

MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS

RAPPORT DE SYNTHÈSE
ÉDITION 2020



CEEBIOS



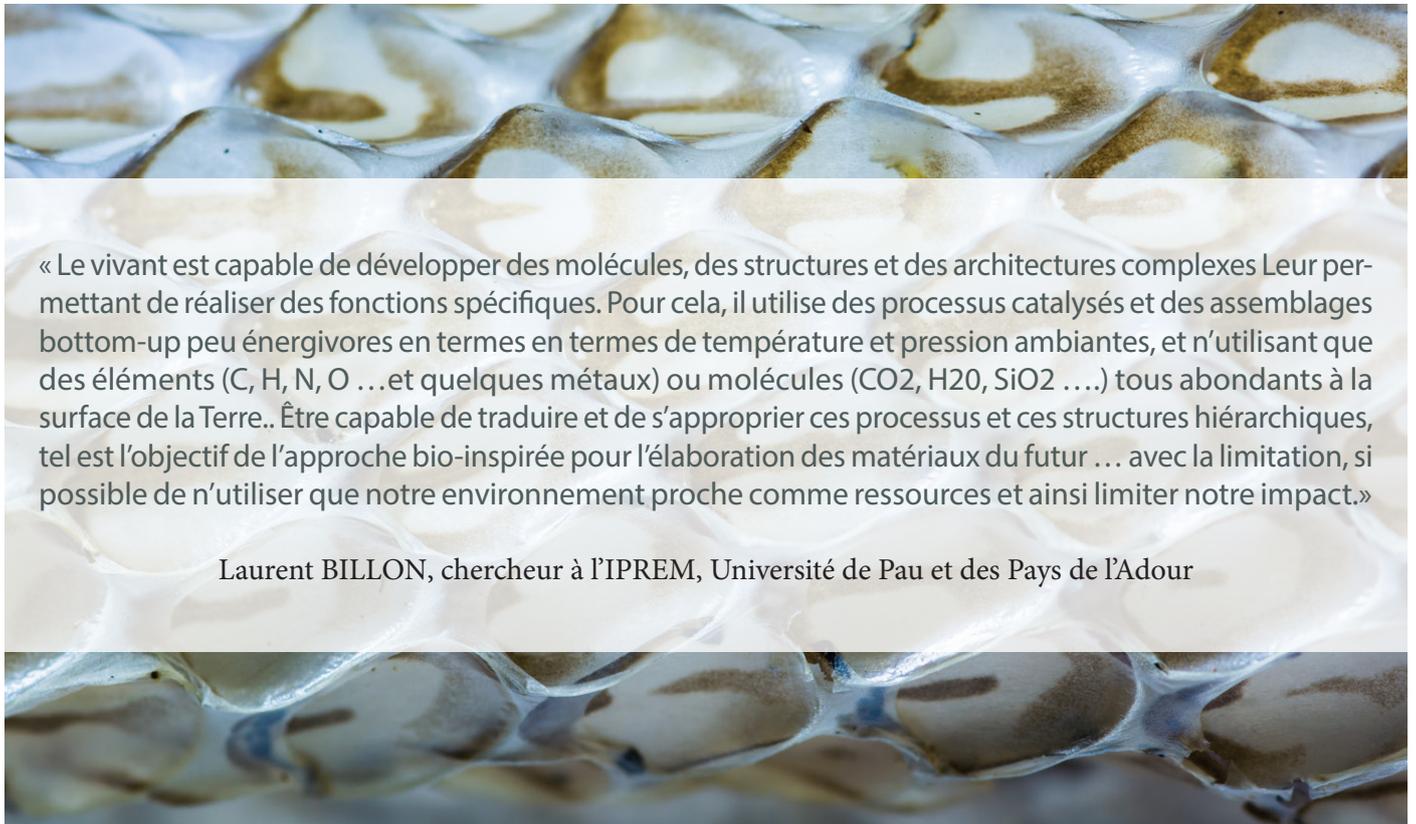
RÉGION
Nouvelle-
Aquitaine



INTRODUCTION

Depuis 3.8 milliards d'années, les organismes vivants colonisent tous les milieux, en repoussant les frontières des espaces habitables. Par les mécanismes de l'évolution et le jeu de la sélection naturelle, les structures et fonctions des matériaux biologiques se sont diversifiées pour maintenir la vie dans des environnements variés. Il en résulte une grande diversité de stratégies mises en oeuvre en réponse à des contraintes spécifiques.

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



« Le vivant est capable de développer des molécules, des structures et des architectures complexes Leur permettant de réaliser des fonctions spécifiques. Pour cela, il utilise des processus catalysés et des assemblages bottom-up peu énergivores en termes de température et pression ambiantes, et n'utilisant que des éléments (C, H, N, O ... et quelques métaux) ou molécules (CO₂, H₂O, SiO₂ ...) tous abondants à la surface de la Terre.. Être capable de traduire et de s'appropriier ces processus et ces structures hiérarchiques, tel est l'objectif de l'approche bio-inspirée pour l'élaboration des matériaux du futur ... avec la limitation, si possible de n'utiliser que notre environnement proche comme ressources et ainsi limiter notre impact.»

Laurent BILLON, chercheur à l'IPREM, Université de Pau et des Pays de l'Adour



TABLE DES MATIÈRES

ENJEUX AUTOUR DES MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS.....	4
Opportunité du biomimétisme dans le secteur des matériaux	
Parallèle entre matériaux manufacturés et matériaux biologiques	
CE QUE LE VIVANT NOUS APPREND.....	6
Zoom sur les matériaux biologiques	
Composition chimique	
Propriétés structurales	
Propriétés fonctionnelles	
Ressources en biodiversité et opportunités pour la France	
MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS : ENJEUX DE MANUFACTURE.....	16
Chimie douce	
Autoassemblage	
Micro- et nano-fabrication	
Fabrication additive	
COMPÉTENCES.....	20
Programmes de recherche à l'échelle européenne	
En France	
Enjeu de la formation	
GALERIES D'EXEMPLES DE MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS PAR GRANDES FILIÈRES.....	24
Habitat & Construction	
Mobilités	
Industries navales & de la mer	
Santé & Cosmétique	
Agriculture & Alimentation	
Chimie & Matériaux	
Électronique & Numérique	
Systèmes énergétiques	
Eau, déchets & Environnement	
Textile, Mode & Luxe	
Défense & Sécurité	
Aéronautique & Spatial	
GALERIE D'EXEMPLES DE MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS PAR MÉDIAS.....	28
Biomim'review	
Nature = Futur !	
Série Supernature	
A PROPOS DES AUTEURS.....	30



ENJEUX DES MATÉRIAUX BIOINSPIRÉS

OPPORTUNITÉS DU BIOMIMÉTISME DANS LE SECTEUR DES MATÉRIAUX

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, composés d'éléments chimiques abondants^{1,2}. Il en résulte des structures composites hiérarchisées, multifonctionnelles et d'une grande diversité, dont la décomposition et le recyclage sont toujours assurés.

MATIÈRES PREMIÈRES, ÉNERGIE ET RECYCLABILITÉ

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

- Des ressources renouvelables : la lumière du soleil, est l'entrée principale d'énergie de toute la biomasse, puis convertie en éléments organiques par les plantes grâce à la photosynthèse.
- Une utilisation efficace : tout système vivant doit, pour sa survie, minimiser ses consommations. Ainsi, l'évolution a sélectionné les comportements, les voies métaboliques ou encore les systèmes de propulsion, les moins coûteux en énergie.
- La diversité des ressources (rayonnement solaire pour les plantes, biomasse pour les prédateurs, etc), des stocks (glucides, graisses..) et la gestion optimisée des réseaux de distribution, afin de s'adapter aux fluctuations environnementales (cycle diurne, saisons...) et à la disponibilité des nutriments.

« Parce que la nature doit travailler à des températures assez basses, elle est limitée aux matériaux organiques ou relevant de la chimie des solutions. La fascinante variété des matériaux naturels vient de la variété des architectures hiérarchiques naturelles que l'on peut observer dans le bois, les os, les coquillages. Inversement l'ingénieur a accès à une grande variété de matériaux constitutifs, mais est à ce jour assez peu inventif sur les architectures. L'association des deux stratégies, base du biomimétisme structural, peut s'avérer une source de très grandes innovations »³.

Yves Bréchet, Membre de l'Académie des Sciences, Haut Commissaire à l'énergie atomique (2012-2018), professeur des universités à l'Institut polytechnique de Grenoble, chercheur au laboratoire "Science et ingénierie des matériaux et des procédés" (SIMaP) de Grenoble.

