



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

ADEME



AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE



CLÉS POUR AGIR

S'inspirer du vivant pour la transition écologique des bâtiments

COMMENT METTRE EN ŒUVRE
LE BIOMIMÉTISME DANS VOS PROJETS

Image de couverture

Projet de surfaçade thermodynamique passif *Feuille de Charme*
pour la rénovation d'un immeuble de bureau, Paris XV^e
© INSITU Lab & In Situ Architecture 2020-2021

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique : Solène Marry, Iman Bahmani-Piaseczny

Rédacteurs : Estelle Cruz, Eduardo Blanco, Olivier Scheffer (Ceebios)

Relecteurs : Iman Bahmani-Piaseczny, Pierre Deroubaix, Rémi Durieux, Sophie Laroche, Emilie Le Fur, Solène Marry, Etienne Marx, Maxime Pasquier, Aurélie Tailleur, Ariane Rozo

Crédits photo : images sous licence Pixabay. Si Copyrights précisés, images ne peuvent être réutilisées dans d'autres contextes, autorisation d'utilisation que dans le cadre de ce rapport

Création graphique : Chloé Lequette (Ceebios), charte graphique de l'ADEME

Avec la participation de Eleonora Brizio et Bruno Pinto

Brochure réf. 011920

ISBN : 979-10-297-2014-7 - octobre 2022

Dépôt légal : ©ADEME Éditions, octobre 2022

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

RESUME

S'inspirer du vivant pour la transition écologique des bâtiments

La démarche du biomimétisme facilite une réintégration du vivant comme un modèle pour guider les choix architecturaux, énergétiques et techniques, dans un objectif de transition écologique et d'impacts positifs pour les écosystèmes.

Ce guide illustre par des réalisations construites bio-inspirées une sélection de problématiques techniques, écologiques et énergétiques du bâtiment, résolues par la démarche du biomimétisme : réduire la consommation d'énergie primaire, le confort d'été, rénover l'existant, optimiser les consommations d'eau, alléger les structures, régénérer les services écosystémiques.

Il vous donne également des premières clés et ressources concrètes pour vous former et intégrer cette nouvelle approche de conception architecturale et urbaine dans vos projets.

→ Un guide réalisé par Ceebios, le Centre d'études et d'expertises en Biomimétisme, pour l'ADEME.

SOMMAIRE

Résumé	3
Introduction	7
Définitions	10
Qu'est-ce que la bio-inspiration, le biomimétisme et la biomimétique ?	10
Qu'est-ce qu'un bâtiment bio-inspiré ?	11
Ce qui n'est pas bio-inspiré ou biomimétique	12
Réalisations bio-inspirées emblématiques	14
Optimiser les consommations d'énergie	18
Favoriser le confort d'été	24
Optimiser et pérenniser l'existant	32
Optimiser les consommations d'eau	38
Alléger les structures	44
Concevoir des bâtiments à impacts positifs pour l'ensemble du vivant	50
Comment mettre en œuvre le biomimétisme ?	56
Constituer une équipe projet « biomimétique »	58
La démarche en phase de conception	62
Se former : les formations professionnelles	72
Conclusion	76
Bibliographie	78



Pleurote, Damir Omerović sur Unsplash

INTRO- DUCTION

QU'EST-CE QUE LE BIOMIMÉTISME ?
S'APPUYANT SUR PLUS DE 3,8 MILLIARDS D'ANNÉES
D'ÉVOLUTION DU VIVANT, LE BIOMIMÉTISME EST...

... À la fois une philosophie, une approche scientifique rigoureuse et une méthodologie qui consiste à s'inspirer des modèles biologiques pour concevoir des solutions innovantes et compatibles avec la biosphère [1] [2].

Cette approche transversale s'applique à l'ensemble des activités humaines telles que la santé, la construction/rénovation, l'aménagement urbain, les transports, le numérique, la robotique ou encore l'agriculture [3] [4].

L'architecture bio-inspirée pour un habitat compatible avec le vivant.

Appliqué au secteur du bâtiment, le biomimétisme est une opportunité de réponse à la fois systémique, et sur une multi-échelle spatiale et temporelle, permettant de développer des systèmes constructifs, des matériaux adaptés, des modes de gestion de l'énergie ou encore des façades en accord avec les principes du vivant et les grands cycles biogéochimiques terrestres¹ de l'eau, du carbone, du phosphore, de la biodiversité, etc. [5].

Ainsi, en interrogeant les pratiques actuelles de la construction au travers du prisme du vivant, la démarche du biomimétisme facilite une réintégration du vivant comme un modèle pour guider les choix architecturaux, énergétiques et techniques, dans un objectif de transition écologique et de régénération des écosystèmes [6] [7].

1. Un cycle biogéochimique est le processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique (eau, carbone, phosphore, etc.) entre les grands réservoirs que sont la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, dans lesquels se retrouve la biosphère.

À qui s'adresse ce guide ?

Ce guide de mise en œuvre opérationnelle du biomimétisme s'adresse aux équipes de maîtrise d'œuvre – agences d'architecture, bureaux d'études techniques, paysagistes, urbanistes, etc. – désireuses d'innover durablement par le biomimétisme dans le cadre de projets de constructions neuves ou de projets de rénovation. Ce guide s'adresse également aux acteurs de la maîtrise d'ouvrage publique ou privée – collectivités, propriétaires fonciers, entreprises, promoteurs, assistants à maîtrise d'ouvrage, etc. –, ainsi qu'aux différents services de l'urbanisme et de la construction de l'État, des régions, ou de leurs opérateurs et centres d'expertise (CAUE, CEREMA, CSTB, ITE...) souhaitant s'acculturer à la démarche.

Comment utiliser ce guide ?

Ce guide est structuré en trois parties. La première section facilite l'appropriation des notions clés essentielles à la compréhension des enjeux, méthodes et exemples sur lesquelles ce guide s'appuie. La seconde partie permet une compréhension technique et méthodologique de projets bio-inspirés existants qui résolvent une ou plusieurs problématiques actuelles du secteur du bâtiment – telles que la rénovation, l'optimisation des consommations d'énergie, de matières et d'eau, l'adaptation aux changements climatiques et le confort d'été – par la démarche du biomimétisme. Une diversité de projets bio-inspirés à l'échelle matériaux, systèmes de façades et bâtiments dans leur ensemble illustre cette seconde section. La dernière partie du guide synthétise les principales étapes de mise en œuvre opérationnelle du biomimétisme en phase de conception (équipe projet, méthodologie, ressources disponibles, etc.), liste les formations disponibles, ainsi que les principaux acteurs, travaux et plateformes pour la recherche.

Références :

[1] Organisation Internationale de Normalisation, Norme ISO 18458:2015 : « Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie ». Source : <https://www.iso.org/fr/standard/62500.html>

[2] Janine M. Benyus, *Biomimicry : innovation inspired by nature*, Willima Morrow, 1997, traduit en français et publié aux Éditions Rue de l'échiquier en 2016 dans la collection « Initial(e)s DD » sous le titre *Biomimétisme : Quand la nature inspire des innovations durables*. Source : <https://www.ruedelechiquier.net/l-ecopoche/376-biomimetisme-25-ans.html>

[3] Ceebios, *Biomimétisme en France : un état des lieux*, pp. 1–30, 2018. Source : <https://ceebios.com/telechargements-references/>

[4] Mycéco et Ceebios, *Biomimétisme : Quels leviers de développement et quelles perspectives pour la France ?*, 2020. Source : <https://ceebios.com/telechargements-references/>

[5] Biomim'City Lab et Ceebios, *Projets urbains bio-inspirés : Un état des lieux des projets français*, 2020.

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

[6] Michael Pawlyn, *Biomimétisme et architecture*, Éditions Rue de l'Échiquier, Collection « Biomimétisme », p. 229.

Source : <https://www.ruedelechiquier.net/essais/243-biomimetisme-et-architecture.html>

[7] Collectif Biomim'City Lab, « Le Biomim'City Lab pour 'réinventer la ville pour et par le vivant' », *Construction 21*, 2020. [En ligne]. Source : <https://www.construction21.org/belgique/articles/h/le-biomim-city-lab-pour-reinventer-la-ville-pour-et-par-le-vivant.html> [lu le 29/04/2021]



Corail Montipora, Dustin Humes sur Unsplash

DEFINITIONS

QU'EST-CE QUE LA BIO-INSPIRATION, LE BIOMIMÉTISME & LA BIOMIMÉTIQUE ?

La **bio-inspiration** est une approche créative basée sur l'observation du vivant.

La **biomimétique** est quant à elle une démarche d'innovation dont la définition a fait l'objet d'une norme (ISO 18548 : 2015) : « *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** est l'application de la biomimétique à des fins de durabilité.

QU'EST-CE QU'UN BÂTIMENT BIO-INSPIRÉ ?

À ce jour, il existe une diversité de définitions du bâtiment bio-inspiré au regard de la littérature scientifique [6] [8]. L'analyse de ces différentes définitions permet d'établir les caractéristiques suivantes du bâtiment bio-inspiré :

a

CONCEPTION

Le bâtiment est issu d'une démarche de conception biomimétique où des principes biologiques ou propriétés de systèmes vivants sont observés, abstraits puis transposés en systèmes constructifs (voir partie : « La démarche en phase de conception », p.60).

b

COMPOSANTS

Le bâtiment comporte un ou plusieurs composant(s) inspirés du vivant tels que des matériaux, une enveloppe ou des systèmes de ventilation et régulation thermiques inspirés de formes, fonctions ou processus biologiques qui contribuent à l'efficacité technique, énergétique et environnementale du bâtiment (voir parties : « Optimiser les consommations d'énergie », p.18 ; « Favoriser le confort d'été », p.24 ; « Optimiser et pérenniser l'existant », p.32 ; « Optimiser les consommations d'eau », p.38 ; « Alléger les structures », p.44 & « La démarche en phase de conception », p.60).

c

ECOSYSTÈMES

Le bâtiment est (ré)intégré durant toute sa durée de vie dans les systèmes écologiques et grands cycles naturels de l'eau, du carbone, de la biodiversité tel un organisme évoluant dans son milieu, en répondant aux principes et cahier des charges du vivant (voir parties : « Concevoir des bâtiments à impacts positifs pour l'ensemble du vivant », p.50 & « La démarche en phase de conception », p.60).

Un bâtiment « bio-inspiré » intègre idéalement ces trois critères simultanément. Ainsi, c'est bien le lien au vivant, que ce soit par la méthodologie biomimétique employée, ses composants bio-inspirés, ou sa réintégration dans les grands cycles naturels à visée régénérative, qui définit le caractère « bio-inspiré » d'un bâtiment.

CE QUI N'EST PAS BIO-INSPIRÉ OU BIOMIMÉTIQUE ?

Par opposition, un bâtiment écologique, mais qui n'aura pas comme démarche et objectif l'inspiration et la régénération du vivant, ne sera pas un bâtiment « bio-inspiré ».

L'architecture vernaculaire, l'architecture solaire, l'architecture traditionnelle japonaise, l'architecture organique ou encore écologique ont certes toutes développé une forme de relation au vivant, et parfois mis en œuvre des principes du vivant, mais sans jamais l'avoir structuré dans une démarche de conception et d'innovation exclusivement basée sur la compréhension et l'inspiration des stratégies et caractéristiques du vivant dans l'objectif assumé de « renaturaliser » le bâtiment en l'intégrant du mieux possible aux équilibres des écosystèmes environnants².

De même, les solutions fondées sur la nature (*SfN* ou *NbS* pour *Nature-based Solutions* en anglais) ou solutions d'adaptation fondées sur la nature (*SafN*), définies par l'UICN comme « *les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité*³ » ne doivent pas être confondues avec la bio-inspiration, que l'on peut plutôt qualifier de solutions inspirées de la nature (*SiN* ou *Nature-inspired Solutions* en anglais).

Néanmoins, les solutions inspirées de la nature peuvent également mettre en œuvre directement des fonctions biologiques ou écosystémiques (bio-assistance) lorsqu'elles viennent « imiter » des solutions naturelles. La distinction est donc essentiellement dans la démarche de conception : la biomimétique.

Références :

[8] N. Chayaamor-Heil, F. Guéna, and N. Hannachi-Belkadi, « Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils », *Les Cah. la Rech. Archit. urbaine paysagère*, vol. 1, pp. 0–33, 2018

1. Voir à ce sujet « L'architecture durable : des sources vernaculaires à BedZed », Olivier Scheffer, éditions SymbioPolis, 2016 https://bit.ly/architecture_durable

2. <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>



Lamelles de champignon, Timothy Dykes sur Unsplash

REALISA-
TIONS
BIO-
INSPIRÉES
EMBLEMA-
TIQUES

Depuis le milieu du XX^e siècle, plus de 200 projets de bâtiments bio-inspirés ont vu le jour en Europe et dans le monde [6] [9] [10].

Ces cas d'études permettent des retours d'expérience concrets de mise en œuvre du biomimétisme d'un point de vue technique et méthodologique par les équipes de maîtrise d'œuvre.

Cette section illustre par des réalisations construites bio-inspirées une sélection de problématiques techniques, écologiques et énergétiques du bâtiment, résolues par la démarche du biomimétisme. Les thématiques abordées sont les suivantes :

- Optimiser les consommations d'énergie primaire
- Favoriser le confort d'été
- Optimiser et pérenniser l'existant
- Optimiser les consommations d'eau
- Alléger les structures
- Concevoir des bâtiments à impacts positifs pour l'ensemble du vivant

Chaque thématique est illustrée par plusieurs projets bio-inspirés existants apportant une réponse aux échelles matériaux, enveloppes et bâtiment. Ces projets présentent différents niveaux de maturité renseignés par leur TRLs - *Technology Readiness Levels*⁴. Certains projets répondent simultanément à plusieurs thématiques comme indiqué tout au long des fiches techniques.

Références :

[9] P. Gruber and S. Gosztanyi, « Skin in architecture : towards bioinspired facades », *Trans. Ecol. Environ.*, vol. 138, pp. 1743–3541, 2010.

Source : https://www.researchgate.net/publication/271449529_Skin_in_architecture_towards_bioinspired_facades

[10] K. M. Al-Obaidi, M. Azzam Ismail, H. Hussein, and A. M. Abdul Rahman, « Biomimetic building skins : An adaptive approach », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1472–1491, 2017.

