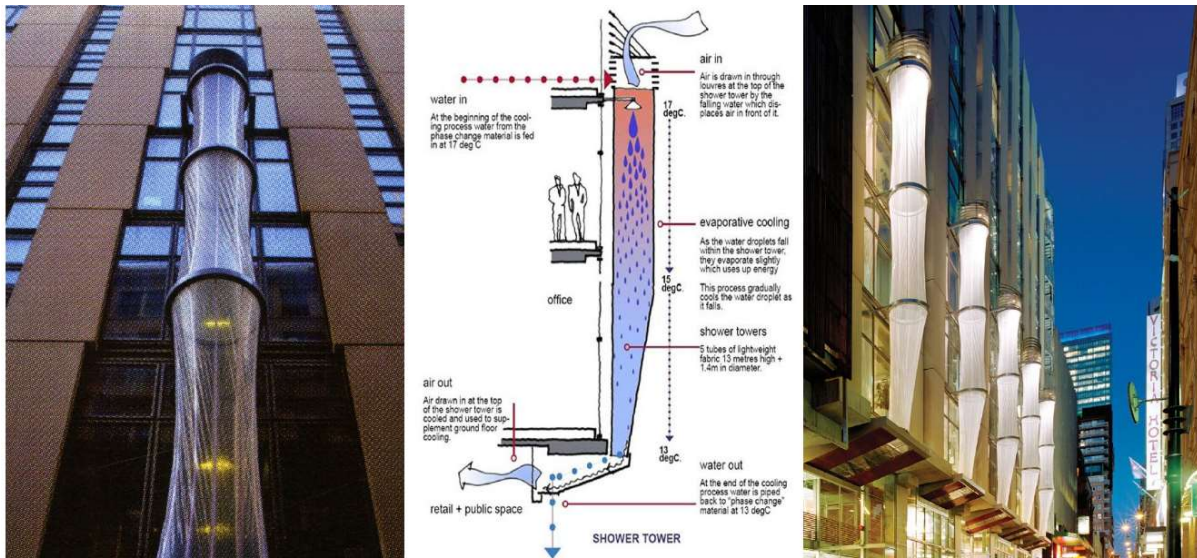


Figure 36 : CH2 - Façade Sud - Tours douches, tiré de DesignInc, 2013

La capacité thermique des plafonds a été optimisée. En effet, le plafond ondulé est en béton ce qui en augmente son inertie thermique. La chaleur rejetée par les murs, eux aussi en béton, est ensuite canalisée par les cheminées de ventilation. Le refroidissement de l'air ambiant est mis en œuvre par des tuyaux d'eau froide placés dans les poutres et les plafonds (Webb, 2005).

L'éclairage naturel entrant dans les locaux a été étudié de manière à ce qu'il soit optimisé, malgré son orientation et sa position par rapport au bâti environnant. La meilleure solution a été de créer une synergie entre la taille des fenêtres et l'entrée d'air, couplées de protections solaires afin d'optimiser au mieux l'entrée de lumière à l'intérieur des bureaux. De plus, les plafonds voûtés laissent pénétrer l'éclairage naturel de façon plus efficace. Des panneaux de bois recyclé non traités (persiennes) contrôlent l'entrée de lumière et les vues dans la façade Ouest, ils s'ouvrent et se ferment en fonction de la quantité de soleil frappant la façade (figure 37). Ce système est entièrement automatisé (Morris-Nunn 2007).



Figure 37 : CH2 – Façade Ouest - Persiennes en position ouvertes, tiré de DesignInc, 2013

La façade Nord est composée de treillis en acier et de balcons supportant des jardins verticaux sur 9 étages. Le feuillage protège également le bâtiment du soleil et filtre la lumière naturelle réduisant ainsi l'éblouissement à l'intérieur (figure 38). L'éclairage artificiel est utilisé lorsque la lumière naturelle est insuffisante ou non présente. Ce sont des luminaires de type « T5 » basse énergie atteignant une densité de puissance d'éclairage inférieure à 2,5 watts/m² pour 100 lux (Webb, 2005).

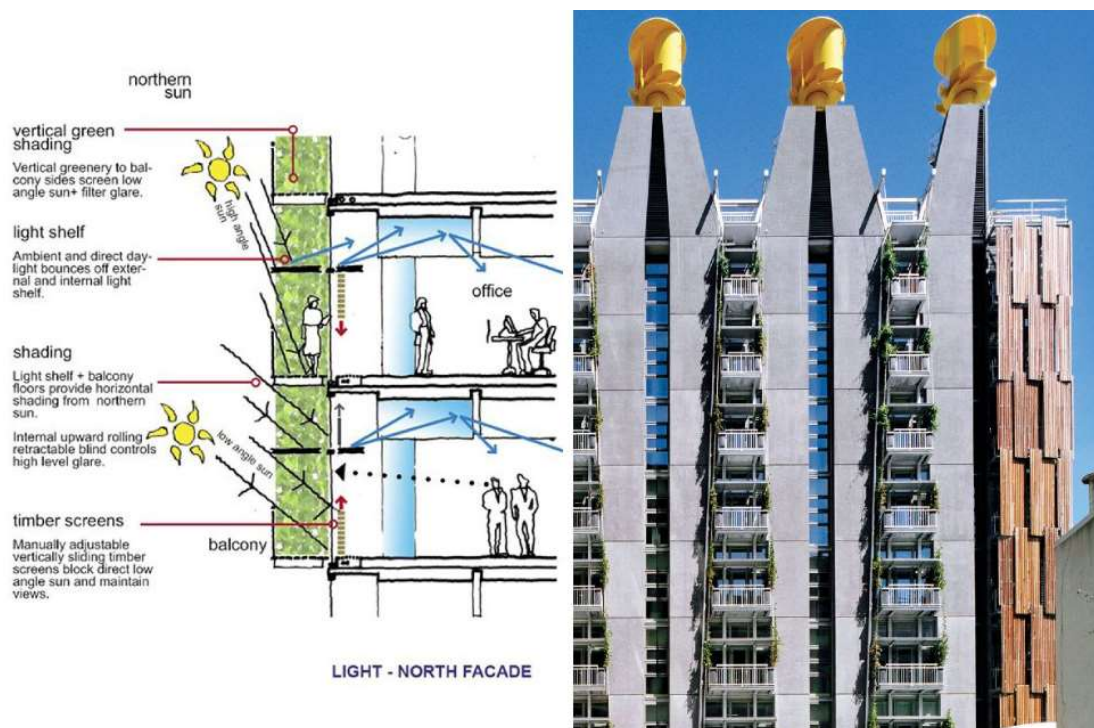


Figure 38 : CH2 – Façade Nord - Treillis en acier, balcons et jardins verticaux, tiré de DesignInc, 2013

Voici divers points intéressants concernant les techniques mises en œuvre afin de limiter la consommation d'énergie (Chua, 2014). La figure 39 ci-dessous les schématise.

- **Système de chauffage** : Système de chauffage sol concentré près des fenêtres.
- **Système de refroidissement** : 40% de la chaleur générée par les activités internes et au niveau des fenêtres est absorbée au moyen d'un système d'air conditionné rafraichissant l'air 2 fois par heure. Les 60 derniers pourcent sont emmagasinés dans les parois en béton et libérés la nuit. La température intérieure est constante (entre 21°C et 23°C)
- **microturbine - Cogénération** : Des microturbines au gaz sont utilisées pour générer de l'électricité afin de subvenir à 30% des besoins en électricité du bâtiment (soit 60kVA)
- **Panneaux photovoltaïques** : 23 panneaux qui permettent de produire 3.5KW d'électricité. (Suffisant pour faire pivoter à eux seuls les persiennes)
- **Panneaux solaires thermiques** : 48m² de panneaux permettent de subvenir à 60% des besoins en eau chaude. Un boiler au gaz supplée le reste.
- **Récupération de l'eau** : La toiture a été réalisée dans le but de récupérer l'eau de pluie et la réinjecter dans le building. La récupération de l'eau de pluie se fait au moyen notamment d'une toiture verte et de jardins verticaux.

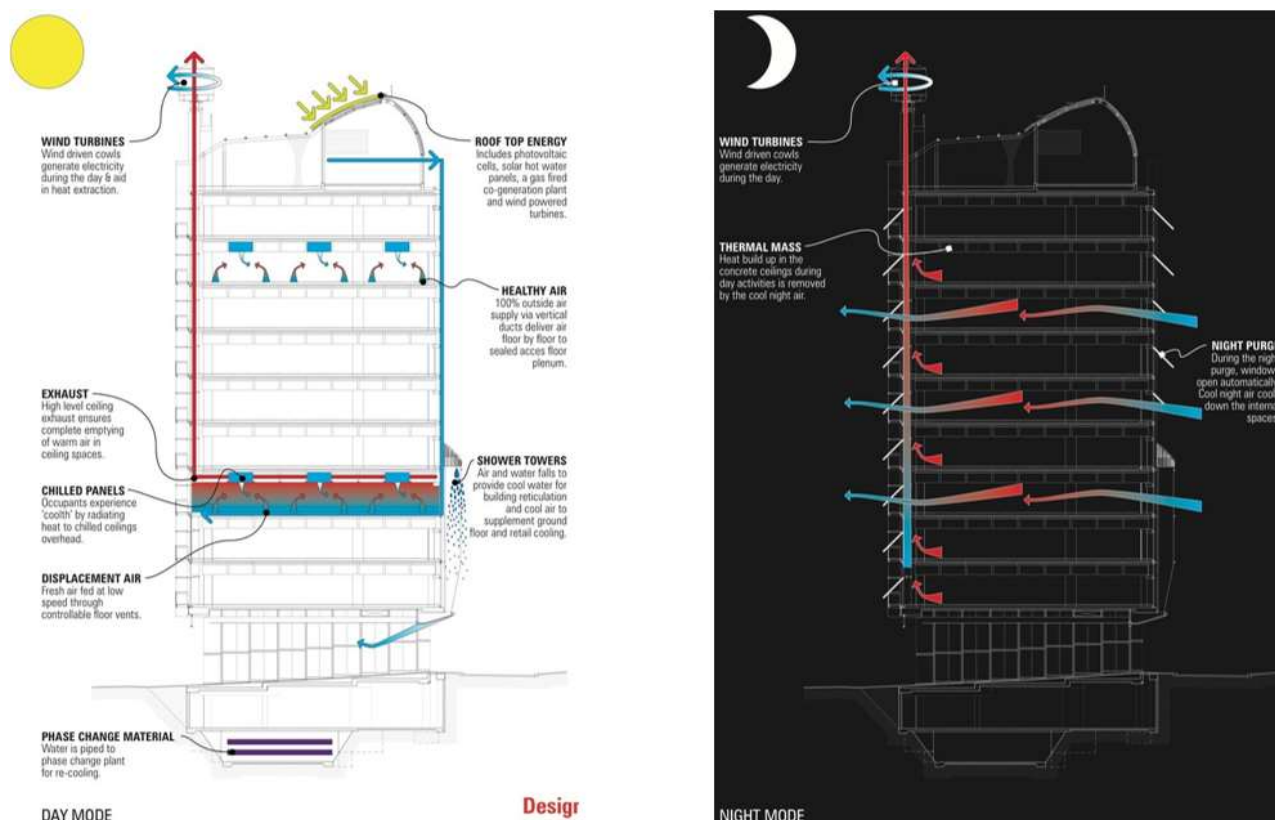


Figure 39 : CH2 - Coupe de principe bioclimatique jour (gauche) et nuit (droite) tiré de DesignInc, 2013

En comparaison au Council House se trouvant à proximité directe, les économies d'énergies sont (Radwan & Osama, 2016) :

- Réduction de la consommation électrique de 85%
 - Nouveaux ordinateurs internes
 - Éclairage artificiel de type T5
- Réduction de la consommation de gaz de 87%
- Production d'émissions de 13%
- Réduction des besoins en eau de 72%

Gains produits par la façade

- Air filtré à 100%
- Éclairage naturel sauvé à 65%
- Ventilation sauvée à 65%

Il est à noter que 12 millions d'euros ont été investis dans l'énergie, dans l'économie d'eau et dans le recyclage des déchets. Le retour sur investissement a été calculé pour 10 ans (Chua, 2014).

II. Cas 2 : Water Cube

Architectes	Chriss Boss, Tristram Carfae, PTW Architects, CSCEC, CCDL et Arup
Localisation	Pékin, Chine
Inauguration	2007
Fonction	Centre aquatique
Surface	12536 m ² sur 10 étages
Prix	94 millions d'euros
Approche Biomimétique	Solution – Based
Inspiration	Bulle d'eau

Tableau 3 : Water Cube - Fiche d'identité



Figure 40 : Water Cube tiré de Maneval, 2014

Ce centre aquatique a été réalisé pour les Jeux olympiques de Pékin de 2008 (figure 40). Le bâtiment a permis d'accueillir les compétitions de natation, de sauts et de nages synchronisées. C'est également à l'intérieur de ce dernier que la finale de Waterpolo a été disputée. La capacité assise est de 17000 places et pour une question de reconversion, 11000 d'entre elles étaient temporaires. À l'heure actuelle, les sports aquatiques, de natation, de fitness et de récréation s'y déroulent. De plus, les Winter Olympic Games de 2022 y seront organisés. Une vue intérieure de l'ouvrage vous est proposée à la figure 41 (Etherington, 2008).



Figure 41 : Water Cube - Vue intérieure de la piscine principale tiré de Etherington, 2008

Le Water Cube utilise le biomimétisme et l'imitation de la bulle d'eau dans le but de maximiser la géométrie tridimensionnelle de son travail de façade (figure 42). De plus, outre la géométrie et le travail de façade du stade olympique, l'aire de la surface extérieure a été réduite via l'analogie à la forme de la bulle et de sa tension de surface. Cette dernière donne également une « expérience » de transparence grâce à l'eau (Elazm & Saad, 2017).



Figure 42 : Water Cube - Façade extérieure tiré de Maneval,2014

Le cube d'une longueur de 177m et d'une hauteur de 30m est entièrement réalisé au moyen d'une membrane d'éthyle tetrafluoroéthylène, ETFE, (une surface totale de 110000m² !) et d'une structure en acier. Ce matériau recyclable est d'une épaisseur très faible (2mm), mais il est également très léger. En effet, le poids de l'ETFE est 100 fois inférieur au poids du verre. Une représentation artificielle tridimensionnelle vous est proposée en figure 43, mais également une vue du projet en travaux à la figure suivante (figure 44) (Maneval, 2014).

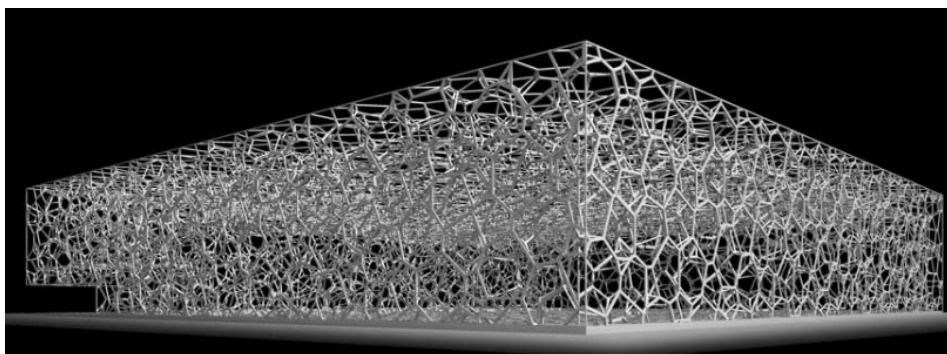


Figure 43 : Water Cube - Travail 3D par ordinateur tiré de Maneval,2014



Figure 44 : Water Cube - Construction - Structure métallique et pose de revêtement (source : archdaily.com)

Les leçons tirées de ce bâtiment sont nombreuses. En effet, le premier est une expérience unique créée au moyen de l'analogie à la bulle d'eau et de sa transparence. Les façades ont toutes été travaillées en fonction de l'orientation. L'avantage du travail de l'ETFE est une pénétration de la lumière et de la chaleur supérieure au verre traditionnel. L'espace laissé entre deux membranes est propice à un « effet de serre » capturant l'énergie solaire. Ceci amène à une diminution des besoins de chauffage de 20% par rapport à un travail de façade traditionnel (Gonchar, 2008). Le vent évacue le surplus de chaleur accumulé dans l'espace interstitiel via 8 bouches d'aération placées en toiture et sur la façade.

De plus, des coussins d'ETFE amovibles permettent de contrôler l'entrée de lumière et à fortiori l'entrée de chaleur à l'intérieur du bâtiment (Gonchar, 2008). La coupe schématique ci-dessous explique ces principes (figure 45).

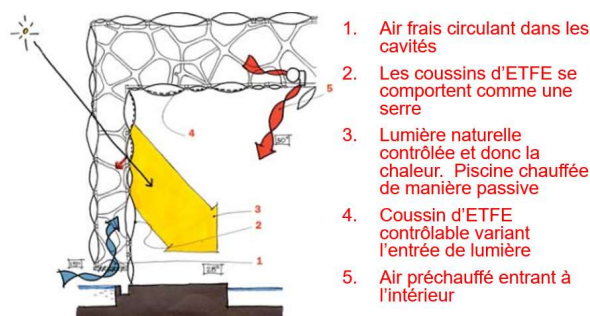


Figure 45 : Water Cube - Coupe de principe bioclimatique tiré de Gonchar, 2008, p.2

Les avantages de cette approche biomimétique au niveau environnemental sont (Radwan & Osama, 2016) :

- Coûts en énergie réduits de 30%
- Besoins en lumière artificielle réduits de 55%
- Projet « effet de serre »
- Expérience de l'eau transparente pour les visiteurs
- Collecte des eaux de pluies et recyclées au moyen de filtres efficaces et d'un système de lavage à contre-courant
- L'énergie sauvée au moyen de l'ETFE est équivalente à un recouvrement de la toiture uniquement avec des panneaux solaires
- 20% de l'énergie solaire est emprisonnée et utilisée pour la chaleur

Notons que pour la conception du bâtiment, un travail en 3D ainsi qu'un processus d'essai-erreur ont été réalisés afin d'optimiser l'orientation de chaque bulle d'eau. Ces dernières ont ensuite été « tranchées » dans l'optique d'obtenir cette forme régulière, tout en gardant à l'esprit le concept initial d'absorption d'énergie solaire (Elazm & Saad, 2017). Une coupe 3D montre le résultat final et les « tranches » dont il est question (figure 46).

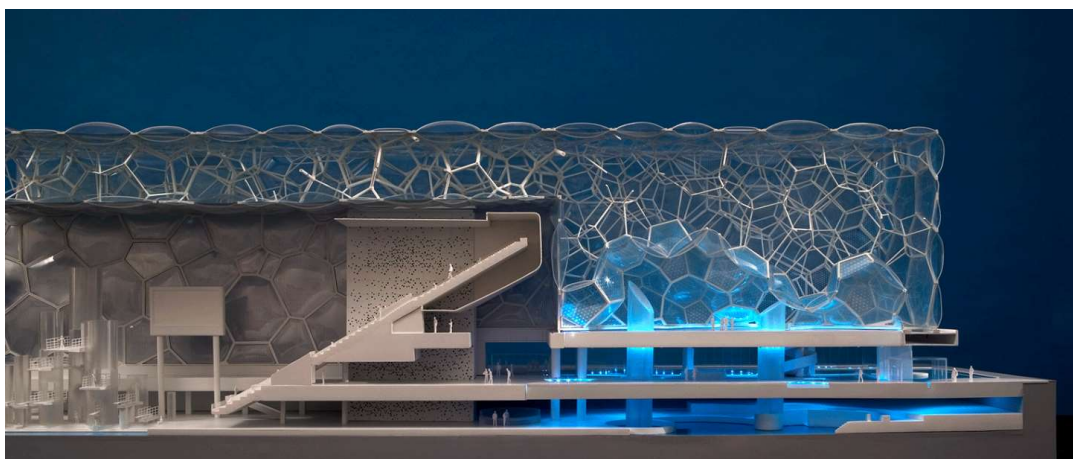


Figure 46 : Water Cube - Coupe 3D (source : archdaily.com)

La maintenance du bâtiment a été très étudiée. En effet, les membranes sont résistantes à de hautes pressions et sont également très épaisses. Ainsi, de légères ruptures ne mettent pas en danger la stabilité de la façade et un remplacement d'une partie peut se faire sans même intervenir sur la structure. De plus, le matériau est autonettoyant grâce à sa faible rugosité et donc sa faible adhérence aux particules volantes. Des précipitations faibles permettent de rendre un certain éclat aux parois (Maneval, 2014).

