



# Veille scientifique

Février 2020

## Biomimétisme et biodiversité

### Plan de l'article

<b>HISTOIRE DU BIOMIMÉTISME</b> .....	2
<b>LES DIFFÉRENTES FORMES DU BIOMIMÉTISME</b> .....	3
Définitions.....	3
Classification des formes de biomimétisme.....	4
Domaines d'application.....	5
Les histoires à succès.....	6
<b>APERÇU DES INITIATIVES FRANÇAISES AUTOUR DU BIOMIMÉTISME</b> .....	7
Les initiatives publiques.....	7
Le Ceebios.....	8
Les instituts de recherche français.....	9
Défis pour la recherche bio-inspirée.....	10
<b>LES OUTILS D'EXPLORATION ET D'ANALYSE POUR LA BIOINSPIRATION</b> .....	11
<b>L'APPROCHE IPBES</b> .....	12
<b>DISCUSSIONS, CONTROVERSES SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVE : VERS UN BIOMIMÉTISME UTILE À LA BIODIVERSITÉ</b> .....	13
Choix des termes utilisés.....	13
La place de l'ingénierie écologique.....	14
Les premières limites du concept et de ses utilisations.....	14
Vers une éthique du biomimétisme et de la bioinspiration.....	15
La question du bénéfice pour la biodiversité.....	16
<b>ANNEXE : PRÉSENTATION DE QUELQUES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES</b> .....	19
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	29



## HISTOIRE DU BIOMIMÉTISME

La nature est composée d'organismes vivants qui ont des traits phénotypiques (morphologiques, anatomiques) extraordinairement diversifiés et adaptés à des modes de vie ou des habitats particuliers ; elle est alors source d'inspiration pour l'Homme confronté à des besoins d'adaptation physique ou physiologique similaires. La nature est aussi le lieu de processus et de modes de fonctionnement qui, en général, ne gaspillent pas inutilement et fonctionnent en cycles, où les déchets des uns deviennent les ressources des autres. Elle peut donc être prise comme modèle pour le développement durable. Les humains *a contrario* développent des processus de production qui nécessitent le plus souvent beaucoup d'énergie, puisqu'ils ne peuvent pas être mis en œuvre à température ambiante ou à la pression atmosphérique et sans recours à des produits chimiques de synthèse toxiques.

Même si depuis leurs origines, les humains ont interagit avec la nature et en ont utilisé des éléments et si Léonard de Vinci, au XV<sup>e</sup> siècle, invitait à prendre des « leçons dans la nature, car c'est là qu'est notre futur », le biomimétisme, ou bio-inspiration, a été théorisé pour la première fois il y a une vingtaine d'année (ouvrage de Janine Benyus, *Biomimicry, Innovation Inspired by Nature*).

Ce concept propose de s'inspirer de la nature et de ses 3,5 milliards d'années d'évolution qui a conduit à une certaine optimisation des différentes formes de vie et de leurs interactions. C'est une démarche interdisciplinaire qui fait appel à la fois aux sciences fondamentales et aux sciences de l'ingénieur. Le biomimétisme demande de la part des acteurs économiques la mobilisation de ressources significatives en matière de recherche et développement. Les acteurs qui y ont recours sont donc historiquement des grandes entreprises (Suez Environnement, Airbus ou Nike), mais de plus en plus de PME, voire de *start-up*, s'y intéressent ou se développent. La dimension économique reste ainsi un frein sérieux au développement du biomimétisme.

L'approche initiale portée à la fin des années 1990, par Janine Benyus, défend une vision qui considère que cette démarche d'innovation « fait appel au transfert et à l'adaptation des principes et stratégies élaborés par les organismes vivants et les écosystèmes, afin de produire des biens et des services de manière durable, et rendre les sociétés humaines compatibles avec la biosphère [...]. [...] contrairement à la révolution industrielle, la révolution biomimétique ouvre une ère qui ne repose pas uniquement sur ce que nous pouvons prendre dans la nature, mais sur les possibilités offertes par la nature pour modifier notre façon de cultiver, de fabriquer des matériaux, de produire de l'énergie, de nous soigner, de stocker de l'information et de gérer nos entreprises [...]. »

L'approche s'est concrètement structurée, notamment dans les pays comme les États-Unis, l'Allemagne ou la Chine, autour de la conception de matériaux et de procédés novateurs de production ou de conception en s'inspirant de la nature pour diminuer les pollutions, la consommation d'énergie tout en améliorant la qualité à moindre coût. Une multitude d'histoires à succès fait depuis la preuve de l'intérêt du biomimétisme. Certains exemples sont cités en annexe de cette note.

En matière de recherche et développement, l'Allemagne a longtemps été en tête avec plus de 100 structures de recherche publique impliquées et 10 réseaux territoriaux spécialisés. Le Royaume-Uni et la Suisse sont aussi deux pays fortement impliqués en Europe. La formation au biomimétisme est un enjeu majeur en Europe.

À l'initiative de l'Institut allemand de normalisation, l'organisation internationale de normalisation (ISO) a proposé la constitution d'un comité technique « Biomimetics »



auquel neuf États ont souhaité participer. Trois normes ont été élaborées :

- Biomimétique – Terminologie, concepts et méthodologie
- Biomimétisme – Matériaux, structures et composants biomimétiques
- Biomimétisme – Optimisation biomimétique

L'Allemagne a une vision très technologique du biomimétisme qui peut rester un peu loin du développement durable. La France, avec l'aide du Ceebios et sous l'impulsion du ministère de l'écologie, s'est alors dotée d'une norme expérimentale Afnor : Biomimétisme – intégration de la biomimétique dans les démarches d'écoconception pour faire valoir les exigences environnementales qui n'ont été retenues que sous formes d'options.

Côté recherche, c'est le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) qui a été le premier en France à s'intéresser au biomimétisme en organisant plusieurs expositions dédiées à cette approche dite « bionique ». En décembre 2012, avec le Commissariat général au développement durable il a co-organisé le colloque « [Recherches bio-inspirées : une opportunité pour la transition écologique](#) » qui réunissait chercheurs, ingénieurs, entreprises et ONG.

En 2014, un réseau national de compétences a été créé, le centre européen d'excellence en biomimétisme (Ceebios). Le premier président du centre fut Gilles Bœuf ; il est actuellement présidé par Antonio Molina, fondateur du groupe Mäder (fabriquant de peintures industrielles et composites).

Ce centre organise depuis 2016 le salon Biomim'expo, réunissant la communauté biomimétique française, avec des entreprises, des chercheurs, des ingénieurs intéressés par le sujet.

L'Afnor a publié en 2017 la norme XP X42-502 « Biomimétisme - Intégration de la biomimétique dans les démarches d'écoconception » qui a pour objet de cadrer les démarches biomimétiques écoresponsables. La biomimétique est définie comme une démarche de transfert de connaissances issues de l'analyse de systèmes biologiques ou écologiques vers des applications pratiques répondant à des besoins identifiés pour l'homme.

## LES DIFFÉRENTES FORMES DU BIOMIMÉTISME

### Définitions

#### UNE DÉFINITION NORMÉE POUR LE BIOMIMÉTISME

##### La bio-inspiration

Approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques

##### La biomimétique

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

##### Le biomimétisme

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

Source : ISO 18458

Le biomimétisme est la rencontre de plusieurs mondes, l'écologie, les sciences de l'évolution, la biologie et l'ingénierie, ou encore une interface entre sciences naturelles et industrie.

Le cycle biomimétique consiste à analyser le besoin technologique puis l'exprimer dans des termes que l'on pourra rechercher dans des bases de données biologiques, identifier le modèle biologique et sélectionner le plus pertinent, avant de le tester, de l'implémenter, etc.

Deux approches sont possibles :

1. Partir de la connaissance d'un système biologique (démarche du biologiste) : définir que la feuille de lotus a des propriétés d'hydrophobie et faire le lien avec les besoins d'autonettoyage. C'est une découverte d'opportunité et de hasard.
2. Partir du problème à résoudre (démarche de l'ingénieur) : essayer de résoudre la problématique d'autonettoyage en fouillant dans les réservoirs d'informations avec des millions de traits, de comportement set d'interactions. Les informations ne sont pas toujours documentées ou disponibles.

Le ministère de la transition écologique et solidaire a proposé une définition différente pour les aspects recherche : « Démarche scientifique qui consiste à s'inspirer des propriétés remarquables des systèmes naturels par l'analyse de ces systèmes, leur abstraction en modèle et le transfert du modèle à l'application, dans la perspective d'un développement soutenable. »

Le biomimétisme devient alors de la biomimétique soutenable et il inclut à côté de l'observation des organismes celle de leurs interactions écologiques.

Les finalités de ces démarches ne sont cependant pas tout à fait prises en compte dans cette définition des concepts : ajouter « ou technologique » dans la définition du ministère chargé de la transition écologique permettrait de ne pas laisser penser que toute démarche qui s'inspire du vivant est nécessairement scientifique.

Une autre proposition pourrait être de séparer biomimétisme et bio-inspiration pour réserver le premier aux démarches technologiques et la seconde aux démarches scientifiques.

## Classification des formes de biomimétisme

Il existe différentes façons de classer les formes de biomimétisme. Certains, comme l'association *Biomimicry Europa*, créée en 2006 pour la promotion du biomimétisme, propose de distinguer trois niveaux d'inspiration :

- les formes biologiques,
- les matériaux et processus,
- les interactions.

La biodiversité recèle en effet une importante variété de structures mécaniques, de parties, de formes ou de processus qui répondent aux besoins des composants de la biodiversité et aux contraintes de l'environnement. En retour, ces composants de la biodiversité sont aussi des sources de contraintes les uns par rapport aux autres, au travers de l'environnement qu'ils modifient. Au niveau moléculaire, des fonctions essentielles sont également assurées par la machinerie cellulaire : autoréparation, multiplication massive avec un très faible taux d'erreurs, auto-assemblage, communication d'informations, etc.

Une autre classification du biomimétisme est basée sur certaines capacités attribuées aux processus naturels :

- Utilisation du soleil comme source stable et durable d'énergie, par exemple l'amélioration de nos propres systèmes de captation de l'énergie solaire peut s'inspirer du fonctionnement de la feuille ;
- Optimisation de la consommation d'énergie grâce à des structures adaptées,

pour utiliser moins de matière (architecture des alvéoles des abeilles) ou moins d'énergie (conception des habitats) ;

- Respect du temps de renouvellement des énergies et des saisons de production *via* un nouveau rapport au temps, introduisant par exemple une saisonnalité pour passer les périodes les moins productives ;
- Adaptation de la forme aux contraintes des fonctions et non l'inverse, pour économiser la matière et l'énergie comme par exemple la conception des termitières qui sont parfaitement thermo-régulées avec peu d'énergie ;
- Recyclage pour valoriser les déchets, dans une économie circulaire écosystémique ;
- Récompense de la coopération plutôt que la loi du plus fort, même si cela ne peut être généralisé ;
- Synergies créées par la diversité en faisant l'hypothèse (qui reste à démontrer) que plus le nombre d'espèces est élevé, plus la multiplicité des interactions est un élément de stabilité (sous-entendu : on table sur l'effet globalement positif de la biodiversité sur la stabilité et le fonctionnement des écosystèmes pour en espérer une moindre dépense d'énergie) ;
- Recherche de solutions locales pour ne pas multiplier les sources d'énergie d'origines géographiques différentes : diminution des frais de transport, meilleure connaissance des ressources locales pour les optimiser et gagner en efficacité ;
- Optimisation des dépenses énergétiques en évitant le gaspillage ;
- Transformation des limites imposées en une incitation à la créativité : les contraintes deviennent ainsi des éléments de la solution et des stimulations à l'innovation alors que le fonctionnement humain actuel tend plutôt à essayer de repousser les limites de l'environnement. Par exemple, dans la forêt tropicale, face à de fortes contraintes, se sont développées de très fortes relations symbiotiques (associations à bénéfices mutuels) entre les organismes vivants.

Une dernière classification peut être faite sur les domaines concernés :

- alimentation,
- production énergétique,
- stockage de l'information,
- santé,
- transport.

### Domaines d'application

Il existe ensuite de nombreuses applications du biomimétisme. Le biomimétisme est considéré comme étant un outil permettant notamment :

- la valorisation du carbone renouvelable,
- la catalyse chimique soutenable à des fins industrielles,
- la conversion et le stockage des énergies solaire, éolienne ou hydrolienne,
- l'assemblage ou la synthèse écologique de matières pour la fabrication de matériaux aux propriétés fonctionnelles et aux performances environnementales élevées,
- le développement d'outils de traitement ou de gestion de l'information économes en énergie,
- les pratiques agronomiques respectueuses de l'environnement inspirées du fonctionnement des écosystèmes.

Consécutivement, les secteurs industriels concernés sont les suivants :

- aéronautique et spatial,
- agroalimentaire,
- bâtiment,
- chimie,



- cosmétique,
- croissance bleue,
- économie circulaire,
- énergie,
- information et communication,
- matériaux avancés,
- santé et biomédical,
- transport.

De nombreuses adaptations naturelles peuvent être prises en exemple, telles que les sécrétions, les surfaces en interaction avec la lumière, les composés biochimiques actifs et de nombreuses autres stratégies de survie, et sont des phénomènes se produisant à l'échelle nanométrique. Orozco *et al.* (2017) décrivent dans une revue de la littérature comment les structures nanométriques extracellulaires sont responsables de la manipulation de l'énergie et de la matière, créant ainsi certaines des propriétés émergentes de la vie. Les couleurs iridescentes des plumes d'oiseaux, la manipulation de la mouillabilité des exosquelettes d'insectes, les propriétés adhésives des sécrétions à nanopatterns et la capacité à polariser la lumière sont des exemples du potentiel des nanostructures extracellulaires. Ils définissent ainsi l'étude des nanostructures extracellulaires comme une « nanobiodiversité », un concept pour mettre en valeur l'inspiration qu'offre la vie à l'échelle nanométrique, non seulement pour la conception de nouveaux matériaux, mais également pour sa compréhension.