Source : https://www.researchgate.net/publication/317557596_Biomimetic_building_skins_An_adaptive_approach

4. Qui peut se traduire par « Niveau de Maturité Technologique » en français
https://fr.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level

Tableau de synthèse d'exemples de réalisations bio-inspirées aux échelles matériaux, enveloppe et bâtiment répondant aux problématiques techniques. Cette liste est non-exhaustive.

THÈMES	MATÉRIAUX	ENVELOPPES	BÂTIMENTS
<p>Optimiser les consommations d'énergie primaire</p>	<p>Matériaux auto-réactifs permettant d'adapter passivement les apports lumineux et thermiques perçus par l'enveloppe</p> <p>→ <i>Pavillon HygroSkin</i>, par ICD Université de Stuttgart, pour la collection permanente du FRAC Centre Orléans (2013)</p>	<p>Façades adaptatives : réguler les apports solaires avec un minimum d'énergie</p> <p>→ Façade du pavillon thématique de l'Allemagne <i>OneOcean</i> à l'expo universelle de Yoesu, Corée du Sud, par Soma Architekten + dmp (2012)</p>	<p>Stocker l'énergie lorsqu'elle est abondante et disponible</p> <p>→ Cuve de stockage intersaison du Lycée <i>Kyoto</i>, Poitiers par l'agence SCAU (2009)</p>
<p>Favoriser le confort d'été</p>	<p>Matériaux auto-réactifs permettant d'adapter passivement les apports solaires perçus par l'enveloppe</p> <p>→ Module <i>PHO'LIAGE®</i> par l'agence ArtBuild (2019)</p>	<p>Sur-façade permettant la création d'îlots de fraîcheur</p> <p>→ Sur-façade <i>Sierpinski Forest</i> par le chercheur Satoshi Sakai et l'agence Shigeru Ban (2012)</p>	<p>Limiter l'utilisation d'équipements actifs de ventilation et thermorégulation.</p> <p>→ <i>Eastgate building</i> par l'agence d'architecture Pearce Partnership (1996)</p>
<p>Optimiser et pérenniser l'existant</p>	<p>Matériaux autoréparants</p> <p>→ Béton autoréparant <i>Basilisk self-healing concrete</i> par la start-up Green-Basilisk B.V.</p>	<p>Surenveloppes thermo-régulatrices passives</p> <p>→ Sur-façade <i>Feuille de Charme</i> par In Situ Lab (2021-2022)</p>	

THÈMES	MATÉRIAUX	ENVELOPPES	BÂTIMENTS
Optimiser les consommations d'eau	Matériaux hydrophobes → <i>Sheerfill architectural membrane</i> par Saint-Gobain	Dessalement des eaux → <i>Water Theater</i> de Las Palmas par l'agence Grimshaw dans les îles Canaries (2013)	Collecte d'eau en zones arides → <i>La Seawater Greenhouse</i> par Charlie Paton à Muscat, Oman (2004)
Alléger les structures bâties	Principes structurels du vivant → <i>Pavillon Elytra Filament</i> par ICD / ITKE, Londres (2016)	Enveloppes en tension → <i>West German Pavilion</i> , par Frei Otto, Montréal (1967)	Economie de ressources et formes performantes → <i>Savill building</i> par Glenn Howells Architects (2006)
Concevoir des bâtiments à impacts positifs pour l'ensemble du vivant	Des matériaux de construction qui accueillent la végétalisation spontanée → <i>Concrete Sprig</i> par XTU Lab (2009)	Des enveloppes qui accueillent plusieurs règnes du vivant – animal, végétal et champignon. → Façade et toiture de <i>l'École des sciences et de la biodiversité</i> à Boulogne-Billancourt (92) par l'agence Chartier Dalix (2014)	Des bâtiments régénératifs qui rendent les services écosystémiques → Bâtiment <i>Bullitt Center</i> à Seattle du Living Future Institute par l'agence Miller Hull Partnership (2013)

OPTIMISER LES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

La problématique technique

En France, la consommation énergétique finale du secteur résidentiel-tertiaire est la plus importante (68,7 Mtep) devant les transports (49,2 Mtep) et l'industrie (32,1 Mtep)⁶. La majorité de cette énergie consommée est dédiée à la régulation thermique des bâtiments, au chauffage de l'eau chaude sanitaire puis à l'éclairage artificiel [11]. La performance énergétique d'un bâtiment est par ailleurs révélée par ses conditions d'implantation, la performance de son enveloppe et l'efficacité des systèmes de régulation internes de ventilation, chauffage et refroidissement [12].

Comment le vivant « optimise les consommations d'énergie » ?

L'énergie solaire est la principale source d'énergie de l'ensemble des systèmes vivants. Elle est rendue accessible à l'ensemble des systèmes vivants grâce à sa conversion en biomasse par la photosynthèse des plantes. Les systèmes vivants subviennent à leurs besoins grâce à des stratégies complémentaires de collecte, stockage, transformation et utilisation de l'énergie solaire disponible sous toutes ses formes. L'ensemble des règnes du vivant stockent par exemple l'énergie lorsque celle-ci est abondamment disponible sous diverses formes : graisse (mammifères), sucres (végétaux) [13]. Les systèmes vivants présentent également des enveloppes biologiques efficaces et adaptatives – peau, poils, plumes, cuticule, etc - afin de réguler efficacement les échanges thermiques perçus par leur organisme. La variation de l'épaisseur de la fourrure des mammifères vivants sous un climat tempéré et suivant les saisons permet une isolation adaptée suivant les besoins thermiques de l'espèce [14].

5. La consommation d'énergie finale est la quantité d'énergie disponible pour l'utilisateur final

6. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-finale-denergie-par-secteur-pefa>

Quels sont les réalisations bio-inspirées existantes ?

MATÉRIAUX : matériaux auto-réactifs permettant d'adapter sans système actif les apports lumineux et thermiques perçus par l'enveloppe

Nom du projet et concepteur : pavillon *HygroSkin*, Laboratoire de recherche ICD, Université de Stuttgart, par Achime Menges, Oliver David Krieg, Steffen Reichert (2013).

Modèle d'inspiration et principe biologique : matériau adaptatif aux variations de l'hygrométrie favorisant le confort thermique inspiré de la pomme de pin⁷

Niveau de maturité : TRL 6/7 (démonstration d'un modèle ou d'un prototype, réalisée dans un environnement opérationnel)

Description : le pavillon est un concept d'enveloppe s'adaptant à l'hygrométrie ambiante. Il s'inspire des écailles de pomme de pin qui s'ouvrent et se ferment en fonction du taux d'humidité présent dans l'air. En effet, les écailles de la pomme de pin sont composées de deux types de fibres (schlérénchymes et sclérides) qui réagissent (gonflent) différemment à l'humidité. Cette réaction différentielle assure l'ouverture de l'écaille en période sèche (pour libérer les graines) et sa fermeture en période humide (pour protéger les graines). Le matériau

utilisé, dit « hygromorphe », a été fabriqué à partir de l'assemblage par pression sous vide de deux plaques fines de contreplaqué selon une orientation précise des fibres, afin d'assurer la déformation différentielle (les fibres se détendent ou se contractent en fonction de l'humidité). Les « diaphragmes météo-sensibles » ainsi constitués permettent de réguler le taux d'humidité, l'accès à la lumière du jour et la température au sein d'un bâtiment de manière passive.



Pomme de pin dont l'ouverture est régulée passivement en fonction des variations de l'hygrométrie pour protéger ses graines



Pavillon *HygroSkin*
Crédit : Ceebios

7. Voir le documentaire *Nature = Futur ! Météosensible comme la pomme de pin*
<https://www.youtube.com/watch?v=9mysZW4wbSs>

FAÇADES ADAPTATIVES : réguler les apports solaires avec un minimum d'énergie

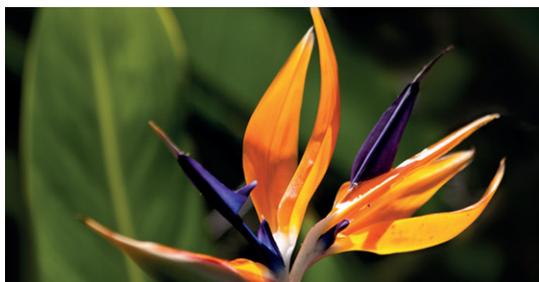
Nom du projet et concepteur : façade du pavillon *One Ocean* (Yoesu, Corée du Sud, 2012). Système *Flectofin* développé par le laboratoire de recherche ITKE de l'Université de Stuttgart et le bureau d'études structure Knippers Helbig Advanced Engineering en partenariat avec l'agence d'architecture SOMA.

Modèle d'inspiration et principe biologique : les systèmes de déformation élastique des plantes permettant l'ouverture ou fermeture des fleurs, l'orientation des feuilles, avec un minimum d'énergie. La fleur d'oiseau du paradis (*Strelitzia Reginae*) présente un perchoir saillant de deux pétales bleus adnés, qui agissent comme une plate-forme d'atterrissage pour les oiseaux. L'inclinaison de ce perchoir par le poids du volatile entraîne un mécanisme réversible de déformation élastique permettant l'accès à l'étamine et la libération du pollen. C'est cette déformation élastique qui a été étudiée, abstraite et transposée pour le mécanisme utilisé pour *Flectofin*.

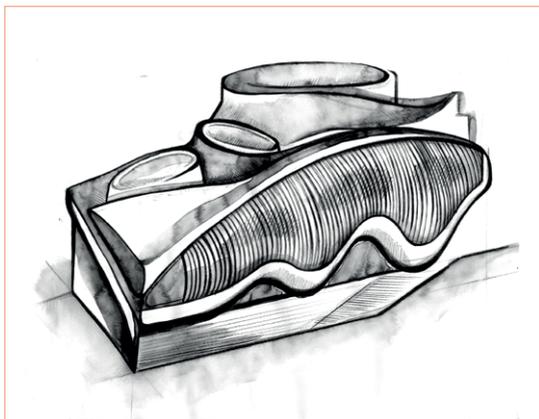
Niveau de maturité : TRL 6/7 (démonstration d'un modèle ou d'un prototype, réalisée dans un environnement opérationnel).

Description : le pavillon est un concept d'enveloppe s'adaptant à l'hygrométrie ambiante. Il s'inspire des écailles de pomme de pin qui s'ouvrent et se ferment en fonction du taux d'humidité présent dans l'air. En effet, les écailles de la pomme de pin sont composées de deux types de fibres (*sclérenchymes* et *sclérides*) qui régagissent (gonflent) différemment à l'humidité.

Cette réaction différentielle assure l'ouverture de l'écaille en période sèche (pour libérer les graines) et sa fermeture en période humide (pour protéger les graines). Le matériau utilisé, dit « hygromorphe », a été fabriqué à partir de l'assemblage par pression sous vide de deux plaques fines de contreplaqué selon une orientation précise des fibres, afin d'assurer la déformation différentielle. Les « diaphragmes météo-sensibles » ainsi constitués permettent de réguler le taux d'humidité, l'accès à la lumière du jour et la température au sein d'un bâtiment de manière passive.



Fleur oiseau de paradis (*Strelitzia reginae*). L'analyse du mécanisme d'ouverture et fermeture réversible des étamines (en bleu) a inspiré la conception de la façade *Flectofin*.



Vue extérieure du pavillon *One Ocean*
Crédit : Ceebios

BÂTIMENT : stocker l'énergie lorsqu'elle est abondante et disponible

Nom du projet et concepteur : lycée *Kyoto* (Poitiers, France, 2009). Système développé par le cabinet d'architectes SCAU en partenariat avec le bureau d'études Technip TPS et la société d'ingénierie environnementale CEDRE.

Modèle d'inspiration et principe biologique : stockage d'énergie lorsqu'elle est abondante et disponible en été puis utilisation lorsqu'elle n'est plus directement disponible dans l'environnement⁸. Plusieurs systèmes biologiques ont recours à cette stratégie : stockage d'énergie sous toutes ses formes (graisse, nourriture, etc).

Niveau de maturité : TRL 8/9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : l'efficacité énergétique du bâtiment est assurée par plusieurs dispositifs dont un système de récupération et stockage de la chaleur en été. Une cuve de stockage intersaison permet de récupérer la chaleur produite en été par l'incinérateur (en pure perte) et de la conserver dans la cuve. Afin de contenir l'eau à 95°C jusqu'à son utilisation, la cuve en acier de 1 000 m³ est protégée par une épaisseur d'un mètre d'isolant. En complément, plusieurs dispositifs telles que la mise en place d'un atrium bioclimatique et une isolation optimisée permettent une limitation des consommations d'énergie du bâtiment [16].



Exemples d'espèces effectuant des réserves d'énergie sous forme de graisse lorsque la nourriture est abondamment disponible.



Lycée *Kyoto*
© Nicolas Borel pour SCAU Architects



Atrium du lycée *Kyoto*
© Nicolas Borel pour SCAU Architects

8. Ce projet n'est pas issu d'une démarche de conception bio-inspirée. Cependant le principe de stockage lorsque l'énergie est abondante et disponible pour une utilisation lorsque celle-ci est rare est un principe récurrent dans le vivant.