¹Jacques Livage, Chimie douce : from shake-and-bake processing to wet chemistry, New Journal of Chemistry, 1, 2001.

²Clément Sanchez et al., Biomimeticism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems, Nature Materials, 4, 2005.

³Leçon inaugurale du Pr. Yves Bréchet au Collège de France, La Science des matériaux : du matériau de rencontre au matériau sur mesure, 2013.



PARALLÈLE ENTRE MATÉRIAUX MANUFACTURÉS ET MATÉRIAUX BIOLOGIQUES ^{4,5}

	MATÉRIAU BIOLOGIQUE	MATÉRIAU MANUFACTURÉ
Composition atomique	Un petit nombre d'éléments légers domine : C, N, O, H, Ca, P, Si, S, Fe	Une grande variété d'éléments : Fe, Cr, Ni, Al, Si, C, N, O
Nature des matériaux	3 famille de Polymères (protéines, polysaccharides, acides nucléiques) Céramiques (sels de calcium, silice...) Variété de composites	Polymères et élastomères Verres et céramiques Nombreux Métaux et alliages
Architecture	Hiérarchie des structures à toutes les échelles entre le nanomètre et le millimètre.	Mise en forme de la pièce Microstructuration du matériau
Liaisons chimiques	Molécules consolidées par de nombreuses liaisons faibles inter- et intra-chaînes (liaisons hydrogène)	Molécules dont la solidité dépend de de l'énergie de liaison élevée le long de la chaîne principale des molécules
Procédé de fabrication	Croissance (bottom-up) par autoassemblage contrôlé biologiquement (design approximatif)	Fabrication à partir de phases mal condensées de la matière (liquide, gaz, poudres...) (design exact)
Conditions de formation	Procédé à basse température nécessaire Nature est limitée aux polymères et à la chimie des solutions ioniques	Procédé à toute température possible (amplitude de 2000 °C) L'apparition de nouveaux matériaux est associée à de nouvelles gammes de procédés.
Propriétés mécaniques	Combinaison de phases dures (cassantes) et de phases molles (résistantes à la rupture)	Matériaux durs non tenaces
Adaptation à la fonction	Adaptation/optimisation de la forme et de la structure pour remplir plusieurs fonctions	Design de la pièce et sélection du matériau et du procédé pour répondre à la fonction
Résolution de problème	Utilisation de l'information	Consommation d'énergie
Durabilité	Evolution des propriétés en réponse aux stimuli de l'environnement Autoréparation	Conception sécurisée (dimensionnement en fonction de la charge maximal et de la fatigue mécanique)

⁴Fratzl P, Biomimetic materials research: what can we really learn from nature's structural materials? J. R. Soc. Interface, 4(15), 637-642, 2007.

⁵Vincent, J. Biomimetic materials, Materials Experience, Fundamentals of Materials and Design, 17, 235-246, 2014.



CE QUE LE VIVANT NOUS APPREND

ZOOM SUR LES MATÉRIAUX BIOLOGIQUES

Les matériaux biologiques sont les matériaux rencontrés dans le vivant. Ce sont les constituants des cellules, des espaces intercellulaires, des tissus et des organes des organismes vivants.

Les matériaux sont classiquement divisés en métaux, céramiques, polymères et composites⁶. En regardant le vivant sous l'angle de la science des matériaux, les matériaux biologiques sont essentiellement des céramiques (à base de sels de calcium et de silice) et des biopolymères (protéines, polysaccharides), ainsi que les matériaux composites les associant dans différentes proportions. Les métaux sont présents dans le vivant sous forme d'oligoéléments. A l'inverse, les matériaux manufacturés sont essentiellement des métaux et des céramiques.

DIVERSITÉ BIOLOGIQUE

Les matériaux biologiques présentent une grande diversité de structures et de propriétés, adaptées aux contraintes du milieu et aux fonctions biologiques qu'ils remplissent : des matériaux rigides, des fibres, des matrices de remplissage, des amortisseurs de chocs, des matériaux résistant à l'usure, des matériaux mous, des matériaux extensibles...

Chacun des règnes du vivant -protistes, champignons, plantes et animaux - contribue à la diversité des matériaux biologiques.



Citons quelques matériaux biologiques bien connus et utilisés dans des applications variées :

- Le bois pour la construction
- Les soies pour le textile
- Les duvets, les plumes et la cellulose pour l'isolation
- Le corail pour des greffes osseuses ou des implants dentaires...

⁶ Ashby M.F., Gibson L.J., Wegst U., Olive R., The mechanical properties of natural materials, Proceedings of the Royal Society, 450:1938, 1995.



Les matériaux biologiques peuvent être étudiés :

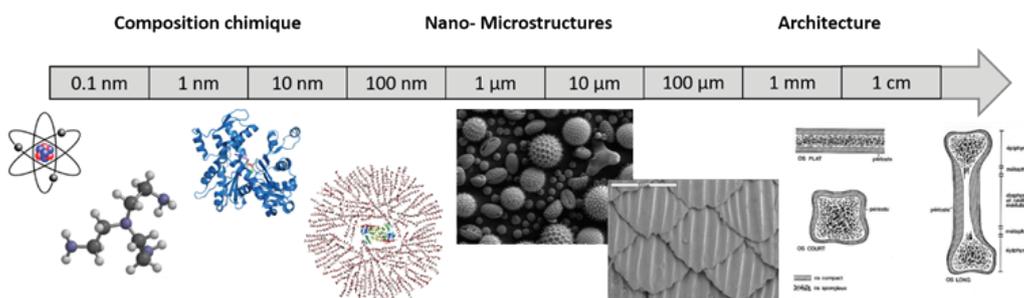
- Selon leur positionnement par rapport à l'organisme vivant
 - à l'intérieur de l'organisme (muscle, os...)
 - à interface avec l'extérieur (enveloppe, coquille, carapace, poils, plumes, cornes...)
 - à l'extérieur (soie, mucus...)
- En distinguant les matériaux constitutifs du vivant des matériaux sécrétés par le vivant
 - cellulaires – vivants ou morts (cellules du bois duramen)
 - extracellulaires – organique (cellulose, chitine, collagène) ou minéral (hydroxyapatite).

Issus de l'évolution dans un champ de contraintes particulier et réalisés dans un souci d'économie de moyens à partir d'un nombre de briques élémentaires restreint, les matériaux du vivant sont le fruit d'une grande optimisation. Ils allient des fonctions performantes (réactivité à l'environnement, auto-réparation, multifonctionnalité, légèreté, résistance mécanique, ...) et des structures complexes (organisation hiérarchisée, composites, interfaces, ...). Les matériaux biologiques sont produits dans des conditions de chimie douce par autoassemblage et croissance adaptative.

La diversité d'assemblages à partir de briques élémentaires universelles est à l'origine d'une grande diversité de propriétés et fonctions: seulement trois familles de polymères (protéines, acides nucléiques, polysaccharides) mais une diversité d'assemblages composites organique/minérale ou amorphe/cristallin.

NIVEAUX D'ORGANISATION

Les matériaux s'organisent sur trois niveaux : la composition chimique (échelle moléculaire), la nano- ou microstructuration (nano- et micrométrique) et l'architecture (macroscopique). La soie d'araignée, étudiée depuis la séquence de protéines jusqu'à la géométrie de la toile, en passant par la présence de microgouttes le long du fil illustre bien ces trois contributions aux propriétés du matériau global.





PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Les matériaux biologiques atteignent des propriétés mécaniques tout à fait comparables aux matériaux manufacturés⁷. Et ceci, malgré une très faible densité, rarement au-delà de 3 g/cm³, et à partir d'un nombre restreint de briques élémentaires de base, là où les matériaux manufacturés utilisent l'ensemble des éléments du tableau périodique.