III. Cas 3 : Esplanade Theater

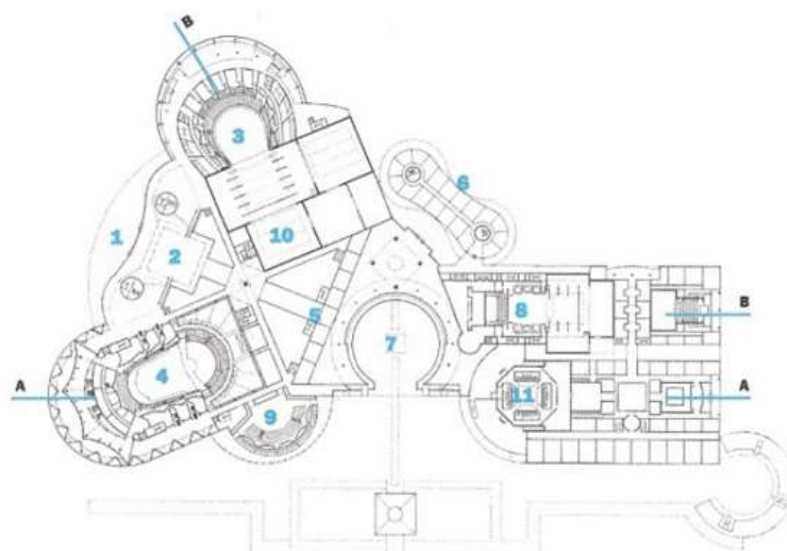
Architectes	DP Architects, Michael Wilford & Partners et Atelier One
Localisation	Singapour, Singapour
Inauguration	2002
Fonction	Théâtre
Surface	75190m ²
Prix	350 millions d'euros
Approche Biomimétique	Solution – Based
Inspiration	Fruit de Durian

Tableau 4 : Esplanade Theater - Fiche d'identité



Figure 47 : Esplanade Theater - Analogie au fruit de Durian tiré de Radwan & Osama, 2016, p.185

L'Esplanade Theater de Singapour (figure 47) dispose de cinq salles dédiées au spectacle. La plus grande fait 2000 places assises et des pièces de théâtre s'y jouent. Ensuite, une salle de concert permet d'accueillir 1800 invités. Pour finir, les concepteurs ont prévu trois studios de plus petites tailles dont le nombre de places n'est pas communiqué. Une esplanade extérieure a été réalisée afin d'accueillir 450 personnes pour des spectacles en plein air. Cette répartition se retrouve plus précisément dans le plan de la figure 48.



1. Entrée principal
2. Hall
3. Théâtre lyrique
4. Salle de concert
5. Espace shopping
6. Entrée espace shopping
7. Patio central
8. Théâtre moyen
9. Petit théâtre
10. Théâtre expérimental
11. Salle « spéciale »

Figure 48 : Esplanade Theater - Plan (source : archdaily.com)

Le design consiste en deux espaces circulaires entièrement vitrés protégés par des protections solaires triangulaires en aluminium (figure 49). Il est à noter que le projet initial ne prévoyait pas de protections solaires. C'est pourquoi l'approche biomimétique de fruit de durian a été mise en place, afin d'éviter des espaces trop vitrés rappelant l'architecture occidentale (question culturelle), mais afin également d'éviter le problème de surchauffe dû au climat tropical singapourien. En effet, ce fruit tropical a la capacité, via sa peau robuste assortie d'épines, de se protéger de l'environnement extérieur (soleil, prédateurs,...). Le nouveau design est ainsi adapté au climat et à la culture locale, sans pour autant être trop traditionnelle (Anonyme, 2004).



Figure 49 : Esplanade Theater - Vue extérieure – Nuit (source : archdaily.com)

Ainsi, le biomimétisme a permis d'éviter une « césure » culturelle dans le travail de façade. (Kong, 2009). Le travail d'une géométrie unique a rendu possible la prise en compte de la course du soleil pour amener une protection aux endroits dont la surchauffe est à éviter. L'analogie du fruit du durian a été choisie pour sa géométrie et sa forme, mais également pour le rôle de protection de sa carapace. En effet, les épines permettent d'éviter l'effet néfaste des rayons solaires directs et de garder une température constante à l'intérieur du bâtiment. La forme ovoïde maximise également les vues vers la baie de Singapour (Radwan & Osama, 2016).

Le bureau d'ingénieurs « Atelier One » a conçu la façade. Elle est faite de losanges en aluminium. Ces derniers sont placés à 20cm du verre et leur orientation ainsi que leur ouverture/fermeture sont contrôlés par des capteurs de lumière photoélectriques (figure 50). Par mauvais temps, les losanges sont en position « ouverte » et permettent la lumière directe du soleil de pénétrer et de chauffer le bâtiment. Par beau temps, les losanges sont en position « fermée » ou « semi-fermée ». Le but étant de réduire les rayonnements solaires directs tout en optimisant l'entrée des rayons solaires indirects par la réflexion de la lumière sur les surfaces des triangles (figure 51) (Anonyme, 2004).

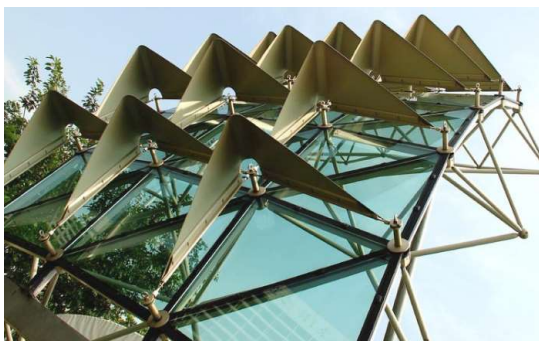


Figure 50 : Esplanade Theater - Zoom sur les panneaux d'aluminium (source : archdaily.com)

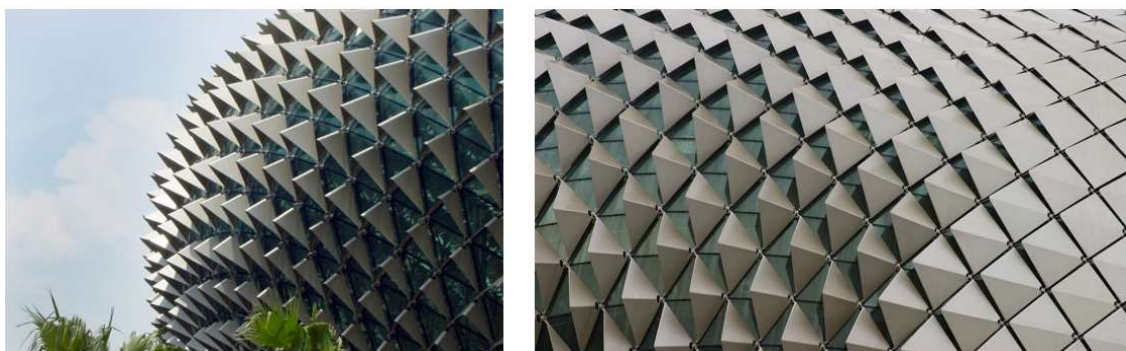


Figure 51 : Esplanade Theater - Travail de façade - Ouvertures/Fermetures (source : archdaily.com)

Le projet a gagné le prix de « Energy Efficient Buidling Award » dans la catégorie « Special Features », pour trois raisons principales. La première a été le système « d'échafaudage », qui caractérise le travail de façades au moyen de triangles d'aluminium. Les protections solaires en aluminium et le double vitrage permettent d'éviter la pénétration des rayons solaires directs tout en permettant une vue optimale depuis l'intérieur. La deuxième raison a été le travail des flux d'air et de la température de confort optimisés par le « Computation Fluid Dynamics » (CFD). Le CFD, appelé aussi la mécanique des fluides numérique en français, permet d'étudier les mouvements d'un fluide au moyen de logiciels et d'algorithmes complexes. Enfin, le prix a également été donné, car le modèle CFD a éliminé tout besoin d'ajuster la façade durant la construction grâce aux diverses simulations et analyses durant la phase de conception.

Divers points positifs ont été relevés concernant les enjeux environnementaux, et ce par rapport à un bâtiment construit de manière traditionnelle (Radwan & Osama, 2016) :

- Besoin d'énergie diminué de 30%
- Lumière artificielle diminuée de 45%
- Capture de l'énergie solaire
- Confort des usagers
- Protection contre la chaleur
- Lumière naturelle
- Diminution des besoins de ventilation

IV. Cas 4 : Biofaçades PBR

Architectes	X –TU Architects et laboratoire universitaire de Nantes (GEPEA)
Localisation	Champs sur marne, France
Inauguration	2007
Fonction	Façade du CSTB
Surface	200m ² de façade
Prix	4,8 millions d’euros
Approche Biomimétique	Nature – based
Inspiration	Microalgues

Tableau 5 : Biofaçade PBR - Fiche d'identité

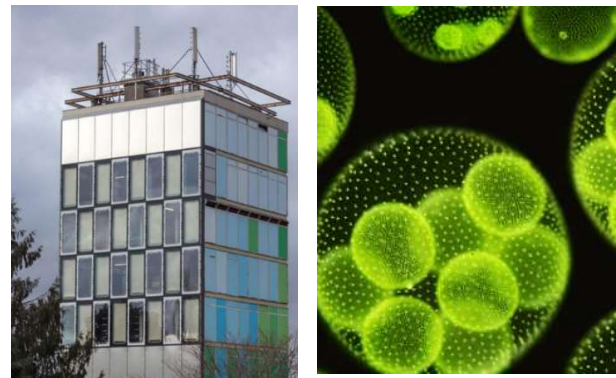


Figure 52 : Biofaçade PBR - Bâtiment CSTB (gauche) (Peter, 2016) - microalgue (droite)

Le bureau X-TU a conçu et mis en place les premières biofaçades. Il s’agit de photobioréacteurs de 4cm composés de double ou triple vitrages et d’une fine lame d’eau. Cette eau permet le développement d’une culture de microalgues. Le but est donc de cultiver ces algues en profitant des échanges thermiques et chimiques avec le bâtiment hôte, à l’image de capteurs solaires « biologiques ». La figure 53 ci-dessous montre le principe de mise en culture des microalgues. Le principe est simple, les microalgues provenant de pompes et de cuves de récoltes sont injectées dans les panneaux de façades qui sont maintenus à une température pouvant varier entre 15 et 35 degrés Celsius. Ces algues se nourrissent de CO₂ et rejettent de l’O₂ (Scheffer, 2015).

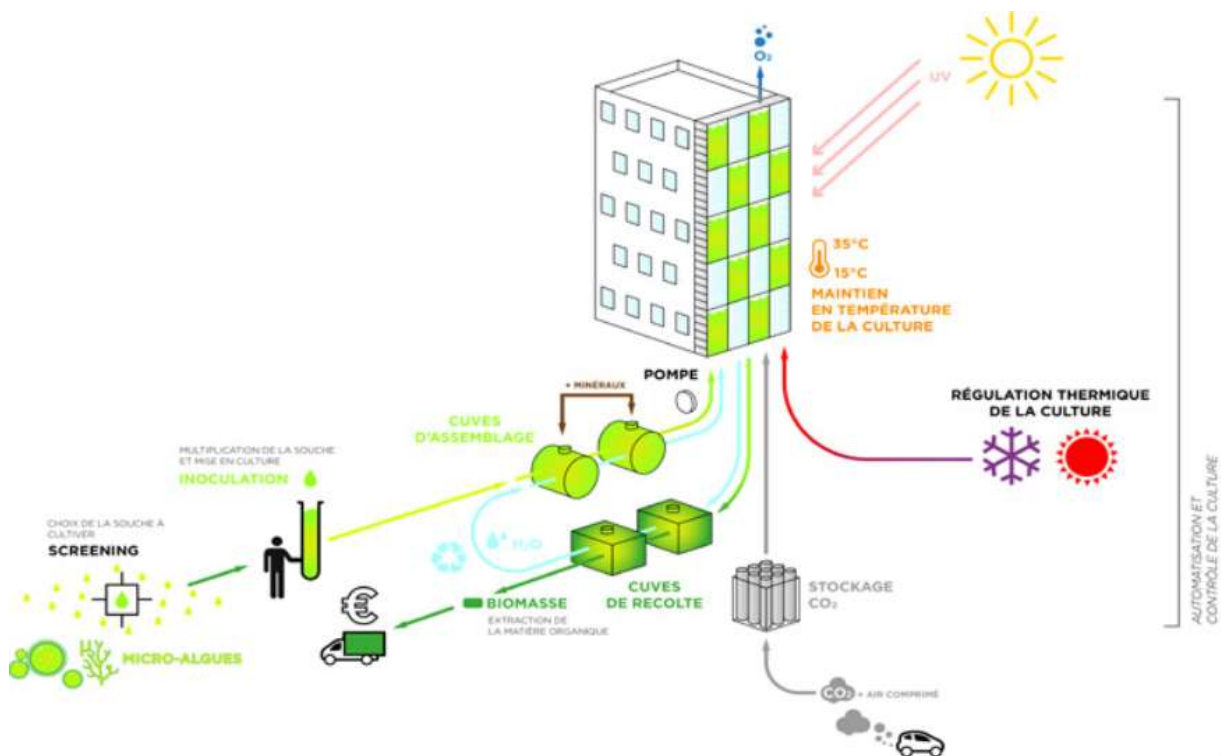


Figure 53 : Biofaçade PBR – Principes (pinterest.fr)

Le projet pilote sur le site du CSTB à Champs-sur-Marne est une première mondiale. La façade se veut active, dépolluante et permet d’assurer à la fois l’étanchéité du bâtiment, la production de biomasse algale et une régulation de la température interne du bâtiment. Les microalgues se nourrissant notamment de CO₂, ce dernier est directement valorisé par les panneaux de façades (figure 54). Dans ce projet pilote, 16 panneaux non opaques ont été posés sur 4 étages tandis que 124m² de panneaux opaques ont été posés sur 7 étages (Scheffer, 2015).

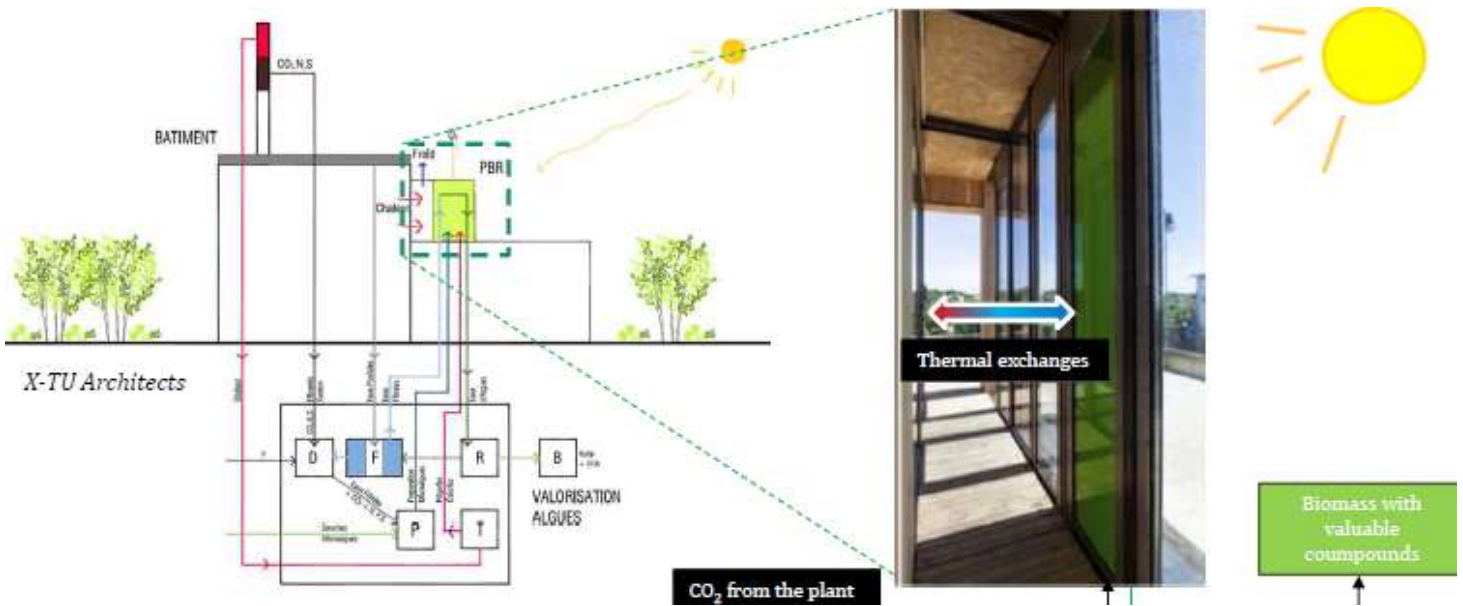


Figure 54 : Biofaçade PBR - Principe bioclimatique tiré de Pruvost, 2014

Les objectifs du projet pilote sont nombreux. Le premier est de prouver la viabilité de l'industrialisation de ce genre de panneau de mur-rideau permettant de répondre aux diverses exigences énergétiques des bâtiments. La seconde est de valider, en conditions réelles, la pertinence de ce travail en panneaux de façade. Enfin, le projet pilote permet de mettre au point les procédures automatisées de la mise en culture de ces êtres vivants et ainsi la mise en production de souches de microalgues (figure 55) (Latieule, 2013).

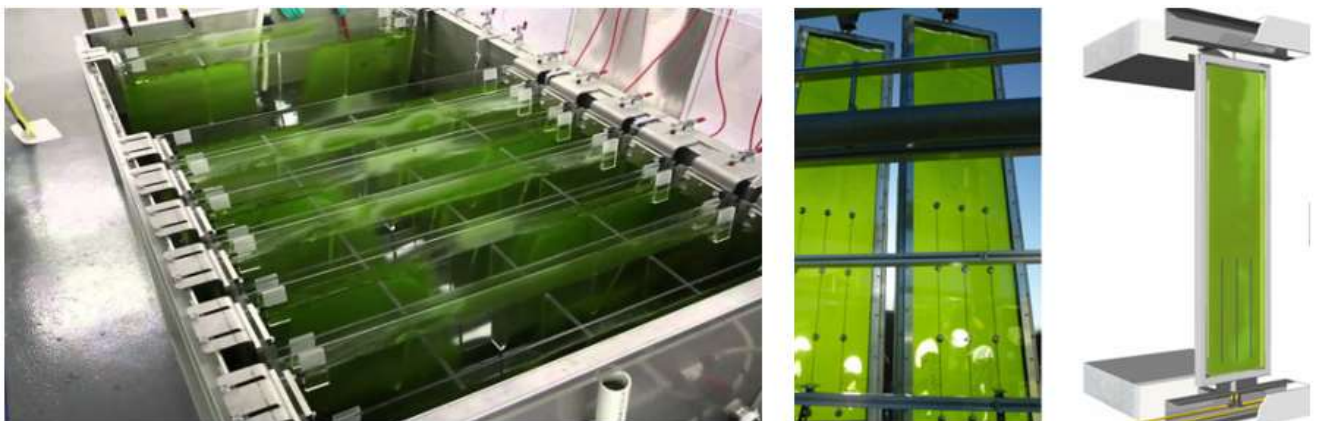


Figure 55 : Biofaçade PBR - Mise en culture (gauche) - Panneaux de façade (droite) tiré de Lofgren, 2013

La maintenance de tels « aquariums » est relativement bien étudiée malgré leur complexité. Cette dernière prévoit le nettoyage d'éventuels biofilms (dépôts), mais également la possibilité d'intervenir sur le système hydraulique dans le cas d'une fuite d'un des bords par exemple. De plus, au vu du partitionnement en panneaux de façade, le remplacement d'un de ceux-ci peut se faire sans pour autant arrêter le fonctionnement entier du système. En effet, lorsqu'un des photobioréacteurs est en panne, seuls 3 à 5 panneaux seraient aussi à l'arrêt au vu de la mise en série du système. À l'image du travail de façade du CSTB, une double peau avec coursive permettant une circulation entre intérieur et extérieur (figure 54) assurerait des interventions ponctuelles et sans gêne pour les usagers (Dossier de presse Symbio2, 2016).