Références :

- [9] P. Gruber and S. Gosztanyi, « Skin in architecture : towards bioinspired facades », *Trans. Ecol. Environ.*, vol. 138, pp. 1743–3541, 2010
- [10] K. M. Al-Obaidi, M. Azzam Ismail, H. Hussein, and A. M. Abdul Rahman, « Biomimetic building skins : An adaptive approach », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1472–1491, 2017
- [11] Ministère de la transition écologique, Données et études statistiques, pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports / Consommation finale d'énergie par secteur (PEFA), 2020.
Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-finale-denergie-par-secteur-pefa>
- [12] Nobatek / INEF4 et Ceebios pour le CODIFAB, « Limiter l'usage des équipements : quelles solutions pour la construction bois ? » novembre 2020.
Source : <https://www.codifab.fr/actions-collectives/limiter-lusage-des-equipements-queelles-solutions-pour-la-construction-bois-2540>
- [13] Ceebios, *Biomimétisme et énergie, rapport de synthèse* avec le soutien de RTE, 2022.
Source : <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2022/07/Synthese-BiomimetismeEnergie-Ceebios-20220720-web.pdf>
- [14] D. J. McCafferty, G. Pandraud, J. Gilles, M. Fabra-Puchol, and P.-Y. Henry, « Animal thermoregulation : a review of insulation, physiology and behaviour relevant to temperature control in buildings », *Bioinspir. Biomim.*, vol. 13, no. 1, p. 011001, 2017.
Source : https://www.researchgate.net/publication/321047502_Animal_thermoregulation_A_review_of_insulation_physiology_and_behaviour_relevant_to_temperature_control_in_buildings
- [15] J. Lienhard et al., « Flectofin : A hingeless flapping mechanism inspired by nature » *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS Bioinsp. Biomim*, vol. 6, pp. 45001–45008, 2011.
Source : https://www.researchgate.net/publication/51839563_Flectofin_A_hingeless_flapping_mechanism_inspired_by_nature
- [16] Frédérique Vergne « Lycée Kyoto à Poitiers : le 1er lycée d'Europe à zéro énergie fossile », *Le Moniteur*, septembre 2009.
Source : <https://www.lemoniteur.fr/article/lycee-kyoto-a-poitiers-le-1er-lycee-d-europe-a-zero-energie-fossile.1916249#!>

Pour aller plus loin :

- *Humanité bio-inspirée* (Chapitre 4 : s'inspirer des systèmes énergétiques vivants), sous la direction de Gauthier Chapelle et Kalina Raskin, Édition Cherche midi, 2020

<https://cite-palais.boutique/fr/bio-inspiree/humanite-bio-inspiree-une-autre-approche/2946.html>

- *Biomimétisme & Architecture* (Chapitre 7 : Énergie), M. Pawlyn, 2020, Édition Rue de l'Échiquier

<https://www.ruedelechiquier.net/essais/243-biomimetisme-et-architecture.html>

- « L'architecture durable : des sources vernaculaires à BedZed », Olivier Scheffer, Éditions SymbioPolis, 2016

https://bit.ly/architecture_durable

- « L'architecture biomimétique : quand l'architecture s'inspire de la nature » (page 15), Olivier Scheffer, Édition SymbioPolis, 2011

https://bit.ly/architecture_biomimetique

FAVORISER LE CONFORT D'ÉTÉ

La problématique technique

Le taux d'équipement en systèmes de climatisation des bâtiments de logement et tertiaire est en constante croissance en réponse à l'augmentation des températures en été et des épisodes de canicule de plus en plus fréquents. En 2020, 25 % des ménages français et 40% des entreprises du secteur tertiaire étaient équipés d'un climatiseur contre 14% en 2016 [17].

Or la climatisation est responsable d'environ 5% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) dans le secteur du bâtiment et de 8,5 % de la consommation d'énergie mondiale. Sans gain d'efficacité, ces chiffres pourraient doubler d'ici 2040 dû à la rapide croissance des climatisations dans le bâtiment, amplifiée par le réchauffement climatique [18].

Plusieurs solutions techniques ont été employées dans le bâtiment pour résoudre cette problématique telles que les « *cool roofs* » (revêtements à albedo élevé⁹), ou plus généralement en faisant appel au bioclimatisme, voire à la végétalisation et renaturation urbaine pour éviter les îlots de chaleur urbain (ICU).

Comment le vivant « favorise le confort d'été » ?

En biologie, la transcription de la notion de confort d'été peut s'apparenter à la conservation de la fraîcheur au sein d'un habitat – nid, terrier, cavité, etc - ou d'un organisme malgré un environnement chaud.

De nombreux systèmes vivants au sein des règnes des animaux, végétaux et champignons sont sensibles aux températures élevées et doivent ainsi maintenir leur température en-deçà de celle de leur environnement (Fig. 1).

Afin de se prévenir de la surchauffe, la première stratégie est d'éviter d'emmagasiner de la chaleur. Certaines espèces jouent sur la réflexion de la lumière (voire de certaines longueurs d'ondes) (Fig.2), d'autres réduisent leur exposition aux radiations en changeant leur forme ou adaptant la surface exposée afin de minimiser la charge thermique (Fig. 3). Si un système vivant s'échauffe, plusieurs fonctions de régulation thermique sont mises en place telles que la dissipation de la chaleur par évaporation, transpiration, halètement ou convection (Fig. 4) .

9. 20% en moyenne C'est la diminution de la demande énergétique des bâtiments résidentiels et commerciaux avec l'application d'un *cool roof* (albedo 0,6) par rapport à une toiture en asphalte (albedo 0,2). (Akbari & Konopacki, 2004). <https://bibliographie.ademe.fr/cadic/5604/recueil-rafraichissement-urbain-011441.pdf>



Fig. 1 (a)



Fig. 1 (b)

Plusieurs espèces animales doivent maintenir une température corporelle moyenne quasi constante soit entre 39-40°C (oiseaux) et 37°C (mammifères)



Fig. 3 (a)

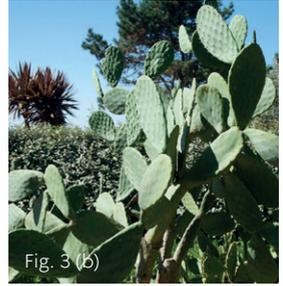


Fig. 3 (b)

Stratégies de présentation de la surchauffe. (a) adaptation de la forme, (b) adaptation de la surface exposée

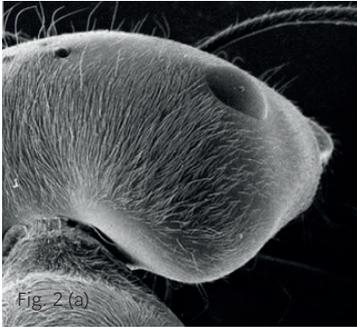


Fig. 2 (a)

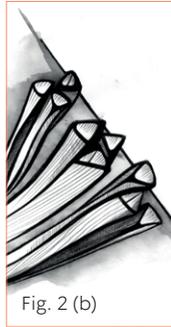


Fig. 2 (b)

Les poils de la surface de ces fourmis argentées sahariennes (a) possèdent une section triangulaire avec deux surfaces corruguées (b). Ils se comportent comme de parfaits réflecteurs de lumière, exploitant le phénomène de réflexion totale. (a) CC BY 4.0 Q. Willot, P. Simonis, J.P. Vigneron, S. Aron (a) Crédit : Ceebios (b)



Fig. 4 (a)



Fig. 4 (b)



Fig. 4 (c)

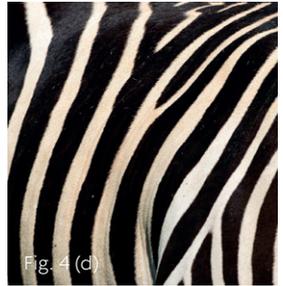


Fig. 4 (d)

Le vivant présente une diversité de stratégies de dissipation de la chaleur communes à plusieurs espèces. (a) évapotranspiration des feuilles des végétaux, (b) transpiration par la peau, (c) halètement chez les mammifères, (d) rafraîchissement par convection en surface et création de micro-turbulences

Quels sont les réalisations bio-inspirées existantes ?

MATÉRIAUX AUTO-RÉACTIFS : adapter sans systèmes actifs les apports solaires perçus par l'enveloppe

Nom du projet et concepteur : *PHO'LIAGE®* (Agence ArtBuild).

Modèle d'inspiration et principe biologique : systèmes passifs d'ouverture et fermeture de plusieurs modèles biologiques (pétales de fleurs, pommes de pin, etc.).

Niveau de maturité : TRL 8/9 – Système réel achevé et qualifié par des tests et démonstrations. Début des travaux de construction début 2021.

Description : la façade *PHO'LIAGE®* est composée de brises soleil qui s'adaptent passivement aux variations thermiques. Cette structure bilame est composée de deux lames en métal aux propriétés thermiques et mécaniques différentes, souples et soudées l'une contre l'autre. Le comportement de dilatation des deux lames étant différent, le brise soleil se déforme localement suivant deux positions distinctes – ouvert et fermé - suivant les variations de température reçues via le rayonnement solaire direct. Ce comportement passif dynamique permet de maintenir un apport de lumière naturelle optimal à l'intérieur tout en se protégeant très localement des surchauffes, le tout sans aucune consommation d'énergie. La première mise en œuvre prévue à grande échelle est la façade du CIRC-IARC - l'Agence Internationale de Recherche sur le cancer de

Lyon. Les propriétés adaptatives du matériau permettent de réguler passivement les apports solaires et ainsi réduire les consommations d'énergie lié au chauffage, rafraîchissement et éclairage artificiel du bâtiment [19].



Fleurs ouvertes



Modules de façade *PHO'LIAGE®* en position ouverte et fermée suivant la température du métal constituant les modules © ArtBuild



Vue aérienne numérique du CIRC-IARC à Lyon © ArtBuild

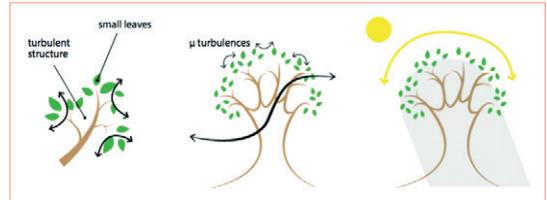
SUR-FAÇADES FRACTALE : créer des îlots de fraîcheur

Nom du projet et concepteur : Sur-façade *Sierpinski Forest* conçue par le professeur Satoshi Sakai de l'Université de Kyoto. La sur-façade a été adaptée au musée des beaux-arts dessiné par l'agence Shigeru Ban à Taïwan.

Modèle d'inspiration et principe biologique : la géométrie fractale des arbres permettant la limitation de l'échauffement de l'arbre et de ses feuilles (Figure X)

Niveau de maturité : TRL 8/9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies

Description : La sur-façade *Sierpinski Forest* est une ombrière constituée de modules assemblés – des tétraèdres de *Sierpinski* - qui permet de diminuer l'échauffement des grandes surfaces construites telles que les toitures, route, parkings, pistes cyclables, voies piétonnes... La forme fractale du tétraèdre permet une dissipation de la chaleur limitant ainsi l'échauffement de la sur-façade. Elle garantit ainsi une zone d'ombrage du bâtiment ou des espaces publics qu'elle abrite aux heures les plus chaudes en été en bloquant 100% des rayons lumineux durant plusieurs heures. Ce système actuellement à l'étude pour des applications à plus grande échelle au Japon permettrait la création d'îlots de fraîcheur urbains [20].



La géométrie fractale des arbres permet la création de micro-turbulences au niveau des feuilles permettant ainsi l'évacuation de la chaleur par convection (a) (b), et une réduction des surfaces exposées aux radiations solaires (c). © Libre de droit, CC-BY-SA, Estelle Cruz



Iconographies des prototypes de façades :

(a) Ombre portée sur le sol des tétraèdres

(b) Vue en contre-plongée de la sur-façade

(c) Vue d'ensemble de la structure de la sur-façade

© Licence Creative Commons SA-NC-BY Estelle Cruz

BÂTIMENTS PASSIFS : ventiler, chauffer et rafraîchir passivement

Nom du projet et concepteur : *Eastgate Building* conçu par l'architecte Mick Pearce à Harare au Zimbabwe (1991 – 1996).

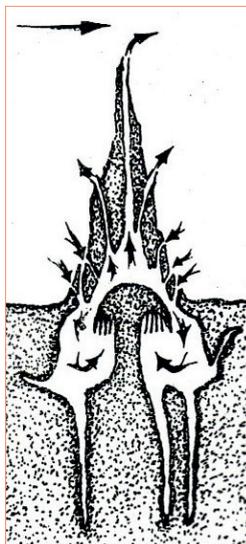
Modèle d'inspiration et principe biologique : Système de ventilation et thermorégulation passif inspiré des termitières (*Odontotermes transvaalensis*)

Niveau de maturité : Bâtiment construit, TRL 9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies

Description : L'*Eastgate building*, bâtiment de bureaux et commerces de 8 étages, s'inspire du système de ventilation passif des termitières. Le système constructif permet une captation de l'air neuf en partie basse du bâtiment (à 9 mètres du sol), puis un refroidissement et acheminement sous les dalles des étages avant d'être diffusé dans les espaces de bureaux puis évacué par les cheminées thermiques en toiture. Le bâtiment absorbe la fraîcheur la nuit pour la restituer durant la journée, et inversement la nuit, les murs diffusent la chaleur emmagasinée pendant la journée. [21].



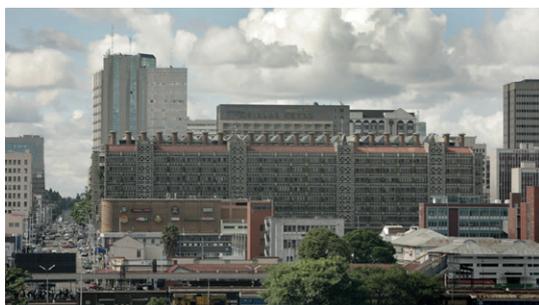
Une termitière, Afrique



Dessin de Mick Pearce
© Mick Pearce



Extrémité Est du bâtiment
© Mick Pearce



Vue d'ensemble de l'*Eastgate building*
© Mick Pearce



Écorce

Références :

[17] « La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires - La librairie ADEME » [En ligne].

Source : https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html?search_query=climatisation&results=46 [lu le 28/09/2021]

[18] « The Future of Cooling – Analysis - IEA. » [En ligne].

Source : <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> [lu le 28/09/2021]

[19] « Pho'liage ® | Art Build. » [En ligne].

Source : <https://www.artbuild.com/lab/pholiage> [lu le 28/09/2021]

[20] S. Sakai et al., « Sierpinski's forest : New technology of cool roof with fractal shapes », Energy Build., vol. 55, pp. 28–34, Dec. 2012

[21] Mick Pearce, « Eastgate Building Harare. » [En ligne].

Source : <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html> [lu le 01/07/2019]

Pour aller plus loin :

- « Analyse comparative de 30 enveloppes bio-inspirées et leurs capacités de multi-régulation », E. Cruz, T. Hubert et Al, 2021, Energy and Buildings
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821003182?via%3Dihub>
- *Biomimétisme & Architecture* (Chapitre 5 : Thermorégulation), M. Pawlyn, 2020, Édition Rue de l'Échiquier
<https://www.ruedelechiquier.net/essais/243-biomimetisme-et-architecture.html>
- « L'architecture biomimétique : quand l'architecture s'inspire de la nature » (page 15), Olivier Scheffer, Édition SymbioPolis, 2011
https://bit.ly/architecture_biomimetique

OPTIMISER ET PÉRENNISER L'EXISTANT

La problématique technique

En France¹⁰, Les activités de construction et de réhabilitation utilisent 400 millions de tonnes de matériaux¹¹ par an et génèrent 340 millions de tonnes de déchets, faisant de ce secteur le plus gros pourvoyeur de déchets.