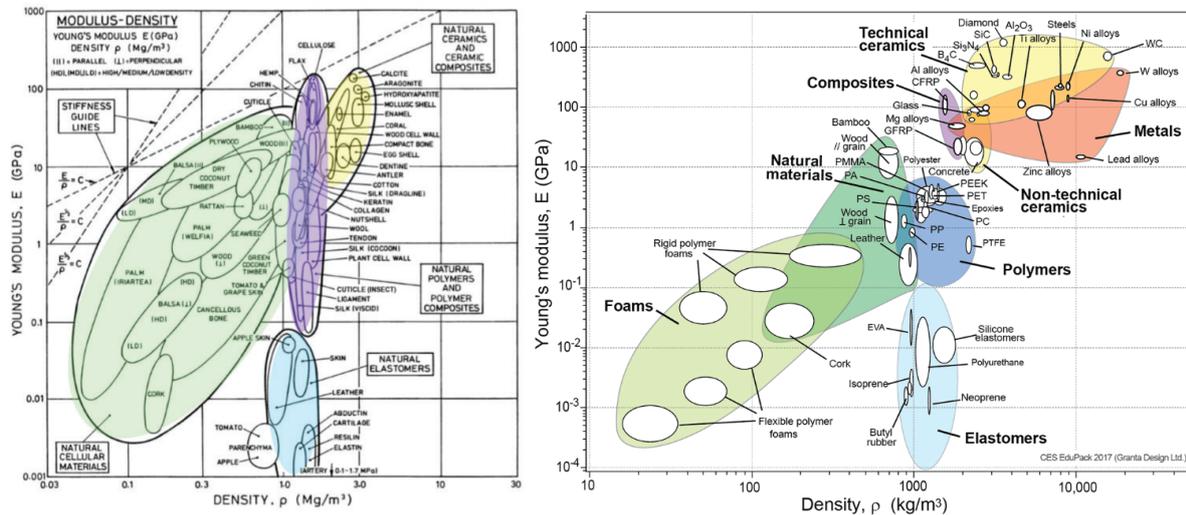


Figure 1: Carte de propriétés des matériaux biologiques (à gauche) et des matériaux manufacturés (à droite)

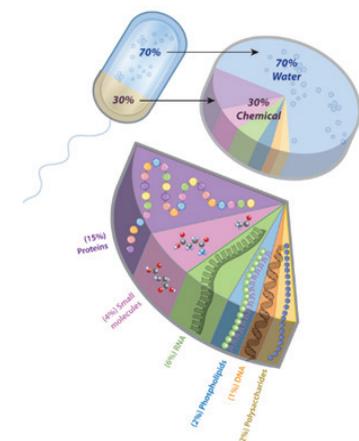
Les matériaux biologiques recouvrent une large gamme de rigidité (de 0.001 à 100 GPa) et de résistance mécanique à la rupture (de 0.1 à 1000 MPa)^{8,9}, comparables aux valeurs des matériaux manufacturés¹⁰. Malgré ce recouvrement important, les matériaux manufacturés tels que les céramiques hautes performances et les alliages métalliques ont des valeurs de rigidité beaucoup plus élevées que celles des meilleurs matériaux naturels, pour répondre à des applications bien différentes. La soie fait exception, atteignant la ténacité extraordinaire de 1 000 MJ m⁻³ avec un module élastique de 10 GPa¹¹ - approchant celle du Kevlar.

C'est le haut niveau d'organisation de la matière à toutes les échelles qui confère aux matériaux biologiques des propriétés remarquables et une grande diversité de fonctions à partir d'un nombre restreint de briques élémentaires de base.

COMPOSITION CHIMIQUE^{12, 13, 14}

Les éléments les plus abondants sont les atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O) et d'azote (N) qui constituent à eux seuls 96 % de la matière vivante. En plus faibles quantités, se trouvent le phosphore (P), le soufre (S) et quelques espèces ioniques : calcium (Ca²⁺), potassium (K⁺), sodium (Na²⁺), et chlore (Cl⁻). Les métaux, plus rares, sont présents en quantités infimes (oligoéléments, biominéralisation...). Cette diversité chimique très restreinte assure la décomposition et le recyclage.

Les organismes vivants ont des teneurs en eau très élevées : de 60% (homme) à 98% (méduse). L'eau agit comme solvant universel des réactions biochimiques, dans des conditions de température et pression modérées.



⁷ Vincent J., Biomimetic Materials, Materials Experience - Fundamentals of Materials and Design, 17:235-246, 2014.

⁸ Wegst U., Ashby M.F., The mechanical efficiency of natural materials, Philosophical Magazine, 84:21, 2167-2186, 2004.

⁹ Wegst U., Bai H., Saiz E., Tomsia A.P. & Ritchie R.O., Bioinspired structural materials, Nature Materials, 14, 2014.

¹⁰ Ashby M.F., Heinemann B., Materials selection in mechanical design, Fifth edition, 2016.

¹¹ Gosline, J. M., Guerette, P. A., Ortlepp, C. S. & Savage, K. N. The mechanical design of spider silks: From fibroin sequence to mechanical function, J. Exp. Biol. 202, 3295-3303, 1999.

¹² Marc A. Meyers et Po-Yu Chen, Biological Materials Science, Cambridge University, 2014.

¹³ Observatoire Français des Techniques Avancées, Biomimétisme et Matériaux, Tec&Doc, chapitres 2-4, 2001.

¹⁴ Nathalie Jarroux, Les biopolymères : différentes familles, propriétés et applications, Techniques de l'Ingénieur, 2008.

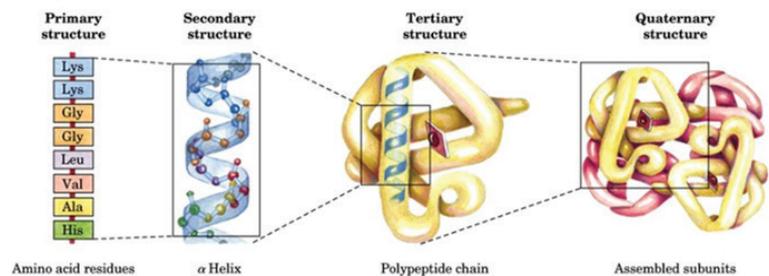


Les molécules biologiques universelles dans le monde vivant appartiennent à quatre classes : les protéines, les glucides, les acides nucléiques et les lipides. Les glucides, les protéines et les acides nucléiques étant extrêmement volumineuses (jusqu'à 100 000 Da) sont appelées macromolécules. Du point de vue chimique, les macromolécules sont des polymères (du grec *polus* « plusieurs, et *meros*, « partie »). Un polymère est une molécule constituée d'un grand nombre d'unités structurales de base (les monomères), rattachées par des liaisons covalentes.

Les fonctions de ces macromolécules biologiques sont intrinsèquement dépendantes de leur structure tridimensionnelle, de sorte qu'une macromolécule dont la structure est dénaturée n'est plus fonctionnelle. La nature chimique des monomères et l'ordre dans lequel ils sont assemblés génèrent certaines interactions entre régions éloignées des macromolécules, responsables de leurs configurations spatiales particulières.

PROTÉINES

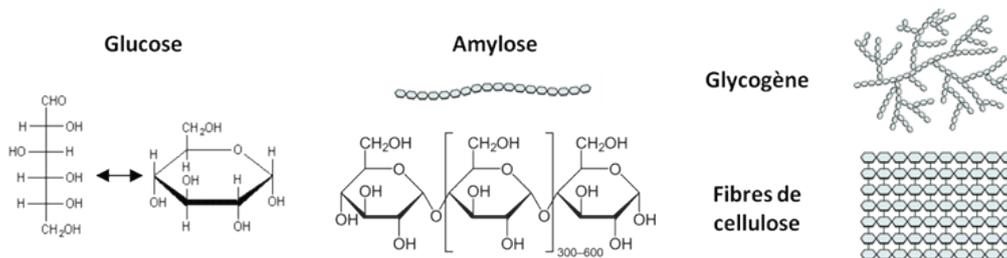
Une protéine est une séquence d'acides aminés qui possède une fonction biologique : catalyseur, hormone, anticorps, maintien structural... L'acquisition de cette fonction s'effectue au moment du repliement de la chaîne en une structure tridimensionnelle :



- Structure primaire est la chaîne linéaire d'acides aminés.
- Structure secondaire est constituée de segments d'acides aminés répétitifs enroulés (en hélice α), ou pliés (en feuillet β) grâce à des liaisons hydrogène.
- Structure tertiaire correspond au repliement dans l'espace de la chaîne polypeptidique. Elle découle des interactions entre les chaînes latérales (radicaux R) d'acides aminés différents (interactions hydrophobes, pont disulfures, liaisons ioniques, interactions électrostatiques).
- Structure quaternaire résulte de l'association de plusieurs polypeptides par des liaisons non covalentes (liaisons hydrogène, forces de Van der Waals), pour former une protéine fonctionnelle¹⁵.

POLYSACCHARIDES

Les polysaccharides sont des macromolécules de glucides, soit des polymères dont l'unité de base est un sucre (ose) : chaîne carbonée de 2 à 7 atomes, portant au moins deux fonctions alcool. Les polysaccharides peuvent contenir quelques centaines à quelques milliers d'oses. Dans le vivant, les polysaccharides ont deux principales fonctions : les réserves énergétiques et le soutien structural de l'organisme. On distingue des polymères très ramifiés de polymères linéaires.



¹⁵D.L. Nelson, M.M. Cox, Lehninger Principles of Biochemistry, Fourth Edition, W. H. Freeman, New York, 2004.