Dans le cas de la détérioration d'un panneau du mur-rideau, le remplacement d'une PBR peut se faire manuellement par 4 personnes depuis l'intérieur, le poids du panneau faisant 180 à 400kg. Malgré cela, le remplacement par nacelle ou grue télescopique est nécessaire lors d'une intervention de l'extérieur du bâtiment, sans accès depuis l'intérieur même du bâti. Les constructeurs préconisent ainsi de garder des panneaux en stock (Dossier de presse Symbio2, 2016).

L'avantage de ce travail de façades est notamment le choix de l'opacité ou non des éléments. Au niveau énergétique, la biofaçade permet de réduire de 50% les consommations en chauffage et climatisation. (23 à 40kWh/m² en région parisienne, sur base de bâtiment RT 2012, passé à 16 à 20kWh/m²). Toutefois, la culture de microalgues en bassins a besoin de 120 kWh/m²) (Dossier de presse Symbio2, 2016).

Les intérêts environnementaux sont nombreux. Premièrement, il a pu être constaté une réduction des besoins en eau pour la culture des algues (99% par rapport aux cultures « ouvertes » traditionnelles). Ensuite, les besoins énergétiques nécessaires à la régulation thermique des cultures des micro algues par rapport à la culture en bassins sont diminués de 80%. La consommation énergétique, pour les besoins en chauffage et refroidissement, du bâtiment est quant à elle réduite de moitié par rapport à un bâtiment dit « RT 2012 ». Ensuite, l'eau pluviale et la chaleur de CO₂ dégagée par l'incinération de déchets sont réutilisées (Dossier de presse Symbio2, 2016).

En résumé, les avantages concernant la performance énergétique du bâtiment sont (Scheffer, 2015) :

- Double peau maintenue en moyenne à 25°C par l'algoculteur
- Performance thermique grâce à la double peau
- Ventilation naturelle assistée contrôlée
- Échanges thermiques entre le bâtiment et la biofaçade

→ Enveloppe active pour le bâtiment et contribue à sa régulation thermique
→ 50% de consommation de chauffage et de climatisation en moins (base : Bâtiment RT 2012).

V. Cas 5 : One Ocean Pavillon

Architectes	Soma, Lima
Localisation	Yeosu-si, Jeollanam-do, Corée du Sud
Inauguration	2012
Fonction	Bâtiment d'exposition EXPO Yeosu 2012
Surface	6900m ²
Prix	Non communiqué
Approche Biomimétique	Nature – based
Inspiration	Oiseau de paradis

Tableau 6 : One Ocean Pavillon - Fiche d'identité



Figure 56 : One Ocean Pavilion tiré de SOMA, 2012

Le projet a été réalisé par le bureau SOMA dans le cadre de l'EXPO de Yeosu en 2012 en Corée du Sud. Le but de cette exposition internationale était de proposer des bâtiments originaux, mais également durables. Le bâtiment One Ocean Pavilion est un des principaux de l'exposition et a été construit dans l'optique de créer une marque dans le paysage en « harmonie » avec le contexte urbain et naturel aux alentours (figure 23) (Maier, 2012).



Figure 57 : One Ocean Pavilion - Vue 3D tiré de SOMA, 2012

L'atout de cet ouvrage, dédié à l'exposition principalement, est sa façade mouvante imitant l'oiseau de paradis (figure 58). L'imitation de la fleur dans son ouverture et sa fermeture est nommée le système Flectofin ® et a beaucoup été étudiée, notamment grâce à une simulation FE (éléments finis) et au programme Transolar (Schleicher, 2011). Cette fleur a permis la mise en place de 108 fines lamelles en fibre de verre (mesurant entre et 0,2 et 14m de hauteur) s'ouvrant et se fermant en fonction des besoins du bâtiment. Ces lamelles sont soutenues par le haut et par le bas de la façade par des broches à vis entrainées elles-mêmes par un servomoteur afin d'en contrôler l'ouverture. L'action des lamelles peut se faire de manière indépendante en étant commandée à distance par un ordinateur. Le matériau utilisé donne une bonne résistance à la traction tout en gardant une faible rigidité flexionnelle (McManus, 2017).

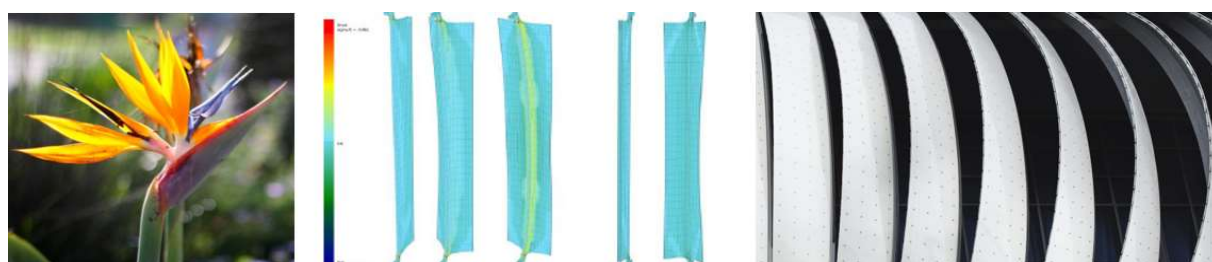


Figure 58 : One Ocean Pavilion - Oiseau de paradis (gauche) - FE Simulation des lamelles (milieu) - Lamelles ouvertes/fermées (droite) tiré de Schleicher, 2011, p. 6.

Le One Ocean Pavillon, dont la longueur est de 140m et la hauteur variant de 3 à 13m (figure 60), accueille des espaces d'expositions et d'autres appropriables pour des conférences ou autres fonctions. Le programme prévoyait également un café, une toiture-terrasse accessible et un spectacle multimédia projetable directement sur la façade. Il a été construit dans un ancien port industriel et dans le but d'améliorer la qualité de l'eau et la qualité de la promenade. En effet, cette dernière a été transformée en une plage urbaine permettant d'octroyer diverses activités de loisirs au public. Des barres LED linéaires dans les bords intérieurs des lamelles permettent d'animer un peu plus la façade après le coucher du soleil (figure 59) (McManus, 2017).



Figure 59 : One Ocean Pavillon - Lamelles fermées, jour (gauche) - Lamelles ouvertes et éclairées, nuit (droite) tiré de SOMA, 2012

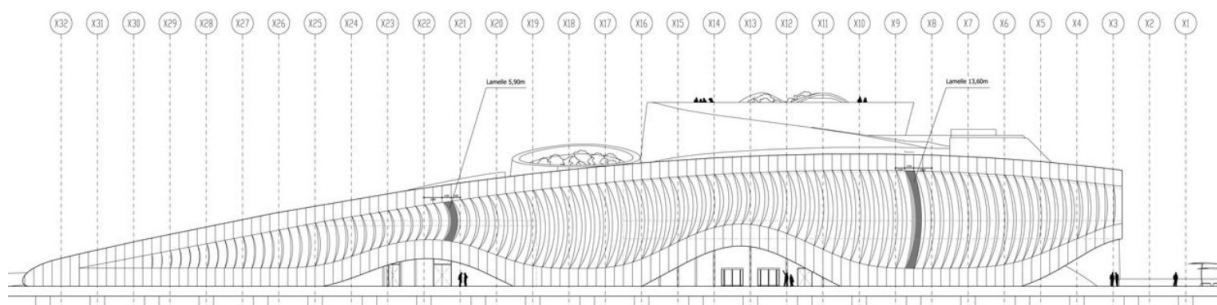


Figure 60 : One Ocean Pavillon - Coupe longitudinale tiré de SOMA, 2012

Outre l'intention d'une « chorégraphie » en façade grâce au mouvement des lamelles, les concepteurs ont beaucoup réfléchi aux gains d'énergie et au confort intérieur que ces dernières peuvent amener. Le climat de Yeosu est marqué par un hiver frais, un été chaud et humide ainsi que des périodes plus tempérées. Les ouvertures en façade optimisent la ventilation naturelle en captant et en guidant les vents à travers le bâtiment. Cette façade cinétique permet également le contrôle des rayons solaires directs et indirects afin d'avoir un éclairage naturel optimal. Il est à noter que des panneaux photovoltaïques intégrés à la toiture permettent de produire plus de 60% des besoins annuels du bâtiment. De plus, la forte inertie des planchers en béton permet de capter et rejeter la chaleur aux différents étages. Une coupe reprenant les principes énoncés est proposée à la figure 61 (Transolar, 2012).

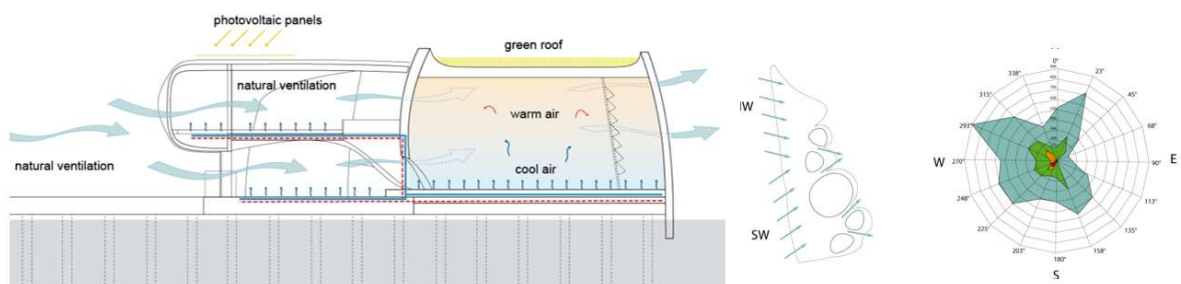


Figure 61 : Coupe de principe bioclimatique (gauche) - Vents dominants (droite) tiré de Transolar, 2012

La maintenance de la façade n'est pas aisée. Les lamelles étant réalisées sur mesure, il est très difficile de les remplacer. L'indépendance des moteurs permet cependant de ne pas avoir une mise en panne globale du système lorsqu'un de ceux-ci a un problème technique. Ces derniers ont également l'avantage d'être principalement alimentés par les panneaux solaires et leurs performances ont été analysées dans des simulations détaillées. Ainsi, le surplus de puissance injecté dans les moteurs est réinjecté dans le système local à des fins d'économie d'énergie. En effet, les moteurs supérieurs et inférieurs fonctionnent souvent avec des exigences de puissances opposées, conduite/freinage (McManus, 2017).

Divers points positifs ont été relevés concernant les enjeux environnementaux (Maier, 2012) :

- Des panneaux photovoltaïques placés en toiture couvrent 66% des besoins en électricité du bâtiment
- Les ouvertures permettent de diminuer les besoins de ventilations
- Les ouvertures et fermetures permettent de contrôler l'apport de lumière interne et donc d'entrée de chaleur. Ainsi, la surchauffe est évitée
- Le béton à forte inertie thermique permet de capter la chaleur durant le jour et de la rejeter durant la nuit.

VI. Cas 6 : HygroSkin

Architectes	Achim Menges Architect, Oliver David Krieg et Steffen Reichert
Localisation	Orléans-la-Source, France
Inauguration	2013
Fonction	Pavillon d'exposition
Surface	290 x 575 x 425 cm
Prix	Non Communiqué
Approche Biomimétique	Nature – based
Inspiration	Cône du Conifère

Tableau 7 : HygroSkin - Fiche d'identité



Figure 62 : HygroSkin (Menges & al., 2013)

Ce projet avait pour but d'allier de façon très poussée la conception paramétrique (figure 63) et les concepts biomimétiques. Les grandes lignes du projet étaient « la réactivité climatique » dans l'architecture. En effet, l'idée était de prouver la possibilité de se passer de dispositifs de détection et d'actionnement par technologie dans le but de réguler un environnement intérieur dans le bâtiment. Ainsi, comme la nature le suggère, il s'agissait de mettre au point des matériaux dont la capacité de réponse est directement ancrée dans cesdits matériaux. (Reichert, Menges & Correa, 2015)



Figure 63 : HygroSkin - Travail 3D paramétrique tiré de Krieg, Christian, Correa, Menges, Reichert, Rinderspacher & Schwinn, 2014, p. 65

Pour mener à bien le projet, des recherches conceptuelles et des expériences sur les principes biomimétiques du cône de conifère ont été menées durant une période de 6 ans. Le biomimétisme réside dans l'imitation de la réponse des cônes aux variations d'humidité. Plus le niveau d'humidité augmente, plus l'ouverture du cône est importante (figure 64). Contrairement à de nombreuses plantes dont le mouvement est produit par des réponses actives, le mouvement du cône est passif, c'est pourquoi il ne nécessite aucun système sensoriel ou fonction motrice. Cette capacité ne consomme aucune énergie, car elle est inhérente au matériau et à ses caractéristiques anisotropiques (Krieg & al., 2014).



Figure 64 : HygroSkin - Degrés d'ouverture fonction de l'humidité relative - Cône du conifère (gauche) - Cavité (droite) tiré de Reichert & al., 2015, p.52

L'enveloppe du pavillon fait office de structure porteuse et de peau « météosensible », réagissant donc aux conditions extérieures. Les feuilles de contreplaqué minces en forme de cônes ont été calculées et testées afin de répondre aux stimuli d'un environnement extérieur. Les 28 composants de façades sont géométriquement uniques et ont été fabriqués et mis en place au moyen de robots à sept axes. (figure 65) (Correa, Krieg, Christian, Menges, Reichert & Rinderspacher, 2013)

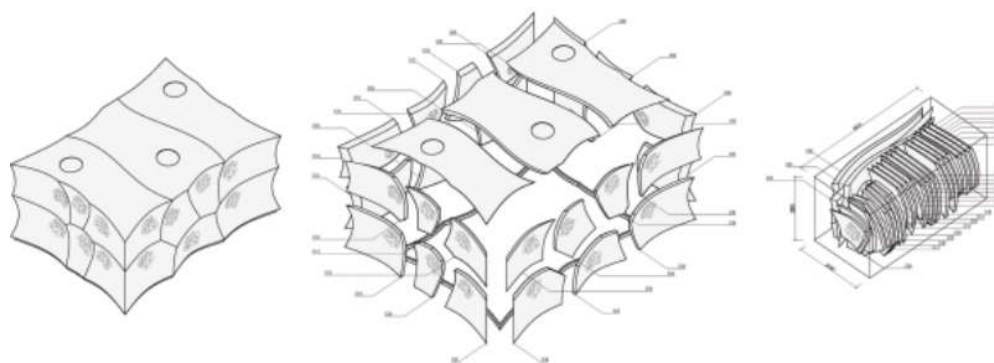


Figure 65 : HygroSkin – Composants tiré de Menges, Krieg & Reichert, 2013

Les ouvertures des cônes répondent à un changement d'humidité relative, à l'image du cône de conifère, allant de 30 à 90%, correspondant respectivement à un temps sec et un temps pluvieux dans un climat modéré. Ainsi, le pavillon ajuste de manière constante le degré des ouvertures prévues et à fortiori la porosité de la façade (figure 64). Cette dernière module donc la transmission de la lumière, la perméabilité visuelle, la ventilation et la température. Cet échange permet de créer des environnements intérieurs différents en fonction des besoins voulus par les usagers (Correa & al., 2013).

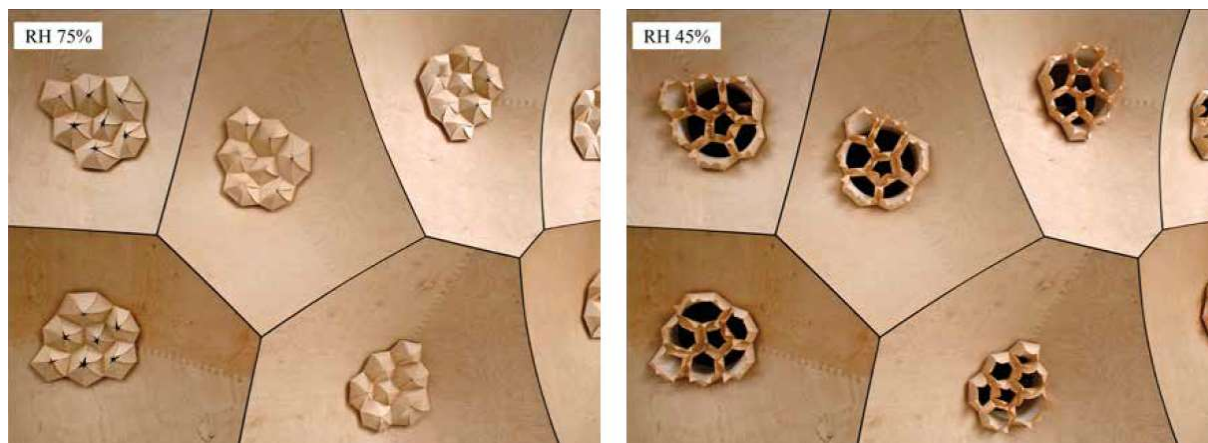


Figure 66 : HygroSkin - Cavités fermées (gauche) - Cavités ouvertes (droite) tiré de Krieg & al., 2014, p.62

La réversibilité et la fiabilité des mouvements d'ouverture et de fermeture ont été longuement testées en laboratoire, dans des conditions contrôlées (figure 67), mais également en extérieur. Le problème réside néanmoins dans l'échelle du projet. En effet, tel que présenté dans le plan et la coupe de la figure 68, le projet est de taille très réduite (difficilement habitable). La viabilité du projet lors de conceptions de plus grande ampleur et dont la complexité des parois dépasse la simple structure en bois (isolants, lames d'airs,...) est remise en cause. D'après Achim Menges et son équipe, des extensions à d'autres matériaux et à d'autres types de surfaces ou de type de toitures sont en cours d'études (Reichert & al., 2015).

