



eva
PÔLE
ENVIRONNEMENT
VILLE
ARCHITECTURE
DIGITAL
aDig

fair
fabrique
d'architectures
innovantes et
responsables

Mémoire de Diplôme Universitaire

Inscription au niveau Master

« **Construire Eco-responsable** »

Délivré par l'Université Gustave Eiffel

Décembre 2022

Biomimétique et conception bioclimatique.

Les solutions biomimétiques des enveloppes du bâtiment sont-elles utiles à la conception bioclimatique ?

Vermont Ignacio ALLADAYÈ

INTRODUCTION

La situation de notre planète est inquiétante !

Par l'action incontrôlée de l'homme sur la nature, nous vivons une série de phénomènes dont l'issue pourrait être fatale à tous les êtres vivants sur terre. En effet, nous assistons à un effondrement de la biodiversité, à la dégradation des écosystèmes, à l'épuisement des ressources naturelles surtout dans les pays pauvres, au réchauffement climatique planétaire (+1,09°C en 2021)¹, avec des conséquences *"irréversibles pour des siècles ou des millénaires"*,² selon le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Dans son discours à l'université de Columbia, le 2 décembre 2020, le Secrétaire Général de l'ONU, António Guterres ; déclarait :³

**« L'humanité fait la guerre à la nature.
C'est une entreprise suicidaire.
Car la nature répond toujours coup pour coup, et elle le fait déjà avec une force et une fureur de plus en plus grandes ».**

Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), le Giec dans son rapport du 6 avril 2022, recommande la mise en place d'une stratégie de consommation énergétique moins carbonée avec le remplacement des *« énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) par des sources d'énergie bas-carbone ou neutres (hydroélectricité, photovoltaïque, éolien...) »*⁴. Ce rapport recommande également une *« plus grande sobriété »* dans le domaine de la construction avec l'isolation des bâtiments.

En France, le secteur du BTP (Bâtiment & Travaux Publics) contributeur de 8% du PIB, serait à l'origine de 25 à 30% des émissions de gaz à effet de serre et de 44% des consommations d'énergie.⁵

Il y a donc urgence à faire évoluer les pratiques du BTP pour s'inscrire durablement dans les objectifs de la Loi de transition énergétique.⁶

En tant qu'intervenant dans l'acte de construire et d'aménager les territoires, nous avons la responsabilité de créer des bâtiments durables et sobres énergétiquement.

L'objet de notre formation de Diplôme Universitaire Construire Eco-Responsable, s'inscrit totalement dans ce cadre.

La démarche de construction éco-responsable passe par l'approche de la conception bioclimatique.

La conception architecturale bioclimatique inscrit le projet dans son environnement naturel en tirant le meilleur parti des spécificités climatiques locales. Les bâtiments conçus et créés à ce titre sont énergétiquement sobres, confortables dans leurs usages et respectueux de l'environnement.

¹ <https://www.vie-publique.fr/en-bref/284117-rapport-2022-du-giec-nouvelle-alerte-face-au-rechauffement-du-climat>

² <https://www.vie-publique.fr/en-bref/281114-rapport-du-giec-sur-le-climat-un-constat-alarmant>

³ <https://unsdg.un.org/fr/latest/blog/etat-de-la-planete#:~:text=Aujourd'hui%2C%20nous%20en%20somm%20au%20cours%20du%20XXI%20si%20si%C3%A8cle.>

⁴ <https://www.vie-publique.fr/en-bref/284713-nouveau-rapport-du-giec-des-solutions-face-au-rechauffement-climatique>

⁵ <https://www.mondedesgrandesecoles.fr/le-btp-face-aux-enjeux-de-developpement-durable#:~:text=Avec%20pr%C3%A8s%20de%20300%20milliards,gaz%20C3%A0%20effet%20de%20serre.>

⁶ <https://cegibat.grdf.fr/reglementation-energetique/loi-transition-energetique-batiment#:~:text=L'article%2017%20de%20la,%C3%A0%202010%20%5B%E2%80%A6%5D%20C2%BB.>

Cependant, l'approche bioclimatique est-elle suffisante pour répondre entièrement aux défis environnementaux actuels auxquels notre planète est confrontée ?

De quels compléments méthodologiques pourrait-elle s'enrichir ?

Ces questionnements nous ont amené à considérer le champ du biomimétisme comme une contribution potentielle à la conception bioclimatique, pour qu'enfin l'humanité arrête de faire « **la guerre à la nature** », mais s'en inspire pour améliorer les conditions de vie sur terre.

En effet, en 3,8 milliards d'années, les systèmes du vivant ont développé des solutions évolutives et résilientes pour s'adapter à l'environnement changeant sur terre.

Comment pouvons-nous grâce à la biomimétique en tant que démarche et méthodologie d'innovation, apprendre de la nature pour répondre aux enjeux environnementaux actuels dans le domaine de l'architecture et de la construction ?

Afin d'avancer dans notre réflexion, nous nous intéresseront à l'enveloppe du bâtiment dans le cadre de ses fonctions régulatrices entre l'intérieur et l'extérieur, fonctions essentielles dans la conception bioclimatique.

Notre mémoire s'intitule donc :

***Biomimétique et conception bioclimatique.
Les solutions biomimétiques des enveloppes du bâtiment sont-elles utiles à la conception bioclimatique ?***

Chapitre 1 - LE PERIMETRE D'ETUDE

Le chapitre 1 sera consacré à la définition de notre périmètre d'étude, à savoir : la conception bioclimatique, les sciences du vivant et la clarification des différentes compréhensions liées au biomimétisme. Nous poserons la problématique du mémoire ainsi que les hypothèses qui guideront nos investigations.

1.1 - La conception bioclimatique

Le mot bioclimatique est composé du préfixe « bio » βίος⁷, bios qui signifie « vie » en grec ancien et du mot « climatique » qui fait référence au climat. Le climat étant défini comme l'ensemble des conditions atmosphériques et météorologiques d'une région géographique pendant un temps donné. La caractérisation du climat se fait par des mesures statistiques atmosphérique locales. Sont pris en compte : la température, la pression atmosphérique, les précipitations, l'ensoleillement, l'humidité, etc. Sur notre planète, il existe plusieurs types de climats : équatorial, tropical, désertique ou aride, méditerranéen, océanique, continental, polaire et montagnard.

La conception bioclimatique établit un rapport étroit entre le climat et l'environnement. L'environnement étant considéré comme « l'ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines »⁸

La conception bioclimatique, c'est l'ensemble des phases de création d'un projet de construction dont le but est d'intégrer le bâti dans son environnement climatique afin d'en tirer le meilleur parti en termes de sobriété et d'efficacité énergétique tout en respectant le milieu naturel.

Concevoir de façon bioclimatique, consiste à s'assurer que l'aménagement ou la construction répond à des enjeux d'intégration dans l'environnement en tenant compte du climat.

La conception bioclimatique vise donc à construire avec le climat et non contre lui.⁹

Historiquement, les peuples ont développé des traditions de construction liées aux caractéristiques climatiques et environnementales des territoires en intégrant les techniques et matériaux locaux. Cette approche concerne l'architecture vernaculaire qui est définie comme une « architecture communément répandue dans un pays, un territoire ou une aire donnée à une époque donnée »¹⁰.

Les maisons du pays Toraja sur l'île des Célèbes dans la province de Sulawesi du Sud en Indonésie, constituent un exemple concret de l'architecture vernaculaire d'inspiration bioclimatique.

Construites dans une région frappée par des moussons chaudes et humides, les maisons Toraja sont construites avec les caractéristiques suivantes :

- Structure porteuse en bois ; remplissage en bambou, chaume et fibres végétales. Ces matériaux tirés de l'environnement naturel sont biosourcés et renouvelables
- Construction traditionnelle avec assemblage à tenon et mortaise, sans clous
- Maisons sur pilotis pour échapper à l'emprise des eaux, à la boue, aux termites et aux moustiques vecteurs du paludisme
- Hauteur élevée du bâti pour créer l'effet de puits dépressionnaire nécessaire à la ventilation passive naturelle
- Toiture en pente et en débord pour permettre l'écoulement rapide des eaux pluvieuses et pour créer une zone d'ombre en cas de forte chaleur.

⁷ <https://fr.wiktionary.org/wiki/bio-#fr>

⁸ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Environnement>

⁹ COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre, *La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation*, Mens, Terre vivante, 2006, p33

¹⁰ https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_vernaculaire



Fig. 1-1. Maison à l'architecture vernaculaire Toraja de l'île des Célèbes dans la province de Sulawesi du Sud en Indonésie.



Fig. 1-2. Détail d'une toiture de maison Toraja avec toit en chaume et bambou, structure en bois.

Références : Fig. 1-1¹¹ , Fig. 1-2¹²

En matière de conception bioclimatique, il s'agit de trouver une adéquation entre l'enveloppe habitée, le climat et l'environnement, les modes de vie et les rythmes des habitants.

Pour ce faire, dans les pays tempérés par exemple, la conception bioclimatique prend en compte :

- En hiver, le captage des énergies naturelles, la diminution des pertes thermiques et le renouvellement d'air en quantité suffisante.
- En été, la diminution des apports caloriques et la mise en œuvre de solutions qui favorisent le rafraîchissement.

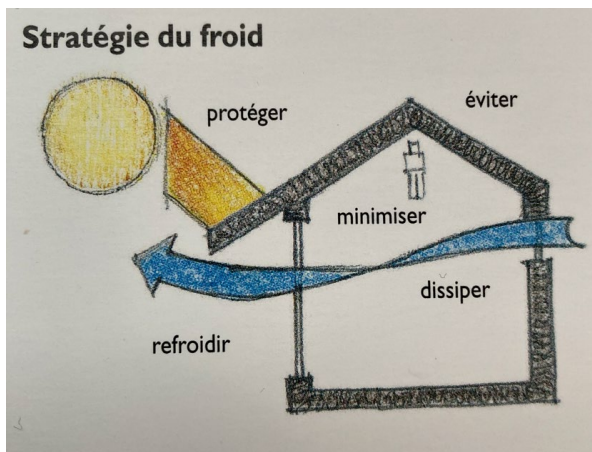


Fig. 1-3. Stratégie du froid en conception bioclimatique dans l'hémisphère Nord.

Croquis de Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva - La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation, Mens, Terre vivante, 2006, p 37

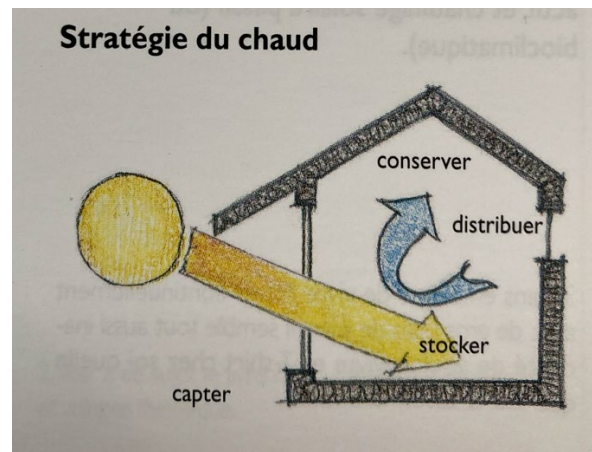


Fig. 1-4. Stratégie du chaud en conception bioclimatique dans l'hémisphère Nord.

Croquis de Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva - La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation, Mens, Terre vivante, 2006, p 36

Références Fig. 1-3 et Fig.1-4¹³

¹¹ <https://maison-monde.com/architecture-traditionnelle-indonesie/>

¹² <https://www.baliautrement.com/paystoraja.htm>

¹³ COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre, La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation, Mens, Terre vivante, 2006, pages 36 et 37

La conception bioclimatique s'appuie également sur une spatialisation adaptée du bâtiment à son environnement, fruit des traditions ancrées localement. Cette approche aboutit à la réalisation d'enveloppes polyfonctionnelles composées de matériaux locaux assurant les fonctions structurelles et protectrices du bâtiment en réduisant les besoins d'apport énergétique.

La conception bioclimatique aborde le projet en prenant en compte :

- la connaissance de l'environnement, du climat et de la biodiversité existante
- la fixation d'objectifs de sobriété énergétique
- le confort d'usage ainsi que la santé des futurs occupants à travers l'emploi de matériaux naturels, non nocifs aux êtres vivants
- le bilan écologique du projet
- la qualité de la mise en œuvre des espaces construits

la conception bioclimatique est également guidée par les principes suivants :

- la morphologie et l'implantation du bâtiment (compacité, orientation, disposition des espaces de vie)
- l'utilisation des énergies gratuites fournies par l'environnement extérieur pour le confort de jour et de nuit, et en toute saison
- les apports énergétiques ponctuels, non couverts par les énergies gratuites, nécessaires occasionnellement pour assurer le confort des usagers
- l'efficacité de l'enveloppe multifonctionnelle du bâtiment (solarisation, porosité, transparence, isolation thermique, inertie)
- la frugalité dans la conception, la construction et dans l'usage comme le préconise négaWatt¹⁴

Ainsi, la conception bioclimatique revient d'une part, à minimiser les efforts nécessaires au bâtiment pour s'adapter au climat et d'autre part à maximiser les apports du climat au bon fonctionnement du bâtiment.

A cet effet, l'enveloppe du bâtiment joue un rôle essentiel pour assurer la transformation des conditions extérieures en apports utilisables pour le confort intérieur, autant en hiver qu'en été.