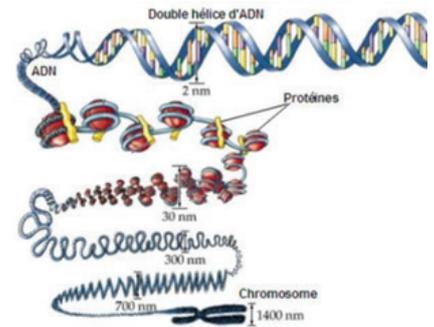


ACIDES NUCLÉIQUES

Les acides nucléiques sont des polymères formés à partir d'unités de base appelées nucléotides. Les nucléotides se composent de trois éléments fondamentaux, liés par liaison covalente :

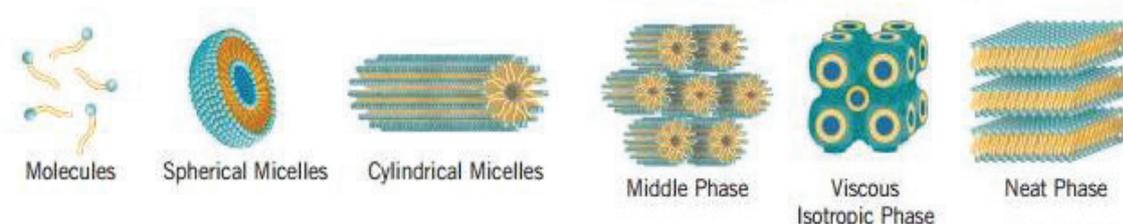
- Un sucre (ose à 5 carbones)
- Un groupement phosphate (acide phosphorique)
- Une base azotée (il en existe 5 principales: adénine, guanine, cytosine, thymine et uracile).

Il existe deux types d'acides nucléiques : l'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'acide ribonucléique (ARN). L'ADN, présent dans le noyau des cellules eucaryotes, est la molécule de stockage de l'information génétique nécessaire à la synthèse des protéines. L'information est contenue dans la séquence de nucléotides. La molécule d'ADN s'organise sous forme très compacte, dans des hélices de doubles brins complémentaires, enroulées de manière primaire et secondaire jusqu'à former les chromosomes. Les chromosomes de l'espèce humaine (au nombre de 46) comptent 3,2 milliards paires de bases. L'ARN messager est une molécule simple brin, issue de la transcription d'un fragment d'ADN, qui code pour une protéine.

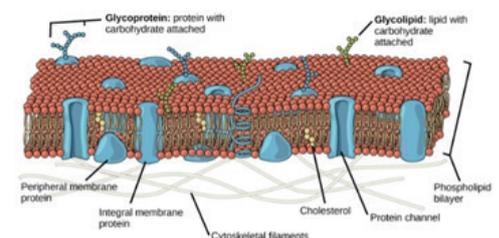


LIPIDES

Les lipides forment un groupe hétérogène de molécules ayant une caractéristique commune importante : ils ne se mélangent pas, sinon très peu, avec l'eau. Les acides gras possèdent une longue chaîne d'hydrocarbures (16 à 18 atomes de carbone) et un groupement carboxyle à l'extrémité. Les lipides s'autoassemblent pour diminuer l'énergie aux interfaces de type eau/air ou eau/huile. Ils forment des structures de géométries variées selon la nature des lipides, leur concentration et la température (couvrant l'ensemble du diagramme de phases).



Les lipides jouent des rôles variés dans les organismes biologiques, pour le stockage de l'énergie, la communication hormonale et surtout la compartimentation : ce sont les constituants essentiels des membranes cellulaires.

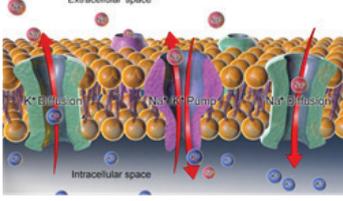
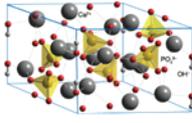
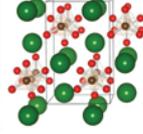
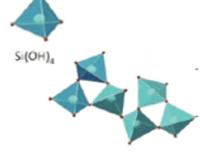
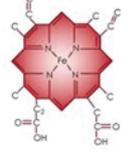
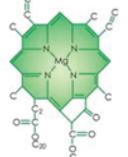
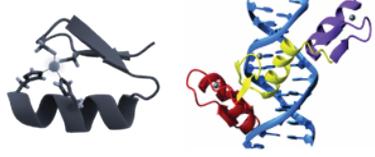




MINÉRAUX

La composition des organismes vivants repose sur deux grandes familles de composés : les molécules organiques dont la structure est composée de carbone, et les structures minérales (non carbonées). Les sels minéraux regroupent des métaux alcalins ou alcalino-terreux, ou des métalloïdes.

Leur rôle est essentiel dans l'organisme pour les équilibres hydriques (pression osmotique) et acido-basiques, en tant qu'éléments de structures (propriétés mécaniques) et comme agents métaboliques couplés à l'activité des protéines. Aucun de ces éléments chimiques n'est synthétisé par le vivant. Ils sont prélevés dans l'environnement : par les racines, en continu, pour les végétaux et par l'alimentation avec possibilité de stockage chez les animaux.

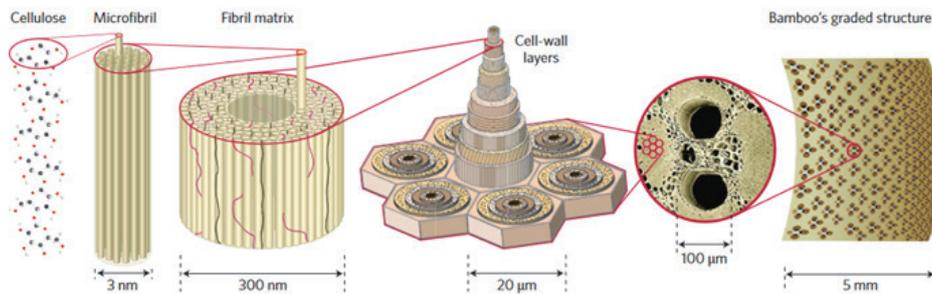
SELS MINÉRAUX SOUS FORME	LOCALISATION DANS LES TISSUS BIOLOGIQUES
<p>Ionique en solution (calcium, sodium, magnésium, potassium) à l'exception du soufre et du phosphore qui entrent dans la composition de protéines et de l'ADN</p>	<p>Déplacements ioniques à travers la membrane plasmique</p>  <p>Mécanisme passif : diffusion selon le gradient chimique Mécanisme actif : activité des pompes ioniques</p>
<p>Cristalline dans des structures rigides obtenues par biominéralisation</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Aragonite CaCO_3</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Silice amorphe SiO_2</p>  </div> </div> <p>Os, dents, Coquilles d'œufs et carapaces d'arthropodes, Diatomées, éponges marines.</p>
<p>Complexée avec des biomolécules pour les oligoéléments.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Hémoglobine humaine (Fe)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Chlorophylle des plantes (Mg)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Régulation des gènes par des protéines dactyle à zinc</p> </div> </div>



PROPRIÉTÉS STRUCTURALES

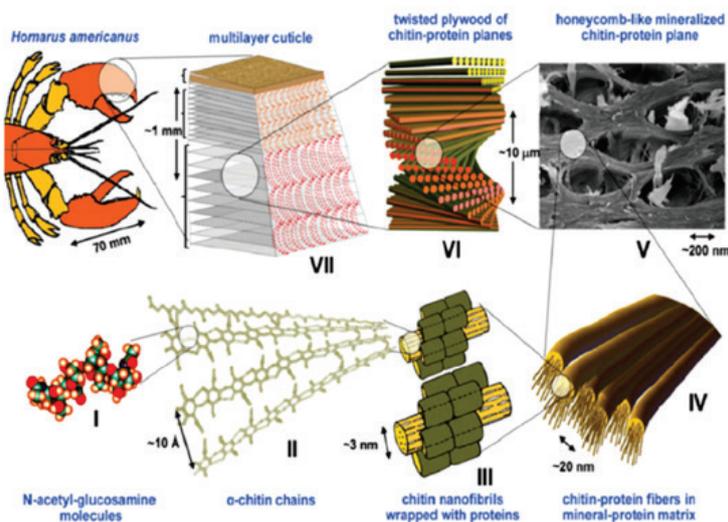
MATÉRIAUX HIÉRARCHISÉS

La complexité des matériaux du vivant dépasse souvent la classification à trois niveaux (composition, micro-structure, architecture) par une imbrication des structures à toutes les échelles : nanométrique à macroscopique. On parle de matériaux hiérarchisés. L'os (sa partie corticale), la carapace des arthropodes, la soie d'araignée ou le bambou¹⁶ sont des exemples de structures hiérarchisées dans le vivant.