Or le bilan carbone des filières classique de la construction est très élevé (béton / ciment, métal, laine de roche, polystyrène, plaques de plâtre). La seule production de ciment génère environ 5 % des émissions mondiales de CO²eq. Par ailleurs, au fur et à mesure que les performances d'usage des bâtiments s'améliorent, la part d'énergie

grise devient prépondérante, notamment celle consommée pour la fabrication des matériaux de construction¹².

Enfin, la durée de vie des bâtiments a tendance à diminuer, notamment ses sous-composants, accélérant l'obsolescence et le besoin de rénovation¹³.

Face à ces tendances lourdes de consommation de ressources, tant matériels (notamment minérales) et énergétiques, de la construction, qui s'intensifient avec l'augmentation des volumes de rénovation pour la transition, une autre approche pourrait consister à concevoir des matériaux et bâtiments qui, à l'image du vivant, s'autoréparent ou s'adaptent à moindre coûts.

10. Prospectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la rénovation énergétique BBC, ADEME, Décembre 2019.

<https://www.ademe.fr/prospectives-2035-2050-consommation-materiaux-construction-neuve-renovation-energetique-bbc>

11. La consommation de matières premières a été évaluée par l'ADEME en scénario « *Business as Usual* » à :

○ pour la construction neuve :

• 51 Mt de matières ont été consommées en 2015 pour la construction neuve en France, dont plus de 80% pour le secteur résidentiel.

• Un ratio moyen de consommation de matières premières de l'ordre de 1,35 t/m² SHONRT pour les logements et 1,2 t/m² SHONRT pour le tertiaire.

• Plus de 30% de la consommation est utilisée pour les fondations et infrastructures.

• Plus de 40% de la consommation est liée aux seuls granulats.

○ pour la rénovation BBC :

• Environ 460 Mm³ d'isolants (soit 17 Mt) consommés pour la rénovation BBC de l'ensemble du parc de logements à l'horizon 2050, dont plus de 85% pour les maisons individuelles.

• Plus de 150 Mm³ de laine de verre consommés jusqu'en 2050.

• Environ 57 Mt de matériaux (autres que isolants) consommés jusqu'en 2050, dont plus de 80% pour les maisons individuelles.

12. « *Un bâtiment basse consommation qui ne va nécessiter que 5Kg éq CO²/m².an pour ses usages va mettre 70 à 80 ans pour compenser l'énergie grise mise en œuvre pour sa construction* » (Alain Maugard, Psdt de Qualibat et du Plan de Rénovation du Bâtiment).

Voir aussi : <https://www.construction21.org/france/articles/fr/lenergie-grise-la-face-cachee-de-la-construction.html>

13. D'après l'étude suisse « *Was hält wie lange? Die Lebensdauer der Bauteile* » (en allemand) : considère que les équipements de la cuisine et de la salle de bains, les peintures et les revêtements de sol doivent être changés tous les 10 à 15 ans ; quant aux canalisations, fenêtres ou toits plats, ils doivent être rénovés tous les 30 ans et la structure (béton ou briques), qui constitue le « squelette » du bâtiment, doit être restaurée au bout de 70 à 100 ans.

<http://www.beobachter.ch/fileadmin/dateien/shop/hilfsmittel/0701.pdf>

Comment le vivant maintient son intégrité et s'adapte aux évolutions de l'environnement ?

Les espèces vivantes maintiennent l'intégrité de leur organisme tout au long de leur vie par une grande diversité de processus tels que la mue, la cicatrisation, le renouvellement cellulaire, etc.

Ces processus permettent de garantir des matériaux biologiques aux performances thermiques, acoustiques ou encore mécaniques constantes malgré les variations climatiques et usures auxquels ces organismes sont soumis. La durée de ces phases de renouvellement varie suivant les groupes d'espèces : de quelques heures (reproduction cellulaire) à plusieurs semaines (mue de pelage, peau, plumes) ou plusieurs mois (renouvellement des feuilles des arbres caduques, remplacement d'un organe tel que la queue de certaines espèces de lézards, etc), [22] (Fig. 5). Ces stratégies biologiques de renouvellement, maintien ou remplacement sont mises en œuvre dans des conditions de température et pression ambiante, les 'déchets biologiques' sont rapidement dégradés car intégrés dans les cycles écologiques [23] [24] [25]. Une fois dégradés, ces déchets biologiques servent de ressource alimentaire à d'autres.



Fig. 5 (a)
Feuilles d'érable, un arbre à feuilles caduques



Fig. 5 (b)
Capacité de régénération d'un membre, pour certaines espèces de lézard

Quels sont les réalisations bio-inspirées existantes ?

MATÉRIAUX AUTORÉPARANTS : réparer avant de remplacer

Nom du projet et concepteur : Béton autocicatrisant *Basilisk Self-Healing Concrete*. Produit développé par les chercheurs Hendrik Jonkers et Bart van der Woerd de l'Université Technologique de Delft.

Modèle d'inspiration et principe biologique : Imitation du processus de cicatrisation par création de calcaire lorsque les bactéries entrent en contact avec l'eau.

Niveau de maturité : TRL 9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies

Description : Le béton autocicatrisant *Basilisk* permet une réparation des fissures qui se forment dans les structures bétonnées et altèrent les propriétés mécaniques. Ce processus de réparation est autonome et assuré par l'intégration de bactéries encapsulées dans le béton.

Lorsque des fissures se forment, elles permettent à l'air et l'humidité d'entrer en contact avec les bactéries encapsulées en dormance déclenchant ainsi leur activité et « cicatrisation » du matériau. Les bactéries se multiplient et transforment alors le dioxyde de carbone et les nutriments contenus dans les capsules en carbonate de calcium. La fabrication d'un matériau minéral permet la restauration de l'étanchéité de la structure et maintien des propriétés mécaniques. Ce matériau peut également être appliqué directement pour réparer des structures fissurées existantes en appliquant le produit si celles-ci n'excèdent pas 0,8 mm de largeur¹⁴.



Béton autocicatrisant : application du système de réparation (liquide *Basilisk ER7*)
© Basilisk Self-Healing Concrete

14. *Basilisk Self-Healing Concrete*.
<http://www.basiliskconcrete.com/>

RÉNOVER LA FAÇADE : Surenveloppes thermo-régulatrices passives

Nom du projet et concepteur : *Feuille de Charme* par In Situ Lab (2021). Prototype développé par Nicolas Vernoux-Thélot, architecte DPLG et botaniste, et Teva Vernoux, Directeur de recherche au laboratoire de Reproduction et Développement des Plantes (UMR du CNRS entre l'ENS de Lyon, l'INRA, l'Université Claude Berard Lyon 1 et l'INRIA).

Modèle d'inspiration et principe biologique : la géométrie particulière des feuilles du charme permet d'optimiser l'énergie cinétique de pliage / déploiement [27], qui a notamment inspiré les mécanismes de déploiement des panneaux solaires des satellites de l'agence d'exploration spatiale japonaise depuis 1995, popularisés par l'astrophysicien japonais Miura-Ori (« Pliage de Miura »).

Niveau de maturité : TRL 4 – Validation en laboratoire du composant ou de l'artefact produit

Description : *Feuille de Charme* est un module de sur-façade disposant d'un occultant solaire totalement passif et nécessitant un minimum d'énergie pour être actionné par des actionneurs qui réagissent uniquement à la température. L'occultant est une toile d'extérieur micro-perforée présentant par ailleurs de très bonnes capacités à réfléchir la radiation solaire tout en laissant passer la lumière et la vue. Ainsi, les rayons incidents du soleil viennent activer l'ouverture des occultants de manière discrète (module par module), uniquement là où il y a échauffement de la sur-façade. L'économie générée est de l'ordre de 7 à 15% sur le poste climatisation (réduction de 3 à 5°C de la température ambiante intérieure du bâtiment au droit de la façade).



Feuilles de Charme



Projet de surfaçade thermodynamique passif *Feuille de Charme* pour la rénovation d'un immeuble de bureau, Paris XV^e
© INSITU Lab & In Situ Architecture 2020-2021

Références :

[22] « Bioinspired self-healing materials : lessons from nature » Joseph C. Cremaldi and Bharat Bhushan.

Source : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5870156/>

[23] Ulrike G.K. Wegst et al., « Bioinspired structural materials », Nature Materials, 14, 2014

[24] Clément Sanchez et al., « Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems », Nature Materials, 4, 2005

[25] « Bioinspiration and Biomimicry in Chemistry : Reverse-Engineering Nature »

Source : <https://en.lignelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118310083>

[26] Basilisk Self-Healing Concrete

Source : <http://www.basiliskconcrete.com/>

[27] Kobayashi, Daimaruya et Vincent « Folding/ Unfolding Manner of Tree Leaves as a Deployable Structure », janvier 2000

Pour aller plus loin :

• *Performance énergétique et environnementale dans les quartiers en renouvellement urbain*, Les carnets de l'innovation, ANRU - Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine (2021)

https://www.anru.fr/sites/default/files/media/downloads/energie_et_environnement_-_carnet_de_linnovation.pdf

OPTIMISER LES CONSOMMATIONS D'EAU

La problématique technique

« Au niveau mondial, le secteur du bâtiment consomme en moyenne pour son fonctionnement 20% de l'eau douce exploitée annuellement, auxquels il faut ajouter environ 5% pour la seule phase de construction, sans compter la fabrication de matériaux comme le ciment par exemple, fort consommateur en eau (les matières premières sont mélangées à une proportion de 30 à 40% d'eau). »¹⁵

Cependant, seulement 1 % de l'eau sur Terre est de l'eau douce, et elle est inégalement répartie, ce qui mène à ce qu'un homme sur cinq n'ait pas accès à l'eau potable. Ainsi, l'intérêt d'une maîtrise de la consommation d'eau est nécessaire économiquement et socialement, mais également écologiquement afin de préserver l'environnement en économisant les ressources naturelles¹⁶.

Comment le vivant « optimise la ressource eau » ?

L'eau est essentielle à tous les organismes vivants, la plupart étant constitués de 55 à 75% d'eau, et elle est également présente dans un grand nombre de processus comme l'évaporation, la condensation ou les précipitations.

La vie s'est adaptée suivant les différents climats pour optimiser les consommations en eau et ainsi capter, conserver, transporter et perdre l'eau de manière efficace (Fig. 6). Dans les milieux où l'eau douce est peu abondante comme les déserts, certaines espèces doivent s'adapter afin de combler leurs besoins en eau. Le scarabée de Namibie et le diable cornu ont adapté leur enveloppe et comportement afin de capter les gouttes d'eau dans la terre ou dans l'air. Dans ces milieux arides, il est également nécessaire de minimiser les pertes en eau en évitant l'évaporation ou en créant de l'ombre tel que le cactus et l'acacia faux-gommier, dont la géométrie de surface met continuellement à l'ombre la majorité de l'enveloppe.

15. Source : *Hyper-urbanisation : la marée grise*, Olivier Scheffer, édition SymbioPolis, novembre 2010
<https://bit.ly/hyperurbanization>

16. http://www.eptb-vienne.fr/IMG/pdf/Guide_Eco_Eau_allege.pdf

Dans le cas où les précipitations sont abondantes mais rares, stocker l'eau est essentiel pour certaines espèces végétales. Les cactus (*Cactaceae*) peuvent par exemple absorber et stocker de grandes quantités d'eau (on parle de plantes xérophytes qui stockent dans leurs tissus des réserves de « suc » pour faire face aux longues périodes de « suc » pour faire face aux longues périodes de sécheresse). Le transport de l'eau est également très important et les feuilles ou nos artères sont spécialistes dans ce domaine avec des réseaux de distribution constants et optimaux.

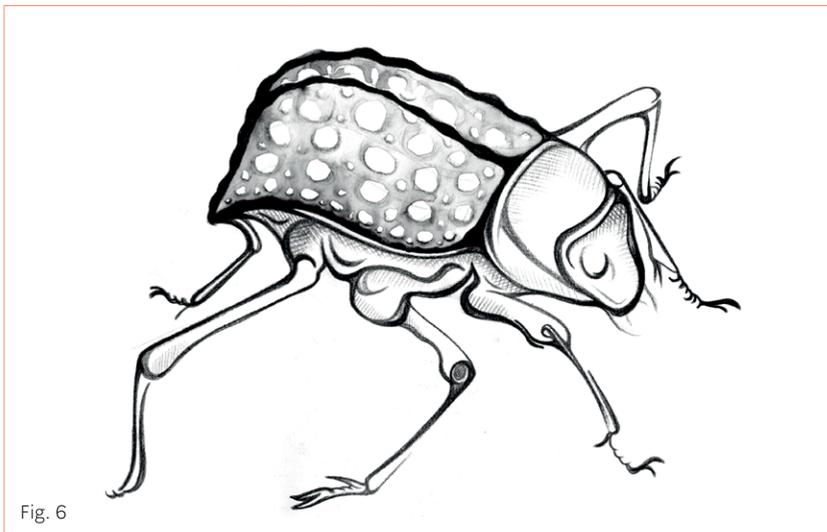


Fig. 6

Le scarabée de Namibie qui capte l'eau de l'air dans le désert
Crédit : Ceebios

Quels sont les réalisations bio-inspirées existantes ?

MATÉRIAUX : Gestion de l'eau par un matériau hydrophobe

Nom du projet et concepteur : *Sheerfill architectural membrane* par Saint-Gobain.

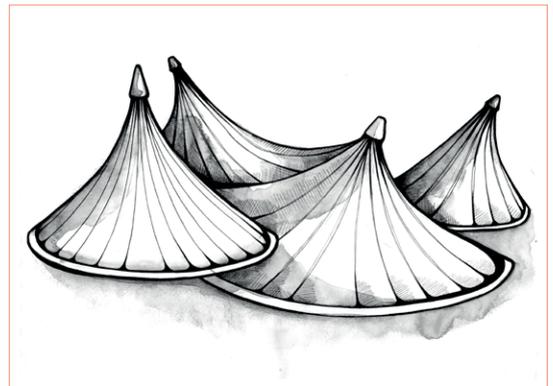
Modèle d'inspiration et principe biologique : Matériau inspiré du plumage des canards qui empêche la pénétration de l'eau dans la surface.

Niveau de maturité : TRL 8/9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : *Sheerfill* est une structure de membrane tendue utilisée pour les toitures. La membrane est composée de fibre de verre et de polytétrafluoroéthylène (PFTE). Cette membrane a notamment été utilisée dans ces débuts pour la toiture d'un bâtiment de l'université de La Verne et a montré que la membrane en fibre de verre tissée est structurellement solide, durable, résistante aux intempéries, immunisée contre les rayons UV et étanche à l'eau¹⁷.