L'enveloppe du bâtiment, c'est un « ensemble complet d'éléments et de composants assemblés de manière à séparer un espace occupé intérieur de l'environnement extérieur, créant ainsi un intérieur confortable et habitable ». ¹⁵

Selon Alain Bornarel, l'enveloppe du bâtiment joue le rôle de filtre entre d'une part « des flux extérieurs multiples et dynamiques » et d'autre part « des usages intérieurs multiples et dynamiques ». ¹⁶

Cette enveloppe composée du plancher, de la toiture, des murs extérieurs avec leurs ouvertures, ainsi que des façades ; permet les fonctions suivantes :

- supporter et transférer les charges structurelles du bâtiment et de son environnement
- contrôler et réguler les apports environnementaux extérieurs comme la chaleur, le froid, l'air, la lumière, le bruit, la pluie, le vent, la neige
- être le support de l'expression à la fois esthétique et fonctionnelle du parti pris architectural perceptible de l'extérieur

Par ses fonctions, l'enveloppe du bâtiment participe pleinement à la stratégie de la conception bioclimatique et joue un rôle déterminant dans la sobriété énergétique.

¹⁴ <https://negawatt.org/>

¹⁵ https://www.encyclopedie.fr/definition/enveloppe_du_b%C3%A2timent

¹⁶ [Cours de bioclimatique, D.U. Construire Eco Responsable, 2022](#)

A l'instar de la peau humaine qui joue le rôle d'interface dynamique entre le corps et l'extérieur, l'enveloppe du bâtiment joue un rôle similaire entre le climat extérieur et celui souhaité à l'intérieur du bâtiment.

Cette analogie est illustrée par Estelle Cruz dans sa thèse "*Multi-criteria characterization of biological interfaces: towards the development of multi-functional biomimetic building envelopes*".¹⁷

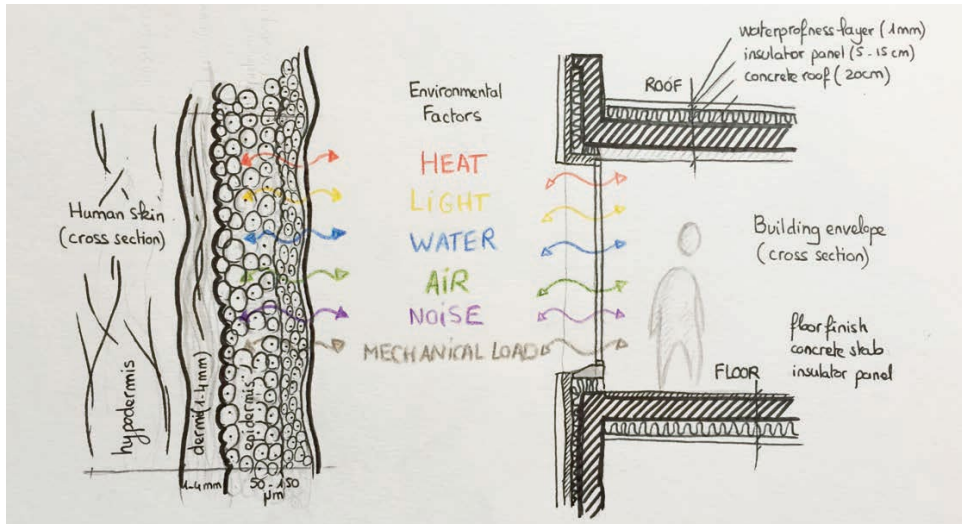


Fig. 1-5. « Analogie entre les interfaces biologiques et l'enveloppe des bâtiments ».

Crédit: Croquis de Estelle Cruz, CC BY-SA 4.0 E. Cruz – page 42

Dans cette illustration, Estelle Cruz met en évidence les facteurs environnementaux que sont la chaleur, la lumière, l'eau, l'air et le bruit qui sont filtrés par la peau humaine comme le fait l'enveloppe du bâtiment.

Cette analogie pourrait être le fil conducteur de la réflexion suivante :

Etant donné qu'en 3,8 milliards d'années, les systèmes du vivant ont développé des solutions évolutives et résilientes pour s'adapter à l'environnement changeant sur terre ; est-il possible de s'inspirer de la nature et du vivant pour améliorer la conception des bâtiments bioclimatiques, et notamment de leurs enveloppes ?

Afin de poursuivre notre réflexion, nous aborderons le domaine des sciences de la vie et leurs rapports avec la conception.

1.2 - Les sciences de la vie

Les sciences de la vie nous apprennent à décrypter et à comprendre le fonctionnement du vivant. Par leur variété, elles touchent des domaines allant de l'agronomie aux neurosciences, en passant par la biologie, la médecine, la génétique, la physiologie, la taxonomie, la toxicologie, pour ne citer que ceux-là.

Cette grande variété des domaines est rendue complexe par la diversité des subdivisions faites selon le type d'organisme étudié. De façon non exhaustive, il s'agit de : la bactériologie, la botanique, l'entomologie, l'herpétologie, l'ichtyologie, la malacologie, la mammalogie, la mycologie, l'ornithologie, la phycologie, la nématologie, la virologie et la zoologie.

¹⁷ Estelle Cruz. *Multi-criteria characterization of biological interfaces: towards the development of multi-functional biomimetic building envelopes*. Engineering Sciences [physics]. Museum national d'histoire naturelle (MNHN PARIS); CEEBIOS, 2021.

En effet, les sciences de la vie ou les biosciences concernent l'étude des organismes qui constituent un système vivant complexe, organisé résultant du produit de variations successives au cours de l'évolution.¹⁸

Historiquement, la classification des êtres vivants s'est faite sur des bases de l'observation macroscopique. Mais avec l'avènement de la génétique, cette classification est désormais possible à partir de l'identification de la proximité des marqueurs génétiques (ADN) : c'est la phylogénétique.

L'arbre phylogénétique du vivant nous montre la complexité de cette classification.

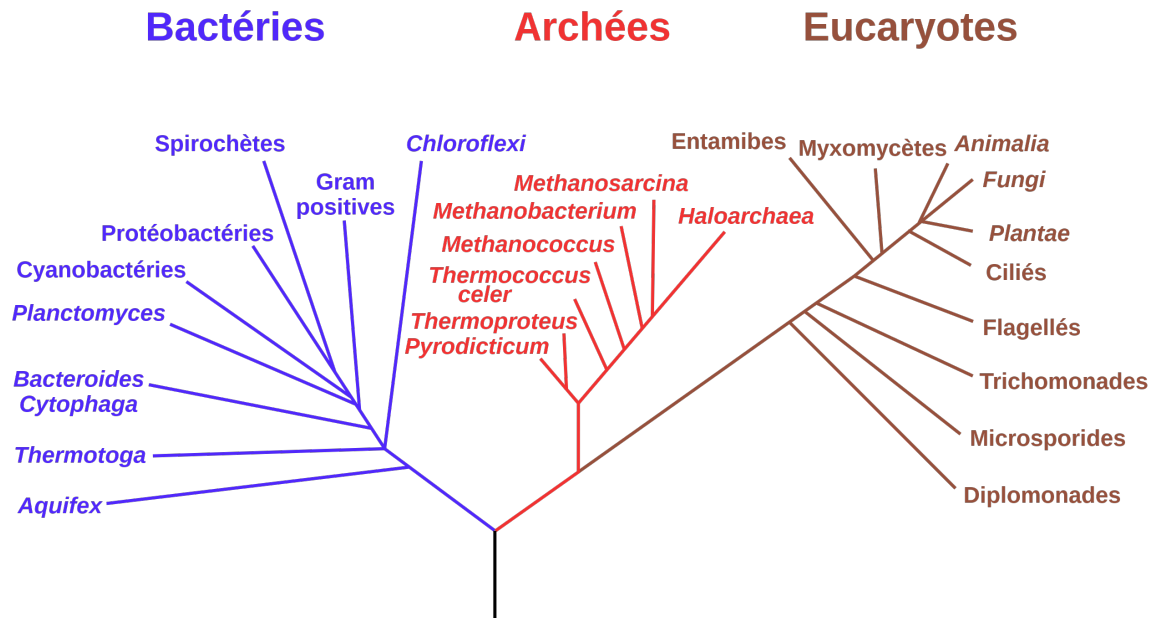


Fig. 1-6. Arbre phylogénétique montrant la complexité du monde vivant.

Référence Fig. 1-6¹⁹

L'organisation du monde vivant se fait à des échelles diverses (du nanomètre au kilomètre) et avec des niveaux d'imbrication complexes d'ensembles et de sous-ensembles (Molécules, Organites, Cellules, Tissus, Organes, Systemes d'organes, Organismes, Groupes, Organisations, Communautés, Ecosystèmes, Biosphère)

Ces ensembles et sous-ensembles fonctionnent de façon coordonnée à différents niveaux hiérarchiques par des échanges de flux de matière, d'énergie et d'information. Les échanges assurent un équilibre en boucles rétroactives qui garantissent la notion d'homéostasie, c'est-à-dire la capacité du système à contrebalancer les perturbations qui auraient sans cela entraîné un changement du système en soit.

Par ailleurs, la plupart des systèmes vivants sont auto-poïétique, car ils ont la propriété de maintenir leur organisation, donc leur structure, malgré le changement de leur composants (matériaux) et de l'évolution de l'information.²⁰

Par exemple, certaines cellules se renouvellent grâce à la mitose (division cellulaire), assurant une stabilité de l'organisation du système dont elles font partie.

¹⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Sciences_de_la_vie

¹⁹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phylogenetic_tree.svg

²⁰ [Autopoïèse — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Autopoïèse)

Les systèmes vivants se caractérisent par une très grande complexité organisationnelle, structurelle et fonctionnelle. Cependant, la complexité des systèmes vivants n'est pas du même type que celle des systèmes techniques créés par les humains.

Le tableau Fig.1-5 montre quelques différences entre les systèmes créés par les êtres humains et les systèmes écologiques.

SYSTEMES CREEES PAR LES ETRES HUMAINS	SYSTEMES ECOLOGIQUES
Flux linéaires des ressources	Flux de ressources en boucles fermées riches en Feed-back
Déconnectés et à fonction unique	Interconnexions multiples et symbioses
Résistants au changement	Adaptés à des changements constants
Gaspilleurs	Tout est nutriment
Utilisant fréquemment des toxines persistantes	Sans toxines persistantes
Souvent centralisés et de culture unique	Distribués et divers
Contrôlés de façon hiérarchique	Autorégulés de façon panarchique
Dépendants des combustibles fossiles	Fonctionnant avec les apports solaires disponibles
Conçus et construits pour maximiser un objectif	Optimisés en tant que système global
Fondés sur l'extraction	Régénérateurs
Consomment des ressources provenant du monde entier	Consomment de ressources locales

Fig. 1-7. « Différences clés entre systèmes conventionnels créés par les êtres humains et les systèmes écologiques ». Tableau réalisé sur la base de celui de Michael Pawlyn

Reference Fig.1-7²¹

Dans la même logique que Michael Pawlyn, Eliot Graeff compare les processus de génération des solutions biologiques et techniques Fig. 1-6)

CARACTERISTIQUES	SYSTEMES BIOLOGIQUES	SYSTEMES TECHNIQUES
Auto-organisation	Oui	Non
Multifonctionnalité	Oui	Rarement
Organisation pertinente depuis les sous-systèmes vers le système	Oui	Parfois
En interaction active avec son environnement	Oui	Souvent mais limitée
Interaction interne entre les sous-systèmes	Oui	Parfois
Autorégulation	Oui	Rarement
Facilement dégradable	Oui	Rarement
Autonome et résilient	Oui	Rarement
Utilise des sources énergétiques locales et renouvelables	Oui	Très rarement

Fig. 1-8. « Comparaison des processus de génération de solutions biologiques et techniques ». Tableau réalisé sur la base de celui de Eliot Graeff.

Reference Fig.1-8²²

²¹ [Michael Pawlyn – Biomimétisme et architecture – page 107](#)

²² [Eliot Graeff. innovation bio-inspirée : modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomiméticien. Biotechnologie. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE027 . tel-02951019 - page 74](#)

1.3 - Le biomimétisme

Les champs sémantiques du biomimétisme

Comment pouvons-nous utiliser les connaissances issues des sciences de la vie pour mieux résoudre les problèmes liés à notre environnement bâti ?

La réponse pourrait bien être dans le principe d'imitation de la nature : le biomimétisme.

En effet, en 3,8 milliards d'années, les systèmes vivants ont développé des solutions évolutives et résilientes pour s'adapter à l'environnement changeant sur terre. Le biomimétisme nous invite à bénéficier de l'exceptionnel laboratoire de recherche et développement qu'est la nature.

Le biomimétisme vient des mots grecs « bios » et « mímêsis » qui signifient respectivement « vie » et « imitation ». Le biomimétisme, c'est donc « l'imitation de la vie ».²³

Avant d'aller plus loin, nous donnerons quelques précisions sémantiques concernant la bio-inspiration, la bionique, la biomimétique et le biomimétisme. Ces définitions sont basées sur la norme ISO 18458 de 2015 ; qui fournit un cadre pour la terminologie concernant la biomimétique à des fins scientifiques, industrielles et éducatives.²⁴

« La bio-inspiration : Approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques.»

« La bionique : discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques.»

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

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

Dans un souci de clarification, nous ajouterons la définition du biomorphisme.

Le biomorphisme: Définit les caractéristiques d'une œuvre d'art dont les formes sont empruntées à la nature, à l'univers organique, et qui est représentée de façon simplifiée.

A ce titre les créations architecturales aux formes courbes et organiques relèvent du biomorphisme, sans pour autant être du biomimétisme.

Etant donné que le sujet de notre mémoire concerne les enveloppes du bâtiment, nous choisirons l'approche pragmatique de la biomimétique comme méthodologie de résolution des problématiques anthropocentrées, appliquées à l'enveloppe du bâtiment. Il n'en demeure pas moins évident que, par nos convictions personnelles et dans le cadre de notre formation du D.U Construire Eco-responsable, notre démarche de fond demeure celle du biomimétisme en tant que philosophie contributrice aux solutions de développement durable et donc soutenables pour notre planète.