Les véhicules sans pilote capables de se déplacer en milieu aquatique se sont largement développés en raison de la diversité des missions devant être exécutées en environnements hostiles. Ces robots ont tout d'abord imité les animaux pour leur efficacité à se déplacer dans des environnements aqueux en abandonnant les locomotions inefficaces basées sur les hélices pour plusieurs types de locomotions biologiques. L'équipe de Salazar (2018) a classé les animaux aquatiques existants et les systèmes bioinspirés pour pouvoir discuter de leur locomotion respective et proposer des améliorations technologiques innovantes.

### Les histoires à succès

- À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la morphologie d'une chauve-souris a inspiré Clément Ader pour créer son avion.
- Le rat-taupe nu, vit cinquante ans et peut survivre à une privation d'oxygène : des traits de vie susceptibles d'inspirer la recherche sur le vieillissement.
- Les Bande scratch/velcro inspirées des fleurs de bardane.
- Le réfléchissement et la réfraction de la lumière inspirés du papillon morpho.
- Les vitres non mouillables inspirées des feuilles du lotus.
- Les ventouses inspirées des grenouilles arboricoles et des tentacules des poulpes.
- Les propriétés d'autonettoyage inspirées des feuilles de plantes comme la capucine ou le chou.
- Le textile adaptatif répondant à des gradients d'humidité pour libérer, automatiquement et sans énergie supplémentaire, de l'humidité dans une salle inspiré de la pomme de pain.
- La production d'eau dans le désert.
- Les pales d'éoliennes inspirées des baleines à bosse (<https://whalepowercorp.wordpress.com>)(<https://www.lapresse.ca/actualites/sciences/201805/08/01-5176426-des-pales-deoliennes-inspirees-des-nageoires-de-baleine.php>) (et ailes d'avions beaucoup plus efficaces).
- Les techniques agro-écologiques s'inspirant du fonctionnement des écosystèmes,
- Les applications dans le champ de l'économie circulaire.
- Le ver marin et la réparation des fractures osseuses : un organisme marin peut sécréter une substance adhésive reproduite par des chimistes pour



concevoir une colle biocompatible qui pourrait faciliter la réparation des os brisés.

- La peau du requin et le maillot de natation : cet exemple réputé du biomimétisme permet de nager plus rapidement.
- Les cigognes et les winglets : comment des ingénieurs aéronautiques ont réduit la consommation des avions en s'inspirant des rémiges situées au bout des ailes des cigognes.
- Le martin pêcheur et le shinkansen, le train le plus rapide du monde et silencieux au Japon : dans ce secteur, l'exemple le plus connu est celui du martin pêcheur. Ici, l'homme a copié la nature dans l'optique d'améliorer les performances d'un de ses moyens de transport afin de le rendre plus agréable. L'avant du train est inspiré de la tête du martin pêcheur pour éviter les chocs phoniques à l'entrée des tunnels (<http://tpebiomimetique.e-monsite.com/pages/biomimetique/quelques-exemples/le-shinkansen.html>).
- La nacre produite sans pollution et avec très peu d'énergie par l'ormeau rouge. La nacre est un composite naturel particulièrement résistant qui présente des propriétés mécaniques supérieures à celles des céramiques de qualité militaire. Aussi l'ormeau a fait l'objet d'études en vue de produire de nouvelles céramiques à la fois résistantes et ductiles, des blindages légers et des matériaux pouvant résister à des hautes températures pour les besoins de la construction aéronautique. Mais pour l'instant, il n'a pas été possible de produire la même nacre avec aussi peu d'énergie.

## APERÇU DES INITIATIVES FRANÇAISES AUTOUR DU BIOMIMÉTISME

### Les initiatives publiques

En France on assiste, depuis 2007, à une prise en compte institutionnelle croissante du domaine avec la présentation en 2018 d'une stratégie « Bioéconomie » pour la France, Plan d'action 2018-2020, ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

Plus de 175 équipes de recherche s'intéressent au sujet alors que plus de 100 entreprises font appel à cette démarche. Plusieurs Groupements de recherche (GDR) et Réseaux thématiques pluridisciplinaires (RTP) génèrent des initiatives structurantes autour de la chimie bio-inspirée, la mécanique des matériaux biologiques ou les micro-technologies inspirées des insectes. Le Ceebios, qui fédère un nombre croissant de grandes entreprises comme L'Oréal, LVMH, Engie, Vicat, Sant-Gobain, et qui bénéficie du soutien du MTEs, a été à l'origine de trois expositions Biomim'Expo.

Les régions les plus impliquées en matière de R&D (compétences académiques) sont l'Île-de-France, Auvergne-Rhône-Alpes et Nouvelle-Aquitaine, puis, à un niveau sensiblement équivalent, Occitanie, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Grand-Est.

Certains considèrent que le biomimétisme peut contribuer aux objectifs du développement durable (ODD) et notamment les ODD 6 (eau propre et assainissement), 7 (énergie propre), 9 (industrie, innovations, infrastructures), 11 (villes durables), 12 (consommation et production responsable), 13 (lutte contre le changement climatique), 14 (vie aquatique), 15 (vie terrestre). Pour la majorité des objectifs, leur optimisation peut s'inspirer de la nature. Par contre, pour les objectifs 14 et 15, le bénéfice du biomimétisme est plus incertain et reste à prouver. Il conviendra également de faire une différence claire entre le concept de solutions fondées sur la nature et le biomimétisme.



Des enjeux nationaux ont été définis :

- le développement de parcours de formation ;
- des actions structurantes autour des acteurs académiques, avec notamment la définition d'axes de recherches stratégiques en recherche fondamentale et appliquée et la mise en place de programmes de subventions et de bourses. À ce niveau on pourra regarder avec intérêt la stratégie d'appels à projets développée par le *Biomimicry Institute* (<https://biomimicry.org>) : les « challenges » qui ouvrent vers le financement de « launchpads » (tremplins) ;
- la connexion et le soutien des universités et industries par le biais de réseaux locaux et de projets bilatéraux de R&D. Des réflexions autour des outils et méthodologies transverses.

## **Le Ceebios**

Le *Ceebios*, Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis, est une association créée en 2014. Le centre a publié un document d'états des lieux en juillet 2018 qui est accessible sur internet : <https://drive.google.com/file/d/1tcEgHKVwBh3urzfiXX30IBpwpCj8BuzT/view>

Trois rapports thématiques majeurs ont également été publiés en 2018 par le Ceebios et la région Nouvelle-Aquitaine :

### **• Sur les matériaux bio-inspirés :**

« L'enjeu du biomimétisme dans le secteur des matériaux est de sortir d'une logique d'économie linéaire et gourmande en énergie et ressources, qui repose sur des matières premières rares, difficiles à extraire et à purifier. Apprendre des matériaux biologiques, c'est revoir nos procédés pour opérer dans des conditions de chimie douce (pression et température ambiantes, solvant aqueux universel), à partir d'un nombre restreint de briques élémentaires, faits d'éléments chimiques abondants. Il en résulte des structures composites hiérarchisées, multifonctionnelles et d'une grande diversité, dont la décomposition et le recyclage sont toujours assurés. » [https://drive.google.com/file/d/11HwgiojpsYOGhf4upWiw9WFNbr2\\_hDVU/view](https://drive.google.com/file/d/11HwgiojpsYOGhf4upWiw9WFNbr2_hDVU/view)

### **• Sur l'habitat bio-inspiré :**

« Le biomimétisme, par la compréhension et l'imitation des systèmes vivants et en particulier des écosystèmes, est une opportunité inédite pour repenser les Villes de demain. Ces dernières, pensées comme des écosystèmes naturels, devront fournir une performance énergétique *a minima* similaire à celle de l'écosystème natif. Les stratégies bio-inspirées peuvent ainsi être utilisées pour la gestion des eaux, de nouveaux concepts de mobilité ou encore une gestion efficace de l'énergie (par exemple : réduction de la consommation, augmenter la réutilisation ou optimiser le stockage). » <https://drive.google.com/file/d/1q2YJSoy-99RZhdRbdfQ4DKGyPS5ZVvDp/view>

### **• Sur le biomimétisme marin :**

« Favoriser une meilleure connaissance transdisciplinaire des écosystèmes marins. Dédire de cette connaissance des principes d'innovation en écoconception et ingénierie des organisations. » <https://drive.google.com/file/d/13cLUcdGLXVJVLADkNO30ubhPBcqSYZy/view>





## Les instituts de recherche français

Avec l'aide du MTES et l'appui du Ceebios, le sujet a été repris en main par le MNHN qui a pour ambition de se positionner comme le leader de cette question. Une feuille de route en sept points a été rédigée et confiée à Anabelle Aish et Jian-Sheng Sun afin de mettre en place un programme de deux ans.

Le MNHN détient 70 millions de spécimens de collection, 42 millions de données sur la biodiversité. Cette richesse combinée à la nécessaire transversalité entre les départements, les collections, les compétences scientifiques, les publics donnent une légitimité au MNHN pour traiter la question.

De nombreux autres instituts travaillent sur des domaines du biomimétisme, le rapport de fin d'étude d'Alice Geny, stagiaire au ministère de la transition écologique et solidaire, apporte des compléments intéressants.

### Exemple de recherche en biomimétisme : urbanisme et architecture bio-inspiré

*Chercheur référent : Philippe Clergeau, MNHN*

L'installation de la biodiversité dans la ville et sa capacité de maintien se fait sous forte contrainte. Il doit donc y avoir une relation forte avec les architectes et les urbanistes autour de plusieurs questions :

- Comment fait-on pour végétaliser la ville ?
- Comment construire une biodiversité urbaine ?
- Comment la ville peut avoir des relations avec son contexte biogéographique et sa région ?
- Est-ce que l'inspiration peut être écosystémique avec comme contrainte les structures ou les formes ou faut-il optimiser les services ?
- Comment faire introduire une nature qui s'autogère, qui fasse écosystème ?
- Comment faire comprendre que les objectifs ne sont plus d'intégrer la biodiversité dans la ville, mais d'aller plus loin vers une prise en compte des fonctionnements écologiques dans la ville ?

Il est intéressant de s'interroger sur l'appartenance de ces enjeux à la grande famille du biomimétisme ou celle des solutions fondées sur la nature, de l'ingénierie écologique, de la restauration écologique ou encore de l'écologie urbaine. Les avis sont partagés sur ce point entre champs scientifiques (globalement entre sciences de l'ingénieur et biologie d'une part, et écologie, ingénierie écologique, écologie de la restauration, écologie de la conservation d'autre part).

*Exemples :*

*Une ville indienne qui avait des problèmes d'inondation a organisé sa conception sur la base des services écosystémiques : l'eau a été gérée en repensant la forme et l'organisation des bâtiments pour pouvoir permettre un maximum d'infiltration dans la forêt.*

*De la même manière, de nombreuses innovations ont été appliquées aux bâtiments végétalisés en introduisant de la végétation méditerranéenne, des pelouses alpines, de nouvelles communautés végétales de conditions extrêmes, du substrat nu en libre évolution (graines aériennes, plancton aérien, mycorrhizes). Aujourd'hui on est soit dans le tout esthétique (presque toujours exotique) soit dans les espèces locales (pas toujours esthétiques). Il faut réussir à faire un mixte des deux ? Des essais sont réalisés, dans le cadre d'une bourse Cifre, sur les murs en béton de chanvre et ont pour objet de comprendre comment les communautés végétales peuvent être intégrées dans le mur et comment il est possible de gérer l'humidité indispensable à la vie.*



## Défis pour la recherche bio-inspirée

*Éléments issus du colloque Bioinspire Muséum du 25 septembre 2019 (chercheurs référents : Guillaume Lecointre, Philippe Grandcolas)*

La bio-inspiration fournit des solutions *a priori* parcimonieuses pour un développement durable, néanmoins, il convient de prendre en compte les lacunes de connaissances, la possibilité d'une maladaptation du vivant et les verrous de recherche.

### Lacunes de connaissances

Les biologistes peuvent avoir accès ou donner accès à une grande base de connaissance, mais il faut toujours avoir à l'esprit que s'inspirer du vivant, c'est s'inspirer d'une toute petite partie des connaissances, d'une toute petite partie des organismes vivants : ceux qui ont été décrits. Sur les deux millions d'espèces décrites, il n'y en a qu'une petite dizaine de milliers sur lesquelles nous avons des connaissances

### Traits mal adaptatifs

Les théories biologiques reposent sur deux piliers : l'optimisation de fonctions et la transmission génétique (diversification et histoire de la diversification). Les organismes vivants ne sont efficaces que dans une marge autorisée par leur histoire de vie et pour cette raison, ils ne sont pas toujours des solutions optimales. Le vivant n'explore qu'une toute petite partie de ce que le physico-chimique autorise. Il est donc fréquent que les simulations trouvent des solutions optimales qui n'auront pas été retenues par le vivant. Le triangle biologique de Seilacher propose trois axes d'optimisation : (1) Fonction / adaptation (= contrainte sélective), (2) Héritage phylogénie, inertie phylogénétique (contrainte historique), (3) Structure embryologie (= contrainte architecturale et structurale). Un être vivant est quelque part dans le triangle, il n'est pas optimisé sur tous les plans.