La fabrication de ces matériaux par autoassemblage favorise la formation de structures supramoléculaires hiérarchisées sous la forme de fibres, contreplaqué, cristaux liquides, ... Cette hiérarchisation de la matière à chaque ordre de grandeur est la clé pour transférer des propriétés nanométriques, intrinsèques à l'échelle macroscopique.

La carapace de crustacés est un exemple de matériau hiérarchisé qui compte 8 niveaux d'organisation¹⁷.



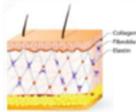
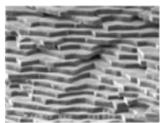
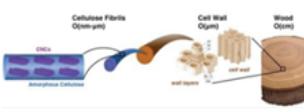
¹⁶ Wegst U.G.K., Bai H., Saiz E., Tomsia A.P. & Ritchie R.O., Bioinspired structural materials, Nature Materials, 14, 2014.

¹⁷ Nikolov et al., Revealing the Design Principles of High-Performance Biological Composites Using Ab initio and Multiscale Simulations: The Example of Lobster Cuticle, Advanced Materials, 22, 2010.



MATÉRIAUX COMPOSITES

Des propriétés complémentaires sont obtenues par des structures composites mêlant molécules organiques et minéraux ou phases cristallines ordonnées et phases amorphes désordonnées. Nacre de la coquille d'ormeau, soie d'araignée, os, bois et carapaces en sont des exemples emblématiques.

COMPOSITES	Souplesse	Rigidité
Organique Minéral	 <p>PEAU : Silicium dans les fibres de collagène et d'élastine de la peau</p>	 <p>NACRE : Protéines entre les plaquettes minéralisées</p>
Amorphe Cristallin	 <p>SOIE D'ARAIGNEE : protéines désordonnées ou cristallines</p>	 <p>BOIS : Nano-cristaux de cellulose</p>

Les composites biologiques sont constitués d'une alternance de phases dures, dont l'origine est minérale ou cristalline, et de phases molles, par contribution organique amorphe. Les matériaux durs sont souvent cassants alors que la matière molle est plus résistante à la rupture. Dans un composite, la matière minérale est rendue moins cassante par des ciments organiques (nacre, os) alors que les matériaux organiques sont rigidifiés par des inclusions minérales ou des domaines organiques cristallins (soie d'araignée, bois, becs de calamar, byssus moule, cuticule).

Le tableau suivant compare quelques matériaux composites, emblématiques du vivant, du point de vue de leur composition.

COMPOSITE BIOLOGIQUE	RENFORT	MATRICE
Dent (partie émail)	Phosphate de calcium (Hydroxyapatite)	Protéines: amélogénines et énamélines
Os (partie corticale)	Phosphate de calcium (Hydroxyapatite)	Protéine: Collagène
Nacre de la coquille d'ormeau	Aragonite (carbonate de calcium)	Protéine: Conchyoline
Carapaces des crustacés	Fibres de Chitine	Calcite + protéines (carbonate de calcium)
Cuticule des insectes	Chitine	Protéines: Tannées, arthropodines...)
Bois, bambou	Fibres de cellulose	Hémicellulose, lignine
Soie d'araignée	Protéine fibroïne (copolymère à blocs hydrophile/hydrophobe)	
	Composante cristalline: Feuilletés β riches en alanine	Composante amorphe: Hélices α riches en glycine

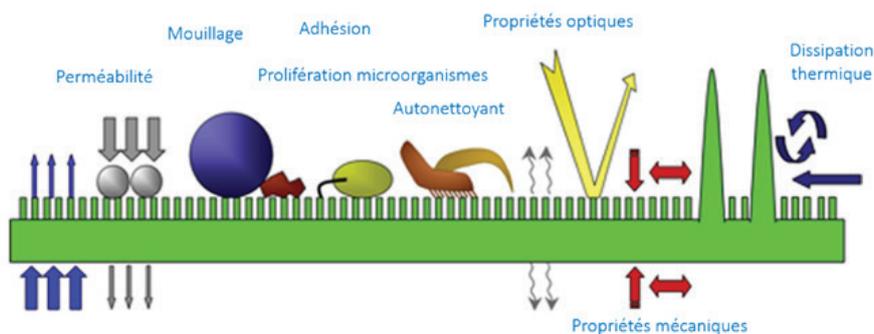


PROPRIÉTÉS FONCTIONNELLES

Une caractéristique remarquable des matériaux biologiques est leur multifonctionnalité, c'est-à-dire qu'une même structure est à l'origine de nombreuses fonctions: apparence optique, régulation thermique, résistance mécanique, mouillabilité, ... Cette remarquable multifonctionnalité est le fruit des processus d'optimisation des matériaux biologiques au cours de l'évolution.

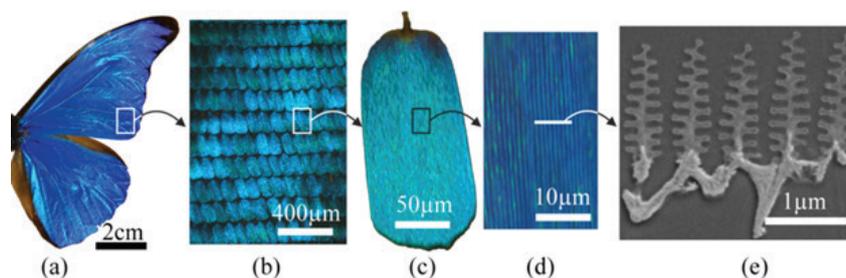
De plus, les matériaux biologiques présentent une certaine versatilité en étant autocicatrisants, par l'intermédiaire d'un fluide circulant ou de l'activité cellulaire, et adaptatifs en fonction des stimuli externes.

Les multiples fonctions des matériaux biologiques s'expriment principalement aux interfaces, notamment au niveau des parois des organismes vivants afin de maintenir des conditions internes stables malgré un environnement extérieur variable et/ou hostile. Le schéma ci-dessous présente les multiples fonctions exprimées par la cuticule à la surface d'une plante¹⁸: régulation de la perméabilité, du mouillage, de l'adhésion d'éléments externes, des propriétés optiques et mécaniques, de la dissipation thermique.



Dans le monde animal, un bel exemple de multifonctionnalité est représenté par les ailes du papillon Morpho¹⁹. La chitine et la micro-texturation de ses ailes sont à l'origine de :

- propriétés autonettoyantes par super-hydrophobie de surface
- régulation thermique selon les spectres d'absorption et d'émissivité de la chitine
- communication par la sélection de la couleur bleue



¹⁸ Kerstin Koch et al., Multifunctional surface structures of plants: an inspiration for biomimetics, *Progress in Materials Science*, 54, 137-178, 2009.

¹⁹ <https://asknature.org/strategy/wing-scales-cause-light-to-diffract-and-interfere/#jp-carousel-6378>.



Le tableau ci-dessous explicite certaines opportunités de transfert des propriétés biologiques vers l'industrie: composition chimique (organique, composite), organisation hiérarchisée de la matière (multi-échelle), structuration de surface, allègement de structure

PROPRIÉTÉ	EXEMPLES BIOLOGIQUES	SECTEURS D'APPLICATIONS
Composition	Soie d'araignée Collagène	Textile, Architecture, Médecine
Adhésion	Moule, Gecko, Poulpe	Manufacture, Architecture, Médecine
Anti-abrasion	Carapace de coléoptère, lézard des sables	Transports
Antifouling/Antibactérien	Peau de requin	Médecine, Transport maritime, Industrie Agroalimentaire
Mouillabilité: Auto-nettoyant Antigel / Antibuée	Feuille de lotus, Ailes de papillons Yeux des moustiques Ailes de cigales	Textures, Revêtements, architecture, Verre
Aero- et hydrodynamisme	Peau de requin, Ailes d'oiseaux, Samares d'érable	Aéronautique, Revêtements, Sport, Electroménager
Structures légères	Bambou, Os, Tiges de plantes, Poisson-coffre	Architecture, Médecine, Revêtements, automobile
Propriétés mécaniques	Coquille d'ormeau, Os, Tronc d'arbre, Soie d'araignée	Médecine, sport, architecture
Résistance à l'impact	Peau de pamplemousse, corne de rhinocéros	Automobile, Médecine, Défense, Sport
Matériaux multiformes	Pommes de pin, gousse de graines, plante carnivore Dionée	Architecture, Robotique
Coloration, optique	Ailes de papillon Morpho, Ecailles de poisson	Cristaux liquides, Electronique, Revêtements
Isolation/conduction	Ours polaire, escargot du désert, bec du toucan	Architecture, réseaux
Auto-réparation	Peau, Lézards, Sève d'hévéa	Architecture, Médecine, Revêtements, automobile
Autoassemblage	Membrane cellulaire	Médecine, Revêtements

RESSOURCES EN BIODIVERSITÉ ET OPPORTUNITÉS POUR LA FRANCE

Actuellement, plus de 10 millions d'espèces ont colonisé une multitude d'habitats, grâce à des solutions optimisées et adaptées aux contraintes de leur environnement à un instant donné. Seulement 10 % environ ont été décrites. La France possède le deuxième plus grand espace maritime du monde avec ses territoires d'Outre-mer. Elle abrite 10 % de la biodiversité mondiale connue. La part de la biodiversité mondiale représentée en France :

- Au moins 50 % des mammifères marins
- 20 % des échinodermes et des cnidaires (coraux, méduses, etc.)
- 25 % des oiseaux
- 20 % des poissons marins et d'eau douce
- Plus de 10 % des mammifères terrestres
- 7 % des insectes connus au niveau mondial.
- Les insectes représentent la moitié de la faune française.