Une brève histoire du biomimétisme

Il nous paraît difficile de dater le moment à partir duquel l'homme s'est mis à imiter la nature.

L'expression grecque, « ars imitatur naturam, » (L'art imite la nature), nous en dit long sur le rapport de l'homme à la nature. Aristote, en utilisant le terme grec « technè » pour désigner l'art, met en

²³ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biomim%C3%A9tisme>

²⁴ <https://www.iso.org/fr/standard/62500.html>

exergue l'aspect « technique productrice » de l'action humaine sur la nature. De ce fait, l'homme observe la nature et l'imité pour « achever ce que la nature n'a pas pu mener à bien ».²⁵

Un exemple de l'imitation de la nature par l'homme est celui de Léonard de Vinci.

Durant la Renaissance italienne, Léonard de Vinci dans l'optique de fabriquer la machine volante pensa à équiper une personne d'ailes articulées comme les oiseaux. Pour ce faire, il étudia l'anatomie des oiseaux et des chauve-souris qu'il transposa en croquis adaptés à l'homme. Se rendant compte que les bras humains étaient trop faibles pour voler, il poursuivit ses recherches vers la solution d'ailes fixes : le planneur.

Bien que ses recherches restèrent théoriques sous forme de croquis, le travail accompli par Léonard de Vinci inspire encore de nos jours de nombreux chercheurs.

A la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle, l'Art Nouveau est fortement inspiré des formes naturelles. Les formes et couleurs véhiculées par ce mouvement artistique viennent des végétaux, des animaux et des insectes.

En tant que maître de l'Art Nouveau, Antoni Gaudí, dès 1882, s'est inspiré de la nature pour la construction de la Sagrada Família. Les piliers de la basilique sont des imitations de troncs d'arbres. Les formes sont organiques et sinueuses comme dans la nature. Cette démarche d'architecture bio-inspirée qui relève d'avantage du biomorphisme annoncera l'intérêt esthétique et symbolique des formes de la nature en architecture.

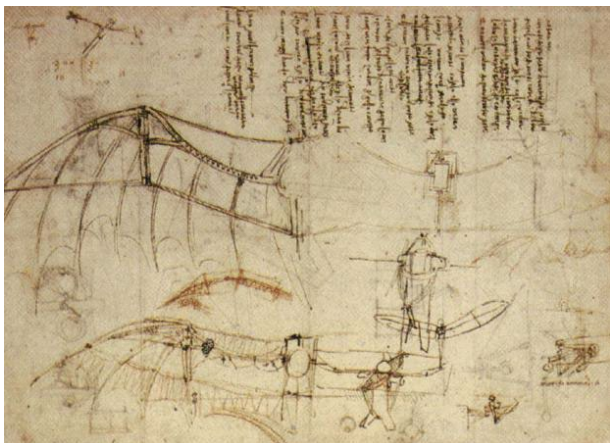


Fig. 1-9. « Profils d'ailes pour machine à voilures fixes » par Léonard de Vinci, vers 1488.

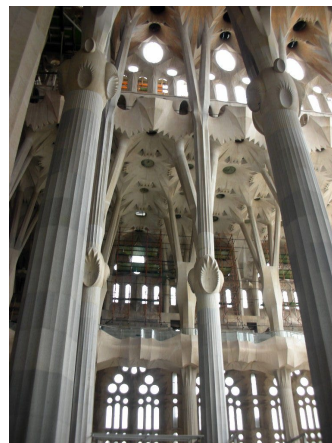


Fig. 1-10. « Colonnes hélicoïdales de la Sagrada Família » par Antoni Gaudí .

Références Fig. 1-9²⁶ et Fig. 1-10²⁷

Au cours du XIXe siècle, des disciplines comme l'aéronautique, l'ingénierie mécanique et électronique, l'ingénierie navale, l'ingénierie automobile s'inspirent du vivant.

Dès 1960, l'expression « bionique » fut utilisée pour la première fois par le prothésiste Dr Jack E.²⁸

Au milieu du XXe siècle, la nécessité de transférer les connaissances issues de la biologie vers la technologie et l'innovation a favorisé l'émergence du biomimétisme.

²⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/L%27art_imite_la_nature

²⁶ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo_Design_for_a_Flying_Machine,_c._1488.jpg?uselang=fr

²⁷ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sagrada_Familia_Interior.jpg?uselang=fr

²⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Jack_E._Steele

En 1997, Janine Benyus publie « *Biomimicry : innovation inspired by nature* » (*biomimétisme : quand la nature inspire des innovations durables*). Cet ouvrage fondateur du biomimétisme moderne, va déclencher une prise de conscience internationale sur le potentiel de la nature comme enseignant universel au profit du développement durable.²⁹

L'Institut du Monde Arabe, achevé en 1987, conçu par l'architecte Jean Nouvel et Architecture Studio est un exemple d'une application du biomimétisme sur l'enveloppe du bâtiment. En effet, le pare-soleil de la façade Sud du bâtiment est basé sur un mécanisme qui imite le fonctionnement de l'œil humain. Le pare-soleil est fait de moucharabiehs métalliques réagissant à la lumière comme l'iris à la luminosité. Les moucharabiehs métalliques sont constitués de diaphragmes sensibles à la lumière dont ils contrôlent la quantité pénétrant dans le bâtiment selon les conditions météorologiques.

Les moucharabiehs, éléments vernaculaires de l'architecture décorative de culture islamique, animent la façade en changeant de formes jusqu'à dix-huit fois par jour grâce aux senseurs photosensibles. Les formes sont tantôt circulaires, octogonales ou quadrangulaires créant ainsi un mouvement poétique qui allie fonctionnalité et esthétique de la façade.



Fig. 1-11. Façade de l'Institut du monde arabe, conçu par l'architecte Jean Nouvel et Architecture Studio

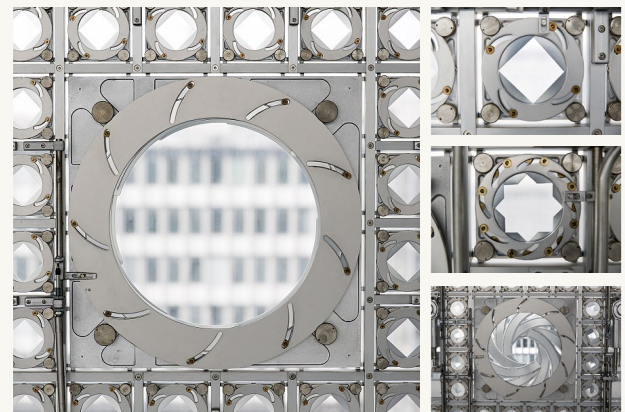


Fig. 1-12. Les moucharabiehs métalliques animent la façade en changeant de formes jusqu'à dix-huit fois par jour grâce aux senseurs photosensibles.

Références Fig. 1-11³⁰ et Fig. 1-12³¹

Le biomimétisme touche différentes industries dont la chimie, l'énergie, les transports, la santé & le biomédical, l'information & la communication, la cosmétique, l'économie circulaire, l'agroalimentaire, le bâtiment, les matériaux, l'aéronautique & le spatial.

Dans ces domaines les innovations issues du biomimétisme sont nombreuses.

En aéronautique, les « winglets » des avions sont inspirés par le positionnement des rémiges primaires des rapaces. Par leur forme et leur position sur les ailes des avions les « winglets » (pennes ou ailerettes en français) permettent d'augmenter l'autonomie des avions. C'est le cas en 1985 du Boeing B-747-400, nouvelle version de B-747, qui grâce à l'ajout de « winglets » augmente son autonomie de 3,5%.³²

Dans l'industrie textile, le scratch est la première colle sèche bio-inspirée.

²⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Janine_Benyus#Biomimicry

³⁰ <https://gtc.hypotheses.org/12155>

³¹ <https://www.imarabe.org/fr/architecture>

³² <https://fr.slideshare.net/alainrenaudin7/biomimreview-newcorp-conseil-ceebios-060215>

Le VELCRO® a été développé par l'ingénieur suisse Georges de Mestral (1907-1990) à partir de l'observation de fruits de bardanes agrippés au pelage de son chien à la suite d'une balade en forêt.

Les bardanes comportent de minuscules hameçons qui s'accrochent facilement aux vêtements et au pelage des animaux. Après 10 ans de recherche avec l'Institut Textile de France, Georges de Mestral met au point le **VELCRO®**, deux bandes de tissus composés respectivement de **velours** et de **crochets**.



Fig. 1-13. Inspiré du principe des fruits de bardanes qui s'accrochent aux tissus, le Velcro® est fait de deux bandes de tissus composés respectivement de velours et de crochets.

Sans multiplier les exemples, nous réalisons que le potentiel d'application du biomimétisme est important. Selon le Ceebios (Centre d'études et d'expertise en biomimétisme), le biomimétisme pourrait répondre à au moins 9 des 17 objectifs mondiaux du développement durable défini par l'ONU.³³

³³ <https://ceebios.com/2018/07/28/parution-de-letat-des-lieux-du-biomimetisme-en-france-2018/>
Page 13

1.4 - La problématique

Nous avons défini d'une part, la notion de conception bioclimatique et développé le cadre de son application liée au climat et à l'environnement.

D'autre part, l'exploration des sciences du vivant nous a montré la grande complexité de ce domaine et les différences entre les systèmes vivants et ceux créés par l'homme.

Nous avons également défini le champ sémantique du biomimétisme ainsi que les notions connexes à ce concept. Dans ce cadre, nous avons privilégié une approche basée sur la biomimétique pour notre étude, car la biomimétique fait le pont entre les enseignements tirés des sciences de la vie et leurs potentiels applications anthropocentrées.

D'après le développement fait au 1-1, nous saisissons que dans la conception bioclimatique du bâtiment, l'optimisation des performances de l'enveloppe joue un rôle capital.

Ce constat annonce donc la problématique de notre mémoire ; laquelle problématique est formulée comme suit :

- **Les solutions biomimétiques des enveloppes du bâtiment sont-elles utiles à la conception bioclimatique ?**

Pour répondre à cette problématique, nous partirons de deux hypothèses :

Hypothèse 1

« Il existe des outils biomimétiques permettant de transposer les solutions développées par le vivant, pour s'adapter à l'évolution sur terre, vers des innovations anthropocentrées. »

Hypothèse 2

« Il est possible, à partir d'exemples existants, de montrer que la biomimétique peut aider à la conception des enveloppes de bâtiments bioclimatiques. »

Chapitre 2 - DES SCIENCES DU VIVANT AUX SOLUTIONS ARCHITECTURALES

Dans ce chapitre, nous ferons un aperçu des méthodes de transfert des connaissances des sciences du vivant vers les sciences de la conception ; avec un focus sur la biomimétique appliquée aux enveloppes du bâtiment.

2.1 - Un aperçu des méthodes de transfert des connaissances du vivant vers les sciences de la conception

En nous appuyant sur notre première hypothèse, nous explorerons les différentes pistes de transfert des connaissances du monde vivant vers les solutions et innovations anthropocentrées.

Hypothèse 1

« Il existe des outils biomimétiques permettant de transposer les solutions développées par le vivant, pour s'adapter à l'évolution sur terre, vers des innovations anthropocentrées. »

Comment partir des sciences de la vie ou sciences du vivant pour aboutir à des innovations technologiques ?

La réponse à cette question passe par la définition du cadre théorique et méthodologique qui régit le transfert des connaissances bio-inspirées. La norme ISO/TC 266 donne le cadre des méthodes et technologies utilisées en biomimétique.

Deux approches théoriques sont identifiées en biomimétique : l'approche « biology push » et celle « technology pull ».

L'approche « biology push » consiste à identifier une fonction du vivant ayant des propriétés spécifiques et présentant un avantage pour son application technologique. Les principes sous-jacents de la fonction identifiée sont extraits et rendus intelligibles pour en appliquer les principes en technologie. Cette approche est également qualifiée de « solution-based » [Badarnah et Kadri,

2015], de « biology to design » [Baumeister et al., 2013] ou de « bottom-up » [Speck et al., 2006]. A titre d'exemple, nous citerons l'entreprise Sharklet® qui a développé un film antibactérien par imitation de la peau du requin. En effet les denticules cutanés du requin le protègent des microorganismes qui pourraient le gêner. Le film antibactérien mis au point par Sharklet® en utilisant le même principe permet la diminution de 94% de la propagation de bactéries.³⁴

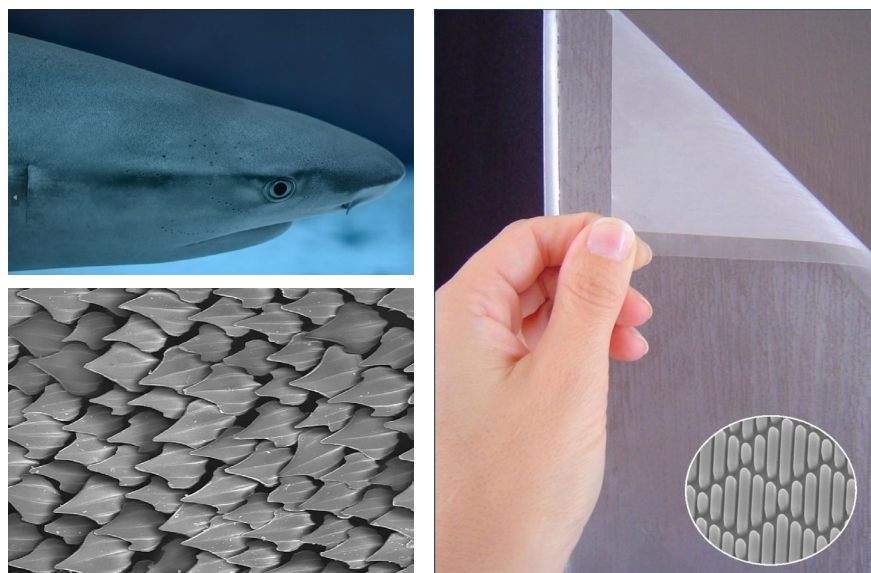


Fig. 2-1. Les denticules de la peau de requin ont inspiré l'entreprise Sharklet® pour le développement d'un film antibactérien. Ce film utilisé dans le milieu hospitalier permet la diminution de 94% de la propagation des bactéries.