*Exemples :*

- *Pourquoi plusieurs ARN polymérases n'ont pas de mécanisme de correction contrairement aux ADN polymérases ? (Synthetic evolutionary origin of a proofreading reverse transcriptase? Jared Wellefson, 2016).*
- *À quoi servent le téton masculin et le clitoris féminin ?*
- *Pourquoi est-ce que la sélection a amené à un virage de l'aorte en sortie du cœur (crosse aortique) ? Ce n'est pas optimum, il aurait été plus judicieux de positionner le cœur vers le bas.*
- *Pourquoi est-ce que le nerf laryngé récurrent gauche, qui innerve les muscles du larynx, part de la base du cervelet, descend dans le cou, passe sous la crosse aortique pour ensuite remonter vers le larynx ? Ce trajet supplémentaire est inutile, notamment chez la girafe avec un cou qui a grandi après cette sélection.*

Le biomimétisme ne se base pas sur la contribution d'un trait à la fitness d'un organisme pour choisir s'il faut le transposer. Il repère des solutions naturelles apparues au cours de l'évolution, c'est-à-dire des fonctions ou des rapports structures-fonctions naturels qu'il peut être intéressant de transposer à une fonction d'intérêt humain : sa finalité est de chercher, d'identifier et d'industrialiser une solution à un problème humain. À l'extrême, il est possible de transposer un trait maladaptatif dans le vivant s'il correspond à une solution recherchée pour l'Homme. Les ingénieurs R&D humains le savent bien et modifient souvent copieusement les modalités de la solution naturelle pour qu'elle colle à leur besoin.

## Verrous de recherche

- La qualité des données, leur stockage et leur mise à disposition.
- La formalisation des propriétés du vivant pour les rendre disponibles pour la bioinspiration : centraliser les corpus de données, inclure les données historiques, extraire ces données et faire l'analogie avec la technologie [= base de données de modèles biologiques].
- Le transfert du modèle biologique au domaine technique.
- L'utilisation et l'adaptation des outils du big data pour faciliter le screening et l'analyse.
- L'intégration des métadonnées (taxa, ontologie, biodiversité avec support d'image, son, etc.).
- L'acquisition de connaissances en systématique qui permet d'apporter la phylogénie, la répartition des structures et fonctions, la description et l'identification des espèces, les homologies, les convergences.

## LES OUTILS D'EXPLORATION ET D'ANALYSE POUR LA BIOINSPIRATION

*Éléments issus du colloque Bioinspire du Muséum du 25 septembre 2019 (interventions de Jian-Sheng Sun / Anabelle Aish / Guillaume Lecointre / Régine Vignes Lebbe)*

Une **carte de la connaissance du biomimétisme** a été réalisée sur la base des publications de janvier 2016 à juillet 2019, soit un corpus de 20 489 articles incluant les mots clés « bioinspiration », « biomimétisme », « biomimetic », « bioinspired », « bio-inspired ».

Toutes ces données s'organisent en quatre clusters : chimie verte et synthèse / eau / matériel / biologie et application biomédicales. La cartographie permet de visualiser les macro et micro liens entre les termes des clusters (ex : neurones, insectes, etc.) et de favoriser les innovations de rupture.

Le MNHN dispose également d'une **cartographie des chercheurs** qui travaillent en interne sur cette question. À travers 50 entretiens semi-directifs, et à l'aide du logiciel *Kumu* (cartographie des systèmes complexes), une base de données a été constituée et permet de faire des requêtes plus ou moins élaborées pour trouver des chercheurs, des thématiques, des financeurs, etc. Aucune cartographie nationale, voire mondiale n'est disponible actuellement. Un tel travail pourrait être pilotée par le Ceebios.

**Les processus et outils d'accès et de transmission des connaissances** font appel à l'expertise des systématiens, des gestionnaires de collections, à la littérature scientifique. Le développement du biomimétisme ne pourra se faire sans des travaux de formalisation de la description du vivant (taxonomie et ontologie) et le développement des outils avec des algorithmes de fouilles de données.

Un des enjeux du biomimétisme est de ne pas se limiter à la découverte par hasard :

1. La sémantique permet de faire des requêtes (google scholar, ou google) en utilisant des algorithmes mis en place par des informaticiens.
2. Les experts systématiens sur un groupe d'organismes apportent un appui à l'utilisation des outils de recherche, au développement des méthodes d'identification.
3. L'approche par homologie permet de faire des relations d'apparementent
4. La systématisation des démarches à partir de démarche accidentelles ou intuitives permet de gagner du temps et d'automatiser les processus de fouilles de données.
5. Toutes les disciplines qui participent au développement de la bio-inspiration doivent être soutenues, de même que les infrastructures qui hébergent les collections.



**La mise en correspondance de terminologies différentes** fait appel aux ontologies et aux processus automatiques sur des ressources automatisées (*data mining*). Ces ontologies permettent de sortir des silos de connaissances. Voir par exemple les travaux du GDR Semandiv ou AskNature qui proposent des terminologies avec vocabulaire contrôlé, ou le réseau international du GBIF qui permet de connecter de nombreuses sources de données et les interconnecter.

**Les algorithmiques évolutionnaires** simulent les processus d'évolution naturelle pour trouver des solutions à un problème posé.

**Les graphes connexes non cycliques**, orientés sont des outils mathématiques qui permettent d'indiquer la proximité génétique (= phylogénie). Ces graphes sont prédictifs sur les propriétés des objets et donc les applications potentielles d'un nouveau matériau.

**La bibliothèque post-transition numérique** (Gildas Illien, MNHN) permet d'imaginer des infrastructures pour rendre visible la ressource pour la bio-inspiration.

La nature transparait à travers sa représentation notamment dans un contexte de transformation profonde de la transition numérique et l'expérimentation de nouvelles formes de recherche et de médiation comme la science participative, tiers-lieux, co-construction, participation, engagement.

Aujourd'hui, on ne parle plus de catalogues, mais de *big data*. Les infrastructures et les collections pensées par et pour des scientifiques évoluent pour intéresser d'autres publics, notamment les créateurs pour produire de l'émotion, de la connaissance, de l'inspiration.

*Exemples :*

- *Les cétacés s'inscrivent à l'intérieur de la branche des artiodactyles. Cependant, il est complexe de le prouver avec les cétacés d'aujourd'hui qui n'ont plus de pattes. L'étude du fossile Pakicetus attocki (- 50 millions d'années) a permis de faire cette démonstration et de vérifier l'hypothèse posée.*
- *Les graphes connexes non cycliques ont été utilisés en linguistique comparative pour comprendre la diversité des langues, dont on sait depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle qu'elles se transmettent sous contrainte.*
- *Ils ont aussi été utilisés pour étudier la transmission généalogique des idées des chercheurs à propos de l'arbre du vivant du XVI<sup>e</sup> siècle à 2012.*
- *L'if Taxus brevifolia a des propriétés anticancéreuses démontrées, mais l'exploitation de cet arbre s'est heurtée à sa rareté, car le processus d'extraction nécessitait de broyer l'arbre, donc de le détruire. L'équipe de Gif-sur-Yvette du CNRS a eu l'idée de chercher chez les espèces apparentées et a trouvé que l'if commun contenait aussi la même propriété. C'est un des rares brevets rentables du CNRS.*

## **L'APPROCHE IPBES**

Pour l'ipbes, le biomimétisme fait partie de ce que les populations tirent de la nature dans la catégorie « *Learning and inspiration* ». En effet, l'humanité apprend de la nature, des processus naturels, expérimente et utilise des caractéristiques écologiques pour sélectionner des cultures, des médicaments, pour guérir et produire des matériaux.

Les humains modifient la nature à leur profit, transforment les processus naturels, sélectionnent et favorisent ceux qui leur semblent les plus intéressants à court terme. Les humains ont ainsi la capacité à remplacer un certain nombre des avantages qu'ils retirent de la nature par de la technologie comme les engrais chimiques qui se substituent à la fertilité des sols. Les acteurs locaux et la science

utilisent de plus en plus la connaissance de la nature et de ses processus pour l'imiter (Hunter, 2017). Cette transformation de la nature a eu des impacts à la fois positifs et négatifs sur la qualité de vie des humains et des impacts très négatifs sur les non humains. Les organismes génétiquement modifiés, par exemple, ont des effets positifs immédiats sur la production d'aliments et de matières premières, mais des questions se posent quant aux effets négatifs potentiels sur l'environnement (Pott *et al.* 2018). De même, l'utilisation de techniques de manipulation génétique sur les moustiques, bien qu'elles ne soient pas encore disséminées *in situ*, devrait avoir d'importants avantages pour la santé humaine (Hammond *et al.* 2017), mais de telles approches font l'objet de débats en raison de préoccupations éthiques et environnementales.

Par ailleurs, certaines innovations sont très performantes en termes d'utilisation économique de la biodiversité (par exemple, le biomimétisme dans les produits pharmaceutiques, cosmétiques et alimentaires) et pourraient contribuer à sa conservation de la biodiversité tout en bénéficiant aux populations locales et aux économies régionales.

Enfin, certains scénarios mentionnent aussi explicitement l'importance de la biodiversité pour la mise en place d'alternatives économiques pour les peuples autochtones et locaux et les économies régionales (Folhes *et al.*, 2015 ; Aguiar *et al.*, 2016). Un article récent (Nobre *et al.*, 2016) a même exploré un nouveau paradigme de développement permettant de concilier la conservation et l'intensification de l'agriculture, grâce au biomimétisme, dans ce qu'ils nomment la « quatrième révolution industrielle ».

Dans les points d'attention pour un futur pour l'humanité, l'Ipbes recommande de préserver la valeur d'option de la biodiversité (c'est-à-dire la valeur qu'on accorde à un élément de biodiversité en prévision de l'usage futur qui pourrait en être fait).

## **DISCUSSIONS, CONTROVERSES SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVE : VERS UN BIOMIMÉTISME UTILE À LA BIODIVERSITÉ**

### **Choix des termes utilisés**

Il existe une dichotomie d'approches dans la communauté scientifique qui amène à l'utilisation, parfois clivante de terminologies consacrées, biomimétisme et bio-inspiration, jusqu'à la proposition d'utiliser une autre terminologie, l'éco-inspiration.

**Biomimétisme**, issu du courant américain (Jeanine Benyus), est une philosophie consistant à prendre la nature comme modèle dans un objectif de développement durable. Cependant, ce terme peut être tout à la fois ressenti comme trop entaché de militantisme, affiché comme le seul disposant d'une dimension philosophique pour le développement durable, ou *a contrario*, ne mettre en avant que la dimension technologique.

Le Ceebios a publié un état des lieux du biomimétisme en France qui propose une définition englobante du biomimétisme incluant les procédés et les systèmes (agroécologie, bioéconomie, etc.) qui imitent la nature.

Le biomimétisme peut être, à ce titre, ressenti comme plus technologique que la bio-inspiration et certains chercheurs considèrent que « *Le biomimétisme pur et dur n'est pas de la biodiversité, mais de la technologie* ». En effet, le biomimétisme prend modèle sur les systèmes biologiques pour orienter des approches d'ingénierie plutôt techniques.

**Bio-inspiration** est le terme choisi par le MNHN pour qualifier ce domaine de recherche et de réflexion. Il est alors affiché comme possédant une dimension écosystémique, éthique et nécessairement favorable à la biodiversité. Des innovations technologiques visant à pallier l'effondrement de la biodiversité,

comme les drones pollinisateurs, sont alors exclues de son champ. Pour d'autres, c'est une approche beaucoup plus anthropocentrée, consistant à étudier la nature sous toutes ses formes pour produire des produits matériaux moins polluants, moins chers au service de l'homme, ou encore, l'art d'utiliser l'observation du fonctionnement de la nature dans un objectif de développement durable. Cette dernière définition se rapproche de celle du biomimétisme en s'intéressant aux formes, structures, surfaces, fonctions, processus, organisations et fonctionnements des écosystèmes pour améliorer le fonctionnement de nos anthroposystèmes.

**Éco-inspiration** est présenté par Denis Couvet, comme une alternative qui intègre la notion de système adaptatif complexe et comment les écosystèmes ont su s'adapter aux grandes crises écologiques depuis l'arrivée de la vie sur Terre. La socio-éco-inspiration tient compte des contextes écologique et social. L'évaluation du *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) présentait ainsi deux scénarios : le jardin technologique (technologies vertes homogènes et imposées par des experts) *versus* la mosaïque adaptative (localement les communautés humaines trouvent des nouvelles solutions adaptées au territoire).

### **La place de l'ingénierie écologique**

Selon les classifications, la manipulation de systèmes écologiques fait partie ou non du biomimétisme. La question de l'ingénierie écologique se pose donc. Au-delà de la terminologie, la différence est importante. Il y a là deux approches différentes, d'une part se saisir d'un modèle présent dans la nature pour développer une innovation (velcro ou bâtiment inspiré d'une termitière) et d'autre part piloter les écosystèmes artificiels à la façon des écosystèmes naturels. L'ingénierie écologique va même plus loin en mettant œuvre des actions ou artifices ponctuels pour restaurer des dynamiques écologiques à terme autonomes, libres, spontanées à forte naturalité.

Dans le premier cas, l'impact sur la biodiversité peut être positif ou négatif, mais il doit également être comparé à l'impact du produit équivalent non bio-inspiré. Dans le second cas, celui de l'ingénierie écologique, il y a manipulation directe d'un système (avec tous les risques que cela peut comporter) sur la base des connaissances explicites disponibles sur le fonctionnement naturel et la volonté de remplacer au maximum les intrants / ressources non-durables par des processus écologiques. C'est par exemple l'idée de l'agroécologie. Dans cette seconde approche, les risques existent, mais les intentions et les moyens sont par définition vertueux alors que dans la première approche, l'idée est juste de s'inspirer de la nature pour créer quelque chose d'efficace pour les humains.