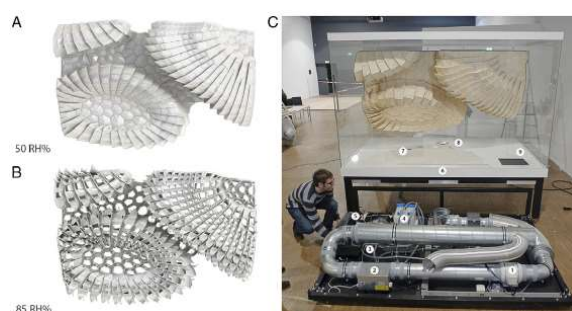


Figure 67 : HygroSkin - Travail paramétrique (gauche) - Tests en conditions contrôlées (droite) tiré de Reichert & al., 2015, p.66

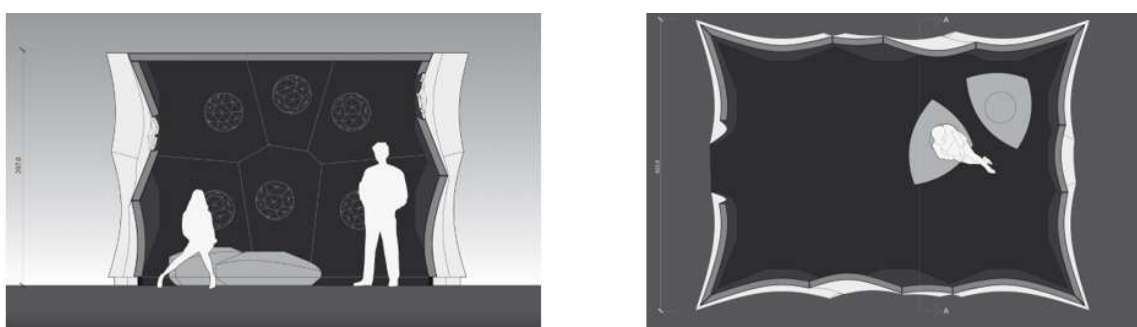


Figure 68 : HygroSkin - Coupe (gauche) - Plan (droite) (Menges & al., 2013)

Divers points positifs ont été relevés concernant les enjeux environnementaux (Reichert & al., 2015) :

- Aucune énergie n'est consommée par des capteurs ou autres moteurs afin de contrôler les ouvertures et fermetures des cavités
- Les besoins internes en chauffage, ventilation et éclairage naturel sont quant à eux autorégulés
- L'autorégulation est fonction de l'environnement extérieur et de son humidité relative
- Le matériau utilisé est le bois contreplaqué

VII. Synthèse des cas d'étude

Résultats

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Nom	Council House 2 (CH2)	Water Cube	Esplanade Theater	Biofaçade PBR	One Ocean Pavillon	HygroSkin
Architecte(s)	- Mick Pearce - DesingInc	- PTW Arch. - Chriss Boss - Arup - CCDL	- DP Architects - Michael Wilford & Partners - Atelier One	- X-TU Architects - GEPEA Nantes	- SOMA Lima	- Achim Menges - Oliver David Krieg - Steffen Reichert
Inauguration	2006	2007	2002	2013	2012	2013
Localisation	Melbourne, Australie	Pékin, Chine	Singapour, Singapour	Champs-sur-Marne, France	Yeosu-si, Jeollanam-do, Corée du Sud	Orléans-la-Source, France
Climat local	Subtropical océanique : Été chaud et sec – hivers doux et humide	Continental mousson : Été chaud humide – hiver froid et sec	Équatorial : Chaud et humide – Pluvieux toute l'année	Climat océanique « dégradé » : été chaud et sec – hiver doux et humide	Océanique : été doux avec un temps variable et hiver frais et humide	Climat océanique « dégradé » : été chaud et sec – hiver doux et humide
Fonction	Bureaux	Centre aquatique	Théâtre	Panneaux Façade (Bâtiment CSTB)	Expositions	Pavillon d'exposition
Superficie	12,536m ²	65000-80000m ²	75190m ²	200m ² de façade	6900m ²	17m ²
Approche biomimétique	Design to biology	Design to biology	Design to biology	Biology to design	Design to Biology	Biology to Design
Inspiration de la façade	Arbre	Bulle d'eau	Fruit de Durian	Micro algues	Oiseau de Paradis	Cône du conifère
Niveau de biomimétisme	Organisme Comportement	Organisme	Organisme Comportement	Organisme, Comportement	Organisme, comportement	Comportement
Objectif	- Lier le bâtiment avec son environnement - Durable - Efficacité énergétique - Utilisation des ressources naturelles	- Efficacité énergétique - Isolation (effet de serre) - Optimiser lumière naturelle	- Culturel - Optimiser vues et lumière naturelle - Protection solaires - Efficacité énergétique	- Enveloppe active - Échanges thermiques entre le bâtiment et la biofaçade - Viabilité de l'industrialisation des panneaux de façades - Tests en conditions réelles	- Chorégraphie en façade - Optimiser la lumière naturelle et les vues - Protection solaires - Optimiser la ventilation naturelle	- Recherches biomimétiques sérieuses - Travail paramétrique - Assemblage robotisé - Travail de matériau répondant aux stimuli sans moteurs
Matériaux de façade	Recyclable - Bois - Béton - Acier	Recyclable - ETFE (ethyl tetrafluoroethylene) - Acier	Recyclable - Aluminium - Acier - Verre isolant	Recyclable - Verre - Culture de micro algues (fine lame d'eau + micro algues)	Recyclable - Fibre de verre - Verre	Recyclable - Bois contreplaqué
Performances énergétiques dû à la façade	- Air filtré 100% - Éclairage naturel sauvé à 65% - Ventilation sauvée à 60%	- Besoins d'énergie réduit de 30% - Éclairage naturel sauvé à 55% - Couverture en ETFE = Couverture en panneaux photo	- Besoins d'énergie réduit de 30% - Éclairage naturel sauvé à 55% - Diminution des besoins de ventilation	- Double peau maintenue en moyenne à 25°C - Ventilation naturelle assistée contrôlée - Diminutions de la consommation d'énergie de 50% (Base FR : RT 2012)	- Panneaux photovoltaïques couvrent 66% des besoins du bâtiment - Diminution des besoins de ventilation - Béton à forte inertie thermique	- Aucune énergie consommée par des capteurs/moteurs - Autorégulation des besoins internes en chauffage, ventilation et éclairage naturel - Autorégulation fonction de l'humidité relative
Façade Adaptative/Non adaptative	Non adaptative	Non adaptative	Adaptative	Adaptative	Adaptative	Adaptative

Tableau 8 : Tableau synthétique des six cas étudiés

L'analyse de ces cas nous amène à nous interroger sur les bénéfices à tirer du travail des façades dans le cadre du biomimétisme. Il est donc question de proposer des critères provenant de l'analyse performantielle des façades biomimétiques présentées ci-dessus. Ces derniers sont comparés aux caractéristiques de la peau humaine suivant le tableau 1 retrouvé dans l'état de l'art section 2.7, et seront thématiques reprises dans l'outil d'aide à la décision envisagé (figure 32). Les différents thèmes abordés sont les suivants :

a. Matériaux biosourcés : Cycle de vie, énergie grise consommée

La peau est un élément naturel et biologique.

b. Protection/couverture : Pourcentage d'ouverture, protection contre la chaleur (rayons solaires)

La peau permet de protéger les organes intérieurs et a un rôle de protection mécanique

c. Performance/énergie sauvée : Pourcentage d'énergie sauvée

La peau récolte de l'énergie

d. Respiration/perméabilité : Taux d'air renouvelé, qualité de l'air à l'intérieur

La peau, dans un sens, respire et transpire.

e. Régulation de la chaleur/isolation : Performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur

La peau a un rôle de thermorégulation permettant d'avoir un équilibre thermique à l'intérieur du corps

f. Luminosité/confort visuel : Pourcentage de lumière artificielle sauvée, Taux d'ouverture

Ce critère s'écarte quelque peu de l'analyse pure de la peau, mais son importance est vitale. En effet, la lumière naturelle est primordiale pour l'être humain.

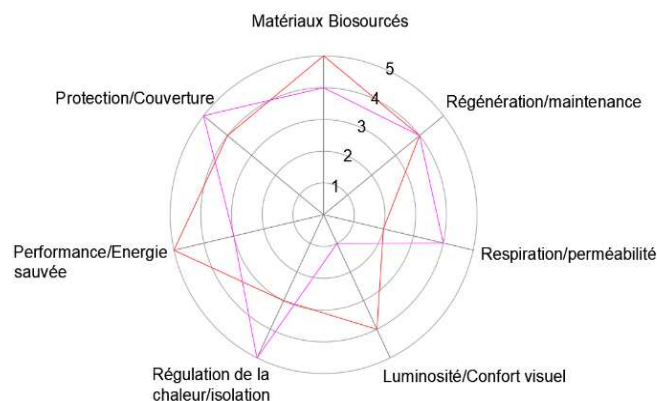
g. Régénération/maintenance : Facilité de maintenance du bâtiment, coût de la maintenance

La peau s'auto-répare, se cicatrise.

La correspondance entre les cas et les critères établis sont repris de manière synthétique dans le tableau ci-dessous.

	Matériaux	Protection	Isolation	Performance	Respiration	Luminosité	Maintenance
CH2							
WaterCube							
Esplanade Theater							
Biofaçade PBR							
One Ocean Pavillon							
Hygroskin							

Tableau 9 : Synthèse Cas - Critères



4.2. Résultats des entretiens

Dans cette section, nous nous intéresserons aux résultats des entretiens qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail afin d'aider à la mise en place de l'outil d'aide à la décision recherché. Pour rappel, les critères proviennent d'une analyse de cas d'étude corrélés aux standards et normes de la section état de l'art « Label et normes ». Les entretiens ont donc pour but de montrer la pertinence ou non de ces critères et de trouver un moyen de pouvoir les quantifier. La grille d'entretien, retrouvée en **annexe n°3**, permet d'introduire le sujet global du travail de fin d'étude, le biomimétisme, et l'analogie voulue entre la peau et la façade. Il a ensuite été question du cœur même du mémoire à savoir l'établissement d'un outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques, au moyen d'une approche multicritère et d'une représentation en forme de radar.

La première question portait simplement sur l'autorisation des personnes interrogées d'apparaître dans le travail. Ils ont tous accepté. Notons que la liste et le profil des personnes interviewées se trouvent à l'**annexe n°4**. De plus, les réponses complètes sont à retrouver à l'**annexe n°5**. L'**annexe n°6** concerne la question numéro 2 et 3, et montre la liste des mots retenus et le comptage de ces derniers.

I. Résultats Question 2

La deuxième question portait sur un avis personnel des personnes interrogées. Il leur a été demandé de définir avec leurs propres mots, sans préparation préalable, le biomimétisme en architecture.

Afin d'analyser cette question, un recensement des différents mots clés des définitions données par les experts sur le sujet a été réalisé. La représentation utilisée est un nuage de mots permettant de mettre en valeur de façon claire les mots avec le plus de récurrences (figure 70). Ainsi, les mots clés les plus fréquemment utilisés lors des définitions ressortent au premier regard. La lecture approfondie du nuage par un lecteur intéressé permet également de montrer l'entièreté des résultats. Notons que les mots retrouvés ici sont ressortis de définitions retrouvées dans l'**annexe n°5**. Ces différents mots ont été généralisés (par exemple : inspirer, s'inspire, ou inspiration ont été regroupé en un seul et unique mot : inspiration).



Figure 69 : Nuage de mots - Question 1 : définition du biomimétisme

Le mot « Nature » est celui qui est apparu la plupart du temps dans les définitions des personnes interrogées. En effet, 15 personnes sur 22 l'ont utilisé pour définir le mot « biomimétisme » dans le cadre de l'architecture.

Ensuite, nous retrouvons, sur le même pied d'égalité, les mots **inspiration** (de la nature) et naturellement le mot **architecture** répertoriés 7 fois sur 22.

En troisième position vient le mot **imitation** que le biomimétisme prônerait lors de conceptions architecturales biomimétiques. Cinq personnes ont utilisé ce mot dans leur définition en faisant référence à une imitation de la nature ou d'un être vivant.

Des personnes ont trouvé important de mettre en évidence les mots **observation, intégration et évolution** lorsque nous parlons de biomimétisme en architecture. Ces derniers ont été cités 3 fois chacun. Le mot évolution est apparu lorsque les personnes faisaient référence au fait que la nature avait évolué afin de se perfectionner, et que d'intégrer ces techniques optimisées par essais-erreurs est important dans le cadre de conceptions biomimétiques.

De plus, notons la présence de certains mots moins récurrents dont il sera question dans la section Discussion. Ces derniers sont : **bénéfice, optimisation, perfectionnement et résoudre**. Ces derniers vont tous dans le sens ou l'imitation de la nature, qui se serait perfectionnée, amènerait des avantages, des bénéfices non négligeables, permettant de résoudre des problèmes que l'Homme aurait face à lui.

II. Résultats question 3

Pour rappel, la 3^{ème} question de la grille d'entretien portait sur l'analogie peau-façade. Il a été demandé aux personnes interrogées d'expliquer, via des mots clés, ce dont il fallait tenir compte lors de la conception de façades biomimétiques tout en faisant une analogie avec la peau de l'être vivant.

La manière de procéder est équivalente à celle expliquée ci-dessus. Il s'agit de réaliser un comptage des différents mots employés par les interlocuteurs et de montrer les récurrences au moyen d'un nuage de mots. Ce dernier se retrouve en figure 71 ci-dessous.



Figure 70 : Nuage de mots - Question 2 : Analogie Peau-Façade

Lors de la question « de quoi faut-il tenir compte lors de la conception de façades biomimétiques, lorsque l'on fait une analogie entre la peau et la façade », les interviewés ont majoritairement répondu **Protection**, et ce, à 15 reprises.

Ensuite, quatre autres mots clés sont ressortis le même nombre de fois. En effet une personne sur cinq a fait référence aux mots **Isolation**, **Respiration**, **Hygrothermie** et **Régulation**.

Trois personnes interviewées ont également considéré qu'il fallait faire attention à l'**étanchéité**, l'**apparence**, l'**interface intérieur-extérieur** et la **transmission de vapeur** lorsque nous concevons une façade en analogie avec la peau du vivant.

Notons, dans ce nuage de mots, la présence de certains mots dont l'occurrence est plus faible (présents dans une seule définition). En effet, certains considéraient que la façade se doit d'être **active** et **dynamique**. Elle permet d'avoir une « interaction entre l'intérieur et l'extérieur dans le but d'optimiser le confort des habitants ». De plus, l'analogie à la peau du vivant a mené au mot **cicatrisation**, dans le sens où la peau **s'autorépare**. Enfin, notons également l'importance de l'**esthétique**, du **rôle** dans le paysage et d'**identification**, que l'analogie peau-façade a éveillé chez trois personnes distinctes. Ce résultat sera également discuté dans le chapitre suivant « Discussion des résultats ».

III. Résultats question 4

Cette question porte sur la prise de connaissance de chacun des critères établis. Les interviewés ont ainsi l'occasion de revenir sur chacun d'entre eux afin de les critiquer, de les améliorer ou de les accepter tels quel. Les réponses, critère par critère, sont détaillées ci-dessous. Pour rappel, les critères établis permettent de mettre en place un outil d'aide à la décision à la conception de façades biomimétiques.

i. Critère 1 : **Matériaux biosourcés : Cycle de vie, énergie grise consommée**

Ce critère a été très vite accepté, en effet, 100% des sondés ont été d'accord de l'importance que ce dernier pouvait avoir dans la conception de façades biomimétiques. De plus, la description était suffisante pour 17 personnes sondées, et 8 personnes insistent sur l'importance que revêt l'analyse du cycle de vie lors de la pondération du critère.

Une personne experte dans le domaine, monsieur Breels (pour rappel, son profil est repris en **annexe n°4**), a cependant nuancé la définition proposée. « *Le point important n'est pas nécessairement le cycle de vie, ce dernier veut tout et rien dire. Et l'énergie consommée ce n'est qu'un paramètre parmi d'autres. Il faut pouvoir inscrire le matériau dans un contexte de production-origine comme la manière dont il est cultivé par exemple. Il faut pouvoir nuancer les matériaux qui ne sont pas « biosourcés ». Il existe des matériaux avec un moins gros impact sur l'environnement et l'homme qui ne sont pas biosourcés par rapport à d'autres qui le seraient. Dans ce critère, il serait intéressant de prendre l'approche que nous utilisons: nous regardons plein d'aspects tels que « impact, esthétique etc... » afin d'éliminer un certains nombres de matériaux. C'est ainsi qu'il ne nous en reste que 5 par exemple et après on les analyse afin de prendre celui qui répond le mieux aux exigences du projet. »*

M. Poskin émet un avis plus tranché encore en considérant ce critère comme « indispensable » et prioritaire sur les autres. Il considère que les matériaux permettent d'étanchéifier les parois et de transmettre la vapeur d'eau. De plus, ces derniers peuvent réguler la chaleur et améliorer les performances du bâtiment. Ils servent également à protéger et à couvrir. C'est ainsi qu'il regroupe l'ensemble des autres critères comme des sous-critères aux « matériaux biosourcés ».

ii. Critère 2 : **Protection/couverture : Pourcentage d'ouverture, protection contre la chaleur (rayons solaires)**

Ce critère a amené plus de questions et de réactions que le premier. En effet, 8 personnes ont préféré l'associer au critère 5 « régulation de la chaleur/isolation : Performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur », trouvant difficile de pondérer ces critères séparément.

Deux personnes ont cependant proposé de le lier au critère 6 « luminosité/confort visuel : pourcentage de lumière artificielle sauvée, Taux d'ouverture », car, d'après Madame Reiter, « *la protection aux rayons solaires est directement liée au taux d'ouverture, donc je ne vois pas comment l'un irait sans l'autre* ». Ce dernier peut rejoindre un autre avis évoqué proposant de corréliser le facteur d'ombrage reprenant le pourcentage de surface vitrée divisé par le m² de surface habitable.

Plusieurs avis se rejoignent quant au changement de définition de ce deuxième critère. En effet, cette dernière a été changée par 5 personnes préférant parler de **protection mécanique**, contre les intempéries par exemple ou les intrusions diverses.

iii. Critère 3 : **Performance/énergie sauvée : Pourcentage d'énergie sauvée**

Après la lecture des critères, le critère 3 a souvent été lié au critère 5 « régulation de la chaleur/isolation: performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur » par 14 personnes interviewées. Douze d'entre elles ont directement fait référence aux exigences PEB en vigueur dans nos régions.

Six personnes ont quant à elles voulu aller plus loin. En effet, ces dernières ont proposé de ne pas se limiter à « l'énergie sauvée », mais plutôt parler « d'énergie produite », notamment le gain d'énergie solaire, ou d'énergie primaire renouvelable. Problématique importante à l'heure actuelle.

iv. Critère 4 : Respiration/perméabilité : Taux d'air renouvelé, qualité de l'air à l'intérieur

Quatorze personnes ont bien insisté sur l'importance de ce critère. La définition leur suffisait, faisant référence à un confort intérieur plutôt qu'à une performance énergétique. En effet, une personne a bien insisté sur les règlements sanitaires en vigueur lorsque l'on parle de taux d'air renouvelé dans les pièces humides par exemple.

Cinq individus ont nuancé le propos et ont utilisé la notion de « perspiration », en analogie avec la perspiration biologique. C'est un phénomène physiologique qui concerne les échanges dus à la respiration d'un être vivant. Les parois perspirantes sont les parois de l'enveloppe permettant une migration optimale de la vapeur d'eau au travers de l'élément, mais gardant également une étanchéité à l'air.

Il a également été noté dans quatre interviews que l'hygrothermie était importante

v. Critère 5 : Régulation de la chaleur/isolation : Performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur »

Comme déjà annoncé précédemment, quatorze personnes l'ont associé au critère 3 performance/énergie sauvée : Pourcentage d'énergie sauvée et huit au critère 2 protection/couverture : Pourcentage d'ouverture, protection contre la chaleur (rayons solaires).

Une personne a proposé de regarder la performance en termes de ventilation, plutôt que de l'isolation qui serait reliée au critère 3.

Notons qu'il a été question, durant une interview, d'insister sur l'inertie importante du matériau, et donc sa capacité à capter et rejeter de la chaleur

En règle générale, ce critère n'a pas été traité, mais son importance a été soulevée, mais difficilement dissociable des critères 2 ou 3 suivant les avis. C'est pourquoi ces personnes ont simplement traité le critère 2 ou le critère 3, y intégrant directement le critère 5.

vi. Critère 6 : Luminosité/confort visuel : Pourcentage de lumière artificielle sauvée, taux d'ouverture.

La plupart des personnes interrogées s'accordaient sur le fait de parler surtout du confort des utilisateurs du bâtiment et ce 13 fois sur 22. Comme expliqué au critère 2, deux personnes ont lié ce critère-ci au deuxième, protection/couverture, éprouvant des difficultés à les dissocier.

Le facteur UDI est un facteur récurrent des discussions que j'ai eues avec mes interlocuteurs, dix personnes en ont fait allusion.

Cependant, une personne a trouvé important de citer que l'essentiel n'était pas de sauver la lumière artificielle, mais d'optimiser un maximum la lumière naturelle. *In fine*, une partie de la consommation de lumière artificielle serait ainsi diminuée.

vii. Critère 7 : Régénération/maintenance : Facilité de maintenance du bâtiment, coût de la maintenance.

Peu de commentaires ont été réalisés sur ce dernier critère, même si les personnes interviewées ont tout de même relevé son importance. Six personnes ont insisté sur le coût de la maintenance.