Le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris possède près de 68 millions de spécimens, soit l'une des trois plus grosses institutions mondiales.





MATÉRIAUX BIOINSPIRÉS : ENJEUX DE MANUFACTURE

CHIMIE DOUCE

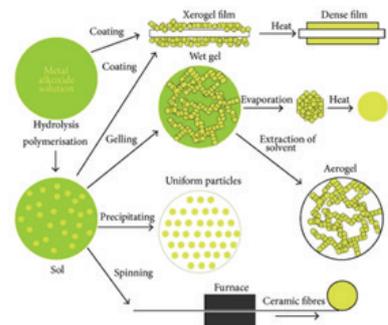
La chimie du vivant est fondée sur des principes hautement conservés entre les espèces :

- utilisation d'un spectre étroit d'éléments abondants et disponibles localement (principalement C, H, O, N, P, S)
- réactions essentiellement basées sur l'énergie solaire
- réactions réalisées à basse température et pression
- réactions réalisées en solution aqueuse
- recyclage métabolique (absence de déchets au profit de ressources mutualisables et renouvelables)
- catalyse enzymatique
- production de molécules biodégradables et biocompatibles
- pas de toxicité à long terme

Ces principes, connus depuis des décennies, convergent vers ceux²⁰ annoncés en 1998 par P.T. Anastas et J.C. Warner, à l'origine du concept de « chimie verte ».

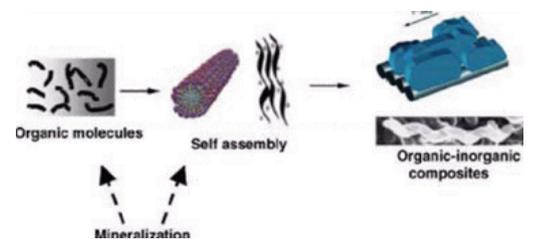
PROCÉDÉ SOL-GEL

Pilier de la chimie douce, la méthode sol-gel est une méthode de synthèse de matériaux vitreux à température ambiante par polymérisation de précurseurs moléculaires dilués dans un solvant (« sol ») puis leur condensation en un réseau tridimensionnel (« gel »). Selon la nature des précurseurs, les matériaux peuvent être purement minéraux ou organo-minéraux (hybrides). La méthode sol-gel permet de produire des matériaux solides mésoporeux.



MINÉRALISATION BIOMIMÉTIQUE

La biominéralisation dans le vivant est un moyen de renforcer des biopolymères organiques par des phases minérales. Elle se déroule à température ambiante, sur des temps très longs et en milieu confiné (régime de sursaturation ionique faible). Inspirés de ce processus, des matériaux hybrides organo-minéraux, à haut niveau d'organisation, sont fabriqués par minéralisation biomimétique dans des conditions de chimie douce. Des structures hiérarchiques formées par autoassemblage servent de gabarit pour la minéralisation par procédé sol-gel.



²⁰ Anastas P.T., Warner J.C., Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, 1998 https://books.google.fr/books/about/Green_Chemistry.html?id=SrO8QgAACAAJ&redir_esc=y



AUTO-ASSEMBLAGE, AUTO-ORGANISATION

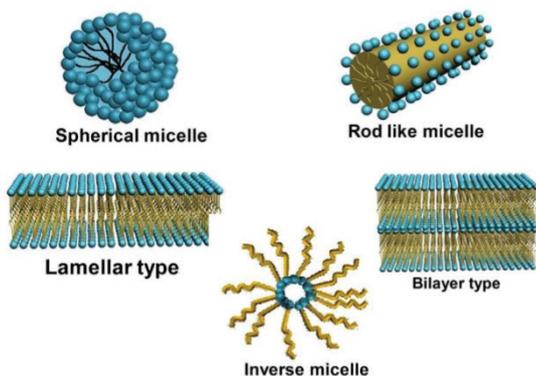
Le processus d'autoassemblage en biologie peut expliquer comment des structures complexes peuvent être obtenues à partir de briques élémentaires simples. Les procédés de fabrication par autoassemblage permettent de reproduire le haut niveau d'organisation des matériaux du vivant, notamment les structures hiérarchiques.

A L'ÉCHELLE MOLÉCULAIRE

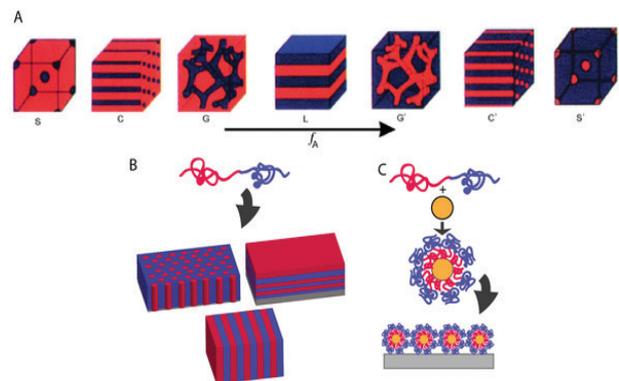
Des molécules asymétriques présentant des domaines moléculaires de composition et de propriétés distinctes s'autoorganisent pour minimiser l'énergie d'interaction. Selon la géométrie des composants et leurs concentrations relatives, il est possible d'obtenir une large gamme de morphologies. Celles-ci sont rassemblées au sein d'un diagramme de phase.

Les tensioactifs et les copolymères à blocs en sont les exemples les plus classiques. Ces édifices supramoléculaires, générés par autoassemblage, représentent un niveau d'organisation intermédiaire entre l'échelle moléculaire et des nanostructures. Ils peuvent servir d'empreintes pour structurer le dépôt d'une phase minérale ou contrôler la croissance d'objets inorganiques.

Types d'arrangements de surfactants

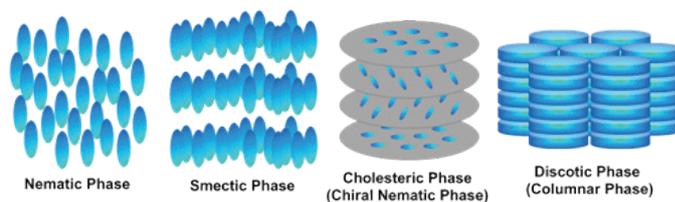
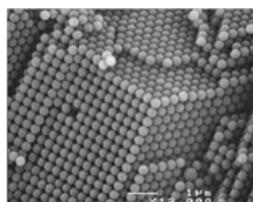


Diagrammes de phase des copolymères à blocs



AVEC DES OBJETS COLLOÏDAUX

Les colloïdes sont des suspensions de particules dont la taille est comprise entre 2 et 2000 nm. Il s'agit de structures intermédiaires entre une solution et une dispersion de particules. La propriété fondamentale qui les caractérise est leur stabilité. Selon les forces inter-objets, leur densité, leur solubilité dans le solvant, des phénomènes de floculation ou d'agrégation peuvent apparaître à plus ou moins long terme. Selon la forme des particules, il est possible d'obtenir des assemblages colloïdaux aux géométries particulières : réseau compact de sphères, alignement de bâtonnets,... Les cristaux liquides l'illustrent bien avec les différentes phases : nématiques, smectiques, cholestériques, ...