### **Les premières limites du concept et de ses utilisations**

Une question importante, dont se saisit la recherche, est de savoir si le biomimétisme est effectivement devenu un élément de prise de conscience environnementale, comme cela avait été affiché par les théoriciens du concept. L'avion par exemple, qui a largement bénéficié d'optimisation bio-inspirées, est moins durable que la bicyclette, qui n'est pas bio-inspirée.

Une seconde question intéressante est de savoir quel sera l'impact de l'érosion de la biodiversité et si une érosion du potentiel de découverte peut être objectivée, à l'instar de la disparition du dernier dauphin Beiji du Yang-Tse Kiang, en Chine qui a emporté avec lui les secrets de son sonar ultra performant. Des réponses ont été apportées par des chercheurs travaillant sur la diversité phylogénétique.

Par ailleurs, le manque de processus d'évaluation sérieuse des impacts du déploiement des technologies issues du biomimétisme reste un vrai problème.

Rien ne permet actuellement d'affirmer avec certitude que le gain apporté par le biomimétisme - c'est-à-dire la différence entre les conséquences positives ou neutres et les conséquences négatives - est favorable. Une étude aux USA démontre par exemple les conséquences sociales et politiques lourdes de ce qu'ils nomment le « cauchemar numérique », alors que ces technologies ont simplifié la communication humaine.

Plusieurs dérives peuvent aussi être identifiées :

- Ce développement rapide est souvent centré sur l'optimisation d'objets ou de processus au service de l'Homme sans qu'un réel bénéfice ne soit pour autant apporté à la biodiversité qui a pourtant servi d'inspiration. Une certaine dérive du phénomène est l'apparition de courants qui estiment que l'Homme, grâce au développement technologique, pourra se passer complètement de la nature et pallier la disparition de la biodiversité et des services que l'humanité en retire. Citons par exemple, les drones pour polliniser ou les arbres artificiels pour capter du carbone et des particules. D'autres projets comme l'injection de particules dans l'atmosphère pour créer artificiellement de la pluie dans les régions arides, ou encore l'ensemencement des océans par du fer pour stimuler la croissance du phytoplancton et capter le CO<sub>2</sub> anthropogénique relèvent sans doute plus de la géoingénierie car ils proposent de jouer sur un facteur physique pour stimuler un processus physique ou biologique.
- des projets comme le transhumanisme (dont certaines approches cherchent à libérer les humains de certaines dimensions biologiques pour qu'ils ne soient plus qu'un mélange de circuits imprimés et de neurones) en sont des extrêmes.

Ces approches posent d'importants problèmes éthiques, vis-à-vis de la biodiversité tout d'abord, mais également vis-à-vis d'une grande partie de l'humanité qui n'aura probablement pas accès à ces technologies de pointe et qu'on condamne à vivre sur une planète invivable. Ces divers points d'attention sont discutés dans ce chapitre.

Enfin le questionnement de la dimension éthique du biomimétisme et de ses excès n'est pas encore abouti. Est-il éthique par exemple de vouloir modifier la nature pour la rendre plus performante ?

### **Vers une éthique du biomimétisme et de la bio-inspiration**

Réfléchir à l'éthique du biomimétisme revient à se poser la question : « Est-ce que la bioinspiration est bénéfique ? À qui ? Et comment ? »

Considérant l'état de la biodiversité et les cinq facteurs du déclin (changement d'usage des terres, prélèvement non soutenable des ressources, changement climatique, espèces exotiques envahissantes et pollution) la recherche doit s'interroger sur les engagements minimaux indispensables de la bio-inspiration et définir les prérequis d'une recherche bio-inspirée, par exemple :

- exclure du champ de la bio-inspiration les innovations technologiques visant à pallier l'effondrement de la biodiversité, comme les drones pollinisateurs ;
- définir le biomimétisme comme nécessairement favorable à la biodiversité, exclure de ce fait les technologies génétiques qui amènent à relâcher dans l'environnement des organismes modifiés ;
- favoriser les solutions fondées sur la nature sous réserve des précautions soulignées par la FRB dans son avis publié en juillet 2016 (<https://www.fondationbiodiversite.fr/blog/2016/07/11/les-solutions-fondees-sur-la-nature/>) ;
- conduire à une diminution de l'empreinte écologique ou aller beaucoup plus loin en s'assurant que la bio-inspiration contribue à sauvegarder le potentiel évolutif du vivant. C'est une des finalités centrales de la conservation de la biodiversité depuis l'émergence de ce concept, dans ses dimensions



éthiques et opérationnelles (Soulé, 1985). C'est aussi nécessaire pour que la biodiversité puisse s'adapter aux pressions anthropiques tant que nous sommes inefficaces pour les réduire. Dans une éthique évocentrique (Sarrazin & Lecomte, 2016) ce second objectif n'est pas une fin en soi et ne doit en aucune manière être un argument pour retarder les efforts de réduction de nos pressions sur la biodiversité. L'éthique bio-inspirée pourrait alors être une éthique ancrée dans ces approches évocentriques ;

- s'attacher à rendre les politiques bio-inspirées plus réactives et dynamiques.
- donner à la bioinspiration une vision écosystémique et holistique, car la biodiversité n'est pas seulement une richesse en organismes et en espèces, mais elle inclut aussi les interactions entre les espèces au sein d'un écosystème. Il faut donc placer les objets bio-inspirés dans leurs contextes environnementaux, sans pour autant appeler bio-inspiration toute l'écologie appliquée ;
- s'interroger sur l'évaluation des innovations, en intégrant la dimension sociale, institutionnelle, les questions de durabilité, les impacts sur le capital naturel, la résilience face aux perturbations. À ce titre, l'échelle d'étude est primordiale, on ne peut étudier une innovation bio-inspirée à l'échelle du produit, il faut l'étudier à une échelle plus large, pour évaluer tous ses impacts ;
- s'interroger sur le modèle économique sous-tendu par une innovation et ses incidences en cascade sur les chaînes de valeurs ;
- ne pas dissocier la technique de la logique de l'utilisateur (comment cela va être utilisé et avec quel objectif ? ). Il peut exister, dans certains cas, une confiance exagérée dans le potentiel de progrès technologiques : or, il est parfois plus générateur de problèmes que de solution.

Au niveau national, une charte nationale du biomimétisme, pourrait être portée à l'initiative du Ceebios

En conclusion, on pourra reprendre ici la citation que le Ceebios a fait figurer à la fin de son état des lieux 2018 :

*Le biomimétisme est [...] une invitation à l'humilité, une invitation à nous réconcilier avec la Nature.*

*[...] cependant, prenons garde [...] nous sommes aujourd'hui à la croisée des chemins quant au sens que nous voulons donner au biomimétisme. [...] si nous ne sommes pas vigilants, la bio-inspiration peut aussi renforcer le rapport utilitariste à la nature qui, on le constate tous les jours, est source de tant d'excès et de désastres environnementaux et humains.*

*Nicolas Thierry, Vice-Président du Conseil Régional Région Nouvelle Aquitaine  
En charge de l'environnement et de la biodiversité.*

### **La question du bénéfice pour la biodiversité**

Parallèlement à ces questions, les personnes impliquées dans la protection de la biodiversité, militants associatifs, gestionnaires d'espaces naturels, chercheurs, peuvent légitimement se poser la question suivante : quel bénéfice effectif retire la biodiversité du développement de la biomimétique ? *A priori*, les oiseaux et les chauves-souris n'ont tiré, en matière de protection, aucun avantage du développement de l'aviation, les geckos et les araignées ne seront pas mieux connus et protégés une fois développés et commercialisés les nouveaux procédés d'adhérence inspirés des pattes de geckos et les fibres ultra-résistantes mimant les soies des araignées. On pourrait multiplier ces exemples. À ce jour, sauf en termes d'image auprès du grand public (mais on verra plus avant que cette notion doit être abordée avec précaution), le biomimétisme ne bénéficie pas directement à la préservation de la biodiversité et il ne bénéficie encore que marginalement



à la recherche sur la biodiversité, et notamment à la connaissance de celle-ci, ce qui peut sembler totalement paradoxal. En effet si on veut pouvoir imiter la biodiversité, il faut connaître cette dernière, ses composants, y compris ceux qui vivent dans les milieux extrêmes ou reculés. Il faut développer les connaissances sur la morphologie, l'anatomie, la physiologie, la génétique, l'écologie du monde vivant, sinon on passera à côté de multiples options à partir desquelles les humains pourront développer leurs capacités d'imitation. Il devrait donc y avoir une alliance de fait entre les tenants du biomimétisme et les descripteurs de la biodiversité surtout alors que l'on sait que cette connaissance est plus que lacunaire. Cela sous-entend des flux financiers significatifs, et des compétences scientifiques renouvelées, en faveur de l'inventaire, de la description et de la compréhension de la biodiversité planétaire et la mobilisation de toutes les techniques susceptibles d'y contribuer.

Mieux connaître la biodiversité devrait donc être le corollaire du développement du biomimétisme, mais si celui-ci se développe, il faut apporter une réponse pragmatique et intelligente à cette absence de retour de la bio-inspiration en faveur de la biodiversité. Si une entreprise veut s'inspirer des travaux d'une autre entreprise, elle va rechercher les brevets qui l'intéressent et négocier les conditions financières de l'accès et de l'usage de ces brevets, elle va payer des royalties... Qu'est-ce que la biodiversité au regard de la biomimétique ? Une source infinie de brevets sur des procédés expérimentés depuis des millénaires quand ce n'est pas sur des millions d'années ; des procédés en général fonctionnels et dynamiques et qui ont intégré en continu les changements environnementaux du passés, les dernières décennies ayant montré que les changements trop rapides de l'environnement étaient responsables des effondrements constatés de nos jours. Si on utilise la biodiversité et les multiples mécanismes qui sont à l'origine du fonctionnement des organismes jusqu'aux écosystèmes, il serait souhaitable que cette biodiversité « modèle » en tire un et même plusieurs avantages directs. Toute utilisation d'un procédé développé par un composant de la biodiversité, animal, plante, champignon, bactérie, pourra faire l'objet d'une action en faveur de cet élément de la biodiversité, ou si c'est pertinent du groupe taxonomique dans lequel il est présent et de l'habitat, ou de l'écosystème qui l'abrite.

Pour aller plus loin, la réflexion autour du biomimétisme peut aussi se fonder sur le principe de l'éthique écocentrée évoquée antérieurement pour ne pas renforcer des approches anthropocentrées, mais proposant de renverser la charge de la preuve déjà évoquée par de nombreux auteurs en éthique environnementale. Il s'agit alors de passer d'une logique qui essaie de démontrer « pourquoi conserver tel ou tel élément de biodiversité » à un bouleversement de nos relations au vivant qui serait de comprendre « pourquoi accepter de perdre ou détruire tel ou tel élément de biodiversité ? »

Compte tenu de la montée des préoccupations de la population à l'égard de la biodiversité, du besoin de reconnexion des humains à la biodiversité, de la nécessité d'une meilleure co-habitation entre humains et non-humains, ce serait une démarche foncièrement éthique qui pourrait soit être favorisée par l'État soit être imposée par celui-ci en incluant ces mécanismes de soutien à la biodiversité dans les textes réglementaires. Sur un plan qui ne relève pas du biomimétisme, mais de l'utilisation des représentations de la biodiversité par les acteurs économiques, des chercheurs, constatant que de nombreuses entreprises utilisent l'image d'espèces rares et menacées pour la commercialisation de leurs produits, et participent ainsi à une perception biaisée de l'état souvent dramatique de leurs populations, ont proposé un mécanisme concret de soutien par les entreprises qui utilisent pour leur image de marque des espèces charismatiques en voie de disparition (<https://www.fondationbiodiversite.fr/extinction-paradoxe-espèces-charismatiques>).

On pourrait s'inspirer de cette proposition pour un retour du développement du biomimétisme au bénéfice, *a minima*, des éléments de biodiversité sur lesquels elle s'appuie.



En bref, il faut faire en sorte que l'ambition que porte le biomimétisme au travers le développement de la biomimétique serve enfin la biodiversité, les connaissances que l'on a d'elle et contribue à assurer son futur.

par

**Hélène Soubelet**

directrice de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité

**et Jean-François Silvain**

président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité

Relecture **Sébastien Barot,**

chercheur à l'IRD et vice-président du conseil scientifique de la FRB

**Philippe Grandcolas,**

directeur de recherche au CNRS et membre du conseil scientifique de la FRB

**François Sarrazin**

professeur de Sorbonne université et président du conseil scientifique de la FRB

## ANNEXE : PRÉSENTATION DE QUELQUES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

### Plan des annexes

<b>Définition et éthique du biomimétisme</b> .....	<b>19</b>
<b>Architecture, villes et infrastructures</b> .....	<b>22</b>
<b>Gestion et restauration des écosystèmes</b> .....	<b>24</b>
<b>Médecine, pharmacie et bio-matériaux</b> .....	<b>25</b>
<b>Agriculture et alimentation</b> .....	<b>27</b>
<b>Autres</b> .....	<b>29</b>

La littérature scientifique sur le biomimétisme est relativement peu fournie par rapport à d'autres sujets. Il s'agit principalement d'articles décrivant une utilisation, ses avantages et inconvénients, souvent traités d'un point de vue exclusivement technique ; c'est-à-dire sans considération des impacts de cette technologie sur l'environnement, mais en s'intéressant simplement aux dérives par rapport au cahier des charges techniques ou à l'objet qu'elle remplace. Il y a donc encore un manque de littérature, et donc de réflexion sur les aspects éthiques du biomimétisme et sur ses impacts sociaux et environnementaux. Or si cette discipline affiche des ambitions de développement durable, il faut aussi qu'elle se confronte à ses deux piliers majeurs que sont l'environnement et le social, au côté du pilier économique, lui, très bien pris en compte. Les choses évoluent avec le souhait de scientifiques de voir se dégager une éthique du biomimétisme qui pourrait prendre la forme d'une charte.