³⁴ <https://fr.slideshare.net/alainrenaudin7/biomimreview-newcorp-conseil-ccbios-060215>

L'approche « biology push » s'apparente à de la recherche fondamentale qui demande des investissements à long terme. Elle est peu utilisée même si elle porte un grand potentiel d'innovation. Ainsi, l'entreprise Sharklet® a mis 30 ans pour peaufiner son film antibactérien.

L'approche « technology pull » part de l'identification d'un problème appartenant au domaine technologique. Une recherche effectuée dans le domaine biologique permet de retenir des solutions dont on fait l'abstraction puis le transfert vers l'application technologique. Cette approche est aussi qualifiée de « problem-driven ».

L'approche « technology pull » est adaptée aux contraintes économiques de l'industrie puisqu'elle part d'un problème clairement identifié à résoudre dans un délai raisonnable pour l'entreprise.

Biology push



Technology pull



Fig. 2-2. « Processus de design biomimétique – Biology push – Technology pull »

Graphique basé sur l'interprétation par Estelle Cruz de la norme ISO standard 2015:18458.

Traduit de l'anglais au français par Vermont ALLADAYE

Référence Fig. 2-2³⁵

Il existe de nombreux outils biomimétiques développés à partir de l'approche « problem-driven ».

Les plus utilisés sont AskNature, Biomimicry 3.8, Functional modeling, Natural language analysis, IDEA-Inspire software, SAPPHERE model, TRIZ et BioTRIZ.

Dans l'optique de synthétiser les outils biomimétiques, Pierre-Emmanuel Fayemi, dans sa thèse « Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances », recense cinquante-trois outils biomimétiques qui illustrent bien « l'état d'un développement épars de la bio inspiration ».

En effet, les experts de la biomimétique travaillent souvent en silo sans nécessairement tenir compte de l'état de l'art des travaux déjà réalisés.

³⁵ [Design processes and multi-regulation of biomimetic building skins: A comparative analysis - ScienceDirect](#)
Page 2 – Figure 1

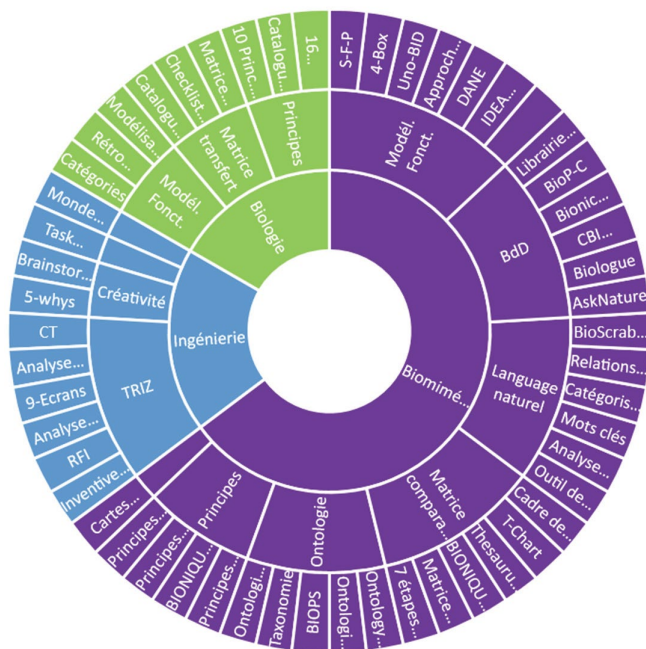


Fig. 2-3. « Représentation synthétique des outils biomimétiques »
Graphique par Pierre-Emmanuel Fayemi - 2016

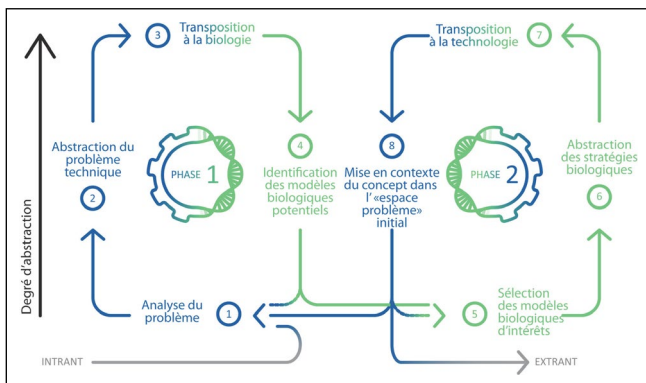


Fig. 2-4. « Modèle de processus biomimétique problem-driven unifié »
Graphique de Pierre-Emmanuel Fayemi - 2016

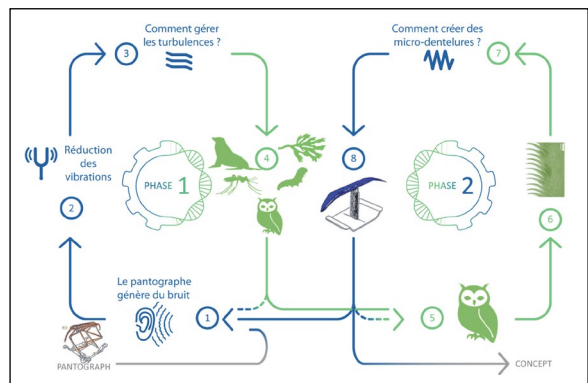


Fig. 2-5. « Modèle de processus biomimétique problem-driven unifié appliqué au shinkansen »
Graphique de Pierre-Emmanuel Fayemi - 2016

Références : Fig. 2-3, Fig. 2-4, Fig. 2-5³⁶

³⁶ Pierre-Emmanuel Fayemi. Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0062. tel-01531185
Pages 140,158 et 160

Afin de donner une réponse à la question du travail en silo des experts, un processus biomimétique « problem-driven » unifié ou « technology-pull » unifié, permettrait de guider la démarche biomimétique.

Cette solution a été développée par Fayemi sous la forme d'un modèle récapitulatif qui « *n'ambitionne aucunement de constituer un nouveau modèle de processus en soi, mais doit plutôt être perçu comme un instrument à même de faire converger les modèles de processus biomimétiques* ».

Le Shinkansen est un train japonais à grande vitesse reliant Osaka et Hakata. Ce train trouvait sa vitesse réduite lors de la traversée de nombreux tunnels qui occasionnait un bruit de nuisance pour le voisinage. Pour résoudre les problèmes du train, les chercheurs ont étudié l'ergonomie du bec et de la tête du martin-pêcheur. En effet, par sa forme fuselée, le martin-pêcheur passe de l'air à l'eau en limitant les perturbations liées à la trainée aérodynamique et hydrodynamique. Il peut ainsi saisir sa proie sans l'alerter lorsqu'il rentre dans l'eau.

Les ingénieurs du Shinkansen en s'inspirant de l'ergonomie du martin-pêcheur ont façonné le train de telle sorte que avec -15% d'électricité, le train est passé d'une vitesse maximale de 210 km/h à 320km/h en réduisant sensiblement les problèmes sonores aux entrées et sorties des tunnels.

L'exemple du Shinkansen illustre bien l'aspect « technology-pull » de la biomimétique.

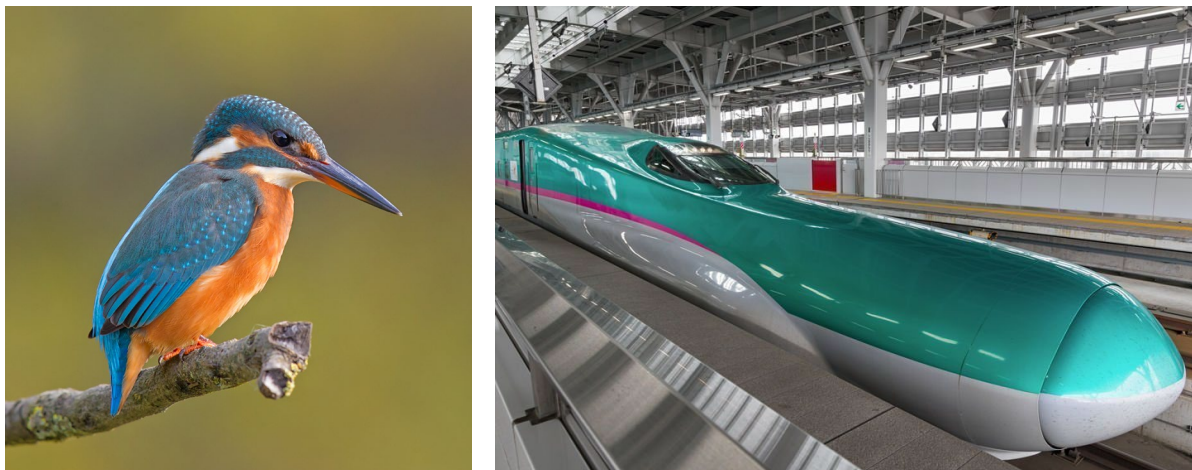


Fig. 2-6. Le Shinkansen, train japonais à grande vitesse est bio-inspiré du bec et de la tête du martin-pêcheur. Résultat surprenant de cette approche biomimétique, le Shinkansen avec -15% d'électricité est passé d'une vitesse maximale de 210 km/h à 320km/h en réduisant sensiblement les problèmes sonores aux entrées et sorties des tunnels.

En synthèse, Fayemi propose une solution « technology-pull » unifiée sous la forme d'un arbre de classification des outils biomimétiques appelé BiomimTree.³⁷

³⁷ Pierre-Emmanuel Fayemi. Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0062. tel-01531185
Page 187 - Figure 4.17 - L'Arbre de classification biomimétique (Problem-driven) – BiomimTree

BiomimeTree: L'arbre de classification des outils biomimétiques

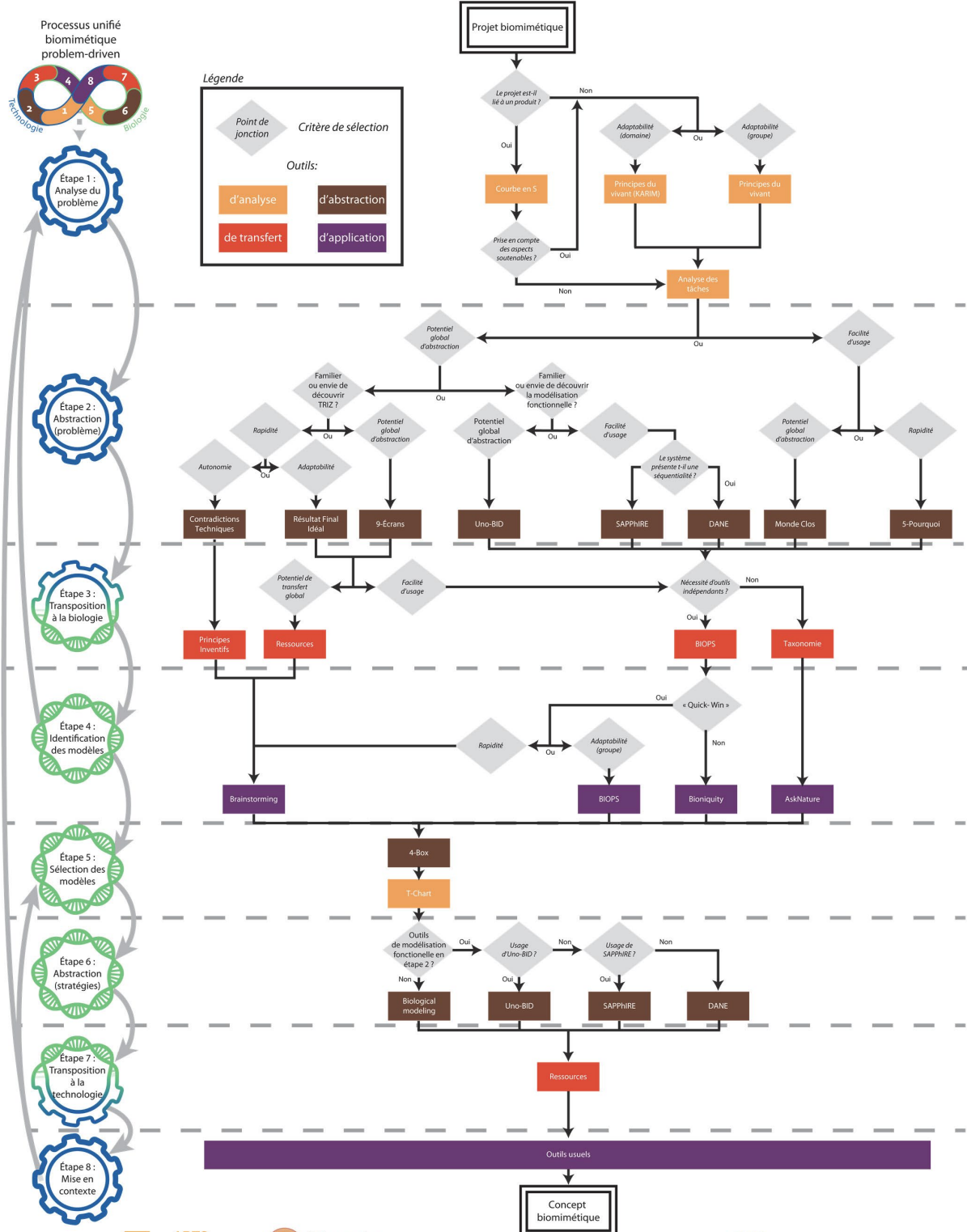


Fig. 2-7. « L'Arbre de classification biomimétique (Problem-driven) – BiomimeTree »
Graphique de Pierre-Emmanuel Fayemi - 2016

2.2 - Les outils biomimétiques pour l'architecture : le cas des enveloppes du bâtiment

Qu'en est-il de l'application des outils biomimétiques à l'architecture ?