Notons que quatre personnes ont nuancé le propos en proposant de parler de pérennité du matériau, liant ainsi ce dernier critère au critère numéro un. Une personne a même insisté sur le fait que le coût pourrait s'avérer bas de base, mais que si le matériau n'était pas pérenne dans le temps et se devait d'être remplacé souvent, le coût en serait logiquement impacté.

viii. Voyez-vous d'autres critères, ou sous critères à ceux précités ?

Cette question suivait la lecture et la critique des différents critères.

La majeure partie du temps, aucun critère supplémentaire n'a été cité, par contre durant 7 entretiens, il a été question d'intégrer un nouveau critère non traité et pourtant essentiel à l'heure actuelle : l'acoustique. Les personnes sondées comprenaient cependant la difficulté de trouver une analogie avec la peau du vivant.

Concernant la maintenance, il a aussi été question, comme Monsieur Poskin le précisait, de tenir compte du coût de la construction et du coût de la déconstruction. Monsieur Breels insiste sur le fait de tenir également compte de l'évolutivité du projet, de sa reconversion et de sa réversibilité.

De plus, comme l'ont spécifié Monsieur Teller et Madame Marique, experts en urbanisme, il faut également prêter une attention particulière à l'intégration du projet biomimétique dans un projet urbain. En effet, Monsieur Teller a pris l'image de l'écosystème, et a spécifié que le bâtiment ne vit pas seul, mais dans un environnement construit et une interaction se crée donc entre le bâtiment et le milieu dans lequel il « vit ». De plus, il a spécifié que l'esthétique jouait également un rôle (rôle de l'appartenance comme la peau).

IV. Résultats Question 5.

Pour rappel, la question 5 porte sur la quantification, sur une échelle de 1 à 5, des différents critères préétablis. Dans cette section, il sera question de présenter les différentes réponses ressorties des entretiens. Il est cependant à noter, comme souligné lors de l'établissement des réponses de la question précédente, que certains critères ont été rassemblés. Ce chapitre traitera les critères séparément. Il sera fait état des réponses sous forme de tableaux pour ceux qui se seraient essayé à l'exercice de quantification. Notons que peu, sur les 22 personnes interviewées, ont tenté de quantifier les critères, de deux à cinq personnes suivant les critères, comme il en sera question dans les tableaux ci-dessous. De plus, notons que 17 personnes ont voulu répondre à la question de manière générale

Les réponses des autres intervenants, ayant répondu à la question, mais n'ayant pas fait l'exercice de quantification, seront expliquées après les encadrés et sont à retrouver, complètes, en **annexe n°5**. Ces réponses proposent des pistes de quantification ou des renvois à des normes et standards comme il en sera fait état ci-dessous

Les tableaux permettent de prendre connaissance des réponses, telles quelles, des personnes interviewées qui ont proposé une quantification selon l'échelle 1 à 5 proposée. Chaque colonne correspond à un intervenant. La deuxième ligne correspond à la définition du critère qu'ils ont proposé ou à son unité permettant de le quantifier (pourcentage, chiffres, ou données qualitatives). Ci-dessous, nous retrouverons les critères un à un avec leurs quantifications proposées et les remarques éventuelles.

Critère 1 : Matériaux biosourcés : Cycle de vie, énergie grise consommée

Personnes interviewées	Sigrid Reiter	Andromaque Simon	Anne-Françoise Marique	Shady Attia	Céline Fizinger
Définition du critère	Naturalité du matériau	Recyclabilité du matériau	Distinction des matériaux et mise en œuvre	Impact sur l'environnement	Type de matériaux
1/5 : Mauvais	0-20%	Récupérable (si pas écologique)	Matériau artificiel, fort consommateur et collé	Pas régénératif	Ciment
2/5 : Ok	20-40%	Écologique (fibre de bois) / local		Biosourcés avec un grand impact négatif sur l'environnement	Façade « traditionnelle », recyclable ou non
3/5 : Bon	40-60%	Récupérable et écologique	Matériau naturel ou mise en œuvre aisée	Biosourcés avec un impact « normal » sur l'environnement	Bois (Mauvaise origine)
4/5 : Très bon	60-80%	Downcycling		Biosourcés avec un faible impact sur l'environnement	Bois (Bonne origine)
5/5 : Excellent	80-100%	Upcycling	Ensemble de matériau naturel et attention au principe de réversibilité	Régénératif	Matériau provenant du site (argile, paille)

Tableau 10 : Propositions de quantification - Critère 1

Dans ce tableau 10, nous retrouvons cinq quantifications distinctes. Madame Marique propose de ne pas quantifier sur une échelle de 5, mais propose des réponses sur une échelle de 1 à 3 pour des questions d'aisance. Dans ce tableau, nous retrouvons des termes qu'il semble important de définir.

Le terme **downcycling**, désigne le fait de recycler un matériau ou un déchet en une matière de qualité moindre. Le terme **upcycling** désigne quant à lui le recyclage d'un matériau ou d'un déchet en une matière d'encore meilleure qualité. Ces définitions ont été données par madame Simon. Un matériau **biosourcé** est un matériau d'origine animale ou végétale. À titre d'exemple, des matériaux de ce type utilisés dans le bâtiment seraient du bois, de la paille, du liège, Par **régénératif**, la personne interviewée entendait « la faculté d'une entité vivante à se reconstituer après la destruction d'une partie de cette entité ».

Plusieurs personnes sondées ont préféré, comme annoncé, renvoyer vers des standards et autres labels qu'ils utilisent dans leur vie professionnelle. À ce propos, nous pouvons noter la base de données suisse « Ecoinvent » rassemblant plus d'un millier de matériaux proposée par Monsieur Possoz. Cet outil d'aide à la décision permet à ces utilisateurs de choisir de manière réfléchie les matériaux avec le plus faible impact environnemental. Notons ensuite la référence au Batex, à BREEAM, HQE, LEED ou aux labels comme NIBE, l'écolabel européen, Blue Engel et Naturplus, tous décrits dans l'état de l'art 2.8 ou encore certains critères de l'analyse du cycle de vie, ACV. Les personnes y ayant fait référence sont à retrouver en **annexe n°5**.

Enfin, d'autres ont préféré donner une explication « globale », voire des pistes de solutions de ce qui était attendu dans le critère, car ils trouvaient la quantification trop subjective et trop complexe. Par exemple, il est difficile pour Madame Huberty de comparer l'aluminium au bois. Elle mettrait en avant trois sous-critères dont il faudrait tenir compte, à savoir le fait de recycler ou non, l'énergie de fabrication et l'énergie durant la vie du bâtiment. Madame Somma prône quant à elle le local et le cycle court des matériaux à utiliser sur une façade. Toute la difficulté de quantifier ce critère a également été soulignée. En effet, Madame Bruyère met également en avant que le recyclage est important, mais que ce n'est pas le seul paramètre. L'endroit d'extraction et de fabrication joue également un rôle. Plus il est éloigné, plus il aura un impact environnemental grand.

i. **Critère 2 : Protection/couverture : Pourcentage d'ouverture, protection contre la chaleur (rayons solaires)**

Ce tableau reprend les propositions de quatre personnes interviewées (tableau 11).

Personnes interviewées	Andromaque Simon	Didier Mans	Céline Fizinger	Shady Attia
Définition du critère	Vitrage et protection solaire	Protection solaire	Type de vitrage	Conformité
1/5 : Mauvais	Proportion vitré / transparent (40-60)	Absence de protection	Simple vitrage (Nord)	Pas conforme
2/5 : Ok	Stores fixes	Protection basique, non amovible	Double vitrage pas bien orienté	Aux normes (feu, acoustique, efficacité énergétique)
3/5 : Bon	Stores mobiles manuellement	Protection basique amovible	Double vitrage bien orienté	
4/5 : Très bon	Stores mobiles automatiquement	Protection fixe bien calculée + amovible	Triple vitrage	
5/5 : Excellent	Stores intelligents	Adaptable + 0 surchauffe et éblouissement	Serre bioclimatique	Approche performentielle dynamique (on va au-delà de la règle)

Tableau 11 : Propositions de quantification - Critère 2

Dans ce tableau, nous retrouvons une proposition de quantification reprenant les types de protections solaires que l'on pourrait utiliser, en spécifiant que les stores intelligents, automatisés via des capteurs, sont considérés comme « excellents » dans la quantification du critère. Une réponse équivalente a été donnée dans la colonne suivante, reprenant l'adaptabilité de la protection solaire. Ensuite, il a été question du type de vitrage permettant de limiter la chaleur entrante dans la pièce. La dernière colonne fait état d'une conformité ou non aux normes. Le grade « excellent » serait attribué à une approche allant au-delà des normes et garantissant un confort optimal. Ces réponses et les personnes qui les ont données sont à retrouver en **annexe n°5**.

Les autres réponses n'ont pas donné lieu à une quelconque quantification. En effet, monsieur De Wispelaere, propose de quantifier ce type de performance au moyen d'un Post Occupancy Evaluation (POE). Ce type d'évaluation permet de rendre compte de l'avis des occupants en termes de confort. Monsieur de Herde était du même avis, liant la quantification du critère au confort des individus qui cherchent à se protéger du climat (chaud, froid, pluie) et des diverses intrusions. Les autres réponses sont à retrouver en **annexe n°4**.

Dans la section précédente, nous notons que 8 individus avaient associé ce critère au critère 5 Isolation, ne trouvant pas d'intérêt à les séparer. C'est ainsi qu'ils se sont référés à quelque chose de connu, à savoir la PEB. Cette dernière est décrite dans l'état de l'art. Madame Bruyère, comme Madame Brandt, Madame Reiter et Monsieur De Herde, a également insisté sur le fait que la quantification dépendait de la fonction du bâtiment (logement ou tertiaire).

ii. **Critère 3 : Performance/énergie sauvée : Pourcentage d'énergie sauvée**

Personnes interviewées	Sigrid Reiter	Jacqueline Somma	Shady Attia	Jean-Philippe Possoz	Céline Fizinger
Définition du critère	Performances	Type de chauffage	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie (PEB)	Type d'enveloppe
1/5 : Mauvais	Niveau PEB classique	Production électrique	Basse énergie	60 kWh	Toile tendue sans régulation
2/5 : Ok	Très basse énergie	Poêle à énergie fossile	Consommation de 15 kWh		Construction placo-plâtre
3/5 : Bon	Passif	Poêle à bois	Passif		
4/5 : Très bon	Zéro énergie	Poêle à inertie	Neutre		Toiture/façade verte
5/5 : Excellent	Énergie positive	Passif	Énergie positive	15 kWh	Mur à forte inertie

Tableau 12 : Propositions de quantification - Critère 3

Comme annoncé, ce critère a été la plupart du temps associé au critère 5 *Régulation de la chaleur/isolation : Performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur* ».

Dans le tableau 12, nous retrouvons une quantification sur base des normes PEB, proposée par Madame Reiter et rejointe de façon quasi équivalente par Monsieur Attia. Ensuite, madame Somma proposait de . Dans la 3^{ème} colonne, les différents niveaux sont caractérisés par la consommation énergétique. Le passif repris fait état de la norme PEB. Dans la 4^{ème} colonne, Monsieur Possoz proposait deux extrêmes de consommation d'énergie en kWh en se référant également à la PEB. Pour Madame Fizinger, il s'agissait de quantifier le critère sur base du type d'enveloppe du bâtiment.

Une fois de plus, le confort des habitants a été une façon récurrente de quantifier le critère, mais qui n'est pas reprise dans le tableau, car il n'a pas été évalué sur échelle de 1 à 5. De plus, comme on peut le remarquer dans le tableau ci-dessus, les normes PEB belges ont souvent été la manière de quantifier la plus simple (12 personnes y ont fait référence). Les personnes ne se sentant pas capables de remplir le tableau ont proposé de regarder dans ces normes ou alors simplement de regarder le coefficient U de la façade, décrit dans l'état de l'art section 2.8. Il a également été proposé de mettre comme très bon le « BREEAM Excellent » par madame Marique pour le critère ou de se référer au Batex (Hélium 3).

Trois intervenants, monsieur De Herde, madame Reiter ou encore monsieur Attia, ont parlé d'un aspect « passif » en regardant surtout l'isolation, mais également d'un aspect « actif » qui produirait de l'énergie, à l'image de panneaux photovoltaïques qui captent l'énergie solaire. Dans le même sens, madame Bruyère proposait de regarder la production ou non d'énergie et le pourcentage de ce que la façade produirait par rapport aux besoins du bâtiment.

Monsieur Breels spécifiait qu'il y avait deux choses dont il fallait tenir compte lorsqu'il était question d'énergie et de façades. Il faut évidemment protéger des déperditions thermiques en isolant correctement le bâtiment, mais il faut aussi protéger de la surchauffe.

Il a une fois de plus été bien spécifié que cette quantification de critères devait être inhérente à l'affectation du bâtiment, à sa fonction et à son orientation, et ce, par les mêmes personnes qu'au critère précédent.

iii. **Critère 4 : Respiration/perméabilité : Taux d'air renouvelé, qualité de l'air à l'intérieur**

Personnes interviewées	Andromaque Simon	Jean-Philippe Possoz	Jacqueline Somma	Shady Attia
Définition du critère	Type d'ouvertures	PPM CO2 (particules par million)	Type de ventilation	Nombre de changement d'air par heure (CAH)
1/5 : Mauvais	Ouverture de fenêtre classique	15000	Renouvellement par système électrique (VMC double flux)	1
2/5 : Ok	Niveau faible et élevé d'ouverture		VMC simple flux – mécanique	3
3/5 : Bon	Ouverture « traversant »		VMC simple flux – naturelle	6
4/5 : Très bon	Ventilation verticale			10
5/5 : Excellent	Cheminée étage par étage dont l'ouverture est automatisée	500	Renouvellement autosuffisant pour la construction (terre)	15

Tableau 13 : Propositions de quantification - Critère 4

Nous retrouvons sur le tableau 13 ci-dessus quatre propositions différentes de quantifications. Madame Simon propose de parler de type d'ouvertures de fenêtres et madame Somma de type de ventilation. Il a également été question d'évaluer le critère en mesurant le nombre de PPM de CO2 présents à l'intérieur, seuls les deux extrêmes ont été donnés. Monsieur Attia a proposé d'évaluer le critère au moyen d'un nombre de changements d'air par heure.

Pour ce quatrième critère, le principe de « confort des usagers » a été prépondérant. En effet, en plus de regarder les normes sanitaires en vigueur, le confort des utilisateurs est à évaluer d'après 12 personnes (à retrouver en annexe n°4), notamment au moyen de POE proposée par Messieurs De Wispelaere et Mans). Une fois de plus, le confort n'a pu être évalué sur une échelle de 1 à 5 à cause de la subjectivité que peut amener ce dernier. Par les POE il est cependant possible de quantifier, via un pourcentage, le nombre de personnes satisfaites ou non.

Monsieur Ruellan (pour rappel, le profil des personnes interviewées se trouve en annexe n°4) soulève le fait que le taux d'air renouvelé, proposé dans la définition du critère, n'est pas une chose aisée à mesurer et à quantifier. De plus, la ventilation naturelle n'est pas une bonne solution d'après lui. Il ajoute qu'il faut également tenir compte de l'hygrothermie à l'intérieur et que les murs en terre étaient une bonne référence. Monsieur Breels insiste quant à lui sur l'importance de la qualité de l'air à l'intérieur qu'elle soit réglée de manière autonome ou par intervention humaine.

iv. **Critère 5 : Régulation de la chaleur/isolation : Performance des parois, taux d'isolation, capacité à capter/rejeter de la chaleur »**

Ce critère n'a jamais été évalué seul. Il est à regrouper avec les critères 2 et 3 retrouvés ci-dessus comme il en a été question dans la section précédente.

v. **Critère 6 : Luminosité/confort visuel : Pourcentage de lumière artificielle sauvée, Taux d'ouverture.**

Personnes interviewées	Didier Mans	Shady Attia
Définition du critère	Confort des usagers (bureaux)	SDA (Spatial Daylight Autonomy)
1/5 : Mauvais	Travail impossible	60%
2/5 : Ok	Lumière suffisante	70%
3/5 : Bon		80%
4/5 : Très bon	Système modulable (non commandé)	90%
5/5 : Excellent	Système modulable (commandé par les usagers)	100%

Tableau 14 : Propositions de quantification - Critère 6

Les propositions recensées dans le tableau 14 font état d'un confort des usagers en termes de possibilité de travail et en fonction d'un système modulable ou non. Il également été proposé d'utiliser la mesure « SDA », proposée par Monsieur Attia. Cette mesure, en pourcentage, fait état du rapport de temps que l'on peut être dans une pièce sans avoir besoin de lumières artificielles.

Notons que peu de personnes (2) se sont senties capables de quantifier sur une échelle graduée ce critère.

Madame Simon proposait de regarder le label Well qui est décrit dans l'état de l'art (section 2.8). Il a également été proposé de se référer au critère du BREEAM ou celui de l'HQE afin de voir la manière dont ils quantifient la qualité du confort visuel intérieur également décrit dans l'état de l'art

Madame Somma a insisté sur le fait de prendre tout d'abord les règles architecturales de base en matière de confort visuel (normes). Il a également souvent été question (10 personnes) du facteur UDI (présenté dans l'état de l'art section 2.8.) dans la quantification de ce critère.

Madame Bruyère a proposé de regarder le critère du BREEAM concernant le critère 6, considérant qu'il était suffisamment bien traité dans le label. Le confort des usagers a été repris également par Monsieur De Wispelaere (passer par un POE), mais a été nuancé par Monsieur De Herde qui trouvait compliqué de pouvoir trouver une solution confortable pour tous les usagers d'un bâtiment.

vi. **Critère 7 : Régénération/maintenance : Facilité de maintenance du bâtiment, coût**

Personnes interviewées	Andromaque Simon	Olivier De Wispelaere	Jacqueline Somma	Shady Attia
Définition du critère	Facilité de maintenance	Pérennité du matériau	Type de système	Provenance du matériau
1/5 : Mauvais	Nacelle	3 mois	Gadget Hi-Tech	> 500km (Produit étranger)
2/5 : Ok	Anticiper la durée de vie des matériaux			500 km
3/5 : Bon	Remplaçable aisément			300 km
4/5 : Très bon	Vitrage autonettoyant			200 km
5/5 : Excellent	Accessibilité par le bras	25 ans	Gadget Low-Tech	100 km et moins (Produit local)

de la *Tableau 15 : Propositions de quantification - Critère 7* **maintenance.**

Le tableau 15 présenté ci-dessus reprend les propositions de quatre personnes interviewées. Notons la présence d'un paramètre non étudié et faisant référence au critère 1 qui est la provenance du matériau, proposé par Monsieur Attia. Ensuite, madame Simon a proposé de quantifier selon une facilité de maintenance. Monsieur De Wispelaere a proposé deux extrêmes de quantifications concernant la pérennité du matériau utilisé, réduisant ainsi l'intervention que l'on aurait sur ce dernier. Il a été rejoint par Madame Fizinger dans la réflexion.

Outre la durabilité et la pérennité du matériau, le cout a été un facteur déterminant dans la quantification, mais n'est pas repris dans le tableau. En effet, comme annoncé dans la section précédente, qui présentait les réponses à la question 4, six personnes ont insisté sur l'aspect économique de la maintenance qui est un des facteurs principaux de nos jours, mais qui est inquantifiable tant les facteurs peuvent varier (type de projet, type de matériaux, localisation...).

Madame Reuter a préféré se référer à un label connu, HQE, qui traite un critère propre à la maintenance. Ce dernier est repris dans l'état de l'art section 2.8.

Rappelons que l'ensemble des réponses données est repris en annexe n°4.

V. Remarques générales

Plusieurs remarques générales sont ressorties des entretiens. Ces dernières portent principalement sur les critères et sur la manière de les quantifier.

Monsieur Hauglustaine propose de regarder la manière dont travaillent LEED et BREEAM. Il expliquait que ces derniers font également une évaluation d'une série de critères de manière totalement indépendante. Ensuite, une pondération de chaque critère traité est réalisée afin de quantifier finalement une performance globale. Concernant la pondération en elle-même et son échelle de 1 à 5, ce professeur a proposé de considérer que l'échelon « 3/5 » devait respecter les normes et que le « 5/5 » était atteint lorsque tout avait été mis en place pour le satisfaire (que l'on arrive à une limite technique et technologique). Il a été rejoint dans la réflexion par Madame Marique et Madame Brandt.