Après les approches de définition du concept et d'éthique, les articles sélectionnés peuvent être classés en plusieurs catégories :

- architecture, villes et infrastructures ;
- gestion et restauration des écosystèmes ;
- médecine et pharmacie et bio-matériels ;
- agriculture et alimentation ;
- divers.

### Définition et éthique du biomimétisme

Javier Collado-Ruano (2015) présente le biomimétisme comme une approche et un véritable outil de transformation des civilisations pour une « citoyenneté mondiale » durable. Il explore les concepts de transdisciplinarité de Basarab Nicolescu (2008) et le concept de biomimétisme abordé par Janine M. Benyus (2012) qui identifie neuf principes de fonctionnement de la vie afin d'imiter la nature dans la reformulation de nouveaux systèmes de production humaine durable avec la biosphère. Il proposait d'identifier des accords internationaux sur l'environnement et le développement durable, afin d'apporter une contribution au cadre stratégique pour la décennie 2015-2025 en matière d'éco-politique, d'éducation et d'éco-éthique en tant que pratique dans « l'éducation à la citoyenneté mondiale »

proposée à l'Unesco. Ce travail aurait pu permettre de renforcer les liens entre éducation, éthique et durabilité en identifiant l'interdépendance, calquée sur celle qui caractérise un écosystème, comme un axe essentiel des structures sociales, politiques et éducatives des systèmes humains.

Pour ses défenseurs, le biomimétisme a vocation à supplanter les modèles d'ingénierie à forte dépendance énergétique grâce à un mode de production plus respectueux de la vie et des non humains. Elizabeth R. Johnson et Jesse Goldsteiny (2015) pointent cependant que la société entière est tournée vers une exploitation de la nature sous-tendue par une recherche de profits et que, même si le biomimétisme intègre la théorie du changement de modèle, les habitudes politiques et les relations sociales sont toujours dominées par le capitalisme dont la philosophie s'oppose à ce principe et tend à tirer un profit maximal de toute exploitation. Cette harmonisation des référentiels et des indicateurs de succès promeut certaines formes de vie et certaines connaissances au détriment d'autres. L'article examine les potentiels et les limites des collectifs qui sortent d'une vision strictement anthropocentrée pour rendre visible les avantages non financiers tirés des capacités biologiques et des connaissances en proposant la notion d'*intellect pluripotent* en tant que cadre cherchant à mettre en valeur la pluralité des formes de vie et des formes de connaissances.

Barthlott *et al.* (2016) croisent les aspects interdépendants de la répartition géographique inégale de la biodiversité, son érosion continue, la perte induite des « prototypes vivants » et le gradient Nord-Sud des capacités institutionnelles liées à la biodiversité et au biomimétisme pour affiner la compréhension de la contribution du biomimétisme à la réalisation du développement durable. L'histoire du biomimétisme, et des terminologies qui lui sont associées, remonte de 1800 à 1925 et à ses premiers pionniers, Alessandro Volta (batterie électrique), Otto Lilienthal (machine volante) et Raoul France (concepts). Il a été pratiquement réinventé sous la forte influence de la cybernétique dans les années 1960 par H. V. Foerster et W. McCulloch. Le terme « biomimétique » est apparu simultanément avec une connotation légèrement différente. « Bio-inspiration » est un terme plus moderne et plus englobant de la bionique à la biotechnologie en passant par le design de mode bio-inspiré. Aujourd'hui, les stratégies marketing jouent un rôle crucial dans le placement de produits dans une économie de plus en plus concurrentielle.

Les auteurs concluent que le biomimétisme pourrait être un contributeur majeur aux futures solutions et innovations technologiques basées sur la nature, abordant ainsi certains des problèmes les plus pressants de l'humanité. Il pourrait devenir, avec ses domaines connexes, une composante majeure de la « grande transformation » actuelle de l'humanité sur sa trajectoire de développement durable.

Michael Fisch (2017) décrit le biomimétisme comme un mouvement et une méthode populaire en faveur de l'écologie qui préconise la création de systèmes de productions biologiques innovants et respectueux de l'environnement. Il explore la notion de nature dans le biomimétisme telle qu'énoncée par la fondatrice du mouvement, Janine Benyus, et la nature du biomimétisme telle que pratiquée par l'écologiste du *Massachusetts Institute of Technology*, Neri Oxman. L'auteur soutient que l'approche de Benyus, qui fait la promotion du biomimétisme en tant que science de la nature dans laquelle la nature est traitée comme une source de conception innovante pouvant être technologiquement imitée, est problématique car elle aboutit à un système d'éthique rigide, exigeant une séparation absolue de la nature et de la technologie. En revanche, il décrit les travaux de Oxman comme portant le biomimétisme en tant que technologie de la nature et mobilisant une interaction avec des matériaux organiques qui incite à une modification radicale de la façon de penser la nature, la technologie et la techno-éthique.

Sur la base d'une analyse du concept de biomimétisme dans la littérature et de son origine philosophique, Block *et al.* (2016) distinguent quatre dimensions du concept

de biomimétisme : mimésis, technologie, nature et éthique avec un concept fort dont la force réside dans le fait que la nature est considérée comme une mesure permettant de juger de la justesse éthique de nos innovations technologiques, mais qui comporte des faiblesses dans la robustesse des présupposés et un concept plus faible qui ne permet pas de distinguer les innovations technologiques dont la finalité est d'exploiter la nature et les innovations dont la finalité est de la préserver. Cette approche avait été discutée par Benyus en 1997 (*Biomimicry : une innovation inspirée de la nature*, Harper Perennial, New York, 1997).

Alors que le mouvement biomimétique contemporain est principalement associé à l'idée de prendre la nature en tant que « modèle » d'innovations technologiques, Henry Dicks (2017) a également travaillé la dimension normative, philosophique et éthique du biomimétisme en tant que « mesure » de notre relation à la nature.

L'éthique environnementale traditionnelle a été appliquée avant tout à des questions telles que la préservation de la nature, la gestion des ressources naturelles, les droits et le bien-être des animaux, elle considère donc d'abord notre relation éthique avec la nature comme inhérent au devoir de protéger, de préserver ou de conserver la biodiversité. Henry Dicks invite à élargir cette vision et propose que l'éthique biomimétique s'applique aussi à la manière dont nous produisons, utilisons et consommons les ressources naturelles afin de constituer le cadre de base nécessaire à la transition vers une économie solaire circulaire et d'origine biologique.

Plus récemment, David Ruano (2019) identifie que le champ lexical de la nature est enraciné dans notre façon de parler, de nommer des choses, de créer des constructions architecturales ou de développer de nouveaux matériaux pour prospérer en tant qu'espèce. Pour lui, tout modèle de conceptions écologiques, durables ou inspirées biologiquement est le signe d'une intelligence collective. Dans le domaine particulier du design, il met en œuvre des ateliers pour favoriser l'appropriation par les chercheurs de nouvelles méthodes pédagogiques basées sur l'observation de la nature et la mise en place d'une nouvelle conception éthique axée sur la nature.

Les organismes vivants ont évolué et se sont adaptés pendant plus de 3,5 milliards d'années. Un des challenges, auquel s'est attelée l'équipe de Grenn (2019), est d'identifier et de cataloguer les caractéristiques essentielles à une bonne conception biomimétique et ce ne peut être possible qu'en augmentant la connaissance sur la classification méta-taxonomique de la phylogénétique, de la systématique, de la recherche sur les matériaux biologiques, des caractérisations structurelles et morphologiques et de la collecte de données écologiques dans les collections.

Il restait à explorer les questions de perception face au biomimétisme et à ses objectifs de conservation de la biodiversité et de l'environnement. Pour identifier ces perceptions et les attentes du public, l'équipe de Kohsaka *et al.* (2017) a conduit, une enquête auprès des visiteurs du Musée national de la nature et des sciences au Japon, où a eu lieu l'exposition sur la biomimétique. Les résultats ont révélé que les attentes du public étaient fortes en termes d'applications médicales, tout en variant cependant selon les groupes d'âge. Les enquêtés de plus de 30 ans s'attendent à un niveau élevé dans le domaine de la protection de l'environnement et globalement le niveau des attentes a augmenté pour tous les groupes d'âge après la visite des expositions présentant les usages commerciaux du biomimétisme et ses applications en termes de facteurs de changement de style de vie. Des expérimentations comme celle conduite au musée de zoologie D'Arcy Thompson par l'équipe de Fehler (2019) ont permis aux publics de participer à des activités guidées qui les aideront à s'inspirer de la nature pour créer et découvrir les potentialités cachées des musées d'histoire naturelle.

## Architecture, villes et infrastructures

Les bâtiments sont des éléments cruciaux dans la lutte et l'adaptation au changement climatique et, à ce titre, la conception de bâtiments durables est un domaine dans lequel le biomimétisme a toute sa place. Prendre la nature comme modèle, guide et mesure est largement accepté dans le domaine de l'architecture, mais principalement dans la conceptualisation de nouvelles formes. En effet, encore aujourd'hui, le biomimétisme est une discipline relativement nouvelle des sciences appliquées.

Le travail de Nihal Amer fait la démonstration de l'importance de l'enseignement de l'approche biomimétique aux futurs architectes pour que des solutions durables diversifiées soient mises en œuvre dans la conception architecturale.

Les stratégies de régulation thermique et de contrôle de l'environnement trouvées dans la nature sont innombrables. Dans l'article de Martin Gomez *et al.*, un parallélisme entre les animaux et les systèmes énergétiques des bâtiments est défini afin d'identifier et de souligner les opportunités immédiates que le biomimétisme offre pour les recherches futures. La motivation était la nécessité de trouver des solutions alternatives pour résoudre les problèmes de l'efficacité des systèmes de chauffage, de ventilation et de refroidissement. Parmi le large éventail de possibilités offertes par les animaux, l'étude s'est largement limitée aux stratégies développées par les animaux à sang froid grâce à une adaptation évolutive à l'environnement.

Une approche pas à pas est suivie : tout d'abord, les différentes stratégies de thermorégulation animales sont définies (domaine biologique), ensuite, la stratégie est analysée et classée en trois catégories pour formuler le parallélisme avec les systèmes de construction (phase de transfert) et enfin, la mise en œuvre potentielle est identifiée (domaine technologique).

La planification urbaine est un processus essentiel pour déterminer la fonctionnalité des villes futures. Selon les prévisions, au moins deux tiers des citoyens du monde résideront dans des villes et des villages d'ici le milieu du siècle, contre un tiers au milieu du siècle précédent. Il est essentiel non seulement de fournir un espace pour le travail et le logement, mais également pour leur bien-être. Le bien-être est inextricablement lié à l'environnement et les paysages naturels ont un effet positif puissant. Pour cette raison, l'inclusion et la gestion des infrastructures vertes urbaines sont devenues un sujet d'intérêt scientifique croissant. Des éléments de cette infrastructure, notamment les toits et les façades végétaux, revêtent une importance croissante pour les opérateurs à chaque étape du processus de planification, de conception et de construction en milieu urbain. Malgré la reconnaissance positive des espaces et éléments verts urbains et les efforts concertés pour en inclure davantage dans les villes, une plus grande attention scientifique est nécessaire pour mieux comprendre son rôle dans l'environnement urbain. Par exemple, de nombreuses solutions sont intelligemment conçues sans prendre suffisamment en compte la biologie de la végétation utilisée. Peter *et al.* (2016) affirment qu'il existe une opportunité significative d'accroître la contribution des plantes au processus de planification urbaine à la fois par une infrastructure verte et par le biomimétisme.

Une autre approche, développée par Maibritt Pedersen Zari en 2016 propose d'étudier le biomimétisme basé sur les écosystèmes pour son potentiel de contribution à l'évolution des environnements construits intelligents. Le travail consiste à analyser l'environnement bâti urbain pour évoluer vers une intégration positive de ce bâti au sein des écosystèmes locaux ou comme contribuant à leur restauration. L'objectif est d'examiner l'utilité du biomimétisme en tant qu'outil pratique pour la recherche et l'évaluation des environnements bâtis existants, nouveaux ou rénovés. En s'appuyant sur le concept de services écosystémiques pour définir un cadre d'utilisation du biomimétisme, les scientifiques identifient les

services les plus pertinents dans le contexte d'un environnement urbain construit et proposent des objectifs de conception et de rénovation urbaine.