En 2006, Maibritt Pedersen Zari a développé un cadre méthodologique permettant d'identifier les principes de conception issus du vivant pour les transposer en architecture et en urbanisme. Ces principes concernent trois niveaux : l'organisme, le comportement et l'écosystème.

- L'étude d'un organisme végétal ou animal permet d'en abstraire une fonction
- A partir du comportement d'un organisme, il est possible d'en tirer des principes applicables en architecture
- L'écosystème est un « ensemble formé par une communauté d'êtres vivants en interaction (biocénose) avec leur environnement (biotope) »³⁸. On peut étudier et s'inspirer des échanges d'énergie, de matière et d'information à l'intérieur d'un écosystème et le transposer au domaine de l'architecture ou de l'urbanisme

En 2012, Lidia Bardanah Kadri développe une méthodologie pour la conception d'enveloppe adaptative du bâtiment. Cette méthodologie est faite d'une phase de design préliminaire et d'une phase d'émulation.³⁹

Dans son article "*Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation*" de 2017, Lidia Badarnah indique que la pratique de la biomimétique implique la participation de différentes disciplines sur la base de trois priorités: *le problème, la nature et la solution*. Le processus d'innovation consiste à : identifier le problème ; explorer les systèmes naturels ; extraire les principes utiles aux fonctions recherchées ; analyser les stratégies et les principes ; faire une abstraction des stratégies ; transférer les stratégies en concept design ; évaluer et valider la solution ; appliquer et résoudre le problème.

La résolution du problème passe par l'identification de la fonction et de la morphologie comme éléments clés de transition entre le problème, la nature et la solution.

³⁸ <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cosyst%C3%A8me>

³⁹ Lidia Bardanah - Towards the LIVING envelope - Biomimetics for building envelope adaptation- 2012 page 43 à 47
The living envelop methodology - Figure 3.2 - Flow chart of the design methodology presenting the various phases to be addressed in order to design the living envelope

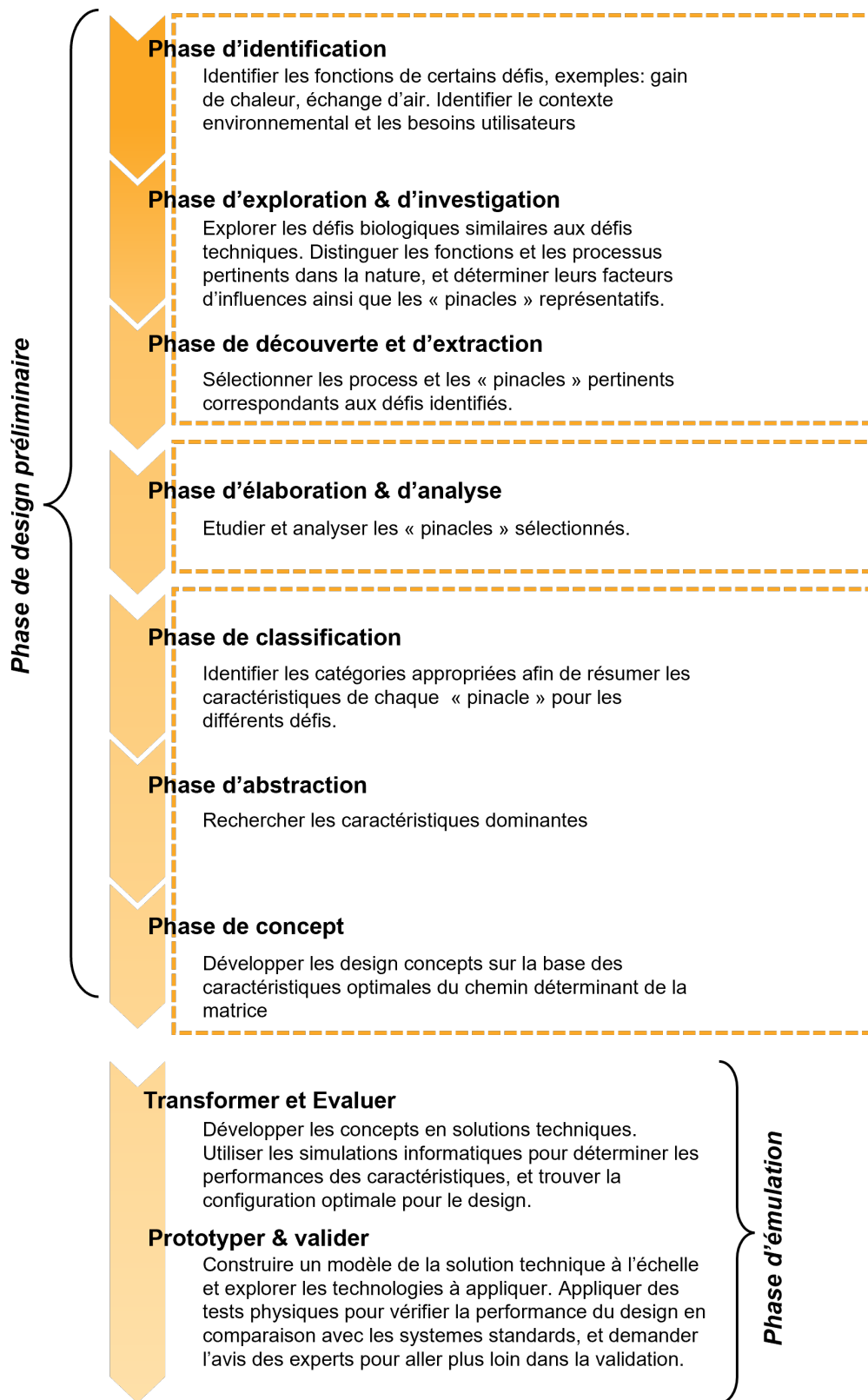


Fig. 2-8. « Principes méthodologique du design applicable aux enveloppes du bâtiment »
Graphique de Lidia Bardanah- 2012 – page 46 - Traduit de l'anglais au français par Vermont ALLADAYE

Référence : Fig. 2-8⁴⁰

⁴⁰ Lidia Bardanah , Towards the LIVING envelope. Biomimetics for building envelope adaptation, Printed by Wöhrmann Print Service B.V. Zutphen, The Netherlands, , 2012 p.46

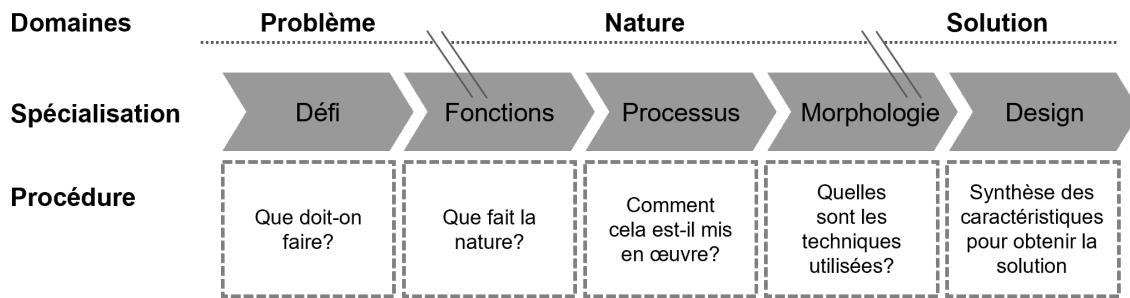


Fig. 2-9. Les domaines du processus du design biomimétique.

Graphique de Lidia Bardanah – 2017 - Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation

Traduit de l'anglais au français par Vermont ALLADAYE

Références : Fig. 2-9, 2-10, 2-11⁴¹ Les systèmes naturels sont soumis à des facteurs environnementaux extérieurs tels que l'air, la chaleur, le froid, l'eau et la lumière ; comme le sont les enveloppes des bâtiments. Le tableau suivant montre les points de convergence entre les défis des bâtiments et ceux environnementaux.

Défis environnementaux	Chaleur	Air	Eau	Lumière
Bâtiments	Confort thermique Energie	Survie Apport en oxygène Apport en CO2 Refroidissement Ventilation	Déshumidification /humidification Refroidissement Apports Pertes Distribution	Lumière de jour Confort visuel Energie
Nature	Survie Thermorégulation Reproduction	Survie Apport en oxygène Apport en CO2 Refroidissement Ventilation	Survie Thermorégulation Réactions chimiques	Survie Photosynthèse Vision Communication
Convergences fonctionnelles	Prendre Retenir Dissiper Empêcher	Echanges Déplacement	Prendre Conserver Transporter	Filtrer Illuminer Exploiter

Fig. 2-10. Les points de convergence entre les défis des bâtiments et ceux environnementaux

Graphique de Lidia Bardanah – 2017

Traduit de l'anglais au français par Vermont ALLADAYE

Pour se protéger de ces facteurs environnementaux, les organes, organismes et systèmes vivants utilisent leurs enveloppes comme des filtres ne laissant passer que ce qui est utile aux fonctions de survie ; ces enveloppes étant structurellement conçues pour lesdites fonctions.

Ci-dessous (Fig. 2-11), une synthèse proposée par Bardanah sur quelques principes clés des applications biomimétiques pour les enveloppes du bâtiment, tirés des enseignements de la nature.

⁴¹ Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation (p.6, p.7, p10)

<https://www.mdpi.com/2075-5309/7/2/40>

Morphologie	Process	Mécanisme	Applications
Rides	Evaporation ● ● Reflection ● ● Convection ● ●	Les rides de la peau de l'éléphant offrent une surface suffisante pour contenir l'humidité et favoriser l'évaporation. En outre, ces rides créent des zones ombrées qui réduisent les pics de chaleur et génèrent des courants convectifs pour favoriser la perte de chaleur.	Refroidissement externe de bardage
Hexagones	Ecoulement ● Condensation ● Interception ●	Chez le lézard, le tégument (peau et écailles) est composé de micro-structures hexagonales qui diminuent considérablement l'angle de contact. Cela se traduit par une surface super-hydrophile qui crée un modèle optimal d'écoulement capillaire. Par ailleurs, l'application d'un réseau hexagonal de facettes sur un plan sphérique améliore l'interception de la lumière.	Humidification et récupération de la lumière
Pointes	Condensation ●	Les plantes qui absorbent l'eau du brouillard, développent des pointes en forme de rosette. Ces feuilles créent une fine couche de surface qui améliore la collecte de l'eau du brouillard	Récupération de l'humidité
Boutons	Condensation ●	Les fils de soie de la toile d'araignée sont au niveau nanométrique composés de boutons qui attirent l'eau de l'air humide	
Rainures	Transport ● Convection ● ● Réduction de l'irradiation ● ●	Les structures de surface des feuilles permettent à l'herbe endémique du désert de Namibie (<i>Stipagrostis sabulicola</i>) de s'arroser avec de l'eau de brouillard. Les grandes rainures des termitières améliorent la dissipation de la chaleur, la ventilation par convection et la création de zones ombragées.	Arrosage, ventilation et dissipation de la chaleur
Capillaires	Transport ● Diffusion ●	Chez le lézard du désert, la disposition spéciale des écailles du tégument crée des micro-canaux (un système capillaire semi-tubulaire) sur la surface du corps pour transporter l'eau via les forces capillaires.	Transport de l'eau
Fractal	Ecoulement ● ● Transport ● ● Diffusion ● ● Interception ● Reflection ●	La disposition fractale des systèmes vasculaires d'écoulement des fluides dans les organismes est éco-énergétique. Le réseau fractal de boucles imbriquées des feuilles des arbres permet le transport optimal des fluides, même en cas de dommages. Les graines des fleurs de tournesol sont arrangées de manière fractale suivant la séquence de Fibonacci qui maximise l'interception lumineuse. La nanostructure fractale des écailles des ailes du papillon Morpho est très réfléchissante à la lumière.	Exploitation de la lumière, protection contre la lumière et efficacité des systèmes de transport.
Lamelles	Réflexion ● Absorption ●	Les ailes du papillon Morpho sont faites de crêtes étroites et garnies de lamelles horizontales et de micro-nervures qui reflètent fortement certaines longueurs d'onde. Les variations d'épaisseur des crêtes peuvent entraîner 96 % d'absorption du rayonnement solaire.	Contrôle de la lumière et génération d'énergie
Pores	Evaporation ● ● Diffusion ● ●	De petits pores à la surface de la peau de la rainette (grenouille) permettent une diffusion directe de l'eau condensée, et la perte d'humidité en réponse aux demandes de thermorégulation	Humidification et refroidissement
Trichomes (Appendices)	Reflexion ● ● Déviation ● ● Condensation ●	Sur la peau du séneçon argenté, Les trichomes, fibres microscopiques, renforcent l'hydrophobie et diffusent la lumière pour une réduction de la lumière incidente à l'interface	Réduire les charges thermiques et récolter l'humidité
Monticules et entonnoirs	Ecoulement ● Dégradé de vitesse ●	Les monticules et les entonnoirs du terrier du chien de prairie génèrent des gradients de vitesse à la surface du sol qui entraînent un dégradé de pression pour la ventilation des terriers.	Ventilation

● Chaleur ● Air ● Eau ● Lumière

Fig. 2-11. Les morphologies, process, mécanismes et applications sur l'enveloppe du bâtiment.
Graphique de Lidia Bardanah – 2017

Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation
Traduit de l'anglais au français par Vermont ALLADAYE

Pour finir, Bardanah, à travers le tableau de synthèse Fig.2-12, indique que pour le vivant, les systèmes sont multifonctionnels. Les systèmes naturels déploient des techniques extraordinaires pour venir à bout des difficultés qu'ils rencontrent. Par leur adaptation morphologique, les systèmes naturels développent des interfaces multifonctionnelles pour réguler l'eau, l'air, la chaleur et la lumière.