Dans un entretien réalisé avec Monsieur De Herde, il a été question du fait que lorsque l'on travaille une approche de ce type, il faut fixer un référentiel commun à tous les critères (le confort, le coût, la performance...). Il précise notamment que la difficulté réside dans le choix d'échelle afin de les pondérer, mais insiste sur le fait que le poids des critères doit être le même (en tout cas, dans le cadre de cet exercice). Concernant la quantification, il propose de mettre un minimum à l'échelon « 2/5 » et ainsi avoir au minimum tout au-dessus de 2, le premier palier de l'échelle est donc « éliminatoire ». De plus, il a rejoint le but du travail en précisant que l'objectif n'était pas de retrouver tous les critères à 5/5, sachant que certains pouvaient être contradictoires.

Monsieur Attia a quant à lui insisté sur le fait de se positionner sur le rôle de l'occupant lorsque l'on parle de conceptions de façades. Il a pris l'image de l'interaction des animaux avec l'extérieur. Il entendait par là que certains animaux s'adaptent aux conditions extérieures, tandis que d'autres préfèrent changer de milieu. Une question générale a été soulevée : « *est-ce que l'occupant doit interagir et s'adapter par lui-même ou alors le bâtiment est assez « intelligent » que pour le faire seul ?* ». Il a finalement été proposé de rajouter un critère général en fonction de l'adaptabilité de la façade, pouvant aller de l'autoadaptation à l'adaptation uniquement via l'interaction humaine avec le bâtiment (manuellement).

Monsieur Possoz a nuancé le propos lorsqu'il s'agit du confort des occupants en l'étayant d'un exemple. En effet, ce dernier travaille sur la rénovation d'un bâtiment scolaire : l'athénée Royale Charles Rogier, Liège 1. Cet établissement va subir une rénovation de sa façade. Après plusieurs études, les maîtres d'ouvrages ont décidé de placer des capteurs afin de contrôler automatiquement les adaptations de la façade tout en laissant un certain contrôle des usagers sur les ouvertures, les flux d'air entrant et autres, afin de leur laisser la possibilité d'intervenir sur leur environnement propre et ainsi ne pas « subir » les changements automatiques prévus par des algorithmes complexes.

Notons également que les deux collaborateurs d'Hélium 3, Monsieur Ballarati et Madame Daube, ont préféré se référer au Batex afin de répondre à la dernière question. Ils ont considéré que les critères présentés étaient tous repris dans l'annexe technique. Ils ont donc trouvé pertinent d'y faire référence au vu de leur travail régulier avec cette dernière. Ceci prouve, une fois de plus, que passer par des standards, des normes ou des annexes techniques est plus aisé pour compléter l'outil d'aide à la décision envisagé.

4.3. Synthèse des résultats

Dans cette section, il s'agira de proposer une synthèse des différents résultats présentés ci-dessus, concernant l'établissement des critères et de leurs quantifications.

Le tableau 16 reprend les différents critères ressortis des cas analysés et les divers labels et standards qui y sont associés. Insistons sur le fait que ces labels et autres ont été sujets à discussion lors des entretiens. Pour rappel, ces standards sont étudiés dans l'état de l'art en section 2.8.

Il s'agit dans ce tableau de mettre en valeur une possibilité de quantifier les critères préétablis au moyen de standards et certifications déjà réalisés et déjà reconnus. C'est ainsi qu'il a été question de réaliser un tableau comparatif permettant de voir quel critère pouvait être quantifié par un label. Par exemple, le critère « respiration : qualité de l'air/taux d'air renouvelé » est traité dans une des cibles de LEED, du BREEAM, de l'HQE et du Well standard, mais fait également partie de l'annexe technique du Batex. De plus, la PEB a également des exigences en terme de ventilation.

Les labels ont simplement été cités durant les entretiens, il a donc été décidé de pousser la réflexion et de rechercher, dans chacun des labels et standards, les thématiques déjà traitées faisant écho à celles établies dans ce travail.

	Matériaux	Protection	Isolation	Performance	Respiration	Luminosité	Maintenance
Labels matériaux (Type I)							
PEB							
LEED							
BREEAM							
HQE							
UDI							
Batex							
Well							

Tableau 16 : Synthèse : Critères - Standards

Ce tableau permet de proposer une solution, provenant des entretiens, à la quantification des critères permettant ainsi la mise en œuvre de l'outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques. Chaque critère serait ainsi pondéré au moyen d'un des labels qui lui correspond. Ceci permettrait d'avoir un avis objectif et une méthode de calcul déjà établie.

Chapitre 5 : Discussion des résultats

Dans ce chapitre, il sera fait état d'un retour sur les différents résultats obtenus, qu'il s'agisse du choix des cas d'étude et leurs analyses, mais également dans les diverses réponses obtenues lors des entretiens réalisés dans ce mémoire. Nous y retrouverons également des pistes de solutions quant aux problèmes rencontrés, comme dans la quantification des critères. Enfin, cette discussion permettra de reprendre une à une les questions de l'entretien afin faire ressortir les réponses qui ont attiré notre attention.

5.1. Discussion des cas d'études

Pour rappel, l'étude a porté sur l'analyse de six cas d'étude différents dans le but de proposer des critères inhérents à la conception de façades biomimétiques. Le choix des cas n'a pas été chose aisée. La première étape a été de définir des critères de choix qui auraient pu s'avérer restrictifs (section 3.3).

Afin de mener à bien ce travail, les critères qui ont permis de limiter le nombre de cas à étudier ont donc été établis dès le départ. C'est ainsi que plusieurs cas n'ont pas été retenus malgré leur intérêt. Rappelons que trois sont à retrouver en annexes n°2 : l'Eastgate Center, le modèle du mur respirant et les projets sur le Thermobimetal. Il paraissait important de limiter les choix et de n'en garder que les plus représentatifs à l'heure actuelle. La quantité d'information retrouvée a été le facteur déterminant. Il a également fallu éviter les redondances (reprendre plusieurs prototypes par exemple, ou des travaux trop proches).

Les informations retenues lors de l'analyse des cas sont critiquables. En effet, soulignons que ces projets n'ont pas été soumis à une étude approfondie de leurs performances. Le cœur du sujet n'est pas de soumettre ces bâtiments éloignés à une étude quantitative approfondie via des capteurs. Il s'agit bien de s'appuyer sur la documentation existante pour étudier l'acceptabilité de certains critères auprès de représentants de diverses expertises du milieu universitaire et architectural. Les informations sont donc sujettes à caution, car elles peuvent s'avérer imprécises ou manquantes d'objectivité selon la source. C'est pourquoi il est important de rester quelque peu prudent avec les différentes « vérités » qui ont été établies par ces sources, et qui ont été traitées dans les résultats, section 4.1.

Il faut également bien insister sur le fait que les projets réalisés de manière biomimétique sont encore rares à l'heure actuelle. Les premiers projets sont pour l'instant soit de grande envergure ou soit de simples prototypes. En effet, l'environnement concurrentiel en terme d'attractivité socio-économique pousse les agglomérations à se doter de bâtiments sortant de l'ordinaire pour se démarquer les uns des autres, le bâtiment revêt alors un caractère emblématique et doit servir de vitrine à la ville commanditaire. Le respect de l'environnement et la réponse au développement durable peuvent dans ce cas devenir secondaires. Parmi ceux-ci, citons évidemment le WaterCube, l'esplanade Theater et le One Ocean Pavillon. Insistons tout de même sur le fait que le travail de ces derniers en matière de développement durable est remarquable. Il est, de plus, important de noter que les projets analysés sont tous des projets « publics ». Il est entendu par là qu'aucune fonction de « logement », pourtant dominante dans le paysage urbain, n'a encore été répertoriée. Il serait intéressant de pouvoir compléter l'étude en y intégrant toutes les fonctions (horeca, logements,...).

La présence de l'Hygroskin (cas n°6) a longuement été discutée lors du choix des cas d'études. En effet, ce projet n'est pas de l'ordre de la « façade » comme nous l'entendons. Il n'est encore qu'au stade de prototype d'exposition et n'est pas encore assez développé pour être intégré à un bâtiment complet, contrairement par exemple au projet de Biofaçade, cas 4. Sa présence résulte cependant de l'importance que ce dernier a dans le monde du biomimétisme à l'heure actuelle. En effet, la prouesse technique derrière ce projet est telle qu'elle a été saluée par de nombreux scientifiques. La recherche biomimétique amenant au projet est également remarquable. Les quelques avantages relevés ne sont également pas négligeables et amènent à une réflexion toute autre du principe d'ouverture de la peau du bâtiment le laissant interagir seul aux conditions extérieures

Cette adaptation automatisée peut s'avérer critiquable également. En effet, il est important de signaler que le confort des usagers est à mettre en premier plan, comme il en a souvent été question dans les entretiens. Le fait de travailler avec des matériaux, comme le bois pour l'Hygroskin, ou des capteurs pour le One Ocean Pavillon qui automatisent les adaptations du bâtiment aux conditions extérieures peut ne pas être optimal pour répondre aux besoins de confort des usagers. En effet, le sentiment de confort peut varier fortement d'une personne à l'autre et créer un « confort absolu », géré par ordinateur, n'est pas forcément la solution adéquate. Il en a été discuté lors du 4^{em}e entretien réalisé avec M. Possoz, architecte de formation et professeur à l'université de Liège, lors du cas du bâtiment scolaire « Liège 1 ».

Notons toutefois que le premier cas analysé, le CH2 de Melbourne, est sans doute celui qui est le plus abouti à l'heure actuelle. En effet, reconnu comme respectueux de l'environnement en Australie, il est également souvent cité comme référence lorsque l'on parle du confort des usagers. Plusieurs études sérieuses ont été réalisées afin de répondre au mieux au bien-être des personnes travaillant dans le bâtiment. Un POE a également été réalisé. Pour rappel, ce dernier est un rapport présentant le confort des personnes qui travaillent dans le bâtiment après réponse à un questionnaire, mais également au moyen de mesures réalisées dans ledit bâtiment après son élaboration. Il est important d'utiliser fréquemment ce genre d'outil permettant de rendre compte finalement de la réelle performance du bâtiment et des réelles lacunes de ce dernier en terme de bien-être des usagers. En effet, la philosophie biomimétique prône avant tout autant le bien-être des occupants que le respect de l'environnement ; deux choses indissociables.

5.2. Discussion de l'interview

Dans ce chapitre il sera question de discuter des divers entretiens réalisés, du profil des personnes interrogées, de la manière dont ces derniers se sont déroulés, mais également de certaines réponses qui ont été relevées.

I. L'entretien

Les entretiens ont été, en majeure partie, réalisés en Belgique et surtout dans la région de Liège. Notons tout de même deux rendez-vous Skype en France ; trois, en personne, à Louvain-la-Neuve ainsi qu'un à Namur. C'est pourquoi il est important de souligner qu'il est concevable de critiquer les profils des personnes interviewées et peut-être leur vision « belgo-liégeoise » de l'architecture. En effet, 17 d'entre elles viennent de Liège et de son université et ont donc toutes une formation équivalente. Toutefois, même si la base est la même pour beaucoup, les backgrounds s'avèrent très variés comme vous pouvez le voir en annexes n°4 en prenant connaissance du profil plus détaillé des personnes interviewées.

Une fois de plus, le facteur temps et le facteur distance ont été des facteurs déterminants dans la recherche des profils. Comme il en a été question dans la section « méthodologie » de ce mémoire, sous-section « entretiens », les entretiens sont, chronophages, mais également à réaliser en face à face afin de garantir leur bon déroulement. Il a tout même été choisi d'avoir un nombre minimum de 20 personnes afin de garantir une représentativité des résultats. La phase d'entretien s'est terminée lorsque les réponses commençaient à se corréliser. En effet, très peu de personnes (2 à 5 par critères maximum) se sentaient capables de répondre à la question 5 et la quantification des critères et renvoyaient vers les normes. Le critère de saturation a donc permis de mettre fin aux interviews.

Lors des entretiens, comme il en a été fait état lors de l'étude pilote réalisée, il a souvent été demandé d'expliquer les raisons de cette interview auprès d'experts concepteurs. C'est ainsi qu'une présentation PowerPoint reprenant mon avancée du travail était prévue afin de recentrer le sujet. Ceci aurait pu s'avérer problématique, pouvant fausser les résultats, car influencés. Malgré cela, la diversité des réponses a permis finalement de réaliser l'objectif de l'entretien : avoir un avis global sur le travail en cours et sur la volonté de mise en place d'un outil d'aide à la décision pour la conception de façades biomimétiques (performantes au niveau énergétique).

Les entretiens ont toujours été réalisés sans préparation au préalable des personnes interviewées. Le sujet du biomimétisme avait également été expressément omis dans la demande d'interview afin de ne pas se voir confronté à un nombre supérieur de refus. En effet, le sujet étant encore que trop peu connu et encore moins maîtrisé, le risque de refus était grand. De plus, cela ne gênait pas le bon déroulement de l'enquête, sachant que le but premier était de se renseigner sur les performances de façades au niveau énergétique, s'écartant ainsi quelque peu du biomimétisme pur. L'objectif a été atteint.

II. La grille d'entretien

Notons maintenant qu'il serait intéressant d'analyser d'un peu plus près certaines réponses provenant des interviews. Les réponses relevées dans les paragraphes suivants correspondent, pour certaines, à des occurrences uniques, allant à contre-courant de l'analyse plus systématique des occurrences répétées réalisées en section 4.2 des résultats.

Si nous commençons par la question 2, il était noté la présence de 4 mots qui paraissaient intéressants de soulever. Pour rappel, il avait été demandé aux personnes interrogées de définir, avec leurs propres mots, la notion de biomimétisme en architecture. Ces mots sont **bénéfice**, **résoudre**, **perfectionnement** et **optimisation**. Ces derniers rejoignent en effet directement la définition même du biomimétisme et l'état de l'art que vous retrouvez en début de ce mémoire. En effet, lorsqu'il s'agit de recherche biomimétique, il est toujours question de rechercher des bénéfices dans le monde naturel qui nous entoure afin de résoudre des problèmes humains, comme le soulignait Monsieur Pawlyn (2011). De plus, la nature s'est perfectionnée durant des millions d'années, c'est ainsi que cette optimisation naturelle est répliquée dans l'architecture.

La troisième question portait sur l'analogie peau-façade. Le nuage de mots a permis de noter la présence de certains mots, non récurrents, mais dont l'intérêt a été relevé. Premièrement une personne a considéré que la façade se devait d'être **active** et **dynamique**. Ceci rejoint parfaitement le but premier du mémoire qui était de traiter les façades adaptatives, comme la peau qui s'adapte à son environnement extérieur. Le mot **cicatrisation**, relevé une fois, a également été soulevé parce qu'il rejoint l'autoréparation et le 7^{em}e critère faisant référence à la maintenance du bâtiment. Ensuite, **l'esthétique**, le **rôle** et **l'identification** reflètent parfaitement le rôle de la peau que l'on retrouve dans l'état de l'art. En effet Kieran et Timberlake (2004), insistent sur le fait que c'est au moyen de cette peau extérieure que l'identité du bâtiment est retrouvée. L'esthétique est un critère subjectif et non quantifiable, malgré son importance évidente. Pour finir, le rôle du bâtiment et plus précisément de la façade biomimétique est de montrer une manière durable de concevoir les bâtiments.

La question suivante portait sur la prise de connaissance des différents critères établis de façon personnelle. En effet, insistons sur le fait que les critères sont tirés d'une analyse personnelle des différents cas d'études et d'un recoupement à l'analogie peau-façade. D'autres critères auraient pu être amenés en fonction du lecteur. Hormis cela, comme il en a été fait état lors de l'analyse des résultats de cette quatrième question, des critères ont souvent été regroupés. Ceci avait été quelque peu relevé dès l'étude pilote qui a permis de tester la grille. En effet, le critère 2, performance, et le critère 5, isolation, étaient très difficilement dissociables tant l'un influençait l'autre. Il a tout de même été décidé de ne pas changer la grille d'entretien et d'assumer cette « erreur » de jugement. L'objectif a été de renforcer cet état de fait.

Ensuite, deux sous-questions étaient posées, à savoir : la proposition d'autres critères ou sous critères à ceux présentés et leur classement selon l'ordre d'importance que les interviewés leur donnaient. La première a permis de mettre en relief trois critères importants qui n'ont pas été inclus dans l'étude. Le premier a été l'acoustique. En effet, il était difficile de faire un parallèle entre l'acoustique et la peau de l'être humain, c'est pourquoi il n'en a jamais été question lors de l'élaboration des différents critères. De plus, lors de lectures sur les cas d'études, l'acoustique n'a jamais été un critère mentionné. Mais notons l'importance que ce critère a dans la performance de façades. En effet, les bruits environnants sont de plus en plus nuisibles, et le confort des usagers passe, notamment, par une bonne isolation acoustique. Ensuite, nous retrouvons l'esthétique déjà présentée dans la question 3. Mais comme relevé, ce critère est trop subjectif et non quantifiable que pour pouvoir apparaître dans l'étude. Finalement nous retrouvons l'adaptabilité des façades comme critère supplémentaire. Ce critère pourrait être un critère de base, dans le sens où il faudrait le respecter un minimum afin de pouvoir être étudié en profondeur. En effet, l'adaptabilité est une problématique de plus en plus traitée à l'heure actuelle lorsqu'il s'agit du travail de façades. Elle permet de recréer un environnement intérieur optimal aux diverses conditions extérieures qui nous entourent (conditions hivernales, estivales, pluvieuses...). Comme il en a été question dans la section précédente, cette adaptabilité est à nuancer dans le sens où le contrôle des occupants sur ce qui les entoure doit toujours être possible. De plus, revenant sur l'analogie peau-façade, l'adaptabilité de la peau est omniprésente : Régulation de la chaleur interne, ouvertures/fermetures des pores de la peau, réponses aux stimuli...

Nous passons finalement à la dernière question de cette interview qui introduisait la volonté de mise en place d'un outil d'aide à la décision pour les façades biomimétiques. Il s'agissait, pour rappel, de quantifier sur une échelle de 1 à 5 des critères inhérents aux performances des façades étudiées dans la partie 4.1 des résultats. Il a tout de suite été relevé que la question était très complexe. Le but de cette question était d'obtenir des avis quant à une possible quantification de la part d'experts concepteurs. Malheureusement très peu se sont sentis capables de le donner. Notons qu'une préparation préalable est préférable afin de répondre à ce genre de questions. Mais rappelons que le but de l'entretien était d'obtenir des avis en temps réel, sans envoi de la grille d'entretien avant le rendez-vous fixé. Il a tout de même été intéressant de remarquer que parmi les personnes interrogées, beaucoup se sont référées à des standards déjà en place, comme il l'a été réalisé lors de la première élaboration des critères. En effet, pour rappel, les critères établis ont directement été comparés à des labels ou standards qui proposaient déjà une quantification. Les personnes s'étant essayées à la quantification sont principalement issues du milieu de la recherche ou de la consultance (Madame Reiter, Monsieur Attia, Madame Marique et Madame Simon et Madame Fizinger du côté de la consultance). Nous avons également deux assistants de l'université, Monsieur Mans et Monsieur De Wispelaere qui se sont prêtés à l'exercice. Visiblement, les milieux universitaires aident à la réalisation de ce type d'exercice.