Canard colvert



Première utilisation de la membrane *Sheerfill* pour l'université de La Verne
Crédit : Ceebios

17. <https://www.sheerfill.com/news/sheerfill-and-evolution-roofing-membranes>

FAÇADES : Projet de dessalement des eaux

Nom du projet et concepteur : Le *Water Theater* de Las Palmas par l'agence Grimshaw dans les îles Canaries

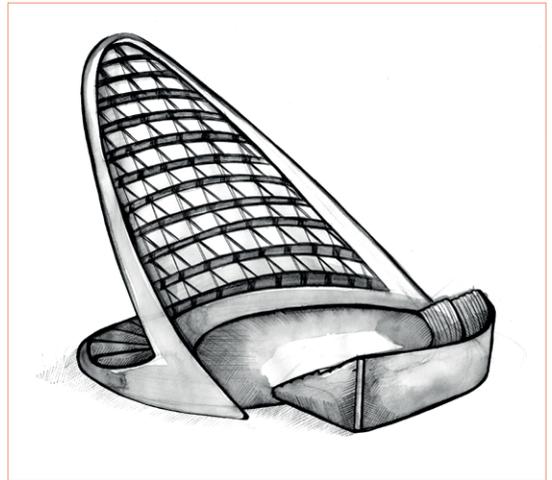
Modèle d'inspiration et principe biologique : Façade de dessalement inspiré du scarabée de Namibie qui collecte l'eau de l'air grâce à son enveloppe. En effet, la surface bosselée de l'élytre des coléoptères du désert de Namibie facilite la formation de gouttelettes d'eau à partir de l'humidité de l'air pendant la rosée.

Niveau de maturité : TRL 4/5 (technologie validée dans un environnement de laboratoire ou dans un environnement simulé).

Description : Le *Water Theater* profite des vents qui soufflent régulièrement dans la même direction quasiment toute l'année et l'eau de mer froide afin de créer de grandes quantités d'eau dessalée. Des évaporateurs et des condensateurs alimentés en eau de mer sont à la base de cette technologie. Les évaporateurs génèrent de l'humidité tandis que les condensateurs récupèrent l'eau douce. L'eau participe ainsi au refroidissement ainsi qu'à l'irrigation.



Le scarabée de Namibie



Le *Water Theater* de Las Palmas
Crédit : Ceebios

BÂTIMENT : Collecte d'eau dans des zones arides par gravitation

Nom du projet et concepteur : La *Seawater Greenhouse* par Charlie Paton à Muscat, Oman

Modèle d'inspiration et principe biologique : Modèle de collecte d'eau inspiré du scarabée de Namibie qui collecte l'eau de l'air grâce à sa peau.

Niveau de maturité : Bâtiment construit, TRL 8/9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : La *Seawater Greenhouse* exploite l'évaporation de l'eau de mer pour l'irrigation dans la serre. La méthode implique de pomper l'eau de mer dans des zones arides et l'utiliser pour humidifier et refroidir l'air, environnement idéal pour les cultures dans ces régions.



La *Seawater Greenhouse* à Oman juste après son achèvement
© Charlie Paton



Intérieur de la serre
© Charlie Paton

Pour aller plus loin :

- *Towards the living envelope* (Chapitre 6 : Water), Lidia Badarnah Kadri
<https://uwe-repository.worktribe.com/output/942071/towards-the-living-envelope-biomimetics-for-building-envelope-adaptation>
- *Biomimétisme & Architecture* (Chapitre 4 : Gestion de l'eau), M. Pawlyn, 2020, Édition Rue de l'Échiquier

ALLÉGER LES STRUCTURES

La problématique technique

La construction des bâtiments est très consommatrice en matériaux, dont certains ont un impact environnemental majeur. La ressource la plus utilisée dans la construction de maisons individuelles est le parpaing avec un taux de presque 50%¹⁸.

Cependant, le ciment utilisé dans le parpaing est entre autres une ressource très intensive en carbone pour sa production. En 2018, l'émission de CO² de la production du ciment était à plus de 0,5 t de CO² par tonne de ciment¹⁹ et la fabrication du ciment représente 3% des émissions de carbone dans le monde²⁰.

Comment le vivant « allège les structures » ?

Dans le vivant, la forme coûte moins cher que les matériaux. Un grand nombre de stratégies sont utilisées dans la nature pour avoir des structures très efficaces.

Une méthode notable pour réduire les matériaux dans les structures est d'utiliser des tubes creux comme le bambou qui gardent une flexion et une rigidité similaire à celle d'un solide carré plein. Afin de minimiser les matériaux lourds, la nature va privilégier les procédés comme les plis, les voûtes, les nervures et les gonflements pour avoir une structure efficace légère en matériaux. Certaines familles d'araignées utilisent des structures tendues, et des oiseaux vont plutôt avoir tendance à tisser ou attacher leurs nids. Une méthode également très efficace est d'accumuler la matière là où les contraintes sont les plus fortes et la retirer ailleurs, comme le font les os ou les arbres.

18. <https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/construction-de-maison-les-materiaux-les-plus-utilises-sont-2016-12-07-29516>

19. [iea.org/fuels-and-technologies/cement](https://www.iea.org/fuels-and-technologies/cement)

20. <https://www.wri.org/initiatives/climate-watch>. En France, le ciment génère 23% des émissions du secteur industriel

Quels sont les réalisations bio-inspirées existantes dans ce domaine ?

MATÉRIAUX : principe structurel basé sur les matériaux

Nom du projet et concepteur : Elytra Research Pavillon par ICD / ITKE (Londres, 2016)²¹

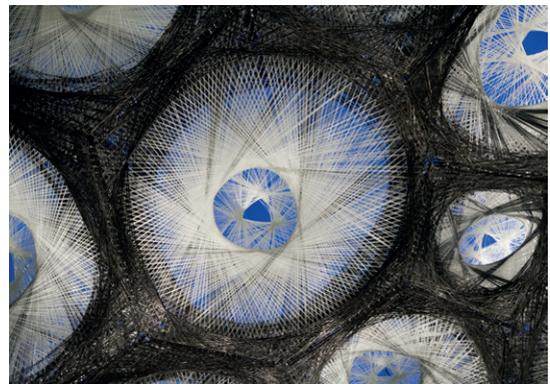
Modèle d'inspiration et principe biologique : Géométrie basée sur le principe structurel extrait des élytres de scarabée.

Niveau de maturité : TRL 7/8 - Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : Ce pavillon est un projet faisant partie d'une série de pavillons dont les géométries sont basées sur les principes structurels extraits des élytres de scarabée. La géométrie globale réagit aux conditions de l'espace public autour du bâtiment universitaire. En même temps, elle démontre la capacité d'adaptation morphologique du système, en générant des dispositions spatiales plus complexes qu'une structure à coque simple.



Elytra Research Pavillon, pavillon en fibre de carbone
© ICD/ITKE University of Stuttgart



Géométrie exploitant les paramètres des fibres de carbone
© ICD/ITKE University of Stuttgart

21. ICD – Institute for Computational Design and Construction, University of Stuttgart (Prof. Achim Menges) & ITKE – Institute of Building Structures and Structural Design, University of Stuttgart (Prof. Jan Knippers). Research Development & Project Management : Moritz Dörstelmann, Vassilios Kirtzakis, Stefana Parascho, Marshall Prado, Tobias Schwinn. Concept Development : Leyla Yunis. System Development & Realisation : WiSe 2012 – SoSe 2013 : Desislava Angelova, Hans-Christian Bäcker, Maximilian Fichter, Eugen Grass, Michael Herrick, Nam Hoang, Alejandro Jaramillo, Norbert Jundt, Taichi Kuma, Ondrej Kyjánek, Sophia Leistner, Luca Menghini, Claire Milnes, Martin Nautrup, Gergana Rusenova, Petar Trassiev, Sascha Vallon, Shiyu Wie. WiSe 2013 : Hassan Abbasi, Yassmin Al-Khasawneh, Desislava Angelova, Yuliya Baranovskaya, Marta Besalu, Giulio Brugnaro, Elena Chiridnik, Eva Espuny, Matthias Helmreich, Julian Höll, Shim Karmin, Georgi Kazlachev, Sebastian Kröner, Vangel Kukov, David Leon, Stephen Maher, Amanda Moore, Paul Poinet, Roland Sandoval, Emily Scoones, Djordje Stanojevic, Andrei Stoiculescu, Kenryo Takahashi, Maria Yablonina supported by Michael Preisack. Module : Bionics of animal constructions, WiSe 2012 : Gerald Buck, Michael Münster, Valentin Grau, Anne Buhl, Markus Maisch, Matthias Loose, Irene Viola Baumann, Carina Meiser. In Cooperation with : Institute of Evolution and Ecology, Evolutionary Biology of Invertebrates, University of Tübingen (Prof. Oliver Betz) ; Department of Geosciences, Paleontology of Invertebrates and Paleoclimatology University of Tübingen (Prof. James H. Nebelsick) ; ANKA / Institute for Photon Science and Synchrotron Radiation, KIT / Karlsruhe Institute of Technology (Dr. Thomas van de Kamp, Tomy dos Santos Rolo, Prof. Dr. Tilo Baumbach) ; Institute for Machine Tools, University of Stuttgart (Dr.-Ing. Thomas Stehle, Rolf Bauer, Michael Reichersdörfer) & Institute of Textile Technology and Process Engineering ITV Denkendorf (Dr. Markus Milwich).

FAÇADES : Structure allégée, structure de tension

Nom du projet et concepteur : *West German Pavillon* par Frei Otto, Montréal, 1967

Modèle d'inspiration et principe biologique : Structure de fil inspiré des toiles d'araignées.

Niveau de maturité : Bâtiment construit, TRL 8/9 - Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : Le *West German Pavillon* est une des nombreuses structures de tensions construit par Frei Otto, pionnier dans ce domaine. Son système utilise un toit en maille d'acier suspendu à huit mâts d'acier élancés de hauteur variable, situés à intervalles irréguliers et soutenus par des câbles d'acier ancrés à l'extérieur de la structure, couvrant une surface de la taille d'un pâté de maison. Le filet en maille d'acier du toit, suspendu aux haubans, était ensuite recouvert d'une peau en plastique translucide.



Le *West German Pavillon*
Crédit : Ceebios

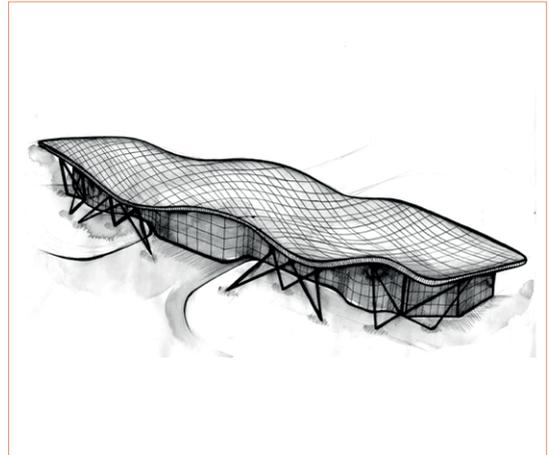
BÂTIMENT : Economie de ressources, forme performante

Nom du projet et concepteur : *Savill building* par Glenn Howells Architects, Windsor Great Park, 2006

Modèle d'inspiration et principe biologique : Coques en résille inspirées entre autres de la coquille de l'ormeau.

Niveau de maturité : Bâtiment construit, TRL8/9 - Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : Le *Savill Building* est un bâtiment inspiré des coquilles et des dômes que l'on trouve dans la nature. Sa toiture en gridshell utilise une série d'éléments linéaires qui agissent ensemble comme une coquille. En utilisant de petites sections de bois sous une forme très efficace, les coques en treillis permettent de réaliser des économies d'un facteur 15 dans l'utilisation des ressources.



Le *Savill Building*
Crédit : Ceebios



Aile de papillon

Pour aller plus loin :

- *Biomimétisme & Architecture* (Chapitre 1 : Structures plus efficaces), M. Pawlyn, 2020, Édition Rue de l'Échiquier

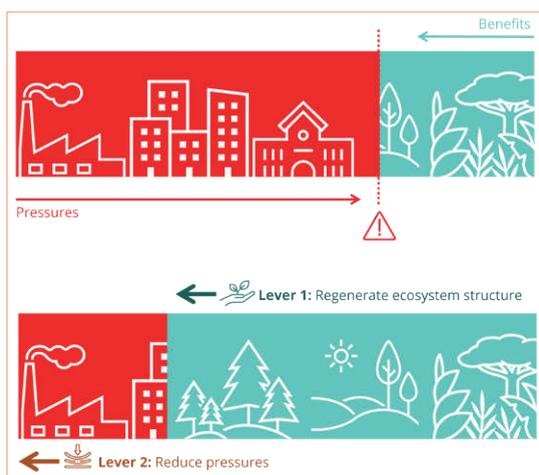
CONCEVOIR DES BÂTIMENTS À IMPACTS POSITIFS POUR L'ENSEMBLE DU VIVANT

La problématique technique

Dans un contexte de crise écologique, les villes sont une cause éminente de simplification des processus écologiques et de perte de biodiversité. L'urbanisation et construction de nouveaux bâtiments altèrent la santé des écosystèmes impactant directement l'ensemble du vivant et alimentant le changement climatique [29] [30]. Le design régénératif propose de créer des bâtiments qui favorisent des impacts positifs et bénéfiques mutuels entre sociétés humaines et écosystèmes [31] [32]. En se basant sur la notion écologique de services écosystémiques, cette nouvelle génération de bâtiments permet une réintégration du bâti dans les cycles biogéochimiques de l'eau, du carbone, des sols, etc.

Comment le vivant maintient les services écosystémiques ?

Les bénéfices de la nature aux personnes, ou les services écosystémiques, regroupent l'ensemble des bénéfices directs et indirects de la nature à nos sociétés [30] [33]. Ils sont classiquement regroupés en quatre familles : les services d'approvisionnement (en eau potable, en nourriture, en molécules d'intérêt notamment pharmaceutiques...), les services de régulation (de la qualité de l'air, du climat, de l'eau, la pollinisation...), les services de soutien (le cycle des nutriments, la photosynthèse, la formation des sols...) et enfin les services culturels (éducation, activités extérieures, spiritualité...). Ces bénéfices sont inhérents à la structure et fonctionnement des écosystèmes, des espaces de nature complexes et en bonne santé.