Il nous paraît alors capital de mentionner que la morphologie joue un rôle important dans la stratégie d'adaptation des enveloppes du bâtiment à leur environnement.

Au regard des investigations menées, nous réalisons qu'il existe bien des outils de transcriptions des solutions développées par le vivant, vers les sciences anthropocentrées ; et notamment vers l'architecture. Néanmoins, sans réelle motivation de la part des concepteurs et des architectes, ces connaissances restent difficiles d'accès car nécessitant une acculturation aux sciences du vivant.

Nous retiendrons ici les apports concrets de Fayemi pour ce qui est de la méthodologie générale de la biomimétique ; et ceux de Bardanah et Cruz quant à aux méthodologies concernant les enveloppes du bâtiment.

Fonctions	Chaleur				Air		Eau				Lumière		
	Prendre	Retenir	Dissiper	Empêcher	Echanger	Déplacer	Prendre	Conserver	Transporter	Perdre	Filtrer	Illuminer	Exploitation
Pinnacles													
Termitières	--	+	+	--	+	+	--	--	--	--	--	--	+
Terrier de chien de prairie	--	--	+	--	+	+	--	--	--	--	--	--	--
Veines/vaisseaux sanguins	+	+	+	+	+	+	--	--	+	--	--	--	--
Peau humaine	--	+	+	--	--	--	--	--	--	+	--	--	--
Ecailles de scinque	--	--	--	+	--	--	--	+	--	--	+	--	--
Peau d'éléphant	--	--	+	+	--	--	--	--	--	+	--	--	--

Fig. 2-12. Exemples d'application multifonctionnelles des systèmes naturels
Graphique de Lidia Bardanah – 2017

Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation
Traduit de l'anglais au français par Vermont ALLADAYE

Référence Fig. 2-12⁴²

⁴² [Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation \(p10\)](https://www.mdpi.com/2075-5309/7/2/40)
<https://www.mdpi.com/2075-5309/7/2/40>

Chapitre 3 - LES FONCTIONS BIOCLIMATIQUES DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT ET LES APPORTS DE LA BIOMIMETIQUE

Dans ce chapitre nous abordons à travers quelques exemples les solutions biomimétiques des enveloppes des bâtiments bioclimatiques. En nous appuyant sur l'hypothèse 2, nous explorerons les questions de morphologie, de transparence, de porosité et de solarisation de l'enveloppe du bâtiment comme éléments importants de l'alphabet bioclimatique.

En préambule, nous souhaitons aborder la question du choix des exemples de projets architecturaux bioclimatiques.

Les exemples des projets bioclimatiques sont proposés sur la base d'informations générales obtenues à travers nos recherches documentaires. Ces informations ne s'inscrivent pas dans le cadre d'une étude de données quantitatives concernant les indicateurs et coefficients bioclimatiques desdits projets.

Il n'en demeure pas moins vrai que les informations obtenues nous ont permis de classer les projets choisis dans la catégorie de projets prenant en compte le climat et l'environnement dans leur approche conceptuelle ainsi que dans leur mise en œuvre.

Hypothèse 2

« Il est possible, à partir d'exemples existants, de montrer que la biomimétique peut aider à la conception des enveloppes de bâtiments bioclimatiques. »

3.1 - Enveloppe et conception bioclimatique

Nous avons précédemment (voir 1-1) rappelé les principes de la conception bioclimatique et mentionné l'importance de l'enveloppe du bâtiment. Cette enveloppe assure les fonctions de solarisation, de transparence, de porosité, d'isolation et d'inertie. Par sa nature, l'enveloppe suit la morphologie du bâtiment et hérite de ce fait des caractéristiques de son insertion dans l'environnement climatique.

Ainsi la forme et les fonctions de l'enveloppe du bâtiment sont étroitement liées et sont influencées par l'environnement.

Cette caractéristique d'adaptation morphologique du bâtiment à son environnement a été mise en avant par Bardanah, comme étant une des stratégies du vivant face à l'évolution.

L'église de Nianing : une tour bioclimatique

Prenons l'exemple de l'église de l'Epiphanie de Nianing au Sénégal.

Ce projet conçu par IN SITU Architecture, a obtenu plusieurs prix et distinctions dont *l'Architecture Masterprize* et le *Global Architecture and Design Award* en 2019.

Situé à une centaine de kilomètres au Sud de Dakar, l'église de Nianing a été construite dans un environnement au climat chaud et sec, avec une température moyenne de 27°C.

La démarche de conception est visiblement bioclimatique. En effet, le choix a été fait de ne pas installer de climatisation et d'utiliser la ventilation passive naturelle. La forme du bâtiment est inspiré du cymbium, coquillage local en forme de spirale. « Cette forme a été ensuite architecturée selon les contraintes constructives du programme et selon une orientation bioclimatique optimale »⁴³

Pour se protéger du soleil et de l'harmattan qui est un vent désertique du Sahara, l'édifice est fermé au Nord et au Sud. Il est cependant ouvert à l'Ouest pour bénéficier de la fraîcheur des alizés, par une cascade de sept voutes et d'un clocher culminant à 45 mètres, faisant office de « cheminée de ventilation ».

C'est en associant la forme de l'édifice et la maîtrise des fonctions de porosité que IN SITU Architecture fait la liaison entre conception bioclimatique et l'inspiration biomimétique. La mise en place de la ventilation passive naturelle est rendue possible en s'inspirant de la forme et du fonctionnement des termitières africaines présentes à quelques centaines de mètres de l'édifice.

En effet, les termites ont adapté leurs constructions aux zones chaudes où la température diurne s'élève à 50°C et celle nocturne descend à 0°C. Malgré ces écarts importants, les termites arrivent grâce à un système de ventilation ingénieux et efficace à maintenir une température constante de 27°C à l'intérieur de la termitière. Les principes fonctionnels des termitières, véritables tours bioclimatiques, sont dans ce projet transposés grâce à la biomimétique au domaine du bâtiment passif.

Ainsi, l'église de Nianing fonctionne comme une grande termitière. Durant la journée, l'air frais des alizés traverse l'édifice en entrant par le bas. Cet air se réchauffe, monte et est évacué par la cheminée. Durant la nuit, la cheminée capte l'air frais marin qui redescend dans l'édifice en le rafraichissant pour le confort thermique des usagers diurnes.

References Fig. 3-1, Fig.3-2, Fig.33, Fig.3-4, Fig.3-5

⁴³ <http://www.insitu-architecture.net/fr/projets/12393-nianing.html>



Fig. 3-1. L'église de Nianing au Sénégal est un bel exemple de la liaison entre conception bioclimatique et abstraction du fonctionnement de la termitière africaine, grâce à la biomimétique. Projet par IN SITU Architecture - 2019

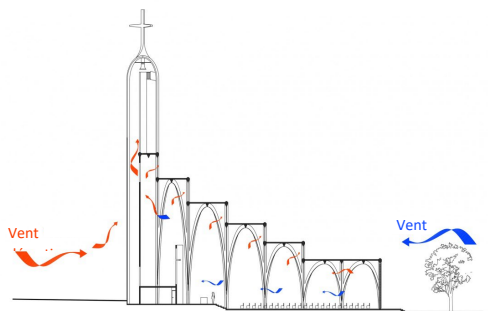


Fig. 3-2. L'église de Nianing au Sénégal
Convection naturelle durant la journée
Projet par IN SITU Architecture - 2019

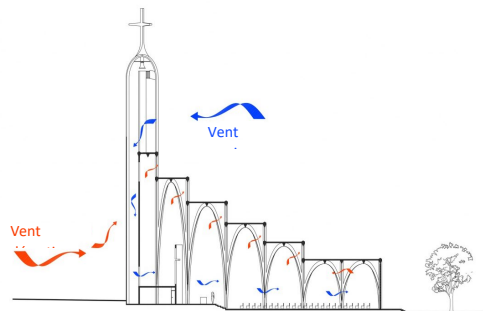


Fig. 3-3. L'église de Nianing au Sénégal
Convection naturelle durant la journée
Projet par IN SITU Architecture - 2019



Fig. 3-4. Une termitière africaine

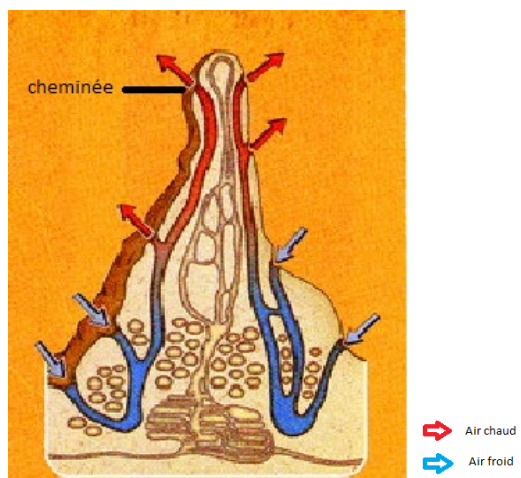


Fig. 3-5. Coupe de principe d'une termitière avec schéma d'auto-régulation thermique

La forme de l'enveloppe au service de la fonction

Une brève analyse du projet de l'église de Nianing nous indique que le parti pris de conception bioclimatique est de se servir de la morphologie du bâtiment pour atteindre les performances de confort d'été.

En effet, en agissant sur la forme de l'enveloppe, sur les ouvertures et donc sur la porosité à l'air du bâtiment ; IN SITU Architecture utilise la morphologie du bâtiment comme moyen de régulation thermique par la ventilation passive naturelle.

Dans cet exemple la biomimétique permet l'abstraction du principe de fonctionnement de la termitière vers une application concrète sur la l'enveloppe du bâtiment à travers sa morphologie ; mettant ainsi la forme de l'enveloppe au service de la fonction bioclimatique.

3.2 - Adaptation à la lumière et à la température pour le confort thermique et visuel

Est-il possible d'ajuster les ambiances intérieures d'un bâtiment en installant des enveloppes qui s'adaptent à la luminosité extérieure ?

Nous explorerons les réponses à cette question à travers l'exemple d'un bâtiment bioclimatique doté d'enveloppes adaptatives.

Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) : un bâtiment à l'enveloppe adaptative

Le nouveau siège du CIRC est un projet de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) portée par la Métropole de Lyon qui affirme son statut international avec un ouvrage emblématique sur la recherche scientifique.⁴⁴

Afin de réaliser le projet, un groupement a été créé. Il est composé de ArtBuild et Unanime pour l'architecture, Inddigo⁴⁵ pour la performance énergétique et environnementale, WSP pour l'ingénierie structurelle et technique, et Demathieu Bard pour les travaux⁴⁶. Cet ouvrage dont l'ouverture est prévue en 2022, est installé dans le bio-district de Lyon-Gerland à Lyon.

Dans le bâtiment d'une surface de planchers de 17 600 m² sur cinq étages, le programme est le suivant: la réception du public, l'administration, la recherche avec des zones classées L2 et L3, l'auditorium, la bibliothèque, les salles de réunion et la cafeteria, ainsi que la biobanque sécurisée en demi sous-sol.

L'ambition du projet est la réalisation d'un bâtiment sobre énergétiquement et qui prends en compte le bien-être de ses occupants avec la certification WELL.

En matière de conception bioclimatique, le choix a été fait de capter l'énergie solaire et de la rendre disponible par un dispositif de stockage par inertie, dispositif mis au point par WSP. A cela s'ajoute l'optimisation des systèmes de traitements des laboratoires permettant de récupérer 75% à 80% de l'énergie utilisée.

La toiture du bâtiment est végétalisée pour favoriser la biodiversité et pour réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain. Une belle part de la toiture est affectée à l'installation de panneaux photovoltaïques comme contribution énergétique naturelle.

⁴⁴ https://www.unanime.fr/files/73cd4706/brochure_circ_2018.pdf

⁴⁵ <https://www.inddigo.com/fr/actualites/circ-un-exemple-de-biomimetisme-applique-au-batiment-230/>

⁴⁶ <https://www.demathieu-bard.fr/actualites/centre-international-de-recherche-sur-le-cancer/>

Le biomimétisme structure ce projet. En effet, le bâtiment de forme carrée est percé en son centre par un cercle qui apporte de la lumière naturelle. Le cercle représente la cellule biologique, « autonome dans l'organisme mais en connexion permanente avec son environnement ». Cette distribution circulaire favorise les déplacements courts et les rencontres.

Dans ce projet, la biomimétique se met au service de la stratégie bioclimatique. Les façades périphériques à double peau de verre sont dotées de lames thermochromiques devenant opaques en cas de fortes chaleurs pour la protection du bâtiment et de ses occupants. Cette adaptation aux changements extérieurs s'effectue sans intervention humaine et à coût zéro. Cerise sur le gâteau, les verres thermochromiques en s'assombrissant, dessinent des arbres majestueux sur les façades avec un effet biophilique, telle une forêt protégeant de sa canopée les êtres vivants qui s'y abritent.

Pour finir, la cour intérieure est habillée de façades biomimétiques qui augmentent l'efficacité énergétique du bâtiment. Il s'agit du projet *Pho'liage*®.