Notons une fois de plus la forte présence du principe de confort des usagers mis en avant par plusieurs experts. Il est peut-être plus simple et plus facilement objectivable de parler de confort, pour certains critères, en proposant un pourcentage de personnes satisfaites dans le bâtiment. Parmi les critères proposés, ceux en rapport avec le confort sont les critères **respiration**, **luminosité** et **isolation**. En effet, le premier se définissait comme la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment. Le second comme le taux d'ouverture et la lumière artificielle sauvée, qui aurait pu être pris comme la lumière naturelle entrant et donc le confort visuel intérieur. Le dernier, l'isolation, se définissait donc comme la performance de la paroi, le taux d'isolation et la capacité de la façade de capter/rejeter de la chaleur et donc du confort intérieur en terme de régulation thermique. Il est, de plus, intéressant de relever que de plus en plus de labels et standards retrouvés dans l'état de l'art section 2.8 proposent déjà le « confort » comme cible de performance, permettant de démontrer l'intérêt grandissant qu'il existe à ce confort des usagers. En effet, parmi ceux-ci, relevons les cibles « santé » du label HQE, l'« Health and Wellbeing » (santé et bien-être) du Breeam et la thématique de performance énergétique et de confort du Batex. De plus, le standard Well porte également une attention particulière au confort et à la santé des occupants d'un bâtiment.

5.3. Conclusion de la discussion

Au terme de ces entretiens, il a été possible de mettre en exergue les divers défauts du travail, mais également de trouver des pistes de solutions quant à la quantification des performances de façades et, *in fine*, la mise en place de l'outil proposé. Rappelons tout d'abord que les besoins d'un bâtiment de bureau ne sont pas les mêmes que les besoins d'une habitation unifamiliale. Il s'est avéré très complexe de remplir l'outil que vous pouvez retrouver dans la figure 72 ci-dessous. Pour rappel, les traits mauve et magenta purement fictifs et permettent simplement de montrer le type de représentation que peut amener l'utilisation du radar.

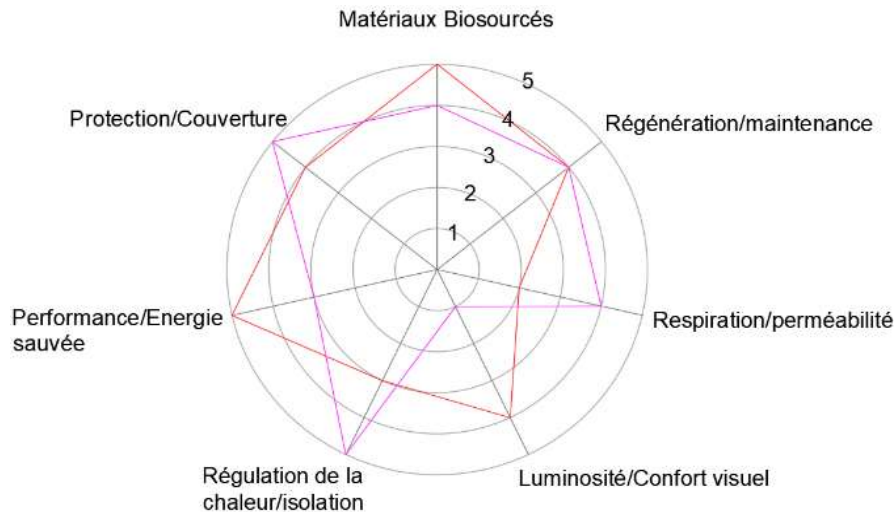


Figure 71 : Représentation radar proposée

Premièrement, les critères établis au premier abord doivent être modifiés selon les résultats des interviews. En effet, le critère « Performance/Énergie sauvée » et le critère « Régulation de la chaleur/isolation » ne sont pas dissociables, c'est pourquoi nous n'allons garder que le critère « Performance », l'isolation y étant incluse. Les matériaux traités ne seront pas uniquement « biosourcés ». Le critère « acoustique » est quant à lui incontournable de nos jours afin de se protéger des nuisances sonores qui nous entourent au quotidien. Nous pourrions également ajouter le critère d'« adaptabilité », permettant aux façades de répondre aux conditions extérieures par elles-mêmes et/ou via des commandes manuelles des usagers du bâtiment. La figure 73 ci-dessous montre une proposition d'amélioration de l'outil. Une fois de plus, les traits mauve et magenta purement fictifs et permettent simplement de montrer le type de représentation que peut amener l'utilisation du radar.

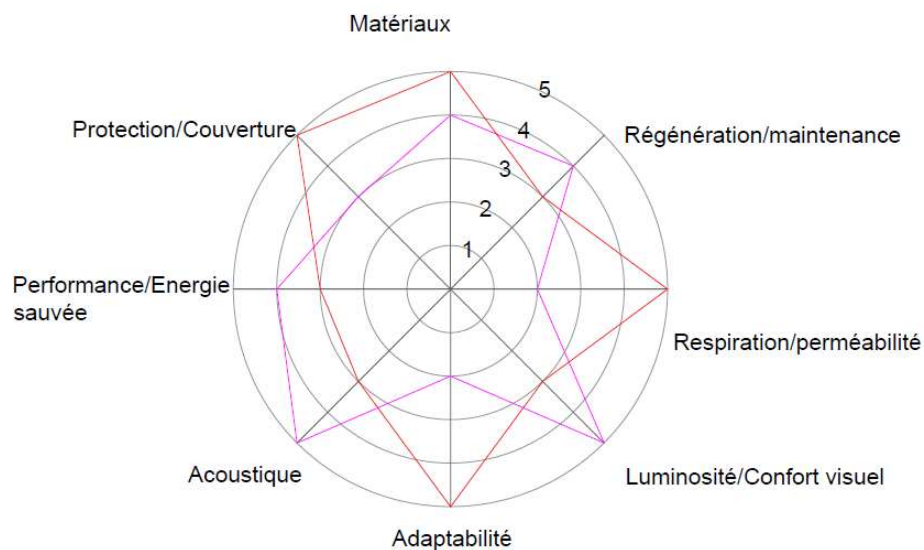


Figure 72 : Proposition postenquêtes de l'outil

Ensuite, précisons une fois de plus que les avis variaient fortement quant à la pondération de chaque critère. C'est ainsi qu'il paraît plus simple de réaliser l'outil au moyen des standards et normes que l'on retrouve dans l'état de l'art, et qui sont ressortis durant les enquêtes. Il s'agirait donc de voir comment le critère équivalent est pondéré dans le label concerné et d'en prendre exemple. Un tableau reliant critères établis et labels/standards est à retrouver dans la section « résultats » (tableau 16). Une autre manière de procéder serait peut-être de définir de manière plus spécifique les critères, en définissant clairement leurs unités facilement quantifiables (parler uniquement de taux d'ouverture, de taux de renouvellement d'air, de confort...) et en recommençant les entretiens. Ainsi, les personnes interviewées seraient plus à même de répondre à la question. Cependant, remarquons que les avis pouvaient diverger quant à la définition même du critère donc le risque de non-réponse est tout de même présent.

Enfin, clôturons cette discussion en insistant sur la complexité de mise en place d'un tel outil d'aide à la conception de façades biomimétiques. En effet, outre la subjectivité présente, le type de façade analysé peut varier et a fortiori la quantification des critères et même leurs définitions. Proposons malgré tout, avec l'aide des entretiens (4.2) et des labels et standards (2.8) une définition susceptible d'aider à la mise en place de l'outil pour les 8 critères finalement retenus. Seuls les réponses les plus récurrentes provenant des entretiens seront retenues. Notons que l'analogie à la peau humaine reste présente.

- **Matériaux : Analyse du cycle de vie**
L'analyse du cycle de vie était importante pour 8 personnes interrogées et 17 étaient d'accord sur le fait d'en tenir compte pour ce critère. De plus, les labels (l'écolabel européen, l'ange bleu et le Naturplus) présentés dans l'état de l'art (2.8, chapitre VIII) et en annexe n°1, prennent en compte cette ACV.
- **Régénération/maintenance : Coût de la maintenance par rapport au prix du bâtiment (%)**
(ce critère reprend la volonté de « régénération de la peau » laissant entendre que le coût de la maintenance serait plus faible si la façade se régénérât d'elle-même (matériaux autonettoyants par exemple).
Aucun exemple de quantification n'est repris dans les entretiens, mais 6 personnes ont insisté sur l'importance de l'aspect économique.
- **Respiration/perméabilité : Taux de satisfaction des occupants en terme de ventilation, confort intérieur**
14 personnes ont insisté sur la notion de confort intérieure pour ce critère. Une solution serait de proposer un POE.
- **Luminosité/confort visuel : Confort visuel selon Well**
Standard proposé par madame Simon. Le confort a été une définition de ce critère pour Monsieur De Wispelaere, Madame Somma, Madame Huberty, Madame Fizinger et Monsieur De Herde . Le Label HQE et le label BREEAM font également référence au confort visuel et sont encouragés par Madame Reuter et Madame Bruyère. Notons qu'il aurait été possible de faire référence au facteur UDI, proposé par 8 personnes
- **Performance/énergie sauvée : Fonction de la réglementation PEB**
Un exemple de quantification est proposé au tableau 12 par madame Reiter et monsieur Attia. En effet, comme expliqué, 12 personnes ont fait référence à la PEB pour la quantification de ce critère.
- **Protection/couverture : Présence et adaptabilité de protections solaires**
Un exemple de quantification est proposé au tableau 11 par monsieur Mans. Il est notamment rejoint par monsieur Attia pour la réponse dynamique (référence à l'adaptabilité) et par madame Simon. Le problème de surchauffe soulevé par 4 autres personnes serait ainsi réglé.
- **Adaptabilité : Taux de réponse d'une façade aux conditions extérieures (automatique ou manuelle)**
- **Acoustique : Confort acoustique selon HQE par exemple.**

Il serait intéressant de resoumettre cette nouvelle proposition à entretiens afin d'avoir un retour objectif. Insistons tout de même sur le fait que l'imposition de définitions de critères sera toujours sujette à débat. Comme il en a été fait état dans la section précédente reprenant les résultats des enquêtes, la définition même des critères était souvent à revoir et n'était pas commune à tous. Notons que les deux nouveaux critères et leur définition n'ont pas été soumis à avis d'experts.

Chapitre 6 : Conclusion

6.1. Conclusion de la recherche

La recherche avait pour objectif de mettre en place un outil d'aide à la conception de façades biomimétiques. Ce dernier s'est inspirée analogie entre la peau humaine et la façade d'un bâtiment, mais également sur l'analyse de diverses façades biomimétiques réalisées à travers le monde. Des critères en sont ressortis et ont été comparés à ceux retrouvés dans les standards belges et internationaux en termes de performances énergétiques. Ensuite, différents experts concepteurs, basés pour la plupart à Liège et ses environs, ont aidé à son élaboration au moyen d'entretiens.

Nous avons pu montrer, de par l'analyse des différents cas d'études et de leurs rendements au niveau énergétique, que l'approche biomimétique à la conception de façade est une approche viable pour répondre au développement durable. En effet, d'après la littérature, les six cas présents dans ce mémoire ont amené des avantages performantiels notables par rapport à des bâtiments réalisés de manière traditionnelle. En outre, ainsi qu'il en a été fait état dans la section « état de l'art », le mode de conception, les réglementations et les outils prouvent que la discipline est en plein essor et est amenée à se développer de plus en plus. De plus, l'analyse de la peau biologique de l'être humain permet de souligner des critères cohérents avec la façade d'un bâtiment.

Cependant, les entretiens menés dans ce mémoire ont démontré que la mise en place d'un outil permettant de rendre compte des performances d'une façade biomimétique n'est pas chose aisée.

Premièrement, la nature même des critères permettant de compléter l'outil est toujours soumise à un avis subjectif de la personne ou du groupe de personnes qui les définissent. En effet, bien que le « nom » des critères soit quant à lui objectivable (lumière, isolation, protection... sont des critères communs à toutes les façades), leurs définitions et leurs quantifications peuvent varier fortement d'une personne à l'autre. Donc il est difficile de trouver un référentiel commun à tous.

Ensuite, des critères importants ont été soulevés par certaines personnes interrogées comme l'esthétique, l'intégration et le rôle de la façade biomimétique dans le paysage urbain. Le problème réside dans le fait que ces thématiques ne sont que difficilement quantifiables et donc impossibles à placer dans un outil comme celui proposé.

Enfin, notons également qu'il est très difficile de proposer une solution générale à la problématique de façades. Comme il a été soulevé à plusieurs reprises dans les entretiens, une approche multicritères comme celle-ci n'est pas exploitable pour tout type de bâtiment et tout type de climat. Les besoins d'un logement dans un pays froid sont à l'opposé des besoins d'un bâtiment de bureaux dans un pays chaud. Il faudrait donc proposer une série d'outils équivalents qui seraient transposables à des climats et des fonctions de bâtiments différents.

6.2. Limites de la recherche

Les limites de la recherche ont déjà été évoquées en partie dans la discussion des résultats. Elles concernent les cas d'étude, l'analogie peau-façade et les enquêtes réalisées.

Premièrement, les cas étudiés, malgré leurs différences, ne représentent qu'une petite partie du monde bâti qui nous entoure. En effet, les bâtiments font tous partie de la fonction « tertiaire », représentant des bâtiments de bureaux, des bâtiments d'expositions, des stades ou des théâtres. Or, notons une fois de plus la diversité de besoins qu'il peut exister entre ces fonctions elles-mêmes, mais également avec des projets de logements par exemple. L'étude mériterait d'être complétée par des fonctions plus diversifiées encore. De plus, les pays d'origine et donc les climats dans lesquels prennent place ces projets sont également très variés. En effet, ces derniers diffèrent fortement avec ce que nous connaissons dans nos régions. La grande limite réside néanmoins dans le faible nombre de projets encore réalisés et ceci se remarque surtout en Europe.

À cela, ajoutons qu'il est toujours préférable de réaliser l'étude des projets en personne. En effet, comme déjà mentionné dans la discussion des résultats, la localisation des projets à l'étranger empêchait toutes mesures *in situ*. Ceci permettrait de garantir la fiabilité des chiffres et autres « vérités » concernant les performances des projets, trouvées dans ce cas-ci dans la littérature.

Deuxièmement, l'analogie peau humaine-façade offre également ses limites malgré les points communs multiples retrouvés dans l'état de l'art dans le tableau 1 page 27. Certains besoins d'une façade ne se retrouvent pas dans les caractéristiques de l'enveloppe humaine. En effet, ainsi qu'il en a été question dans les interviews, un nouveau critère non traité a été proposé : l'acoustique. Ce dernier est incontournable dans notre société actuelle afin de se protéger des nuisances extérieures. L'analogie avec la peau de l'homme est par contre très difficile à faire vu qu'aucune fonction biologique de la peau n'est recensée à ce niveau-là. Ceci est également valable pour le critère « luminosité/confort visuel ».

Troisièmement, notons que l'outil envisagé n'a encore jamais été testé auprès de concepteurs afin de vérifier sa viabilité.

Finalement, la dernière limite de ce mémoire concerne les entretiens réalisés. Comme il en a été question dans la partie « résultats » et « discussions », la plupart des personnes interviewées sont issues de l'Université de Liège. Malgré la volonté de récolter des avis de personnes au background différent, fort est de constater que la base est commune à la plupart des sujets ayant pris part à l'enquête. Comme il en a été question dans la section « discussions des résultats », les facteurs temps et distance ont été déterminants dans le choix des profils. Il s'agirait donc, pour des travaux futurs, de proposer l'enquête à des personnes extérieures, à l'international par exemple.

6.3. Pistes pour de futures recherches

De futurs travaux peuvent être menés après la réalisation de ce mémoire. Ces derniers répondraient notamment aux limites de la recherche énoncées ci-dessus.

La première est évidemment l'agrandissement de la zone d'étude. Par cela, il est entendu une étude de cas plus variée incluant du logement par exemple, et non uniquement du tertiaire. De plus, il serait intéressant d'étudier un nombre plus important de projets proches de nos régions. Ceci permettrait de répondre à la problématique des mesures *in situ* soulevée ci-dessus.

Ensuite, ainsi que précisé dans le chapitre « discussion des résultats », il serait préférable de fixer des critères plus précisément. Les critères devraient être définis de manière à ce qu'il n'y ait pas d'ambiguïté lors de leurs quantifications. Il serait intéressant de proposer de parler uniquement de confort par exemple, sujet incontournable dans les conceptions architecturales.

Après cette étape, il serait important de tester l'outil auprès de concepteurs (élèves par exemple). Ceci permettrait de remarquer les divers défauts dans son utilisation et appuierait les critères et leurs quantifications dans le cas où l'exercice serait concluant. Dans le cas contraire, des ajustements seraient envisageables.

Enfin, les entretiens devraient être proposés à des personnes extérieures à la Belgique, ayant une approche différente de l'architecture et à fortiori de la conception de façades. Cela permettrait de mettre en place un nombre plus important d'outils permettant de répondre à tout type de projets, dans tout type de climat.

Bibliographie

- Akadiri, P. (2011). *Development of multi-criteria approach for the selection of sustainable materials for building projects* (Doctoral Thesis). University of Wolverhampton, Wolverhampton, England.
- Allard, O. (2012). *Biomimétisme - Comment les entreprises peuvent-elles intégrer le biomimétisme dans leur stratégie d'innovation ?* (Thèse de doctorat). ESIEE Paris, Paris, France.
- Anonyme (2004). The Realisation of complex roof geometries. *Roof and façade Asia*, 1(1), 1-3. <http://www.mero.com.sg/files/News%20-%20The%20Realisation%20of%20Complex%20Roof%20Geometries.pdf>
- Ariffin, N.A.M. & Gad, A.S. (2015). Content analysis of the existence of biomimicry life's principles in green building index Malaysia. *Journal of Malaysian Institute of Planners*, 15(1), 179-190. Récupéré de : <http://planningmalaysia.org/index.php/pmj/article/view/233>
- Aziz, M. S., & El Sheriff, E. A. (2016). Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. *Alexandria Engineering Journal*, 55 (1), 707-714. doi : 10.1016/j.aej.2015.10.015
- Badarnah, L. (2012). *Towards the LIVING envelope Biomimetics for building envelope adaptation* (Doctoral Thesis). Israel Institute of Technology, Technion, Israel.
- Badarnah, L., Nachman, F., & Knaack, U. (2010). Solutions from nature for building envelope thermoregulation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, 251-261. doi:10.2495/DN100221
- Benyus, J.M. (2011). *Biomimétisme : Quand la nature inspire des innovations durable*. (Rue de l'échiquier). Paris, France : L'Écopoche.
- Blewitt, J. (2004). The Eden Project – Making a connection. *Museum and society*, 2(3), 175-189. Récupéré de <https://www2.le.ac.uk/departments/museumstudies/museumsociety/documents/volumes/blewitt.pdf>
- Bogatyreva, N., & Bogatyreva, O. (2015). TRIZ-based algorithm for Biomimetic design. *Procedia Engineering*, 131, 377 – 387. doi : 10.1016/j.proeng.2015.12.417
- Callebaut, V. (2011). Lilypad, une écopolis flottante pour réfugiés climatiques. *Les cahiers nouveaux*, 80, p. 10-13. Récupéré de : ftp://docum1.wallonie.be/DOCUMENTS/CAHIERS/CN80/c1a1_callebaut.pdf
- Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis (2013). Biomimétisme, pourquoi la nature est plus forte que nous ? Exposition. Récupéré de <http://ceebios.com/wp-content/uploads/2013/10/Expo-biomim%C3%A9tisme-2013.pdf>
- Certivea, (2015) GUIDE PRATIQUE DU RÉFÉRENTIEL POUR LA QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE DES BÂTIMENTS. Récupéré de https://www.certivea.fr/uploads/documents/3b5504-GP_REF_NFHQEBT_NEUF_20150619.pdf
- Chakrabarti, A., Sarkar, P., Leelavathamma, B., & Nataraju, B. (2005). A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 19(2), 113-132.
- Charraud, A., & Valdelièvre, H. (1981). La taille et le poids des Français. *Economie et statistique*, 132, 23-38. doi : 10.3406/estat.1981.4474
- Chayaamor-Heil, N., Guéna, F., & Hannachi-Belkadi, N. (2018). *Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils. Les Cahiers de la recherche architectural urbaine et paysagère*, 1. doi : 10.4000/crap.309.