MICRO- ET NANO- FABRICATION

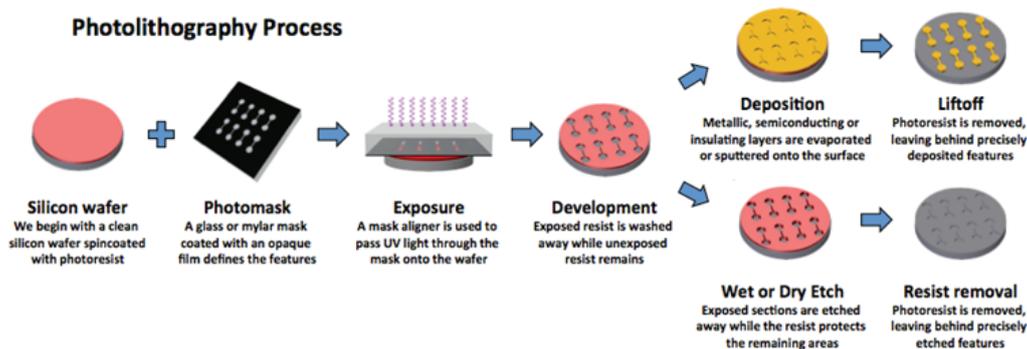
La fabrication de micro/nano-objets ou de surfaces micro/nano-texturées fait appel aux techniques de micro/nano-fabrication issues des développements des technologies MEMs (Micro-Electro-Mechanical devices). Ces procédés reposent principalement sur le dépôt et la mise en forme de différentes couches, par une succession d'étapes.

FABRICATION

Les principales techniques de fabrication sont :

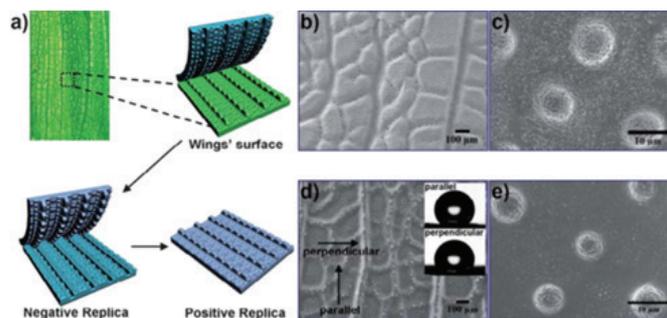
- le micro-usinage : enlèvement de matière par le mouvement rotatif d'un outil.
- la gravure sèche ou humide : attaque physique ou chimique d'un matériaux pour l'enlever (après protection préalable de ce qui doit être conserver).
- la photolithographie : transfert d'un motif par action de la lumière sur une résine photosensible à travers un masque alternant des régions opaques et transparentes.

Le dépôt de couches minces à épaisseur donnée est généralement obtenu par rotation à grande vitesse d'une résine à viscosité contrôlée.



RÉPLICATION

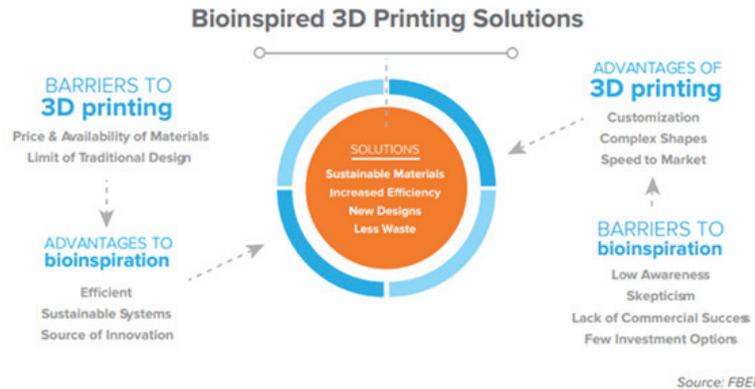
A partir d'une surface micro-fabriquée, il est possible d'obtenir un grand nombre de répliques, par des techniques de moules et contre-moules, en utilisant des matériaux polymères : réticulation chimique, thermoformage, ... Ces procédés peuvent également être mis en œuvre sur des surfaces naturelles. La résolution des structures fabriquées est 200 nm - 10 µm.





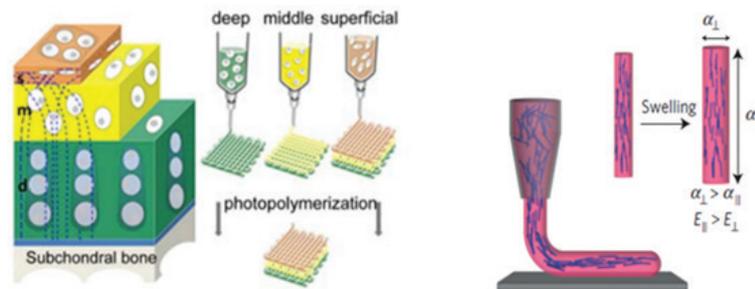
FABRICATION ADDITIVE

Sur de nombreux critères, le biomimétisme et la fabrication additive convergent et répondent à des enjeux communs : une production locale, à la demande, par une approche de fabrication « bottom-up » qui minimise la génération de déchets. Le biomimétisme contribue à fournir les designs et concepts pertinents dans une optique d'utilisation efficiente de la matière, alors que l'impression 3D est la brique technologique qui les rend possibles²¹.



A partir de différentes sources de matières premières, l'impression 3D peut réaliser des structures multi-matériaux, composites²². Les transitions et interfaces entre deux composants peuvent être abruptes ou plus douces, de manière à induire des gradients de propriétés.

La structure composite peut également être due à la présence d'inclusions dans la matrice déposée par impression 3D. Avec des inclusions significativement plus petites que la taille des dépôts de matrice, cette organisation s'approche des matériaux hiérarchisés du vivant. Il est possible d'augmenter le niveau d'organisation grâce à des éléments à fort rapport d'aspect qui s'auto-alignent ou par une orientation contrôlée par un champ magnétique.



L'impression 4D issue des procédés de fabrication additive correspond à l'impression 3D d'objets dont la forme et/ou la fonctionnalité peut évoluer en fonction du temps ou de sollicitations extérieures, mais concerne également l'assemblage d'objets par eux-mêmes, du fait des propriétés de la matière qui les compose (matériaux « programmables »)²³.

²¹ The Fermanian Business and Economic Institute, Can 3D printing unlock bioinspiration's full potential? Point LOMA, 2014.

²² Zngqian Liu et al., Functional gradients and heterogeneities in biological materials: design principles, functions, and bioinspired applications, Progress in Materials Science, 2017.

²³ Gladman A.S., Matsumoto E.A., Nuzzo R.G., Mahadevan L., Mewis J.A., Biomimetic 4D printing, Nature Materials, 2016.



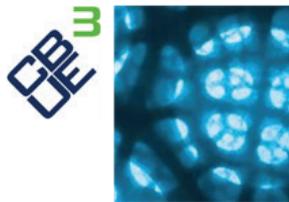
COMPÉTENCES

PROGRAMMES DE RECHERCHE EUROPÉENS

Le secteur des matériaux est un des principaux domaines de développement du biomimétisme comme en atteste la croissance exponentielle du nombre de publications scientifiques liées aux matériaux à l'international²⁴. L'Europe fournit près de 40 % des publications mondiales dans le domaine du biomimétisme avec un net leadership de l'Allemagne et de la Suisse.

Cette tendance se confirme par le développement de centres de recherche d'excellence dans le secteur des matériaux ces dix dernières années à l'échelle européenne. Ainsi, en Allemagne, le centre SFB TRR 141 - Biological design and Integrative Structures étudie les structures et matériaux biologiques pour des applications architecturales, l'institut FIT - Interactive Materials and Bioinspired Technologies à Fribourg est focalisé sur est focalisé sur la science des matériaux (matière molle, propriétés mécaniques, production, ...), tandis que le B-CUBE à Dresde développe l'étude des matériaux biologiques aux échelles moléculaires. A Fribourg en Suisse, un Centre national de recherche (NCCR) sur les matériaux bio-inspirés regroupe notamment les universités de Fribourg, Lausanne (EPFL) et Zurich (ETH). Au Royaume-Uni, un centre dédié à la manufacture bio-inspirée est en amorçage et fédère déjà des acteurs universitaires tels que l'université Heriott Watt d'Edimbourg, l'Imperial College de Londres et l'université de Cambridge.

ECHELLE MOLECULAIRE



MICRO- NANO-STRUCTURES



ARCHITECTURE



²⁴N.F. Lepora, P. Verschure & T.J. Prescott, The state-of-the-art in biomimetics, Bioinspiration & Biomimetics, 2013.