L'objectif de cette recherche biomimétique basée sur l'approche « technology-pull » était de trouver une solution sobre pour protéger les façades vitrées de la chaleur en été tout en récupérant l'énergie produite par l'ensoleillement. Le laboratoire de recherche de ArtBuild Architect a développé un dispositif innovant en partant de l'observation de l'oxalide des bois ou oseille des bois (*Oxalis acetosella*) qui a la particularité de fermer ses feuilles et ses fleurs en cas de pluie et durant la nuit ou quand baisse la luminosité. La solution biomimétique s'est matérialisée sous la forme d'une lame en pétales se rétractant au froid et se dilatant à la chaleur, protégeant ainsi le bâtiment lors de fortes chaleurs. Ces pétales faites d'un alliage TBM (Thermostatic Bi Metal) à mémoire de forme est équipé d'un mécanisme de captation de l'énergie solaire grâce à des composants photovoltaïques. Les pétales *Pho'liage*® peuvent donc réagir et s'adapter aux changements des températures extérieures tout en tirant le meilleur parti par captation de l'énergie solaire.

L'exemple du projet *Pho'liage*® nous montre l'aspect multifonctionnel des enveloppes adaptatives du bâtiment issue d'une démarche biomimétique au service de la conception bioclimatique.



Fig. 3-6. Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a été conçu en s'inspirant de la cellule biologique représentée par le cercle de la cour intérieure du bâtiment. Une partie de l'enveloppe est faite de verres dotés de lames thermochromiques s'adaptant aux changements de la luminosité extérieure. La cour intérieure est habillée de façades biomimétiques qui augmentent l'efficacité énergétique du bâtiment avec la solution *Pho'liage*® qui protège les façades en récupérant de la chaleur. Architecture par ArtBuild et Unanime



Fig. 3-7. Cour intérieure du CIRC montrant une vue projetée de la façade Pho'liage®.

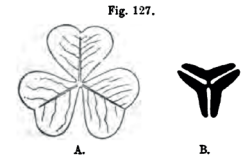


Fig. 127. *Oxalis acetosella*: A, leaf seen from vertically above; B, diagram of leaf asleep, also seen from vertically above.



Fig. 3-8. Le projet biomimétique Pho'liage® est une abstraction du principe de fonctionnement de l'oxalide des bois ou oseille des bois vers une solution de protection contre le rayonnement solaire et de récupération de l'énergie solaire.

Références Fig. 3-6⁴⁷, Fig.3-7, Fig.3-8⁴⁸

La polyvalence des solutions biomimétiques

Le projet du CIRC par les solutions d'enveloppes réactives à l'environnement extérieur, nous donne un exemple d'application de la biomimétique à l'échelle du bâtiment. Cette capacité de l'enveloppe à répondre aux stimuli extérieurs s'approche de la façon dont les systèmes vivants interagissent avec leur milieu.

Les solutions proposées ici, bien que d'une grande simplicité comparée aux systèmes vivants, mettent le doigt sur la polyvalence des réponses adaptatives des enveloppes du bâtiment. En contrôlant les quantités de lumière et de chaleur qui pénètrent dans le bâtiment, les solutions biomimétiques aident à atteindre un objectif bioclimatique de premier ordre : maîtriser la solarisation, la transparence et le confort thermique de façon naturelle.

Un des enseignements à tirer de l'exemple du CIRC à travers le projet Pho'liage®, c'est qu'il est possible de développer des solutions biomimétiques multifonctionnelles. Dans ce cas précis ; la protection contre le rayonnement solaire et la récupération d'énergie solaire. Une imitation de la polyvalence des solutions développées par les systèmes vivants pour s'adapter à l'évolution.

⁴⁷ <https://www.unanime.fr/projets/centre-de-recherche-international-sur-le-cancer>

⁴⁸ <https://www.artbuild.com/lab/pholiage>

3.3 - L'air et l'eau : des facteurs déclencheurs

L'humidité ambiante peut-elle faire réagir nos bâtiments ?

La biomimétique en accompagnant la démarche bioclimatique peut nous réserver des innovations surprenantes.

ECOTONE, un bâtiment à l'enveloppe méteosensible

Le projet ECOTONE est situé au Sud de la métropole parisienne, à Arcueil, entre une zone urbaine et un parc. L'ambition du projet est d'être la transition entre les deux écosystèmes comme un écotone écologique. Ce projet tertiaire mixte remporté dans le cadre de *"Inventons la Métropole du Grand Paris"* par Triptyque Architecture, Duncan Lewis Scape Architecture, Parc Architectes et OXO Architectes en 2017 ; couvre 82 000m² de surfaces de planchers. Sa livraison est prévue en 2023.

Le bâtiment est intégré dans son environnement sous la forme d'une colline verdoyante qui crée une continuité avec le coteau et son paysage naturel vivant et habité. Le programme comprend des bureaux, des commerces, des équipements sportifs et des crèches.

Le parti-pris de ce projet principalement biomimétique inclut la démarche de conception bioclimatique. Le bâtiment est orienté de manière à capter l'énergie solaire par une « silhouette intelligente photosensible » qui redistribue l'énergie au centre du bâtiment.

En s'inspirant de la peau humaine, les architectes ont imaginé une enveloppe multifonctionnelle par un jeu de doubles façades de verre, de ETFE (Ethylene tetrafluoroethylene) et de végétal pour la protection des usagers (chaleur et bruit) et permettre d'abriter la biodiversité. Cette enveloppe offre des percées visuelles sur le paysage tout en prolongeant la topographie singulière du coteau.

Une des innovations de ECOTONE consiste en l'intégration de la paroi HYGROSKIN® développée par Achim Menges de l'institut de Stuttgart. L'HYGROSKIN® est une paroi « méteosensitive » composée de bois mêlé à un matériau composite capable de réagir aux variations de l'humidité de l'air grâce aux propriétés hygroscopiques du bois. Il se présente sous la forme « d'alvéoles qui s'ouvrent et se ferment naturellement en fonction du taux d'humidité dans l'air ».

La dimension expérimentale et technologique de l'HYGROSKIN® est mise en valeur dans le bâtiment pour son rôle pédagogique pour le potentiel du biomimétisme.

Au-delà de l'aspect de la solution biomimétique de l'enveloppe du bâti, l'objectif de ECOTONE est de s'inscrire dans la dimension écosystémique du biomimétisme en réalisant un ouvrage qui rend des services à son environnement à travers des axes impactants. Ces axes sont : l'amélioration de la biodiversité, la production et la gestion vertueuse des flux de matière, la gestion des eaux pluviales, la réduction des émissions de carbone.

Ce projet se veut être une référence en matière de biomimétisme et de développement durable. En effet, il crée une dynamique économique complémentaire par sa programmation mixte et la jonction entre trois villes : Arcueil, le Kremlin-Bicêtre et Gentilly. En s'inspirant du vivant, il introduit la biodiversité en ville. La qualité des certifications visées montre le niveau d'exigence attendu de ce projet : Breeam 2016 Very Good, HQE 2016, Cradle to Cradle, Biodiversity, E+C- et matériaux Biosourcés.⁴⁹

⁴⁹ <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/12/EtatDesLieux-BCL-20201223-web-BasDef.pdf>
p.54

Références Fig. 3-9, Fig.3-10⁵⁰



Fig. 3-9. ECOTONE, à Arcueil, est intégré dans l'environnement sous forme d'une colline verdoyante qui crée une continuité avec le coteau et son paysage naturel vivant et habité.
Projet par Triptyque Architecture, Duncan Lewis Scape Architecture, Parc Architectes et OXO Architectes

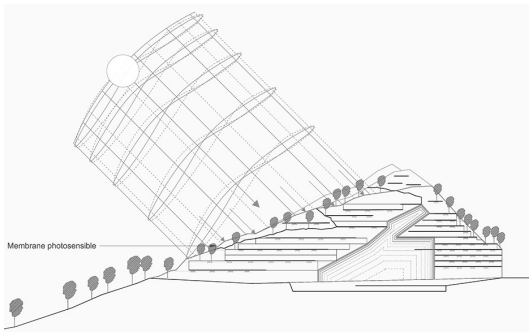


Fig. 3-10. « Une silhouette intelligente photosensible qui capte l'énergie de l'environnement pour la redistribuer en son centre. »
Projet par Triptyque Architecture, Duncan Lewis Scape Architecture, Parc Architectes et OXO Architectes

⁵⁰ <https://www.oxoarch.com/project/40>

Reference Fig 3-11⁵¹



Fig. 3-11. L'HYGROSKIN® est une paroi « méteosensitive » composée de bois mêlé à un matériaux composite capable de réagir aux variations de l'humidité de l'air.

Conception et Réalisation : Achim Menges de l'institut de Stuttgart

L'ambition écosystémique

A travers le projet ECOTONE, plusieurs éléments de l'alphabet bioclimatique sont visibles.

Par son orientation, le bâtiment capte le rayonnement solaire et le distribue dans le patio central permettant ainsi une utilisation optimisée des apports solaires. Le dispositif de la membrane photosensible répond à des préoccupations de contrôle de la transparence et de la solarisation.

Le végétal présent sur les façades de verre et de ETFE apporte la fonction de rafraîchissement de l'enveloppe du bâtiment. Ce rafraîchissement est également assuré par les percées visuelles des terrasses végétalisées qui s'ouvrent sur le paysage.

L'humidité de l'air est utilisée comme déclencheur pour la paroi HYGROSKIN®. Cette capacité réactive de l'enveloppe nous indique que la fonction de porosité du bâtiment peut être contrôlée par des mécanismes biomimétiques naturels.

Bien que notre étude soit focalisée sur les solutions biomimétiques de l'enveloppe du bâtiment, nous réalisons à travers le projet ECOTONE que les solutions biomimétiques et la conception bioclimatique peuvent servir dans la démarche du biomimetisme défini comme philosophie permettant de relever les défis du développement durable.

Les solutions biomimétiques des enveloppes du bâtiment sont dans ce sens réalisées au service d'un objectif plus large : celui du service écosystémique.

⁵¹ <https://www.frac-centre.fr/auteurs/rub/rubinventaire-detaille-90.html?authID=361&ensembleID=1206>

3.4 - Synthèse des fonctions des enveloppes du bâti et approche bioclimatique

Nous sommes partis de l'hypothèse selon laquelle il est possible, à travers quelques exemples de montrer l'impact que la biomimétique appliquée à l'enveloppe du bâtiment pouvait avoir sur la conception bioclimatique. Pour corroborer cette hypothèse nous avons choisi des exemples prenant en compte à la fois le climat, l'environnement et la biomimétique.

Le tableau ci-dessous, donne une vue synthétique des fonctions bioclimatiques mises en exergue par l'apport de la biomimétique.

Alphabet de la conception bioclimatique	Exemples de projets bioclimatiques				
	<i>Eglise de Nianing</i>	<i>CIRC Projet général</i>	<i>CIRC Pho'liage</i>	<i>ECOTONE Projet général</i>	<i>ECOTONE HygroSkin</i>
Morphologie	Architecture en cheminée Air ● Eau ●			Silhouette intelligente photosensible Lumière ● Chaleur ●	
Solarisation		Façades en verre Lumière ●	Ouverture/fermeture des feuilles en alliage TBM à mémoire de forme Lumière ● Captage énergie solaire par cellules photovoltaïques Lumière ●	Façades en verre et ETFE Lumière ●	
Transparence		Façades en verre de lames thermochromiques Lumière ●	Ouverture/fermeture des feuilles en alliage TBM à mémoire de forme Lumière ● Air ●	Façades en verre et ETFE Lumière ●	
Porosité	Ouvertures (portes/fenêtres) Air ●	Ouvertures (portes/fenêtres) Air ●	Ouverture/fermeture des feuilles en alliage TBM à mémoire de forme Air ●	Ouvertures (portes/fenêtres) Air ●	Actionneur hygromorphe par gradient de vapeur d'eau dans l'air Air ● Eau ●
Isolation	Enveloppe isolante Eau ●	Enveloppe isolante Eau ●		Enveloppe isolante Eau ●	
Inertie		Captage énergie solaire, stockage par inertie, dispositif mis au point par WSP ingénierie Chaleur ●			
Fraicheur	Gradient de température Air ● Chaleur ●	Végétalisation des toitures Chaleur ●		Terrasses et toitures végétalisées Air ●	

● Chaleur ● Air ● Eau ● Lumière ● Solution biomimétique

Fig. 3-12. Tableau récapitulatif des exemples étudiés concernant l'application des solutions biomimétiques aux enveloppes des bâtiments bioclimatiques

Graphique par Vermont ALLADAYE– 2022

La convergence fonctionnelle entre les défis environnementaux et les défis du bâtiment sont identifiés par les facteurs de la chaleur, de l'air, de l'eau et de la lumière.

Ces facteurs sont contrôlés par les éléments constitutifs de l'alphabet bioclimatique que sont : la morphologie, la solarisation, la transparence, la porosité, l'isolation, l'inertie et la fraicheur. En croisant les impacts de la biomimétique avec l'alphabet bioclimatique, nous voyons les champs d'influence de l'intervention biomimétique sur l'enveloppe des bâtiments bioclimatiques.

A travers le tableau récapitulatif (Fig.3-12), nous pouvons affirmer que les solutions biomimétiques appliquées aux enveloppes du bâtiment peuvent aider dans la conception bioclimatique.

Nous corroborons ainsi notre deuxième hypothèse :

Hypothèse 2

« Il est possible, à partir d'exemples existants, de montrer que la biomimétique peut aider à la conception des enveloppes de bâtiments bioclimatiques. »

Chapitre 4 - BIOMIMÉTISME EN URBANISME ET EN ARCHITECTURE : POTENTIELS ET FREINS

Nous aborderons dans ce dernier chapitre les questions liées à l'utilisation des solutions biomimétiques et du biomimétisme en urbanisme et en architecture.