- Chekchak, T., & Lapp, K. (2011). Biomimétisme, la nécessaire resynchronisation de l'économie avec le vivant. *Ecologie & politique*, 43(3), 159-166. doi:10.3917/ecopo.043.0159.
- Chiu, I., & Shu, L.H. (2007). Biomimetic design through natural language analysis to facilitate cross domain information retrieval. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 21, 45-59. doi : 10.1017/S0890060407070138
- Correa D., Krieg,O., Christian Z., Menges A., Reichert S., & Rinderspacher K. (2013). HygroSkin : a climate-responsive prototype project based on elastic and hygroscopic properties of wood. *ACADIA Adaptive architecture*, 33, 33-42. Récupéré de : https://www.researchgate.net/publication/273060852_HygroSkin_A_Climate-Responsive_Prototype_Prject_Based_on_the_Elastic_and_Hygroscopic_Properties_of_Wood
- Deimel, M. (2007). Relationships between TRIZ and classical design methodology. *Procedia Engineering*, 9, 512–527. doi:10.1016/j.proeng.2011.03.138
- Deldin, J.- M., & Schuknecht, M. (2014). *Biologically inspired design : Computational methods and tools*. London, England : Springer. Doi : 10.1007/978-1-4471-5248-4
- Diner, S. (2007). Le biomorphisme dans la culture artistique moderne. *Exposition Sculpture numérique et biomorphisme Nancy, Octobre 2007*. Récupéré de : <http://www.peiresc.org/DINER/Biomorphisme.pdf>.
- Direction du bâtiment durable du Service public de Wallonie (DGO4) & Centre interdisciplinaire de formation de formateurs de l'Université de Liège (CIFFUL). (2015) Le guide PEB. Récupéré de : <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/le-guide-peb-2015.pdf?ID=32266>
- Direction générale opérationnelle de l'aménagement du territoire, du logement, du patrimoine et de l'énergie (DGO4), (2013). Appel à projets "Bâtiments exemplaires Wallonie 2013" – Critères pour les projets non résidentiels. Récupéré de l'adresse : <http://www.batiments-exemplaires-wallonie.be/pages/batex.asp>
- Dréno, B. (2009). Anatomie et physiologie de la peau et de ses annexes. *Annales de dermatologie*, 136(6), 247-251. doi :10.1016/S0151-9638(09)72527-X
- EIDin, N, Abdou, A, & Abd ElGawad, I. (2016). Biomimetic: Potentials for Building Envelope Adaptation in Egypt. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 375-386. doi: 10.1016/j.proenv.2016.04.033
- El-Zeiny, R. M. A. (2012). Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 50, 502-512. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.08.054
- Elazm, F.M.A., & Saad, B. S. (2017). Towards Novel and Appropriate Smart Buidlings “Beijing Water Cube”. *International Journal Of Environmental Science*, 2, 13-22. Récupéré de [http://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijes/2017/008-0003\(2017\).pdf](http://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijes/2017/008-0003(2017).pdf)
- European Commission (2011). Communication from the commission to the European Parliament, the Council ,the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. Energy Road map 2050. doi:10.2833/10759
- European Commission (2011). Communication from the commission to the European Parliament, the Council ,the European economic and social Committee and the Committee of the Regions. Horizon 2020 – The EU Framework Programme for Research & Innovation. doi:10.2777/3719
- Fayemi, P.-E., Maranzana, N., Jacobs, S., Wanieck, K., & Zollfrank, C. Biomimetics and its tool. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 6(2), 53-66. Doi : 10.1680/jbibn.16.00010
- Fernandez, I. (2010) *Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux* (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse, France.

- Glier, M.W., Tsenn, J., Linsey, J.S., & McAdams, D.A. (2011). Methods for supporting bio-inspired design. *Biomedical and Biotechnology Engineering; Nanoengineering for Medicine and Biology*, 2, 737-744. doi:10.1115/IMECE2011-63247
- Gonchar, J. (2008). Inside Beijing's Big Box of Blue Bubbles. *Architectural Record*, 196(7). Récupéré de : <http://www.epab.bme.hu/oktatas/2014-2015-2/v-CA-B-MS/FreeForm/Examples/WaterCube.pdf>
- Gronier, G., & Lallemand, C. (2016). *Méthodes de design UX 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Paris, France : Eyrolles.
- Gruber, P. (2008). The signs of life in architecture. *IOP Publishing : Bioinspiration & Biomimetics*, 3. doi : 10.1088/1748-3182/3/2/023001
- Gruber, P. (2008). Transfer of nature to architecture - analysis of case studies. *Biological approaches to Engineering conference*, 58-61. Récupéré de : <https://www.researchgate.net/publication/304625203>
- Gruber, P. (2011). *Biomimetics in Architecture – Architecture of Life and Buildings*. Vienna, Austria : SpringerWienNewYork. Récupéré de : <https://www.researchgate.net/publication/230875495>
- Gruber, P., & Goszontoyi, S. (2010). Skin in architecture : towards bioinspired facades. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, 503-513. doi:10.2495/DN100451
- Guba, E.G., & Lincoln, Y.S. (1994). Competing paradigms research. In N.K. Denzin & Y.S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (pp. 105-117). Thousand Oaks, CA: Sage.
- Harkness, J. M. (2002). In Appreciation A Lifetime of Connections: Otto Herbert Schmitt, 1913 – 1998. *Physics in Perspective*, 4(4), 456-490. Récupéré de : <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s000160200005.pdf>
- Hartpulgil, T., Prins, M., Gültekin, A.T., & Topçu, Y.I. (2011). Conceptual framework for potential implementations of multi-criteria decision making (MCDM) methods for design quality assessment. *Management and Innovation for a Sustainable Built Environment*. Récupéré de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:717a8a83-445a-498e-bd97-e71e52ebb34e>
- Heil, N., & Nelson, M. L. (2016). Biomimetic for building skin : Living Envelope for Contemporary Architecture. *The power of Skin : New materiality in contemporary architectural design*, 1-40. En ligne : http://www.maacc.archi.fr/IMG/pdf/guidelines_for_authors-3-2.pdf
- Hermann, L. (2011). Luc Schuiten, Architecte utopiste. *Les cahiers du développement durable*, 145. Récupéré de : http://www.unil.ch/files/live/sites/ouvdd/files/shared/URBIA/urbia_19/partie_9.pdf
- Johnson, P. (2012) : The Eden Project – gardens, utopia and heterotopia. *Heterotopian Studies*. Récupéré de : <http://www.heterotopiastudies.com/wp-content/uploads/2012/05/The-Eden-Project-pdf.pdf>
- Kamal-Chaoui, I., Robert, L., & Robert, A. (eds.) (2009). Competitive Cities and Climate Change. *OECD Regional Development Working Papers*, 2. Récupéré de <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/44232251.pdf>
- Kapsali, V. (2017). Le grand livre du biomimétisme. Hors Collection. Récupéré de https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/Feuilletage_7.pdf
- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction*. (1st ed.) New York, NY : McGraw-Hill.
- Kolle, A.G. (2005). *Analogical problem-solving in design - Evaluating the feasibility and benefits of the methodical use of biological analogies in solving design problems*. Technical Report. Récupéré de

- https://pdfs.semanticscholar.org/3b61/d36648b680b83149dd9ea5ff1b9c80c9e1d0.pdf?_ga=2.118372809.1950328403.1527797067-545234115.1527797067
- Kong, L. (2009). Making sustainable creative/cultural space in Shanghai and Singapore. *The Geographical Review*, 99(1), 1-22. doi : 10.1111/j.1931-0846.2009.tb00415.x
- Krieg, O., Christian Z., Correa D., Menges A., Reichert S., Rinderspacher K., & Schwinn T. (2014). HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion Institute for Computational Design. *Fabricate UCL press*, 60-67. Récupéré de <https://www.researchgate.net/publication/273060832>
- Lopez, M., Rubio, R., Martín, S., & Croxford B. (2016). How plants inspire façades. From plants to architecture : Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 692-703. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.018
- Morris-Nunn, R. (2007). CH2. Architecture Australia, 96(1), 101-104. Récupéré de : <https://architectureau.com/articles/ch2/>
- Nagel, J.K.S., Nagel, R.L., Stone, R.B. & McAdams, D.A. (2010). Function-based, biologically inspired concept generation. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24(4), 521-535. doi:10.1017/S0890060410000375
- Oral G.K. & Yilmaz, Z. (2003) Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view. *Energy and buildings*, 35(2), 383-388. doi :10.1016/S0378-7788(02)00111-1
- Pawlyn, M. (2011). *Biomimicry in Architecture*. (2nd ed.). London, England : RIBA publishin
- Perrot, C. (n.d.) La peau : introduction à la clinique. *OP MEDICA SAS*. Récupéré de : www.opmedica.fr/publications/telecharger/1
- Potschin, M., Kretsch, C., Haines-Young, R., E. Furman, Berry, P., & Baró, F. (2016): Nature-based solutions. In: Potschin, M. and K. Jax (eds): *OpenNESS Ecosystem Services Reference Book*. EC FP7 Grant Agreement no. 308428. Récupéré de: www.openness-project.eu/library/reference-book
- Pruvost, J. (2014). Symbiotic Integration Of Photobioreactors In A Factory building Façade For Mutual Benefit Between Buildings And Microalgae Needs. doi: 10.13140/2.1.2076.1920
- Radwan, G.A.N. & Osama, N. (2016). Biomimicry, an approach, for energy efficient building skin design. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 178-189. doi: 10.1016/j.proenv.2016.04.017
- Rankouhi, A (2012). *Naturally Inspired Design. Investigation into the application of biomimicry in architectural design*. (master's thesis). The Pennsylvania State University, Pennsylvania, United States. Récupéré de : <https://issuu.com/azarch/docs/thesis>
- Rao, R. (2014), Biomimicry in architecture. *International Journal of Advanced Research in Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering and Developing*, 1 (3), 101-107. Récupéré de l'adresse http://www.isrjournals.org/journals/civil_environmental_journals/biomimicryinarchitecture1401273613.pdf
- Reap, J., Baumeister, D., & Bras, B. (2005) Holism, Biomimicry and Sustainable Engineering. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 423-431. doi: 10.1115/IMECE2005-81343
- Reichert S., Menges A., & Correa D. (2015). Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60, 50–69. doi: 10.1016/j.cad.2014.02.010

- Ricard P. (2015). Le biomimétisme: s'inspirer de la nature pour innover durablement. *Les avis du conseil économique, social et environnemental (CESE). Les éditions des journaux officiels* Récupéré de: http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Rapports/2015/2015_23_biomimetisme.pdf
- Rosemond, A.D., & Anderson, C.B. (2003). Engineering role models : do non-human species have the answers?, *Ecological Engineering*, 20, 379-387. doi:10.1016/j.ecoleng.2003.09.002
- Rossin, K.J. (2010). Biomimicry : nature's design process versus the designer's process. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, 559-570. doi:10.2495/DN100501
- Toxopeus, H., & Polzin F. (2017) Characterizing nature-based solutions from a business model and financing perspective. *Naturvation*. Récupéré de : https://naturvation.eu/sites/default/files/news/files/naturvation_characterizing_nature-based_solutions_from_a_business_model_and_financing_perspective.pdf
- Sartori, J., Pal, U., & Chakrabarti, A. (2010). A methodology for supporting "transfer" in biomimetic design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24(4), 483-506. doi: 10.1017/S0890060410000351
- Schleicher, S. (2011). Adaptive Façade Shading Systems inspired by Natural Elastic Kinematics. *International Adaptive Architecture Conference*. Récupéré de : <https://pdfs.semanticscholar.org/4624/366c90df8d62a37638f6038567a014a4023e.pdf>
- Schleicher, S. (2014). A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. *Computer-Aided Design*, 60, 105–117. doi: 10.1016/j.cad.2014.01.005.
- Shu, L.H. (2010), A natural-language approach to biomimetic design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24, 507-519. doi:10.1017/S0890060410000363
- Stevanović S. (2013). Optimization of passive solar design strategies : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 177–196. doi :10.1016/j.rser.2013.04.028
- Sugar, V., Leczovics, P., & Horkai, A. (2017). Bionics in architecture. *YBL Journal of Built Environment* 5(1), 31-42. doi:10.1515/jbe-2017-0003.
- SymBIO² (2016), XTU - Biofacades, capteur solaire biologique de demain. *Dossier de presse*. Retrouvé à l'adresse <http://bit.ly/symbio2-presskit>
- Taylor Buck, N. (2015) The Art of Imitating Life: The Potential Contribution of Biomimicry in Shaping the Future of Our Cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44 (1), 120-140. doi: 10.1177/0265813515611417
- Terrier, P., Glaus, M., & Raufflet, E. (2017). Biomimétisme : outils pour une démarche écoinnovante en ingénierie. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*. Récupéré de : <http://journals.openedition.org/vertigo/17914>.
- Vangeloglou E. & Rasmussen H (2015). Evaluation of daylight in buildings in the future, *REHVA Journal Octobre*, 35-40. Récupéré de <https://www.rehva.eu/publications-and-resources/rehva-journal/2015/052015/evaluation-of-daylight-in-buildings-in-the-future.html>
- Vincent, J., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev N. R., Bowyer A., & Pah, A. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *The Royal Society Interface* 3 (9), 471-482. doi:10.1098/rsif.2006.0127
- Volstad, N.L., & Boks, C. (2008). Biomimicry - A useful tool for the industrial designer? Shedding light on nature as a source of inspiration in industrial design. *NordDesign Conference*, 275-284. Récupéré de <https://www.designsociety.org/publication/27376/Biomimicry+%E2%80%93+a+useful+tool+for+t+he+industrial+designer%3F>

- Webb, S. (2005). The integrated design process of CH2. *Environment design Guide*, 36, 1-10. Récupéré de <https://www.melbourne.vic.gov.au/SiteCollectionDocuments/ch2-case-study.pdf>
- Yeang, K. (1999). *The Green Skyscraper, The Basis for Designing Sustainable Intensive Buildings*. (1st ed.) New York, NY : Prestel.
- Yowell, J. (2011). *Biomimetic Building Skin : A phenomenological approach using tree bark as model*. (master's thesis). University of Oklahoma, Oklahoma, United States
Récupéré de: <http://tulsagrad.ou.edu/studio/biomimetic/jy-FINAL-thesis.pdf>
- Zari, M. P. (2007). Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability, *Sustainable Building*, 33. Récupéré de l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/237460476_BIOMIMETIC_APPROACHES_TO_ARCHITECTURAL_DESIGN_FOR_INCREASED?enrichId=rgreq-013ef30480044d1eb8fd3257f071d110-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzIzNzQ2MDQ3NjtBUzoxMDEyMDQxODA4NjUwMjZAMTQwMTE0MDM2NTEyMg%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf

Webographie

- Abel, J. (2016). Conférence Médias et infini. En ligne : <http://reso-nance.org/wiki/culture/medias-et-infini/accueil>. Consulté le 20 avril 2018.
- Chua, G. (2014). Keeping it cool: how Melbourne's Council House 2 took advantage of the night. En ligne : <https://www.architectureanddesign.com.au/news/keeping-it-cool-how-melbourne-s-council-house-2-to>. Consulté le 5 mars 2018.
- Demougeot, M. (2017). Biomimétisme : 5 bâtiments inspirés par la nature. En ligne : http://www.regardssurlaplanete.com/article/biomimetisme-5-batiments-inspires-par-la-nature_a7694/1 Consulté le 20 avril 2018.
- DesignInc (2013). CH2 Melbourne City Council House 2. En ligne : <https://www.archdaily.com/395131/ch2-melbourne-city-council-house-2-designinc>. Consulté le 3 mars 2018
- Etherington, R. (2008). Watercube by PTW Architects. En ligne : <https://www.dezeen.com/2008/02/06/watercube-by-chris-bosse/> Consulté le 6 mars 2018.
- HOK (2009). India – Lavasa Hill Station Masterplan. En ligne: <http://www.hok.com/design/region/india/lavasa-hill-station-master-plan/> Consulté le 22 avril 2018.
- ISO (2016). ISO 18547 : Biomimétisme – Matériaux, structures et composants biomimétiques. En ligne : <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:18457:ed-1:v1:en>. Consulté le 20 février 2018.
- ISO (2015). ISO 18548 : Biomimétisme – Terminologie, concepts et méthodologie. En ligne : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:fr>. Consulté le 20 février 2018.
- ISO (2015). ISO 18549 : Biomimétisme – Optimisation Biomimétique. En ligne : <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:62501:fr>. Consulté le 20 février 2018
- Juignet, P. (2015) . Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn. *Philosophie, science et société*. En ligne : <https://philosciences.com/philosophie-et-science/methode-scientifique-paradigme-scientifique/113-paradigme-scientifique-thomas-kuhn>.
- Latieule, S. (2015). Microalgues : Pilote en vue pour le projet SymBIO2. En ligne : <http://formule-verte.com/microalgues-pilote-en-vue-pour-le-projet-symbio2/> Consulté le 6 mars 2018.
- Larousse. (s.d.). Dictionnaire français, Biomimétisme. En ligne : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biomim%C3%A9tisme/10911021>. Consulté le 22 mars 2018.
- Larousse. (s.d.). Dictionnaire français, Ecosystème. En ligne : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9cosyst%C3%A8me/27682>. Consulté le 12 mars 2018.
- Larousse. (s.d.). Dictionnaire français, Label. En ligne : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/label/45761?q=Label#45699>. Consulté le 17 mars 2018.
- Lofgren, K. (2013). World's First Algae-Powered Building by Splitterwerk Architects Opens in Germany. En ligne : <https://inhabitat.com/splitterwerk-architects-design-worlds-first-algae-powered-building-for-germany/> Consulté le 7 mars 2018.
- Maier, F. (2012). One Ocean – Thematic pavilion for EXPO 2012. En ligne: <https://www.detail-online.com/article/one-ocean-thematic-pavilion-for-expo-2012-16339/> Consulté le : 10 mars 2018.

- Mairs, J. (2015). Grimshaw Architects to design £100 million Eden Project in China. En ligne : https://www.dezeen.com/2015/09/28/eden-project-grimshaw-architects-100-million-pounds-qingdao-china/#disqus_thread. Consulté le 3 janvier 2018.
- Maneval, V. (2017). Architecture bulle-cube d'eau (2003-2008) Pékin –Chine. En ligne : <http://bubblemania.fr/architecture-bulle-cube-deau-2003-2008-pekin-chine/>. Consulté le 6 mars 2018.
- McManus, D. (2017). Expo 2012 Yeosu Pavilion : Landmark Building Korea. En ligne : <https://www.e-architect.co.uk/korea/expo-yeosu-pavilion> Consulté le 10 mars 2018.
- Menges, A., Krieg O.D. & Reichert, S. (2013). HygroSkin-Meteosensitive Pavilion. En ligne : <https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert> Consulté le 8 mars 2018
- Peter, S. (2016). Construction d'une biofaçade pilote. En ligne : <http://viry.fayat.com/Actualites/CONSTRUCTION-D-UNE-BIOFACADE-PILOTE> Consulté le 7 mars 2018.
- Schuiten, L. (2015). La ville de demain – Genève. En ligne : <http://www.vegetalcity.net/topics/geneve-2/> Consulté le 22 avril 2018.
- Schuiten, L. (2017). La ville de demain – Bruxelles . En ligne : <http://www.vegetalcity.net/topics/bruxelles/> Consulté le 22 avril 2018.
- SOMA (2012). One Ocean, Thematic Pavillon EXPO 2012. En ligne : <https://www.archdaily.com/236979/one-ocean-thematic-pavillon-expo-2012-soma> Consulté le 20 mars 2017
- Stott, R. (2017). Spotlight : Antoni Gaudi. En ligne : <https://www.archdaily.com/519298/happy-birthday-antoni-gaudi>. Consulté le 10 décembre 2017.
- Transolar (2012). One Ocean – Pavilion EXPO 2012, Yeosu, South Korea. En ligne : <http://transolar.com/projects/one-ocean-pavillon-expo-2012> Consulté le 10 mars
- Walsh, N.P. (2018). Shortlist Announced for Competition to Redesign The Eiffel Tower Visitor Experience. En ligne : <https://www.archdaily.com/893829/shortlist-announced-for-competition-to-redesign-the-eiffel-tower-visitor-experience>