Théories liées à la production des services écosystémiques © Eduardo Blanco



Ensemble des services écosystémiques rendus par le vivant © WWF Living Planet Report 2016, adapted from the Millennium ecosystem Assessment 2005

Quels sont les réalisations bio-inspirées existantes dans ce domaine ?

DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION QUI ACCUEILLENENT LA VÉGÉTALISATION SPONTANÉE

Nom du projet et concepteur : *Concrete Sprig* par XTU Architects, Anouk Legendre et Nicolas Desmazières. Collaboration avec Ciments Calcia, Tandem Urbain et Roland Cahen.

Modèle d'inspiration et principe biologique : Roches des falaises minérales permettant la colonisation naturelle par des mousses, lichens, et autres plantes pionnières.

Niveau de maturité : TRL 4 – Validation en laboratoire du composant ou de l'artefact produit.

Description : Les propriétés physico-chimiques du béton conventionnel ne sont pas favorables au développement des plantes sur la durée (le ciment étant trop basique). XTU Lab a travaillé sur une formulation adaptée et une matrice granulaire optimale pour permettre l'accueil spontanée de la végétation directement au sein des blocs de béton, ainsi que la circulation et rétention optimale de l'eau, et enfin une sélection d'espèces végétales et de substrats compatibles avec la matrice support, afin d'initialiser la végétalisation par des techniques d'hydroseeding (projection directement sur les supports du mélange par une lance adaptée). Les gains sont multiples, depuis l'accueil de la biodiversité, le rafraîchissement urbain (par le phénomène adiabatique d'évapotranspiration des plantes), ou l'atténuation des bruits ambiants.



Blocs de béton « *Concrete Sprig* »
© XTU Architects

DES ENVELOPPES QUI ACCUEILLENT PLUSIEURS RÈGNES DU VIVANT – ANIMAL, VÉGÉTAL ET CHAMPIGNON

Nom du projet et concepteur : *Groupe Scolaire des Sciences et de la Biodiversité*²² (Boulogne-Billancourt, 2010) conçu par l'agence d'architecture Chartier Dalix.

Modèle d'inspiration et principe biologique : Écosystème de falaises minérales permettant la création de services écosystémiques de support, régulation, soutien et culturel.

Niveau de maturité : TRL 9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : Le *Groupe Scolaire des Sciences & de la Biodiversité* se situe dans le quartier du Trapèze, l'un des premiers quartiers français à obtenir la certification écoquartier. Le bâtiment est composé de 18 salles de classes et d'un gymnase dimensionné pour accueillir des compétitions régionales. Cette école a ouvert ses portes à la rentrée scolaire 2014 à 482 élèves, de la maternelle à l'élémentaire. Perçu comme le poumon vert du quartier du Trapèze ce bâtiment participe à la restauration écologique de cette ancienne friche industrielle. Dotée d'un jardin

sur son toit accueillant jusqu'à 1,5 mètres de pleine terre et d'une enveloppe dite vivante, inspirée des falaises minérales, cette école facilite l'accueil de la biodiversité en milieu urbain, par la forme de ses murs et par la création d'une continuité d'habitat pour la biodiversité entre le sol, les murs et le toit. À ce jour, les écologues comptabilisent plus d'espèces présentes que celles initialement introduites²³.



Falaises minérales



Le *Groupe Scolaire des Sciences et de la Biodiversité*
Crédit : Ceebios

22. <https://www.chartier-dalix.com/wp-content/uploads/2018/01/Article-AA422.pdf>

23. Le 28 juin 2016, Audrey Muratet, écologue, a effectué un premier relevé de la faune et de la flore. Son rapport fait apparaître que sur les 114 espèces recensées, 44 sont issues des plantations d'origine et 70 sont des espèces arrivées spontanément. *École élémentaire Sciences et biodiversité : suivi écologique - Chartier Dalix (chartier-dalix.com)*
<https://www.chartier-dalix.com/2017/12/20/ecole-elementaire-sciences-et-biodiversite-suivi-ecologique/>

DES BÂTIMENTS RÉGÉNÉRATIFS QUI RENDENT LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Nom du projet et concepteur : *Bullitt Center*, Living Building Institute, Seattle par l'agence Miller Hull Partnership (2013).

Modèle d'inspiration et principe biologique : le Pin de Douglas et son écosystème forestier.

Niveau de maturité : TRL 9 – Système réel achevé et qualifié par des missions opérationnelles réussies.

Description : Situé à Seattle dans l'état de Washington, le *Bullitt Center* est considéré à ce jour comme étant l'un des bâtiments commerciaux les plus écologiques au monde. En 2013, le *Bullitt Center* devient le troisième bâtiment à obtenir la certification Living Building Challenge. En s'inspirant du Pin de Douglas, En s'inspirant des processus écologiques du Pin de Douglas et des forêts qu'il constitue, espèce endémique de la région, le *Bullitt Center* tente de s'insérer au sein de l'écosystème urbain de Seattle sans le perturber ni y émettre des externalités négatives et s'intéresse à restaurer les services écosystémiques préalablement existants sur le site du projet. L'objectif est d'édifier un bâtiment régénératif, ayant une empreinte écologique, sociale et économique positive, et ce en tenant compte de l'ensemble de son cycle de vie.

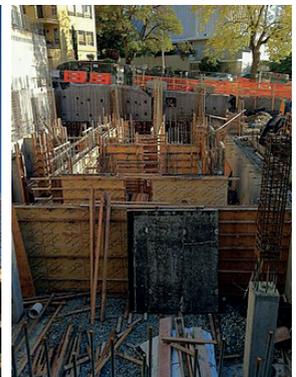
Autonome en énergie et en eau, le *Bullitt Center* a été conçu dans l'objectif de démontrer qu'il était possible d'ériger un bâtiment commercial ayant une empreinte écologique neutre, et par ailleurs non dépendant des énergies fossiles. La démarche intérieure biophile permet aux utilisateurs de renouer avec leur environnement et d'augmenter ainsi leur sentiment de bien-être.



Pin douglas



Bullitt Center, en janvier 2014
© Wikipedia



Construction en octobre 2011
© Wikipedia

Références :

[28] *Performance énergétique et environnementale dans les quartiers en renouvellement urbain*, Les carnets de l'innovation, ANRU - Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine (2021).

Source : https://www.anru.fr/sites/default/files/media/downloads/energie_et_environment - carnet_de_linnovation.pdf

[29] M. Alberti, « The effects of urban patterns on ecosystem function », *Int. Reg. Sci. Rev.*, vol. 28, no. 2, pp. 168–192, 2005.

[30] IPBES, « Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. », 2019.

Pour aller plus loin :

• *Typologie de l'implantation de la flore spontanée en ville dense*, (openedition.org), Xavier Lagurgue, Flavie Mayrand et Philippe Clergeau, volume 19 numéro 2 | octobre 2019

<https://journals.openedition.org/vertigo/25986>

• *Optimizing Urban Ecosystem Services : The Bullitt Center, Case Study*, Ecostrust, Stuart Cowan, Brent Davies, David Diaz, Noah Enelow, Kevin Halsey, Kathryn Langstaff (2014)

http://www.bullittcenter.org/wp-content/uploads/2014/09/bullitt_report_7.16.14_high_res.pdf

• *Living Proof, The Bullitt Center, High Performance Building Case Study*, University of Washington, Center for Integrated Design, Robert B. Peña (2014)

<http://www.bullittcenter.org/wp-content/uploads/2015/08/living-proof-bullitt-center-case-study.pdf>

• Label régénératif et bioinspiré: LBC – Living Building Challenge

<https://living-future.org/lbc/>

• Projet Nature4Cities

<https://www.nature4cities.eu/>

• COST Restore

<https://www.eurestore.eu/>

COMMENT METTRE EN ŒUVRE LE BIOM- METISME?

Le biomimétisme est par nature une approche pluridisciplinaire. Aux dimensions économiques, techniques, logistiques, relationnelles ou encore réglementaires initiales du projet d'architecture s'ajoutent des savoir-faire méthodologiques et techniques de mise en œuvre du biomimétisme. Intégrer le biomimétisme lors des phases de conception implique donc :

1

La mobilisation de nouvelles expertises au sein de l'équipe projet

2

L'utilisation d'outils et/ou méthodologies en biomimétisme appliquée à l'architecture

3

La mise en œuvre de nouveaux systèmes constructifs

CONSTITUER UNE ÉQUIPE PROJET « BIOMIMÉTIQUE »

La démarche du biomimétisme est facilitée par un ou plusieurs acteurs de l'équipe de maîtrise d'œuvre ayant une expérience pratique ou connaissance approfondie des méthodes, outils et cas d'études existants. Le portage et la coordination de l'approche peut être interne ou externe à l'équipe de maîtrise d'œuvre.

Le portage et coordination externe du biomimétisme sont assurés par un acteur spécialisé dans l'accompagnement de projets en biomimétisme tels que le centre d'études et d'expertises en biomimétisme Ceebios, le studio de design BBP - Big Bang Projet, le bureau d'études environnement Pikaia, etc. Ces acteurs facilitent l'appropriation du sujet par l'ensemble de l'équipe de maîtrise d'œuvre par un accompagnement technique et méthodologique tout au long du projet.

Le portage et la coordination interne du biomimétisme peuvent être assurés par un ou plusieurs acteurs de l'équipe de maîtrise d'œuvre tels que les architectes, un ou plusieurs bureaux d'études (environnement, thermique, structure, etc) ou encore le promoteur immobilier. Ces acteurs doivent à minima avoir une expérience de mise en œuvre de la démarche du biomimétisme dans le cadre de projets d'architecture ou avoir suivi une formation spécialisée en biomimétisme et architecture²⁴. La France compte à ce jour plusieurs dizaines d'acteurs de la maîtrise d'œuvre ayant mis en œuvre le biomimétisme dans le cadre de projets de construction tels que les membres du collectif Biomim'City Lab, l'agence ArtBuild, etc

Quant à la maîtrise d'ouvrage, elle peut également se faire accompagner, notamment par le Ceebios, qui a co-développé avec le Biomim'City Lab un guide spécifique à destination de la MOA pour intégrer le biomimétisme dans ses appels d'offres.



Lauréat Paris Grand Métropole, projet Ecotone
© Luxigon / Oxo architectes / Compagnie de Phalsbourg



Lauréat Paris Grand Métropole, projet Ecotone
© Luxigon / Oxo architectes / Compagnie de Phalsbourg

24. Voir partie « Se former : les formations professionnelles », page 72.

Critères d'évaluation	Indicateurs
<p>Composition de l'équipe projet</p> <p>Au sein de l'équipe projet, quels acteurs facilitent l'intégration de l'approche du biomimétisme tout au long du projet ?</p> <p><i>À minima : deux membres de l'équipe projet formés à la mise en œuvre du biomimétisme facilitent la mise en œuvre de la démarche tout au long du projet.</i></p> <p><i>Rappel : les acteurs sont classés suivant leur degré d'influence dans l'acte de concevoir. L'architecte mandataire et le bureau d'études environnement sont en général les acteurs ayant le plus de poids pour faciliter l'intégration du biomimétisme dans un projet.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Agence d'architecture <input type="checkbox"/> Bureau d'études (préciser) <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Énergie <input type="checkbox"/> Environnement (écologues, biologistes) <input type="checkbox"/> Structure <input type="checkbox"/> Fluides <input type="checkbox"/> Autre (préciser) <input type="checkbox"/> Agence d'urbanisme ou de dvlpt régional <input type="checkbox"/> Aménageur <input type="checkbox"/> Promoteur immobilier <input type="checkbox"/> Laboratoire de recherche (préciser) : <input type="checkbox"/> Structure de conseil en biomimétisme <input type="checkbox"/> Constructeur <input type="checkbox"/> Partenaire académique pour l'assise scientifique <input type="checkbox"/> Représentant(s) de la société civile (préciser) <input type="checkbox"/> Autre (préciser) :
<p>Références de l'équipe projet</p> <p>Quelles sont les expériences passées de mise en œuvre du biomimétisme au sein de l'équipe projet ?</p> <p><i>Les références sont à préciser.</i></p> <p><i>À minima : un membre de l'équipe projet a été impliqué dans l'une des actions décrites.</i></p> <p><i>Rappel : les références sont classées suivant le niveau de maturité en biomimétisme qu'elles ont permis d'acquérir.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Conception (ou participation à la conception) d'un projet urbain ou bâtiment bio-inspiré construit ou en cours de construction <input type="checkbox"/> Recherche académique (publication d'articles de recherche, recherche menée avec ou au sein d'un laboratoire de recherche ou en partenariat...) <input type="checkbox"/> Conception (ou participation à la conception) d'un projet urbain ou de bâtiment bio-inspiré non sélectionné <input type="checkbox"/> Conseil et accompagnement en biomimétisme tout champ d'activité confondu <input type="checkbox"/> Réflexion en amont sur un bâtiment bioclimatique / bio-inspiré / solutions techniques <input type="checkbox"/> Vulgarisation et sensibilisation en biomimétisme <input type="checkbox"/> Autre (préciser) :

Très pertinent Pertinent Peu pertinent

« Grille d'évaluation des compétences en biomimétisme de l'équipe projet », extraite du guide *Évaluer la qualité technique d'opérations bio-inspirées*, Ceebios & Biomim'City Lab, 2022
 © Ceebios

Références :

[31] R. J. Cole, « Regenerative design and development : current theory and practice », *Build. Res. Inf.*, vol. 3218, 2012.

[32] M. Brown et al., « Sustainability, Restorative to Regenerative. COST Action CA16114 RESTORE, Working Group One Report: Restorative Sustainability », 2018.

[33] *Millenium Ecosystem Assessment, Ecosystems and human well-being : Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.