4-1 Biomimétisme , urbanisme et architecture

Le potentiel du biomimétisme pour aider à l'adaptation au changement climatique est important, car comme aime à le dire Janine Benyus, « *Le service Recherche et Développement de la nature a 3,8 milliards d'années d'avance sur ceux de nos entreprises* ». ⁵²

Est-il pour autant évident d'utiliser le biomimétisme ou la biomimétique dans les projets d'architecture et d'urbanisme en France ?

En matière d'urbanisme, la production de la ville est d'une grande complexité qui impose des équilibres règlementaires, économiques, environnementaux et sociaux. Dans ce contexte, intégrer le biomimétisme dans un projet urbain est un véritable défi. En effet, les acteurs, publics et privés, de la production de la ville ne sont pas nécessairement sensibilisés au potentiel du biomimétisme comme outil de transition écologique.

Pour mener à bien les projets bio-inspirés ou de biomimétisme, il faut une acculturation des acteurs au monde de la biologie et de l'écologie. Cet effort nécessite l'intégration de profils qualifiés de biologistes et/ou d'écologues dans les équipes de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre. Il est en effet vital de bien traduire le langage du monde du vivant vers celui de l'urbanisme et de l'architecture. Car un langage mal traduit abouti souvent à des projets « greenwashing » ayant un mauvais impact écologique.

Afin d'aider les acteurs à structurer leur démarche de biomimétisme à l'échelle de la ville, Biomim'City Lab propose de « *promouvoir et intensifier les approches collaboratives innovantes appliquant les principes et méthodologies du biomimétisme, au service de la réinvention de villes vertueuses, régénératives et résilientes, inspirées et pensées par et pour le vivant.* » ⁵³

En ce qui concerne l'architecture, la question de l'utilisation de la démarche du biomimétisme nous paraît légitime.

L'étude menée par Estelle Cruz and al.2022, intitulée « *Has Biomimicry in Architecture Arrived in France? Diversity of Challenges and Opportunities for a Paradigm Shift* » apporte quelques éléments de réponses.

Les architectes dans leur méthodologie du projet, passent par les phases de recherche documentaire, d'analyse de site, d'entretien, de croquis, de mise en place d'une stratégie de concept et de design, puis d'une proposition multicritère pour le projet. Les recherches concernant le biomimétisme sont contraintes par le temps court (quelques semaines/mois) accordé au projet et à son exécution.

Dans ce contexte, très peu d'architectes sont enclins à développer de nouvelles solutions biomimétiques nécessitant des certifications pour leurs mise en œuvre réglementaire. Cette considération est rendue prégnante par la pression économique pour la rentabilité des projets.

Cependant, la recherche fondamentale en biomimétisme/biomimétique est liée au temps long (quelques années). Cette recherche menée par des organismes de recherche comme le Ceebios, Nobatek INEF4 ; abouti à des solutions applicables en architecture et en construction.

⁵²https://www.librairielesquare.com/listeliv.php?base=paper&mots_recherche=&auteurs=Gauthier%20Chapelle,%20Mich%C3%A8le%20Decoust

⁵³ <https://biomimexpo.com/2020/03/03/biomimcity-lab/>

Une piste pour développer la pratique du biomimétisme en architecture est l'utilisation de solutions « Plug & Play » ayant déjà fait leurs preuves et ayant passées les ATEEx (Appréciation Technique d'Expérimentation) et/ou ATEc (Avis Technique) nécessaires à leur mise en œuvre.⁵⁴

Pour favoriser le développement du biomimétisme en urbanisme et en architecture en France, il serait souhaitable que la réglementation encadre et accompagne la pratique. Quelques outils, développés par le Ceebios, sont actuellement disponibles pour aider la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre à définir l'évaluation de l'offre pour un projet architectural et urbain biomimétique.⁵⁵

Afin d'aider la maîtrise d'œuvre à être autonome dans la démarche de conception biomimétique, Annelise Letard, propose l'intégration d'un profil de designer dans les pratiques de conception et d'innovation.

En effet, par sa formation le designer favorise « la génération de concept inspiré du vivant » ainsi que « le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales. »⁵⁶

⁵⁴ <https://www.mdpi.com/2313-7673/7/4/212>

Estelle Cruz & al. "Has Biomimicry in Architecture Arrived in France? Diversity of Challenges and Opportunities for a Paradigm Shift" p7

⁵⁵ <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2022/06/EvalQualiTechOpeBioInsp-BCL-web.pdf>

Evaluer la qualité technique d'opérations bio-inspirées. Outils d'évaluation d'une offre à destination de la maîtrise d'œuvre & de la maîtrise d'ouvrage. Ceebios- Biomim'City Lab - 2022

⁵⁶ <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03678610>

Annelise Letard. Contribution au développement du cadre méthodologique de la conception biomimétique : intégration de l'expertise des profils formés au Design pour favoriser le déploiement de l'approche dans les pratiques de conception et d'innovation. Eco-conception. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE034. tel-03678610

P. 174 et p.175

CONCLUSION

Nous avons, au cours de ce mémoire, tenté de répondre à la question de l'utilité des solutions biomimétiques applicables aux enveloppes du bâtiment dans le cadre de la conception bioclimatique.

Après avoir défini les concepts de biomimétique et de conception bioclimatique, nous avons démontré qu'il existe des outils de transcriptions des solutions développées par le vivant, vers les sciences anthropocentrées ; et notamment vers l'architecture.

Par ailleurs, nous avons montré que les solutions biomimétiques des enveloppes du bâtiments sont utiles à la conception de bâtiments bioclimatiques.

La biomimétique apporte des innovations qui utilisent les ressources naturelles renouvelables comme la chaleur, la lumière et l'humidité de l'air. Ces solutions contribuent à la sobriété des bâtiments bioclimatiques.

Cet apport de la biomimétique est à considérer comme un atout complémentaire à la démarche vertueuse de la conception bioclimatique, notamment pour les performances de l'enveloppe du bâtiment.

La biomimétique peut donc être utilisée comme un complément méthodologique interdisciplinaire pouvant être mis au service de la conception bioclimatique.

Nous souhaiterions maintenant élargir notre réflexion en passant de la biomimétique au biomimétisme.

La biomimétique peut être incluse dans la démarche plus large du biomimétisme définie comme philosophie pour relever les défis du développement durable. L'exemple du projet ECOTONE nous a permis de réaliser cet enseignement.

La conception bioclimatique par son approche vertueuse vis-à-vis de l'environnement peut être considérée comme ayant des objectifs proches du biomimétisme. A ce titre, la conception bioclimatique et le biomimétisme participent à l'effort d'adaptation au changement climatique et à la démarche de développement durable.

En adoptant la pensée systémique de résolution des problèmes, le biomimétisme se rapproche du vivant dans sa manière de solutionner les défis auxquels il est confronté.

En effet, le vivant résout ses défis en développant des processus circulaires rétroactifs et dynamiques, où les extrants des uns constituent les intrants des autres.

Adopter le biomimétisme, c'est changer de regard sur la nature, en l'imitant pour l'amélioration des conditions de vie sur terre.

Cette affirmation rejoint la pensée de Michael Pawlyn à qui nous laissons le mot de la fin.

« Certains avancent que le biomimétisme correspond à la conclusion logique de l'évolution de la pensée humaine : après avoir cherché à dominer la nature, puis à la conserver, nous chercherions aujourd'hui à nous réconcilier avec elle. »⁵⁷

⁵⁷ PAWLYN Michael, Biomimétisme et architecture, Paris, Editions rue de l'échiquier, Octobre 2019. p 216

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

PAWLYN Michael, *Biomimétisme et architecture*, Paris, Editions rue de l'échiquier, Octobre 2019

WRIGHT David, *Manuel d'architecture naturelle*, Marseille, Edition Parenthèses, avril 2022

COURGEY Samuel, OLIVA Jean-Pierre, *La conception bioclimatique des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation*, Mens, Terre vivante, 2006

DUHEM Ludovic, PEREIRA DE MOURA, BERG Peter, MAGNAGHI Alberto, PAQUOT Thierry, ROLLOT Mathias, *Design des territoires : l'enseignement de la biorégion*, Paris, Association Culturelle Eterotopia France, 2020

THESES EN LIGNE

LETARD Anneline, *Contribution au développement du cadre méthodologique de la conception biomimétique : intégration de l'expertise des profils formés au Design pour favoriser le déploiement de l'approche dans les pratiques de conception et d'innovation. Eco-conception*. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE034. tel-03678610

Disponible sur <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03678610>
[consulté le 20-08-2022]

GRAEFF Eliot. *Innovation bio-inspirée : modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomimétique*. Biotechnologie. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE027. tel-02951019

Disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02951019>
[consulté le 25-08-2022]

FAYEMI Pierre-Emmanuel. *Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances*. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0062. tel-01531185

Disponible sur <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01531185>
[consulté le 28-08-2022]

CRUZ Estelle, *Multi-criteria characterization of biological interfaces: towards the development of multi-functional biomimetic building envelopes*. Engineering Sciences [physics]. Museum national d'histoire naturelle (MNHN PARIS); CEEBIOS, 2021. English. tel-03558596

Disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03558596>
[consulté le 05-09-2022]

BARDANAH KADRI Lidia , Towards the LIVING envelope. Biomimetics for building envelope adaptation, Printed by Wöhrmann Print Service B.V. Zutphen, The Netherlands, Bachelor of Architecture, Technion - Israel Institute of Technology, geboren te Haifa, Israel, 2012

Disponible sur

https://www.researchgate.net/publication/262066290_Towards_the_LIVING_envelope_biomimetics_for_building_envelope_adaptation

[consulté le 20-08-2022]

HICHAM Hadbaoui, Pratique du biomimétisme dans l'architecture bioclimatique: Essai sur la performance énergétique des enveloppes architecturales autonomes responsives dans un climat aride. Université Salah Boubnider Constantine 3 – Faculté d'architecture et d'urbanisme – Département d'architecture. Option architecture climatique et environnement. 2018

Disponible sur

https://www.academia.edu/36379732/Pratique_du_biomim%C3%A9tisme_dans_l_architecture_bioclimatique_Essai_sur_la_performance_%C3%A9nerg%C3%A9tique_des_enveloppes_architecturales_autonomes_responsives_dans_un_climat_aride

[consulté le 15-10-2022]

MEMOIRES ET ARTICLES

BARDANAH Lidia, Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. School of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA; badarnah.l@gmail.com; Tel.: +44-7447-493239. Publié le 12-05-2017

Disponible sur <https://www.mdpi.com/2075-5309/7/2/40>

[consulté le 20-08-2022]

Ceebios, Biomim' CITY LAB, Évaluer la qualité technique d'opérations bio-inspirées Outils d'évaluation d'une offre à destination de la maîtrise d'oeuvre & de la maîtrise d'ouvrage – 2022
Disponible sur <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2022/06/EvalQualiTechOpeBioInsp-BCL-web.pdf>

[consulté le 10-11-2022]

Ceebios, Biomimetisme en France. Un état des lieux, juillet 2018

Disponible sur <https://drive.google.com/file/d/1mEmytyfRGtBAOG6UW5LUSyVz6VCFqovs/view>

[consulté le 23-07-2022]

Ceebios, Nobatek INEF4, Biomim' CITY LAB, ICAD ; Projet urbain bio-inspiré : Rapport de synthèse édition 2020

Disponible sur <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/11/RapportSynthese-UrbBI-201125-web.pdf>

[consulté le 07-08-2022]

CRUZ Estelle *et al.* , Has Biomimicry in Architecture Arrived in France? Diversity of Challenges and Opportunities for a Paradigm Shift. 2022

Disponible sur <https://www.mdpi.com/2313-7673/7/4/212>

[consulté le 03-12-2022]

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 - LE PERIMETRE D'ETUDE	3
1.1 - La conception bioclimatique	4
1.2 - Les sciences de la vie	7
1.3 - Le biomimétisme.....	10
Les champs sémantiques du biomimétisme	10
Une brève histoire du biomimétisme.....	10
1.4 - La problématique	14
Chapitre 2 - DES SCIENCES DU VIVANT AUX SOLUTIONS ARCHITECTURALES	15
2.1 - Un aperçu des méthodes de transfert des connaissances du vivant vers les sciences de la conception.....	16
2.2 - Les outils biomimétiques pour l'architecture : le cas des enveloppes du bâtiment.....	21
Chapitre 3 - LES FONCTIONS BIOCLIMATIQUES DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT ET LES APPORTS DE LA BIOMIMETIQUE	26
3.1 - Enveloppe et conception bioclimatique.....	27
L'église de Nianing : une tour bioclimatique.....	27
La forme de l'enveloppe au service de la fonction	29
3.2 - Adaptation à la lumière et à la température pour le confort thermique et visuel.....	29
Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) : un bâtiment à l'enveloppe adaptative	29
La polyvalence des solutions biomimétiques.....	31
3.3 - L'air et l'eau : des facteurs déclencheurs.....	32
ECOTONE, un bâtiment à l'enveloppe méteosensible	32
L'ambition écosystémique.....	34
3.4 - Synthèse des fonctions des enveloppes du bâti et approche bioclimatique.....	35
Chapitre 4 - BIOMIMETISME EN URBANISME ET EN ARCHITECTURE : POTENTIELS ET FREINS.....	37
4-1 Biomimétisme , urbanisme et architecture	38
CONCLUSION	40
BIBLIOGRAPHIE	41
OUVRAGES.....	41
THESES EN LIGNE	41
MEMOIRES ET ARTICLES.....	42
TABLE DES MATIERES	43