Le même auteur (Zari, 2019) poursuit son analyse en évaluant la manière dont les villes pourraient soutenir ou générer des services écosystémiques (une approche qui pourrait aussi relever de l'ingénierie écologique), notamment celui de la fourniture d'une bonne qualité de vie, *via* la qualité de l'habitat. Selon l'auteur, des écosystèmes plus sains permettent aux humains de mieux s'adapter au changement climatique en créant du potentiel pour une résilience accrue. Le rôle des espaces verts urbains et des forêts urbaines est crucial à cet égard. Fixer des objectifs ambitieux en matière de performance écologique urbaine et de fourniture de services écosystémiques revêt une grande importance en raison du large impact environnemental négatif que les villes ont actuellement sur les écosystèmes et, donc de la fourniture de services écosystémiques. L'étude comparative a analysé le service écosystémique de la fourniture d'habitat dans deux environnements urbains existants avec des climats similaires Wellington, en Nouvelle-Zélande, et Curitiba, au Brésil. L'étude conclut que, bien que la réalisation des objectifs de fourniture d'habitat dérivés de l'analyse des services écosystémiques dans les zones urbaines est difficile, la détermination d'objectifs quantitatifs spécifiques au site et au climat pourrait permettre aux concepteurs urbains d'accroître l'efficacité des efforts de conservation et de régénération des fonctions écosystémiques à partir d'espaces verts et bleus urbains.

Cuce *et al.* (2019) démontrent que le biomimétisme est une approche efficace pour concevoir et exploiter des environnements construits durables et éventuellement même régénératifs pour les bâtiments du futur. Dans le cadre de leur étude, ils ont développé un modèle d'approche, notamment *via* le modèle générique de la peau humaine et sa capacité d'adaptation au changement climatique, pour l'architecture biomimétique dans le contexte de la ville de Mumbai. Ils proposent des stratégies d'adaptation au changement climatique qui utilisent la biodiversité locale en tant que bibliothèque d'organismes source d'inspiration.

Toujours dans le cadre de la lutte et de l'adaptation aux changements climatiques anthropiques Hayes *et al.* (2019) ont étudié les risques relatifs aux infrastructures de transport, notamment les opérations perturbées, la réduction de leur durée de vie et l'augmentation des coûts de reconstruction et de maintenance. Lorsque des mesures d'adaptation physique ont été mises en œuvre, celles-ci se sont généralement alignées sur l'approche traditionnelle de « résilience technique » consistant à accroître la résistance et la rigidité des actifs pour faire face aux effets du changement climatique et maintenir un état de fonctionnement stable. De tels systèmes ont une agilité limitée et sont susceptibles d'échouer à cause des « événements surprises ». S'attaquant à ces limitations, l'équipe de Hayes *et al.*, envisage une autre approche de la résilience, inspirée des écosystèmes naturels qui détectent les conditions en temps réel, englobent la multifonctionnalité et évoluent en fonction des conditions environnementales changeantes. De tels systèmes englobent l'imprévisibilité et l'instabilité et sont résilients. Les auteurs ont synthétisé la littérature clé sur l'adaptation au climat et la théorie de la résilience socio-écologique et proposent un changement de paradigme pour la conception, la construction et l'exploitation des infrastructures de transport, vers des systèmes conçus pour transformer, évoluer et gérer la vulnérabilité de manière interne. Les auteurs discutent de l'opportunité offerte par le biomimétisme en tant que discipline pour soutenir une infrastructure résiliente et régénératrice.

**Remarque : comme précédemment évoqué, certains exemples relèvent largement de l'écologie urbaine, de l'ingénierie écologique ou des solutions fondées sur la nature.**

**Par ailleurs, les capacités d'auto-organisation des organismes et celles des écosystèmes ne reposent pas totalement sur les mêmes processus et contraintes,**



il pourrait être ici proposé de parler d'écomimétisme plutôt que de biomimétisme en ce qui concerne les approches inspirées des systèmes naturels.

## Gestion et restauration des écosystèmes

Pour la plupart des entreprises, le développement de pratiques durables en matière de chaîne d'approvisionnement reste difficile. Gruner *et al.* (2015) ont travaillé à des recommandations pour inciter les entreprises à imiter les écosystèmes naturels afin de développer des chaînes d'approvisionnement plus locales et donc plus durables.

L'augmentation de la durabilité environnementale des chaînes d'approvisionnement passe par le déplacement de l'attention d'une entreprise de l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement mondiale vers la construction d'opérations socio-écologiques régionales.

Cette recherche est l'une des premières tentatives d'application des principes écologiques aux chaînes d'approvisionnement, créant ainsi une synergie et un dialogue entre les disciplines de la gestion durable de la chaîne d'approvisionnement, de l'éthique des affaires et de l'écologie industrielle.

Le biomimétisme peut aussi avoir pour objet de créer des habitats artificiels pour restaurer un ou plusieurs éléments de la biodiversité. Griffiths *et al.* (2018) étudient l'exemple de la création d'habitats supplémentaires qui imitent efficacement les caractéristiques physiques et thermiques des cavités naturelles des arbres dans le cadre des programmes de restauration des paysages et de compensation de la biodiversité. En comparant les profils thermiques des cavités naturelles d'arbres avec plusieurs types de cavités artificielles conçues pour les petits marsupiaux planeurs et les chauves-souris insectivores arboricoles, ils ont démontré l'efficacité des cavités creusées à la tronçonneuse directement dans les troncs et les branches d'arbres vivants, et l'échec des nichoirs en contreplaqué mal isolés et produisant des environnements thermiques de qualité inférieure.

La destruction de l'habitat est l'une des principales causes du déclin de la biodiversité et des ressources halieutiques dans le milieu marin. Un récif artificiel (RA) pourrait constituer un outil de protection ou de restauration de ces habitats et de la dégradation de leur biodiversité, mais aussi contribuer à renforcer la durabilité des pêcheries. L'objectif est de concevoir des structures non polluantes qui imitent au mieux la complexité des habitats naturels afin d'améliorer leurs services à la communauté. À ce jour, l'évaluation de la performance des récifs s'est principalement concentrée sur les assemblages de poissons et les espèces présentant un intérêt écologique et / ou socio-économique, et a ignoré les communautés de biofilms qui déterminent le premier niveau du réseau trophique d'un RA. Dans ce travail, l'équipe de Riera *et al.* (2018) a utilisé la formation de biofilms pour comparer la qualité des substrats utilisés comme pièces de construction pour un RA, afin d'optimiser un matériau respectueux de l'environnement qui sera utilisé pour concevoir une nouvelle génération de RA produit par des imprimantes 3D géantes. La structure des communautés photosynthétiques a été identifiée à l'aide de biomarqueurs pigmentaires et leur production d'exsudats a été analysée. Ces substances polymères ont été quantifiées en termes de concentrations totales en sucre et en protéines. Ils ont ensuite été analysés en termes de teneur en acides aminés. Les auteurs n'ont trouvé aucune différence significative entre les communautés de micro-algues développées sur les différents substrats. Ces communautés de photosynthèse étaient principalement composées de diatomées, prasinophytes, haptophytes et dinoflagellés. Cependant, ils ont montré que le matériau utilisé pour les réactions indésirables était crucial pour le développement du biofilm, notamment en ce qui concerne ses sécrétions de sucre. Le choix d'un substrat approprié pour la construction des RA revêt donc une importance particulière, car les sécrétions de biofilms déterminent le substrat organique sur lequel les macro-organismes sessiles vont se déposer.



L'étalement mondial des centres urbains remplace des habitats naturels complexes par des infrastructures relativement plates et sans reliefs, qui favorisent une faible biodiversité. Dans un mouvement de contraction croissant, les micro-habitats artificiels sont de plus en plus intégrés dans les conceptions d'infrastructures *vertes* et *bleues*. Afin de maximiser la valeur écologique de telles interventions, l'équipe de Bugnot *et al.* (2018) a entrepris d'informer les conceptions avec les observations des systèmes naturels et des infrastructures vertes et bleues existantes. Ils se sont concentrés sur les caractéristiques de rétention d'eau imitant les mares de roches intertidales, car il s'agit d'une intervention largement utilisée dans les écosystèmes côtiers. À l'aide d'une méta-analyse et d'une revue de la littérature qualitative, ils ont compilé des informations sur la diversité et la fonction des mares rocheuses sur les rives rocheuses naturelles et les structures bâties afin d'évaluer les avantages écologiques potentiels des micro-habitats retenant l'eau et les mesures de conception des mares rocheuses qui affectent la diversité et la fonction. Une méta-analyse a montré une richesse en espèces plus élevée dans les gisements de roches par rapport aux surfaces émergentes des structures bâties, mais cette variation était variable selon les emplacements. L'examen qualitatif a révélé que les mares rocheuses sur les rives naturelles et artificielles abritaient généralement des espèces qui n'étaient pas présentes sur les roches émergentes et pouvaient également héberger des espèces non indigènes, ce qui suggère que l'ajout de ces caractéristiques peut parfois avoir des conséquences indésirables et que les connaissances écologiques locales sont essentielles pour mettre en œuvre des interventions réussies. Les relations entre la richesse en espèces et les paramètres de conception, tels que la hauteur à terre, le volume, la surface et la profondeur de la piscine, étaient spécifiques à chaque taxon. Par exemple, les résultats de la méta-analyse suggèrent que la construction de piscines plus grandes et plus profondes pourrait accroître la diversité des poissons, mais pas celle des organismes benthiques. Cette étude met en évidence des lacunes importantes dans notre compréhension de la manière dont l'ajout de mares, de roches et de métriques de conception influent sur la diversité et les variables affectant le fonctionnement écologique des mares de roches. Sur la base des connaissances acquises jusqu'à présent, des recommandations sont formulées à l'intention des gestionnaires et le besoin d'études futures pour ajouter des connaissances permettant d'élargir ces recommandations est discuté.

**Même si effectivement il existe des réflexions sur certains objets artificiels qui se rattachent au biomimétisme, les travaux décrits dans cette partie peuvent tout aussi bien être classés dans de l'ingénierie écologique classique.**

### **Médecine, pharmacie et bio-matériaux**

La biodiversité fournit des molécules à vertus thérapeutiques et peut également être source d'inspiration pour optimiser ou orienter les procédés de synthèse chimique. Il est régulièrement attesté que plus de 60 % des médicaments anticancéreux disponibles dans le commerce sont d'origine naturelle, car issus de plantes ou de champignons. Parmi les organismes marins, les algues se sont révélées être l'une des principales sources de nouveaux composés d'origine marine, y compris ceux présentant un potentiel anti-tumoral et cytotoxique. Ces composés ont démontré leur capacité à induire des activités inhibitrices spécifiques sur un certain nombre de processus cellulaires clés, y compris les voies de l'apoptose, l'angiogenèse, la migration et l'invasion, dans des modèles *in vitro* et *in vivo*, révélant ainsi leur potentiel d'utilisation en tant que médicaments anticancéreux. La revue de Alves *et al.* (2016) se concentre sur les molécules bioactives des algues, de leur origine à leurs utilisations potentielles, en mettant l'accent sur l'algue *Sphaerococcus coronopifolius* en tant que producteur de composés cytotoxiques.



basé à l'Université de l'Illinois à Chicago (UIC), vise à résoudre les problèmes interdépendants d'inventaire et de conservation de la biodiversité, de découverte de médicaments et de croissance économique soutenue dans les pays en développement et développés. Il s'agit d'un programme interdisciplinaire faisant appel aux vastes synergies et aux efforts de collaboration des botanistes, des chimistes et des biologistes des pays du Vietnam, du Laos et des États-Unis. Les efforts de découverte de médicaments menés par UIC-ICBG au cours des 18 dernières années ont abouti à la collecte d'un total cumulé de plus de 5 500 échantillons de plantes (représentant plus de 2 000 espèces), qui ont été évalués pour leurs effets biologiques potentiels sur le cancer, le sida, la grippe aviaire, la tuberculose et le paludisme. Le fractionnement et la séparation guidés par des essais biologiques des dérivés de plantes bioactives ont abouti à l'isolement d'environ 300 composés de divers degrés de complexité structurale et / ou d'activité biologique. Zhang *et al.* (2018) résumant les importantes réalisations de l'équipe multidisciplinaire UIC-ICBG en matière de découverte de médicaments dans le projet sur la période 1998-2012 et les projets menés les années suivantes en impliquant les chercheurs de Hong Kong.

*Litsea verticillata* Hance (*Lauraceae*), un médicament chinois utilisé pour traiter l'enflure causée par une blessure ou par une morsure de serpent, a été la première plante identifiée par l'ICBG comme active sur le sida. À partir de cette plante, huit nouveaux composés ont démontré des activités anti-VIH. Dans des études ultérieures, 26 composés supplémentaires de types structuraux différents ont été identifiés.

Les greffes osseuses à base de biomatériaux jouent un rôle important dans le domaine de l'ingénierie du tissu osseux. L'une des classes de biomatériaux les plus prometteuses est le collagène, y compris ceux issus de la biodiversité marine (généralement appelée spongine (SPG)). De plus, l'hydroxyapatite (HA) joue un rôle important dans la stimulation du métabolisme osseux. Le travail de l'équipe de Parisi (2019) a étudié l'association de ces deux biomatériaux afin d'évaluer leurs caractéristiques physico-chimiques et morphologiques et leurs performances biologiques *in vitro*. Ces investigations ont conclu que ces matériaux présentaient des propriétés biologiques améliorées, notamment celles imitant la composition d'un os et mettent en évidence le potentiel d'amélioration des performances du greffon pour les applications de régénération osseuse.

Les microorganismes présents dans des environnements extrêmes, tels que ceux présentant une salinité ou une alcalinité élevée, sont connus comme extrémophiles et incluent diverses espèces d'actinomycètes.

En étudiant le sol des environnements extrêmes du Kazakhstan, Trenozhnikova *et al.* (2018) ont exploré l'action de nouveaux antibiotiques d'extrémophiles contre les agents pathogènes résistants.