Pour aller plus loin :

- Guide *Évaluer la qualité technique d'opérations bio-inspirées*, Ceebios & Biomim'City Lab, 2022

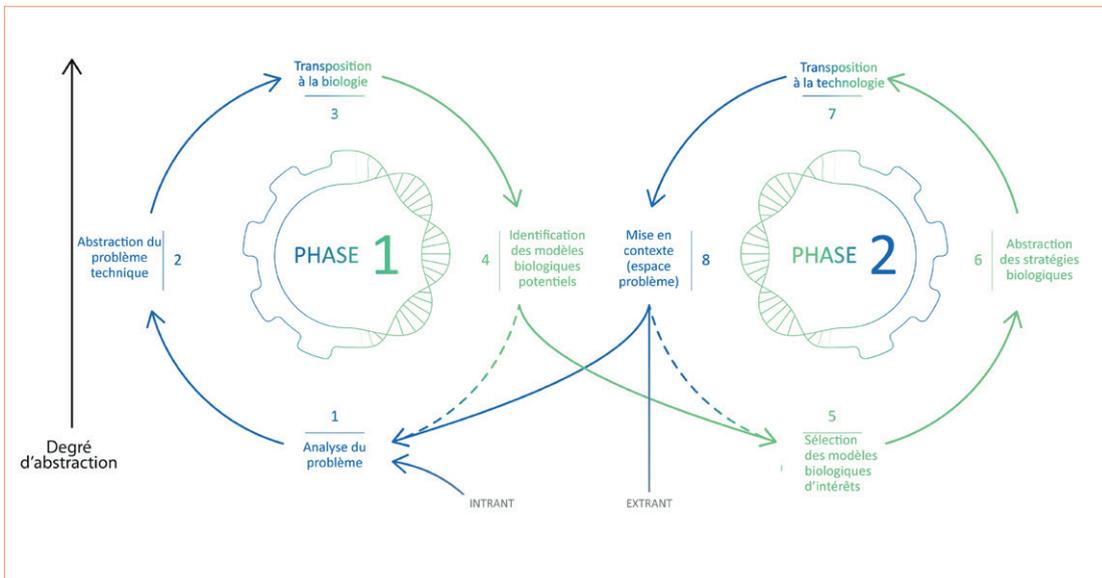
LA DÉMARCHE EN PHASE DE CONCEPTION

La démarche du biomimétisme vise à la fois la résolution de problématiques techniques du bâtiment (performance acoustique de l'enveloppe, optimisation énergétique du bâtiment, allègement des structures, etc.) et l'amélioration de la performance environnementale globale du projet. La démarche du biomimétisme peut ainsi être implémentée grâce à deux approches complémentaires : une approche fonctionnelle et une approche écosystémique pour le développement d'un projet d'architecture bio-inspiré.

L'approche fonctionnelle : résoudre une problématique technique spécifique

L'approche fonctionnelle consiste à s'inspirer des systèmes vivants pour résoudre une problématique technique ciblée telle que la régulation thermique, l'isolation acoustique, la limitation des îlots de chaleur ou encore l'optimisation énergétique [34]. Cette démarche est définie par la norme ISO 1845:2015 et les huit étapes de conception nommées « Unified problem-driven of biomimetics » dans la thèse de recherche de Pierre-Emmanuel Fayemi (2012). Elle fournit un cadre méthodologique pour le développement de produits biomimétiques à partir de principes et mécanismes observés dans le vivant.

Adaptées à une problématique technique de la construction, les grandes étapes de conception biomimétique pour répondre à une problématique technique sont les suivantes :



Fayemi, P. E. (2016). Innovation par la conception bio-inspirée: proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM)
 © Pierre-Emmanuel Fayemi

01

ENJEU TECHNIQUE : Identifier les problématiques techniques du projet.

Cette étape consiste à identifier le périmètre technique de la problématique initiale transposable au monde du vivant. Les problématiques techniques identifiées sont spécifiques à chaque cahier des charges et parcelle du projet.

Exemple de problématique technique : ventilation et thermorégulation passive du bâtiment afin de limiter les consommations d'énergie des équipements du bâtiment.

02

EXPLORATION DU VIVANT : Identifier les organismes biologiques répondant à la problématique technique.

Cette étape est centrée sur la recherche dans diverses sources de données des stratégies du vivant répondant aux problématiques fonctionnelles précédemment identifiées. Ces stratégies biologiques sont ensuite comparées et les plus pertinentes d'entre elles sélectionnées afin d'être approfondies. Une compréhension plus fine des mécanismes biologiques sous-jacents mène ensuite à l'étape de transposition du ou des principes biologiques.

Exemple de modèles biologiques : système de ventilation passif des termites de la famille des Macrotermes (espèce *Odontotermes transvaalensis* endémique du sud de l'Afrique – Afrique du Sud, Zambie, Mozambique et Zimbabwe).

03

ABSTRACTION BIOLOGIQUE : Transposer les solutions biologiques en principes constructifs et techniques.

Cette étape permet d'abstraire les principes biologiques en concepts avant leur transposition technique et architecturale.

Exemple d'abstraction biologique : système de ventilation passif réversible basé sur l'inertie thermique.

04

CONCEPTION INNOVANTE : Transposer les solutions biologiques en systèmes constructifs et techniques.

Cette étape permet de transposer les principes biologiques identifiés à l'étape 3 en solution techniques éco-conçues. La transposition peut aboutir à :

- 1 Une innovation de rupture nécessitant le développement de nouveaux matériaux ou systèmes constructifs dont la mise en œuvre sera soumise à des essais techniques approfondis et développement de documents techniques spécifiques (ATEX, DTU, etc.).
- 2 Une innovation incrémentale combinant de manière innovante des systèmes techniques et techniques constructives jusque-là connues et maîtrisées ne nécessitant pas ou peu de tests techniques approfondis.

Exemple de transposition : les systèmes de ventilation passifs et bio-inspirés de l'*Eastgate Building* (Harare, 1996), de la *Serre Davies Building* (Londres, 2012), de l'église *Nianing* (Sénégal, 2019). Ces systèmes innovants sont des innovations bio-inspirées incrémentales.



Coupe de tige de plante

Pour aller plus loin :

- Norme ISO TC 18458 : 2015. « Biomimétique — Terminologie, concepts et méthodologie »
- Thèse *Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances*, P-E. Fayemi, 2016
- Thèse *Caractérisation multicritère des enveloppes biologiques : vers le développement de façades bio-inspirées*, E. Cruz, Ceebios & Mecadev, 2021 (voir Chapitre 3)
- Guide *Biomimétisme & éco-conception*, ADEME, Ceebios & le Pôle Éco-conception, 2022

L'approche écosystémique : améliorer la performance environnementale globale

L'approche écosystémique consiste à s'inspirer du fonctionnement des écosystèmes pour améliorer la performance globale du projet, son but ultime est d'aboutir à un projet mieux intégré avec son écosystème et régénératif.

Les projets régénératifs ont plus d'impacts positifs que négatifs et ces impacts positifs sont bénéfiques pour la société comme pour les écosystèmes. Le projet doit s'intégrer profondément aux logiques naturelles du site, catalyser le changement et permettre au système social et écologique d'évoluer en bonne santé [35].

Maibritt Pedersen Zari a formalisé le premier cadre méthodologique de conception urbaine utilisant ces concepts, appelé Analyse des Services Ecosystémiques (ASE). L'ASE s'appuie sur l'évaluation des services écosystémiques pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes et tente de transposer ces connaissances dans le domaine de la conception architecturale et urbaine. Le cadre se compose de quatre étapes:

- la première est une évaluation préliminaire des services écosystémiques générés par l'écosystème original qui existait sur le même site que le cadre urbain actuel en question ;
- la deuxième est une évaluation des services écosystémiques actuellement générés sur le site ;
- la troisième est une comparaison entre les résultats des étapes 1 et 2. Cela permet d'élaborer des buts et des objectifs de performance basés sur la réalité écologique spécifique du site ;
- la quatrième étape consiste à rechercher et à mettre en œuvre des solutions de conception, de technologie et de changement de comportement pour atteindre les objectifs définis.

Cette étape est suivie d'une évaluation et, si nécessaire, d'une nouvelle conception. Le cadre de Pedersen Zari énumère diverses mesures pouvant être utilisées dans les processus de calcul, tels que : les zones couvertes de végétation et leur capacité à stocker et à séquestrer le carbone ; les types de pollution atmosphérique et les taux d'élimination par la végétation ; les précipitations annuelles ; et les capacités du cycle des nutriments, entre autres. Ces mesures sont utiles pour comprendre l'évolution du fonctionnement des écosystèmes et des services écosystémiques disponibles dans une zone urbaine et permettent aux concepteurs de définir des stratégies pour les régénérer et / ou les intégrer et ainsi créer des impacts positifs sur les socio-écosystèmes [36].

Les méthodologies pour l'application des approches bio-inspirées à l'échelle des écosystèmes aux projets urbains sont encore en développement et ont moins de maturité que l'approche fonctionnelle présentée auparavant. Ceebios porte une thèse avec fin prévue en 2022 sur ce sujet, qui aboutira à une nouvelle méthodologie de conception du projet bio-inspiré des écosystèmes basés sur des indicateurs quantitatifs.

Néanmoins, quelques étapes clés ressortent des approches bio-inspirées et régénératives qui peuvent être prises en compte dans une démarche de bio-inspiration des écosystèmes :

01

Comprendre les potentialités et besoins du site :

Le projet doit être ancré sur la réalité de son site, donc à travers un diagnostic socio-écologique l'équipe de conception doit comprendre les logiques sociales et écosystémiques du site de projet. Ce diagnostic doit mettre en évidence les potentialités et les besoins du site sur les plus diverses thématiques qui sont à l'interface entre le système urbain et les systèmes écologiques, comme l'eau potable et l'eau de pluie, l'énergie, les ressources naturelles disponibles, la qualité du sol, de l'air et de l'eau et la biodiversité locale. Cette lecture va être importante pour la définition des objectifs du projet et dans la définition de solutions à mettre en place.

02

Définir des objectifs :

Avec cette lecture du site de projet, l'équipe projet doit définir des objectifs à cibler. Quels services écosystémiques devons-nous régénérer sur ce projet ? Définir la cible est essentiel pour sélectionner et prioriser des solutions techniques à mettre en place et des approches qualitatives ou quantitatives peuvent être mobilisées.

03

Sélectionner des solutions :

Une fois les objectifs définis, l'équipe de conception doit proposer des solutions techniques pour les atteindre. Ces solutions peuvent être de divers types, comme des solutions fondées sur la nature, des solutions technologiques bio-inspirées, de la réglementation urbaine et même des solutions d'éducation et gouvernance au sein du projet. Elles doivent rendre opérationnels les engagements définis préalablement.

04

Mesurer des performances et réévaluer le projet :

Le projet écosystémique et régénératif est un projet qui vit dans le temps. L'impact positif du projet n'est pas abouti à la livraison du projet. Le projet va catalyser un processus de changement et l'impact positif aura lieu dans un temps long. Le cadre bâti est un socio-écosystème en évolution continue : il est donc fondamental de suivre l'évolution du projet, des besoins locaux et de la performance de solutions proposées, pour, dans un processus d'amélioration continue, pouvoir faire des ajustements dans la feuille de route.

SE FORMER : LES FORMATIONS PROFESSIONNELLES

Il existe plusieurs types de formations professionnelles en biomimétisme à ce jour dispensées par l'enseignement supérieur et des organismes de formation professionnelle en France. La formation des acteurs facilite une mise en œuvre rigoureuse et opérationnelle du biomimétisme en phase de conception architecturale.

FORMATION CONTINUE

Master professionnel NID – Nature Inspired Design.

Ce programme de formation continue vise la formation de chefs de projets en biomimétisme et design qui sauront coordonner un projet en mobilisant les expertises techniques et compétences nécessaires. Il s'agit du premier Master diplômant en biomimétisme reconnu par l'enseignement supérieur en France. Ce programme est enseigné par les équipes pédagogiques de l'ENSCI.

- Durée : 1 année en alternance
- Public : tout public, niveau Master 2 requis
- Formateurs : ENSCI, Paris
- En savoir plus : [programme de formation](#)

FORMATION PROFESSIONNELLE : MÉTHODOLOGIE

Focus Lab Biomimétisme.

Formation professionnelle de cinq jours permettant le transfert de propriétés d'un système vivant à un autre champ disciplinaire (ingénierie, industrie, transports, architecture, packaging, etc). Cette formation méthodologique à l'abstraction des systèmes vivants est animée par l'IFS – Institut des Futures Souhaitables.

- Durée : 5 jours, 3 sessions par an à Paris
- Public : tout public
- Formateurs : Institut des Futures Souhaitables, Paris
- En savoir plus : [programme de formation](#)

FORMATION PROFESSIONNELLE : MAÎTRISE D'ŒUVRE & D'OUVRAGE

Formation de la maîtrise d'œuvre : concevoir un bâtiment bio-inspiré & régénératif.

Cette formation professionnelle permet une compréhension et appropriation des concepts, outils et méthodologies en biomimétisme mobilisables par la maîtrise d'œuvre pour la conception d'un projet urbain ou d'architecture bio-inspirés. L'enseignement est basé sur l'analyse de cas d'études concrets, des résultats de recherche appliqués obtenus dans le cadre de travaux de recherche fondamentale, des analyses bibliographiques de publications scientifiques et retours d'expériences du Ceebios en tant que Maîtrise d'œuvre en biomimétisme depuis 2015. Ces formations de deux jours sont conçues pour un maximum de 20 participants et mobilisent l'intervention de plusieurs expertises du secteur de la construction bio-inspirée.

- Durée : 2 jours, 5 sessions par an à Paris et province
- Public : maîtrise d'œuvre (agences d'architecture, bureau d'études environnement, fluide, structure, promoteur immobilier)
- Formateurs : Ceebios, Paris
- En savoir plus : <https://ceebios.com/formation-projet-urbain-bio-inspire/>

Références :

[34] « Biomimétisme en architecture : Vers une conception régénérative | Techniques de l'Ingénieur. » [En ligne].

Source : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/conferences-en-ligne/biomimetisme-en-architecture-vers-une-conception-regenerative/>
[lu le 09/09/2020]

[35] E. Blanco, M. Pedersen Zari, K. Raskin, and P. Clergeau, « Urban Ecosystem-Level Biomimicry and Regenerative Design : Linking Ecosystem Functioning and Urban Built Environments », *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 404, 2021

[36] M. P. Zari, « Ecosystem services analysis for the design of regenerative built environments », *Build. Res. Inf.*, vol. 40, no. 1, pp. 54–64, 2012

Pour aller plus loin :

- Rapport de synthèse des formations continues en biomimétisme en France et en Europe : [Formation au Biomimétisme : un enjeu pour la France](#), Ceebios 2017.

CONCLU- SION

Le bâtiment est sur l'ensemble de son cycle de vie le secteur ayant le plus d'impacts en termes de consommation de matériaux et d'énergie, d'artificialisation des sols et d'atteintes à la biodiversité, de production de déchets et de pollutions.

Il fait face qui plus est, et difficilement, à un enjeu de rénovation impérative pour réduire prioritairement ses émissions de gaz à effet de serre. Mais limiter la rénovation à l'efficacité énergétique, même « grise » (E+C-), risquerait de « tuer le gisement » si « en même temps » on n'adresse pas tous les autres enjeux que l'on peut synthétiser dans le concept « *One Health* » / « *Une seule santé unifiée* » : notre santé étroitement imbriquée dans celle des écosystèmes naturels qui nous abritent et, sans cesse, essayent de créer des conditions toujours plus favorables à la vie.

Le biomimétisme – et l'écomimétisme – représentent une voix d'innovation (ré)conciliant nos socio-écosystèmes avec les écosystèmes naturels, dans une coévolution régénérative. Après plusieurs dizaines d'années d'expérimentations, de mise en œuvre de projets, d'évolutions des pratiques, de développement de méthodologies et d'outils, le biomimétisme est aujourd'hui suffisamment mature pour devenir un levier majeur de la transition écologique et sociale, notamment dans le domaine du bâtiment et de la ville.

**ALORS CHANGEONS
DE PARADIGME DÈS
MAINTENANT :
TENTONS D'HABITER
NOTRE SEULE ET
UNIQUE PLANÈTE
COMME UNE ESPÈCE
EN HARMONIE
AVEC LES MILLIONS
D'AUTRES...
ET BIO-INSPIRONS-
NOUS D'ELLES !**



Lichen

BIBLIO- GRAPHIE

[1] Organisation Internationale de Normalisation, Norme ISO 18458:2015 : « Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie ». Source : <https://www.iso.org/fr/standard/62500.html>

[2] Janine M. Benyus, *Biomimicry : innovation inspired by nature*. Willima Morrow, 1997, traduit en français et publié aux Éditions Rue de l'échiquier en 2016 dans la collection « Initial(e)s DD » sous le titre *Biomimétisme : Quand la nature inspire des innovations durables*. Source : <https://www.ruedelechiquier.net/l-ecopoche/376-biomimetisme-25-ans.html>

[3] Ceebios, *Biomimétisme en France : un état des lieux*, pp. 1–30, 2018. Source : <https://ceebios.com/telechargements-references/>

[4] Mycéco et Ceebios, *Biomimétisme : Quels leviers de développement et quelles perspectives pour la France ?*, 2020. Source : <https://ceebios.com/telechargements-references/>

[5] Biomim'City Lab et Ceebios, *Projets urbains bio-inspirés : Un état des lieux des projets français*, 2020. Source : <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/12/EtatDesLieux-BCL-20201223-web-BasDef.pdf>

[6] Michael Pawlyn, *Biomimétisme et architecture*, Éditions Rue de l'Échiquier, Collection « Biomimétisme », p. 229. Source : <https://www.ruedelechiquier.net/essais/243-biomimetisme-et-architecture.html>

[7] Collectif BCL - Biomim'City, « Le Biomim'City Lab pour 'réinventer la ville pour et par le vivant' », Construction 21, 2020. [En ligne]. Source : <https://www.construction21.org/belgique/articles/h/le-biomim-city-lab-pour-reinventer-la-ville-pour-et-par-le-vivant.html> [lu le 29/40/2021]

[8] N. Chayaamor-Heil, F. Guéna, and N. Hannachi-Belkadi, « Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils », *Les Cah. la Rech. Archit. urbaine paysagère*, vol. 1, pp. 0–33, 2018.

[9] P. Gruber and S. Gosztanyi, « Skin in architecture : towards bioinspired facades », *Trans. Ecol. Environ.*, vol. 138, pp. 1743–3541, 2010.

[10] K. M. Al-Obaidi, M. Azzam Ismail, H. Hussein, and A. M. Abdul Rahman, « Biomimetic building skins : An adaptive approach », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1472–1491, 2017.

[11] Ministère de la transition écologique, Données et études statistiques, pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports / Consommation finale d'énergie par secteur (PEFA), 2020.

Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-finale-denergie-par-secteur-pefa>

[12] Nobatek / INEF4 et Ceebios pour le CODIFAB, « Limiter l'usage des équipements : quelles solutions pour la construction bois ? » novembre 2020.

Source : <https://www.codifab.fr/actions-collectives/limiter-lusage-des-equipements-quelles-solutions-pour-la-construction-bois-2540>

[13] Ceebios, *Biomimétisme et énergie, rapport*

de synthèse, avec le soutien de RTE, 2022.
Source : <https://ceebios.com/wp-content/uploads/2022/07/Synthese-BiomimetismeEnergie-Ceebios-20220720-web.pdf>

[14] D.J. McCafferty, G. Pandraud, J. Gilles, M. Fabra-Puchol, and P.-Y. Henry, « Animal thermoregulation : a review of insulation, physiology and behaviour relevant to temperature control in buildings », *Bioinspir. Biomim.*, vol. 13, no. 1, p. 011001, 2017.
Source : https://www.researchgate.net/publication/321047502_Animal_thermoregulation_A_review_of_insulation_physiology_and_behaviour_relevant_to_temperature_control_in_buildings

[15] J. Lienhard et al., « Flectofin : A hingeless flapping mechanism inspired by nature » *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS Bioinspir. Biomim.*, vol. 6, pp. 45001–45008, 2011.

Source : https://www.researchgate.net/publication/51839563_Flectofin_A_hingeless_flapping_mechanism_inspired_by_nature

[16] Frédérique Vergne « Lycée Kyoto à Poitiers :

le 1er lycée d'Europe à zéro énergie fossile », Le Moniteur, septembre 2009.

Source : <https://www.lemoniteur.fr/article/lycee-kyoto-a-poitiers-le-1er-lycee-d-europe-a-zero-energie-fossile.1916249#!>

[17] « La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires - La librairie ADEME ». [En ligne].

Source : https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/4745-la-climatisation-de-confort-dans-les-batiments-residentiels-et-tertiaires.html?search_query=climatisation&results=46 [lu le 28/09/2021]

[18] « The Future of Cooling – Analysis - IEA ». [En ligne].

Source : <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> [lu le 28/09/2021]

[19] « Pho'liage ® | Art Build ». [En ligne].

Source : <https://www.artbuild.com/lab/pholiage> [lu le 28/09/2021]

[20] S. Sakai et al., « Sierpinski's forest : New technology of cool roof with fractal shapes », Energy Build., vol. 55, pp. 28–34, Dec. 2012

[21] Mick Pearce, « Eastgate Building Harare ».

[En ligne].

Source : <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html> [lu le 01/07/2019]

[22] « Bioinspired self-healing materials : lessons from nature », Joseph C. Cremaldi and Bharat Bhushan.

Source : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5870156/>

[23] Ulrike G.K. Wegst et al., « Bioinspired structural materials », Nature Materials, 14, 2014

[24] Clément Sanchez et al., « Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems », Nature Materials, 4, 2005

[25] « Bioinspiration and Biomimicry in Chemistry : Reverse-Engineering Nature ».

Source : <https://en.lignelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118310083>

[26] Basilisk Self-Healing Concrete.

Source : <http://www.basiliskconcrete.com/>

[27] Kobayashi, Daimaruya et Vincent « Folding/

Unfolding Manner of Tree Leaves as a Deployable Structure », janvier 2000

[28] *Performance énergétique et environnementale dans les quartiers en renouvellement urbain*, Les carnets de l'innovation, ANRU - Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine (2021), https://www.anru.fr/sites/default/files/media/downloads/energie_et_environmentement_-_carnet_de_innovation.pdf

[29] M. Alberti, « The effects of urban patterns on ecosystem function », *Int. Reg. Sci. Rev.*, vol. 28, no. 2, pp. 168–192, 2005.

[30] IPBES, « Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services », 2019.

[31] R. J. Cole, « Regenerative design and development : current theory and practice », *Build. Res. Inf.*, vol. 3218, 2012.

[32] M. Brown et al., « Sustainability, Restorative

to Regenerative. COST Action CA16114 RESTORE, Working Group One Report : Restorative Sustainability », 2018

[33] *Millenium Ecosystem Assessment, Ecosystems and human well-being : Synthesis*. Washington, DC : Island Press, 2005

[34] « *Biomimétisme en architecture : Vers une conception régénérative | Techniques de l'Ingénieur* », [En ligne].

Source : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/conferences-en-ligne/biomimetisme-en-architecture-vers-une-conception-regenerative/> [lu le 09/09/2020]

[35] E. Blanco, M. Pedersen Zari, K. Raskin, and P. Clergeau, « Urban Ecosystem-Level Biomimicry and Regenerative Design : Linking Ecosystem Functioning and Urban Built Environments », *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 404, 2021

[36] M. P. Zari, « Ecosystem services analysis for the design of regenerative built environments », *Build. Res. Inf.*, vol. 40, no. 1, pp. 54–64, 2012



Ceebios, Centre d'études & d'expertises en biomimétisme

Ceebios est un centre d'innovation au service de la transition écologique et sociétale par la voie du biomimétisme. Il catalyse la richesse des compétences nationales du monde académique, de l'enseignement et de la R&D industrielle autour de trois axes :

EXPLORER le potentiel du biomimétisme :

- Développement d'outils & ressources
- R&D bioinspirée
- Coopération des sphères académiques & industrielles

INNOVER avec le biomimétisme :

- Conseil, études & ingénierie
- Recherche & méthodologie
- Management de l'innovation

DÉPLOYER le biomimétisme en France :

- Connexion d'experts
- Formation & enseignement
- Animation du réseau matinal
- Communication

+ de **500 clients & partenaires** : grands groupes tels que AirLiquide, Eiffage, ICADE, Renault, L'Oréal, LVMH, Rabot Dutilleul, Mäder, EGIS, RTE, EDF, Decathlon, Elan, Engie et de nombreuses PME.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME – l'Agence de la transition écologique – nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines – énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc. –, nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

Les collections de l'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur :

Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert :

Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent :

Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

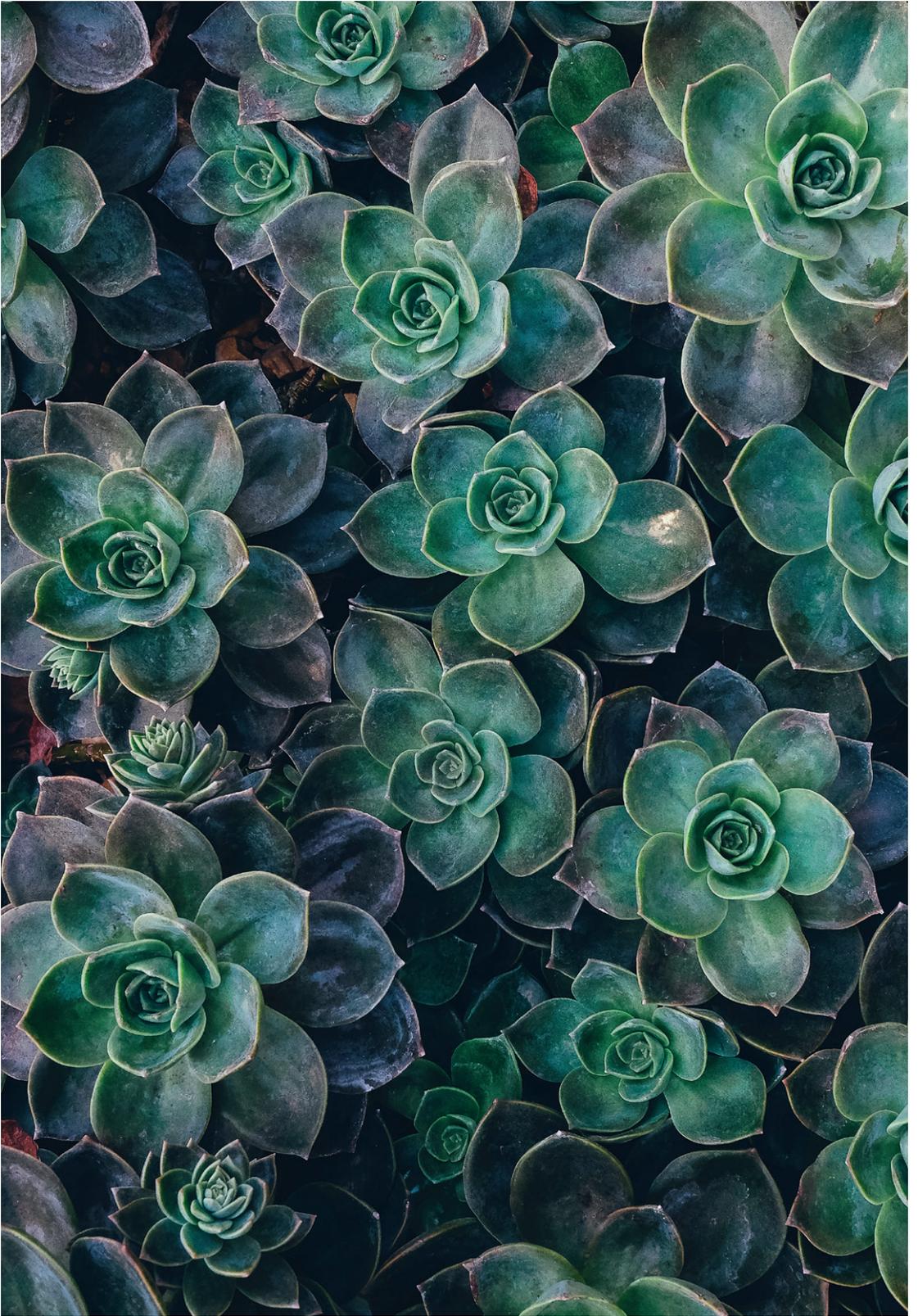
L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir :

Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



Succulentes, Annie Spratt sur Unsplash



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



CLÉS POUR AGIR

S'inspirer du vivant pour la transition écologique des bâtiments

Résumé : La démarche du biomimétisme facilite une réintégration du vivant comme un modèle pour guider les choix architecturaux, énergétiques et techniques, dans un objectif de transition écologique et d'impacts positifs pour les écosystèmes.

Ce guide illustre par des réalisations construites bio-inspirées une sélection de problématiques techniques, écologiques et énergétiques du bâtiment, résolues par la démarche du biomimétisme : réduire la consommation d'énergie primaire, le confort d'été, rénover l'existant, optimiser les consommations d'eau, alléger les structures, régénérer les services écosystémiques.

Il vous donne également des premières clés et ressources concrètes pour vous former et intégrer cette nouvelle approche de conception architecturale et urbaine dans vos projets.

*Un guide réalisé par Ceebios,
le Centre d'études et d'expertises
en biomimétisme, pour l'ADEME.*

ISBN 979-10-297-2014-7
Brochure n° 011920



9 791029 172014