Un total de 5 936 souches d'actinomycètes extrémophiles ont été isolées ; parmi celles-ci, 2 019 souches ont été ensuite isolées dans des cultures pures. Parmi celles-ci, 415 souches d'actinomycètes ayant démontré une activité antibactérienne antagoniste ont été sélectionnées. Ces actinomycètes ont ensuite été classés en groupes et sous-groupes en fonction de leurs réponses à différentes conditions de culture. L'activité antagoniste antimicrobienne de certaines souches d'actinomycètes dépend des conditions de culture et du développement de mycélium aériens dans des conditions extrêmes.

Les chercheurs ont identifié plusieurs extraits candidats intéressants ayant des activités antimicrobiennes putatives contre plusieurs souches d'agents pathogènes résistants aux médicaments.

Dustin *et al.* s'intéressent au rôle des parcs, des loisirs et du tourisme dans la promotion de la santé et proposent une nouvelle définition de la santé considérant la santé humaine et la santé environnementale comme inextricablement liées. Leur travaux abordent ensuite des idées écologiques enracinées dans le biomimétisme

qui illustrent les types de contributions que les professionnels des parcs, des loisirs et du tourisme peuvent apporter à la promotion de la santé considérant comme « des membres effectifs et des citoyens d'une communauté de vie plus large » (Leopold, 1949, p. 224), des citoyens qui reconnaissent que nous avons beaucoup à apprendre d'autres espèces sur la façon de vivre nos vies de manière à assurer un avenir durable pour tous. Les principes du biomimétisme sont ici placés dans un contexte mondial plus large en expliquant un modèle de promotion de la santé fondé sur l'écologie, au moyen duquel les professionnels des parcs, des loisirs et du tourisme pourraient mieux comprendre l'apport de leur travail à la promotion de la santé.

Ramdan *et al.* (2016) soulignent que la riche biodiversité indonésienne a été considérée comme une ressource infinie de biomatériaux naturels et dérivés. L'utilisation de ces matériaux naturels pour des applications de biomatériaux nécessite des étapes supplémentaires par rapport aux méthodes de synthèse conventionnelles actuellement établies. Certaines de ces étapes ont été développées avec succès à l'échelle du laboratoire avec des paramètres de contrôle appropriés pour aboutir à un processus de synthèse global optimal. D'autres optimisations et ajustements des paramètres sont nécessaires pour traduire l'innovation en une commercialisation. Des efforts supplémentaires de la part des chercheurs dans le domaine des biomatériaux et une politique de soutien du gouvernement sont essentiellement nécessaires pour favoriser le développement du biomatériau et de ses technologies appliquées, permettant ainsi de créer des dispositifs médicaux à la fois économiques et efficaces pour soutenir le programme national de soins de santé. Ce chapitre se concentre sur les biomatériaux d'origine naturelle, leurs sources et leur traitement, qui ont été développés en Indonésie. Celles-ci incluent la synthèse d'hydroxyapatite à partir de coraux, d'escargots terrestres et de coquilles d'œufs *via* une réaction de précipitation, des méthodes sol-gel, hydrothermales et biomimétiques, une nouvelle synthèse de membrane et une encapsulation à l'aide d'un modèle dérivé d'une plante à fleurs et la synthèse de zircone pour la restauration dentaire.

**Les exemples relevés dans cette partie peuvent relever d'une certaine ambiguïté. En effet, on peut légitimement se poser la question suivante : « le fait d'obtenir une molécule organique en cultivant les organismes qui la produisent relève-t-il du biomimétisme ou est-ce l'analogie de fonction entre une molécule produite par certains organismes et une autre molécule produite par d'autres qui relève du biomimétisme ? »**

Cette même remarque est valable pour le paragraphe suivant qui traite d'agriculture.

### **Agriculture et alimentation**

D'ici le milieu du siècle, la population mondiale dépassera les neuf milliards d'habitants, ce qui entraînera une demande accrue d'aliments disponibles, d'eau, de terres arables et d'impacts sur l'environnement. Les problèmes de sécurité alimentaire, les carences nutritionnelles, les pertes post-récolte, les incohérences dans la réglementation et les attitudes des consommateurs sont autant de défis qui doivent être relevés pour maintenir la sécurité alimentaire et la durabilité.

Les contraintes environnementales et économiques incitent à rechercher des pistes d'amélioration pour réduire l'empreinte environnementale de l'agriculture, tout en augmentant sa résilience et en maintenant sa productivité. L'approche biomimétique, dans le cadre du génie écologique, qui pourrait aussi relever plus de l'ingénierie écologique que du biomimétisme, permet de baser plus la culture et la productivité sur la dynamique intrinsèque des écosystèmes que sur les

intrants humains / chimiques générés par les combustibles fossiles. L'ouvrage *The Potential of Synergy - Developing a Tool to Design Ecosystems for Sustainable Soil Management* décrit un modèle de prévision informatique permettant de concevoir des partenariats ou des grappes de plantes adaptées et efficaces *via* des relations symbiotiques, suffisamment flexibles pour exploiter les informations relatives aux conditions pédologiques / climatiques locales. Cet outil constitue un moyen de sortir du dilemme de la déforestation par l'agriculture et ouvre la voie à une utilisation possible des sols par les humains lors de la réhabilitation des zones polluées, avec des conséquences importantes dans de nombreux domaines concernés par l'utilisation des sols, notamment l'environnement, la stabilité des sols, la santé et la sécurité, le climat.

Denisson *et al.* s'opposent à l'idée que le biomimétisme est dans tous les cas une option optimale. Ils affirmaient déjà en 2015 que l'organisation des écosystèmes naturels (diversité, schémas spatiaux, etc.) n'était pas nécessairement supérieure à celle des écosystèmes agricoles bien conçus, au regard des critères pertinents pour l'agriculture et que les contraintes de l'agriculture (exportation de protéines vers les villes, gestion des mélanges) limitaient de fait la possibilité de recours au biomimétisme. Par contre, ils affirment que les adaptations individuelles d'espèces sauvages qui ont été constamment améliorées au cours des millénaires, *via* une sélection naturelle compétitive pourraient être appliquées pour améliorer la résistance aux organismes susceptibles d'occasionner des dégâts ou la tolérance au stress des cultures, et que ces plantes pourraient être mieux étudiées dans les écosystèmes naturels où elles ont évolué.

Parmi les solutions possibles figurent des avancées dans les technologies de transformation des aliments, la nanotechnologie, des formulations alimentaires innovantes et l'utilisation d'approches génomiques telles que sources alternatives de protéines, farine d'insectes, nutriginomique, impression alimentaire 3D, biomimétisme, génie alimentaire et technologie de fusion. Des organisations internationales telles que l'Union internationale de science et de technologie alimentaires jouent également un rôle important dans la sécurisation des approvisionnements alimentaires mondiaux en fournissant une expertise par l'intermédiaire de leurs membres respectifs. Le présent examen aborde les rôles de la science et de la technologie alimentaires dans la résolution des problèmes actuels et étudie les solutions possibles pour nourrir le monde dans un avenir proche.

En 2015, le *Biomimicry Institute* a lancé un appel intitulé « *Biomimicry Global Challenge Design 2015* ». Le *Biomimicry Institute* travaille en partenariat avec la Fondation Ray C. Anderson et des experts en alimentation et en conservation afin de rechercher des solutions inspirées par la nature pour améliorer les systèmes alimentaires. L'idée est d'imaginer un concept réalisable applicable pour les prochaines décennies avec l'utilisation de la technologie moderne et du biomimétisme. Dans leur appareil, les auteurs ont utilisé une approche biomimétique pour concevoir des surfaces artificielles capables de transporter des liquides de manière dirigée, sur la base des principes du lézard à cornes du Texas. À cette fin, ils ont analysé la morphologie du réseau capillaire de *Phrynosoma cornutum* et caractérisé les propriétés matérielles de la surface de l'animal. Le résultat final a été un cultivateur de balcon - un appareil durable divisé en trois parties fonctionnelles qui se soutiennent mutuellement. La première est une partie inférieure pour le compostage, la deuxième partie est utilisée pour la culture des plantes et la troisième partie sert à l'irrigation. Le projet de cultivateur de balcon en est encore au stade de la conception, mais dans le cadre du programme d'accélérateur du *Global Design Challenge* de *Biomimicry*, l'équipe de recherche a déjà résolu le prototypage, les tests et l'élaboration de plans d'entreprise pour le lancement du produit. Les auteurs ont créé un design unique, qui, outre la valeur artistique, comporte une pensée sophistiquée et une fonction durable.

## Autres

Inspiré par le fait que le comportement parasite est bénéfique à l'écosystème naturel Qin *et al.* (2015) proposent une optimisation de la robotique inspirée du comportement d'essaim de particules présentant un comportement parasitaire sur trois aspects : les parasites se nourrissant de l'hôte, l'hôte réagit par son immunité et ces interactions entraînent l'évolution des parasites. Avec une probabilité prédéfinie, qui reflète les caractéristiques du comportement parasite facultatif, les deux essaims échangent des particules en fonction des valeurs de fitness triées par chaque particule. L'immunité de l'hôte est imitée de deux manières : le nombre de particules échangées est diminué de façon linéaire au fil des itérations, et les particules de l'essaim hôte peuvent tirer profit de la meilleure position globale dans l'essaim de parasites.

Zhang et Aggidis (2018) cherchent comment utiliser de manière biomimétique des structures et fonctions issues de l'évolution, pour concevoir la prochaine génération de convertisseurs d'énergie houlo-motrice. Dans leur article, les caractéristiques des convertisseurs d'énergie des vagues existants sont analysées à l'aide d'idées biomimétiques, puis les règles de conception qui y sont cachées sont établies. Tout d'abord, les caractéristiques de l'énergie des vagues sont introduites. L'état de l'art et les méthodes d'extraction d'énergie par les convertisseurs d'énergie houlo-motrice sont ensuite analysés. Ensuite, sur la base de l'introduction des connaissances en conception biomimétique, les caractéristiques, principes et caractéristiques biomimétiques des convertisseurs d'énergie houlo-motrice sont expliqués. Enfin, les règles d'association cachées dans les caractéristiques biologiques et les caractéristiques techniques sont extraites à l'aide de l'algorithme *Apriori*. Ces règles aideront au développement de la prochaine génération de convertisseurs d'énergie des vagues biomimétiques et fourniront les tendances futures en matière de recherche.

Faire voler des machines plus lourdes que l'air, à n'importe quelle échelle, coûte énormément d'énergie. Ceci est grandement exacerbé à petite échelle et a, jusqu'à présent, présenté un obstacle insurmontable pour le vol sans attache dans des robots de la taille d'un insecte (masse inférieure à 500 milligrammes et envergure inférieure à cinq centimètres). Ces véhicules doivent donc voler attachés à une source d'alimentation et à un générateur de signaux externes en raison des difficultés liées à l'intégration de l'électronique embarquée dans une capacité de charge utile limitée. Jafferis *et al.* (2019) abordent ici ces défis afin de démontrer le vol soutenu et sans anicroche d'un véhicule aérien à l'échelle des insectes de la taille d'un insecte. Le véhicule de 90 milligrammes utilise quatre ailes entraînées par deux actionneurs piézoélectriques renforcés à l'alumine pour augmenter l'efficacité aérodynamique (jusqu'à 29 % par rapport à des véhicules similaires à deux ailes) et atteindre un rapport de port de masse de 4.1 à 1, démontrant une plus grande poussée par masse musculaire que les homologues biologiques typiques. Le système intégré du véhicule ainsi que l'électronique requise pour le vol autonome (une centrale photovoltaïque et un générateur de signal) pèsent 259 milligrammes, avec une capacité de charge utile supplémentaire permettant d'ajouter des dispositifs embarqués. Consommant seulement 110 à 120 milliwatts de puissance, le système correspond à l'efficacité de poussée d'insectes de taille similaire, tels que les abeilles. Il convient ici de se poser la question de la réalité de la démarche biomimétique dans le développement de ces robots, en matière de structures et de fonctions.

## BIBLIOGRAPHIE

**Amer** Nihal Biomimetic Approach in Architectural Education: Case study of 'Biomimicry in Architecture' Course *Ain Shams Engineering Journal*

**Alves**, C (Alves, Celso); Silva, J (Silva, Joana); Pinteus, S (Pinteus, Susete); Gaspar, H (Gaspar, Helena); Alpoim, MC (Alpoim, Maria C.); Botana, LM (Botana, Luis M.); Pedrosa, R (Pedrosa, Rui) From Marine Origin to Therapeutics: The Antitumor Potential of Marine Algae-Derived Compounds. *Frontiers in pharmacology*, vol9, 6 aout 2016

**Barthlott**, W (Barthlott, Wilhelm); Rafiqpoor, MD (Rafiqpoor, M. Daud); Erdelen, WR (Erdelen, Walter R.) Bionics and Biodiversity - Bio-inspired Technical Innovation for a Sustainable Future *Biomimetic research for architecture and building construction: biological design and integrative structures*, vol9, pages 11-55, 2016

**Benyus**, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: William Morrow & Co.

**Blok**, V (Blok, Vincent); Gremmen, B (Gremmen, Bart) Ecological Innovation: Biomimicry as a New Way of Thinking and Acting Ecologically *Journal of agriculture and environmental ethics*, volume29, pages 203-217, april 2016

**Bœuf**, G. (2014). Biomimétisme et bio-inspiration. *Vraiment durable*, (1)5, 43-55. doi : 10.3917/vdur.005.0043

**Bugnot**, AB (Bugnot, A. B.); Mayer-Pinto, M (Mayer-Pinto, M.); Johnston, EL (Johnston, E. L.); Schaefer, N (Schaefer, N.); Dafforn, KA (Dafforn, K. A.) Learning from nature to enhance Blue engineering of marine infrastructure *Ecological engineering*, vol120, pages 611-621, sept2018

**Breuer** Kenny Flight of the RoboBee 448 | NATURE | VOL 570 | 27 JUNE 2019

**Collado-Ruano**, J (Collado-Ruano, Javier) Biomimicry: a necessary eco-ethical dimension for a future human sustainability. *Futur human image - an international journal for philosophy psychology and education*, pages 23-57, 2015

**Cuce**, E (Cuce, Erdem); Nachan, Z (Nachan, Zaid); Cuce, PM (Cuce, Pinar Mert); Sher, F (Sher, Farooq); Neighbour, GB (Neighbour, Gareth B.) Strategies for ideal indoor environments towards low/zero carbon buildings through a biomimetic approach *International journal of ambient energy*, vol 40 pages 86-95, janv2019

**Demertzis**, K (Demertzis, Konstantinos); Iliadis, L (Iliadis, Lazaros) Detecting invasive species with a bio-inspired semi-supervised neurocomputing approach: the case of *Lagocephalus sceleratus*. *Neural computing and application*, vol28, pages 1225-1234, juin 2017

**Denison**, RF (Denison, R. Ford); McGuire, AM (McGuire, Andrew M.) What should agriculture copy from natural ecosystems? *Global food security agriculture policy economics and environment* vol 4, pages 30-36, mars 2015

**Dicks**, H (Dicks, Henry) Environmental Ethics and Biomimetic Ethics: Nature as Object of Ethics and Nature as Source of Ethics *Journal of agriculture and environmental ethics*, volume30, pages 255-274, april 2017

**Dustin** Daniel, Chris Zajchowski, Elise Gatti, Kelly Bricker Matthew T. J. Brownlee, Keri Schwab Greening Health: The Role of Parks, Recreation, and Tourism in Health Promotion *Journal of Park and Recreation Administration* Vol. 36 · pp. 113-123 · 2018





**Fehler**, M (Fehler, Michelle); Penick, CA (Penick, Clint A.) Hidden Treasures. Discovering the Design Potential of Natural History Collections, *Design journal*, vol 22, pages 2189 – 2195, 2019

**Fisch**, M (Fisch, Michael) The Nature of Biomimicry: Toward a Novel Technological Culture *Science technology and human value*, volume 42, pages 795-821, sept 2017

**Gallo**, T (Gallo, Travis); Stinson, LT (Stinson, Lani T.); Pejchar, L (Pejchar, Liba) Mitigation for energy development fails to mimic natural disturbance for birds and mammals, *Biological conservation*, vol 212, pages 39-47, august 2017

**Gejdoš** Miloš Zuzana Tončíková, Miroslav Němec, Miroslav Chovan, Tomáš Gergel Balcony cultivator: New biomimicry design approach in the sustainable device *Futures* 98 (2018) 32–40

**Green**, DW (Green, David W.); Watson, JA (Watson, Jolanta A.); Jung, HS (Jung, Han-Sung); Watson, GS (Watson, Gregory S.) Natural History Collections as Inspiration for Technology, *Bioessays*, vol 41, fev 2019

**Griffiths**, SR (Griffiths, Stephen R.); Lentini, PE (Lentini, Pia E.); Semmens, K (Semmens, Kristin); Watson, SJ (Watson, Simon J.); Lumsden, LF (Lumsden, Linda F.); Robert, KA (Robert, Kylie A.) Chainsaw-Carved Cavities Better Mimic the Thermal Properties of Natural Tree Hollows than Nest Boxes and Log Hollows. *Forests*, vol9, may 2018

**Gruner**, RL (Gruner, Richard L.); Power, D (Power, Damien) Mimicking natural ecosystems to develop sustainable supply chains: A theory of socio-ecological intergradation. *Journal of cleaner production*, vol 149, pages 251-264, april 2015

**Guan**, YF (Guan, Yifu); Wang, DY (Wang, Dongying); Tan, GT (Tan, Ghee T.); Hung, NV (Nguyen Van Hung); Cuong, NM (Nguyen Manh Cuong); Pezzuto, JM (Pezzuto, John M.); Fong, HHS (Fong, Harry H. S.); Soejarto, DD (Soejarto, Djaja Doel); Zhang, HJ (Zhang, Hongjie) Litsea Species as Potential Antiviral Plant Sources *American journal of chinese medicine*, vol44, pages 275-290, avril 2016

**Hayes**, S (Hayes, Samantha); Desha, C (Desha, Cheryl); Burke, M (Burke, Matthew); Gibbs, M (Gibbs, Mark); Chester, M (Chester, Mikhail) Leveraging socio-ecological resilience theory to build climate resilience in transport infrastructure *Transport Reviews* may 2019

**Jangsun** Hwang, Yoon Jeong, Jeong Min Park, Kwan Hong Lee, Jong wook Hong, Jonghoon Choi Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine *International Journal of Nanomedicine* 2015:10 5701–5713

**Jafferis** Noah t., E. Farrell Helbling, Michael Karpelson & Robert J. Wood Untethered flight of an insect-sized flapping-wing microscale aerial vehicle 27 June 2019 | VOL 570 | NAtUre | 491-495

**Jenny** (Jingxin) Tiana, Brian C. Bryksab and Rickey Y. Yadaa Feeding the world into the future – food and nutrition security: the role of food science and technology† *Frontiers in Life Science*, 2016 VOL. 9, NO. 3, 155–166

**Johnson** Elizabeth R. and Goldsteiny Jesse Department of Geography, University of Exeter Department of Sociology, Virginia Commonwealth University Biomimetic Futures: Life, Death, and the Enclosure of a More-Than-Human Intellect *Annals of the Association of American Geographers*, 105(2) 2015, pp. 387–396

**Kohsaka**, R (Kohsaka, Ryo); Fujihira, Y (Fujihira, Yoshinori); Uchiyama, Y (Uchiyama, Yuta); Kajima, S (Kajima, Shuichiro); Nomura, S (Nomura, Shuhei); Ebinger, F



(Ebinger, Frank)

Curator Public Perception and Expectations of Biomimetics Technology: Empirical Survey of Museum Visitors in Japan *The museum journal*, vol60, pages 427-444, oct 2017

**Lebel**, M. et Matthieu, A. (2015). *L'art d'imiter la nature, le biomimétisme*. Montréal. Éditions MultiMondes

**Lee**, D. et Thompson, M. (2011). *Biomimicry: Inventions Inspired by Nature*. Toronto. Éditions Kids Can Press

**Martín-Gómez**, César Amaia Zuazua-Rosa, Javier Bermejo-Busto, Enrique Baquero, Rafael Miranda, Cristina Sanz Potential strategies offered by animals to implement in buildings' energy performance: Theory and practice *Frontiers of Architectural Research*

**Orozco**, F et al. Nanobiodiversity: The Potential of Extracellular Nanostructures *Journal of renewable material* vol5, pages 199-207, juillet 2017

**Parisi**, JR et al. Incorporation of Collagen from Marine Sponges (Spongin) into Hydroxyapatite Samples: Characterization and In Vitro Biological Evaluation *Marine biotechnology*, vol21, pages 30-37, fev2019

**Peter** C. et al. Review: Improving the Impact of Plant Science on Urban Planning and Design *Buildings* 2016, 6, 48; doi:10.3390/buildings6040048

**Qin**, QD (Qin, Quande); Cheng, S (Cheng, Shi); Zhang, QY (Zhang, Qingyu); Li, L (Li, Li); Shi, YH (Shi, Yuhui) Biomimicry of parasitic behavior in a coevolutionary particle swarm optimization algorithm for global optimization *Applied soft computing*, vol32, pages 224-240, juillet 2015

**Ramdan**, RD (Ramdan, Raden Dadan); Sunendar, B (Sunendar, Bambang); Hermawan, H (Hermawan, Hendra) Naturally Derived Biomaterials and Its Processing *Biomaterials and medical devices: a perspective from an emerging country*, vol58, pages 23-39, 2016

**Reap**, J. J. (2009). *Holistic biomimicry: a biologically inspired approach to environmentally benign engineering*. (thèse de doctorat). Georgia Institute of Technology. Récupéré par ResearchGate. 44131825

**Riera**, E (Riera, Elisabeth); Lamy, D (Lamy, Dominique); Goulard, C (Goulard, Christophe); Francour, P (Francour, Patrice); Hubas, C (Hubas, Cedric) Biofilm monitoring as a tool to assess the efficiency of artificial reefs as substrates: Toward 3D printed reefs *Ecological engineering*, vol120, pages 230-237, sept2018

**Ruano**, DS (Sanchez Ruano, David) Nature-Centered Design. Exploring the path to design as Nature. *Design journal*, vol22, pages 2225-229, 2019

**R. Salazar**, V. Fuentes, A. Abdelkefi Classification of biological and bioinspired aquatic systems: A review *Ocean Engineering* 148 (2018) 75–114

**Taylor** Buck, N. (2017). The art of imitating life: The potential contribution of biomimicry in shaping the future of our cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(1), 120–140. <https://doi.org/10.1177/0265813515611417>

**Sarrazin**, F., & Lecomte, J. (2016). Evolution in the Anthropocene. *Science*, 351(6276), 922-923.

**Soja** Constance M. A Field-Based Biomimicry Exercise Helps Students Discover





Connections Among Biodiversity, Form and Function, and Species Conservation During Earth's Sixth Extinction *Journal of Geoscience Education* 62, 679–690 (2014)

**Schmitt**, O. (1969). Some interesting and useful biomimetic transforms. Third International Biophysics Congress. p. 297

**Soulé**, M. E. (1985). What is conservation biology?. *BioScience*, 35(11), 727-734.

**Trenozhnikova**, L (Trenozhnikova, Lyudmila); Azizan, A (Azizan, Azliyati) Discovery of Actinomycetes from Extreme Environments with Potential to Produce Novel Antibiotics *Central asian journal of global health*, vol7, 2018

**Young**, KJ (Young, Katherine J.) Mimicking Nature: A Review of Successional Agroforestry Systems as an Analogue to Natural Regeneration of Secondary Forest Stands *Integrating landscapes: agroforestry for biodiversity conservation and food sovereignty*, vol12, pages 179 – 209, 2017

**Wheeler**, Q. D, et al. Mapping the biosphere: exploring species to understand the origin, organization and sustainability of biodiversity *Systematics and Biodiversity* (2012), 10(1): 1–20

**Zari**, MP (Zari, Maibritt Pedersen) Mimicking ecosystems for bio-inspired intelligent urban built environments *Intelligent buildings international*, vol8, pages 57-77, 2016

**Zari**, MP (Zari, Maibritt Pedersen) Can built environment biomimicry address climate change? *Regenerative urban design and ecosystem biomimicry*, pages 44-68, 2018

**Zari**, MP (Zari, Maibritt Pedersen) Applying ecosystem services biomimicry to urban contexts City case studies (Wellington, Havana, Curitiba), *Regenerative urban design and ecosystem biomimicry*, pages 158-232, 2018

**Zari** Maibritt Pedersen Devising Urban Biodiversity Habitat Provision Goals: Ecosystem Services Analysis *Forests* 2019, 10, 391; doi:10.3390/f10050391

**Zhang**, HJ (Zhang, Hong-Jie); Li, WF (Li, Wan-Fei); Fong, HHS (Fong, Harry H. S.); Soejarto, DD (Soejarto, Djaja Doel) Discovery of Bioactive Compounds by the UIC-ICBG Drug Discovery Program in the 18 Years Since 1998. *Molecules*, vol21, nov2018

## Autres

Commissariat général au développement durable. (2012). Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers. Études et document. Délégation au développement durable, N°72

Conseil économique social et environnemental. (2015, 9 septembre). Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement. Rapport et avis de la section environnement. Journal officiel de la République Française. Récupéré de : [http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2015/2015\\_23\\_biomimetisme.pdf](http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2015/2015_23_biomimetisme.pdf)

The Potential of Synergy - Developing a Tool to Design Ecosystems for Sustainable Soil Management *European journal of sustainable development*, vol 6, pages 517-530, 2017

Expanding the suite of Cultural Ecosystem Services to include ingenuity, perspective, and life teaching *Ecosystem services*, vol25, pages 117-127, juin 2017



*Le vivant pour modèle*, de Gauthier Chapelle et Michèles Decoust

Gould, S. J. (1997). *L'éventail du vivant : le mythe du progrès*. Paris, Éditions Points

*Les inventions de la nature et de la bionique* Yves Coineau

*Colloque 2010 « S'inspirer : la vie quelle entreprise ! »*

*Actes du colloque fondateur du 10 décembre 2012 et ouvrage de synthèse au mois de mai 2013 Salon Biomim'expo*

## **LIENS DIVERS**

<https://journals.openedition.org/tc/9299>

<https://www.gaiapresse.ca/2017/03/le-biomimetisme-un-outil-de-developpement-durable/>

<http://www.humanite-biodiversite.fr/article/pourquoi-le-biomimetisme>

[http://ceebios.com/wp-content/uploads/2017/06/201523\\_biomimetisme\\_Rapport\\_CESE.pdf](http://ceebios.com/wp-content/uploads/2017/06/201523_biomimetisme_Rapport_CESE.pdf)

<http://tpebiomimetique.e-monsite.com/pages/introduction.html>

<https://www.biomimicry.eu>

<http://www.biomimicryinstitute.org>

<https://biomimicry.org/10-finalist-teams-use-lessons-from-nature-to-create-radical-solutions-to-climate-change-problems/>

<https://challenge.biomimicry.org>

<https://innovation.biomimicry.org/launchpad/>

<https://asknature.org>

<http://www.biokon.de>

<http://www.biomimicryguild.com>