CENTRE TUTELLES	THÉMATIQUES	PROGRAMMES DE RECHERCHE
<p>B-Cube Center for Molecular Bioengineering</p> <p>Allemagne : Technische Universität Dresden</p>	<p>Matériaux biomimétiques (Biominéralisation, Autoassemblage) Outils bio-nanométriques Prospection biologique</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Moteurs moléculaires et nanotechnologies • Biominéralisation et synthèse de matériaux bio-actifs • Autoassemblage • Dynamique conformationnelle de biomolécules • Matériaux stimulables • Analyse multi-échelle
<p>FIT Freiburg Center for Interactive Materials and bioinspired Technologies</p> <p>Allemagne : Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</p>	<p>Principes fonctionnels du vivant Matériaux performants Matériaux intelligents qui s'adaptent</p>	<p>3 thèmes de recherche :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matériaux polymères adaptatifs • Matériaux biomimétiques et biosourcés • Microsystèmes autonomes en énergie <p>3 plateformes techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Imagerie / Manufacture / Modélisation
<p>Collaborative research center SFB-TRR 141 Biological design and Integrative structures</p> <p>Allemagne : Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Eberhard Karls Universität Tübingen, Naturkunde Museum Stuttgart Universität Stuttgart</p>	<p>Matériaux de structure Matériaux adaptatifs Structures déployables</p>	<p>Etudes de cas et implémentations (régulation thermique, dissipation d'énergie, structures porteuses, façades et enveloppes, ...)</p> <p>Méthodologies (algorithmes évolutifs, passage à l'échelle, simulation multi-échelle, procédés de fabrication)</p>
<p>Bio-inspired Materials</p> <p>Suisse : Adolphe Merkle Institute Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ETH Zürich Université de Fribourg Université de Genève</p>	<p>Matériaux mécaniquement réactifs Autoassemblage de matériaux Interactions matériaux/cellules</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Co-polymères à blocs • Capsules réactives • Bi-couches lipidiques • Hydrogels • Matériaux photoniques • Interactions nanoparticules/cellules • Substrats pour la culture cellulaire



Des programmes de recherche européens fédèrent les travaux académiques dans le domaine des matériaux bio-inspirés et visent à renforcer les capacités de recherche et d'innovation de l'Europe :

- PlaMatSu - Plant-inspired Materials and Surfaces, financé par la Commission Européenne et les Actions Marie Skłodowska-Curie, permet à 9 doctorants de travailler en partenariat dans 3 universités européennes - Fribourg (CH), Fribourg (DE) et Cambridge (UK), en lien avec des industriels partenaires.
- COST ENBA - European Network of Bio-Adhesion expertise, financé par le programme Horizon 2020, développe un réseau scientifique et technologique sur les adhésifs biologiques et biomimétiques.
- ITN eSCALED - European School on Artificial Leaf: Electrodes Device, financé par le programme Horizon 2020, développe des cellules solaires électrochimiques s'inspirant de la photosynthèse des plantes.



COMPÉTENCES EN FRANCE

En France, plus de 175 équipes de recherche ont été identifiées sur le sujet du biomimétisme. Plus d'une centaine d'entreprises, aussi bien des grands groupes que des PME, font appel à cette démarche, quel que soit leur secteur d'activité : énergie, construction, matériaux, cosmétiques... La recherche en biomimétisme est nécessairement polymorphe, aux frontières disciplinaires, et nécessite des collaborations originales. Si de nombreux laboratoires y contribuent, quelques 110 équipes de recherche explorent plus spécifiquement les matériaux du vivant ou bio-inspirés.

En France, les outils GDR (Groupement de Recherche) et RTP (Réseau Thématique Pluridisciplinaire) du CNRS sont les supports principaux des initiatives structurantes autour des thématiques telles que la chimie bioinspirée (French-BIC), la photosynthèse artificielle (Solar Fuels), la mécanique des matériaux biologiques (CellTiss, PhyP, Mecabio), les microtechnologies inspirées des insectes ...

Dans les appels à projets, cette pluridisciplinarité est encore difficile à gérer notamment dans les CES (Comités d'Evaluation Scientifique) de l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) qui ne présentent pas une structuration suffisamment transversale. Au CNRS, la Mission pour l'Interdisciplinarité présente des dispositifs non spécifiques au biomimétisme mais prometteurs pour son essor : Osez l'Interdisciplinarité !, défi Mécanobiologie, ... ainsi qu'un premier appel à projet dédié « Biomimétisme » en 2019 (20 lauréats – bourses inférieures à 30 k€).

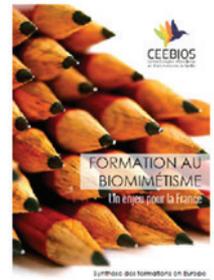


ENJEU DE LA FORMATION

La formation reste un enjeu majeur pour systématiser le recours au biomimétisme comme démarche d'innovation responsable chez les prochaines générations :

- sensibilisation à la biodiversité dès le plus jeune âge ;
- appropriation de la démarche biomimétique dès les premiers enseignements scientifiques ;
- intégration du biomimétisme dans les programmes universitaires pour chaque filière.

L'Allemagne compte à elle seule plus d'une quinzaine de formations diplômantes (licences et master) sur les 25 dédiées à la thématique répertoriées en Europe²⁵. Toutes ces formations sont principalement destinées aux ingénieurs, et de nombreuses sous l'angle spécifique des matériaux.



En France, de nombreux enseignants du supérieur se mobilisent autour de ce sujet et quelques établissements ont déjà ouvert des modules dédiés à la thématique (tels que l'X, SupBiotech, l'Université de Brest Orient, les Mines de Nancy, l'Université de Tours ou l'UTC).

En 2020 deux masters spécialisés vont ouvrir leurs portes.

Formation responsable chez les prochaines générations :

- Le premier, le Master of Science « Nature Inspired Design© » à l'ENSCi les Ateliers, à Paris a fait sa première rentrée en janvier 2020. Il propose une formation pratique de conception de solutions innovantes bio-inspirées et biologiques qui dure 18 mois, dont une mission de 4 à 6 mois en entreprise^{26b}.
- Le second Master à l'université de Pau et des Pays de l'Adour propose une formation M1 et M2 centrée sur les matériaux bio-inspirés. La première session débutera en septembre 2020^{26c}.

De plus, Ceebios a construit un programme pédagogique pluridisciplinaire sur les matériaux bio-inspirés à l'intention des étudiants ingénieurs et designers de la semaine d'échange PSL (Paris Sciences et Lettres) à l'ESPCI Paris. Cette semaine réunissant conférences et projets personnels a eu lieu en 2018 et 2019 et sera reconduite en 2020.

NORMES ET ÉCO-CONCEPTION

Depuis 2011, des travaux de normalisation sont menés dans le domaine de la biomimétique au niveau international sous l'impulsion de l'Allemagne. Trois normes ISO ont été publiées sous la responsabilité du comité technique ISO/TC 266, en collaboration avec 25 pays, dont 9 membres participants directs et 16 membres observateurs.

- La norme ISO 18457:2016 Biomimétisme -- Matériaux, structures et composants biomimétiques
- La norme ISO 18458:2015 Biomimétique -- Terminologie, concepts et méthodologie
- La norme ISO 18459:2015 Biomimétique -- Optimisation biomimétique

Par ailleurs, une norme expérimentale française XP X42-502 Biomimétisme - Intégration de la biomimétique dans les démarches d'éco-conception – définit comment le biomimétisme peut nourrir une démarche d'éco-conception et inversement, comment l'éco-conception peut fournir des solutions techniques pour des produits biomimétiques²⁶.

²⁵ Formation au Biomimétisme- Un enjeu pour la France – Synthèse des formations en Europe, Ceebios, 2017.

²⁶ Norme XP X42-502 – Biomimétisme – Intégration de la biomimétique dans les démarches d'éco-conception, AFNOR, 2017.

^{26b} Plus d'infos <https://formation-continue.ensci.com/developpement-durable/nature-inspired-design/>

^{26c} Plus d'infos <https://www.masteretudes.fr/Master-in-Bio-inspired-Materials/France/Universit%C3%A9-de-Pau-et-des-Pays-de-lAdour/>



GALERIES D'EXEMPLES DE MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS PAR GRANDES FILIÈRES



HABITAT & CONSTRUCTION

- Surfaces autonettoyantes par effet Lotus (BIOCLEAN, Saint-Gobain)
- Bétons auto-cicatrisant (Hendrik Jonkers – Université technique de Delft)
- Performance mécanique de structures bois recyclées grâce à un maillage polygonale inspiré des cellules biologiques (InSitu Architecture)
- Résistance mécanique de bétons présentant un gradient fonctionnel de porosité inspiré des épines d'oursin (Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK) Germany)



MOBILITÉS

- Propulsion nautique par membrane ondulante (FinX)
- Algorithmes bio-inspirés pour l'allègement de structures sur le modèle des os (AutoDesk)
- Profil aérodynamique du train inspiré du martin pêcheur pour réduction des nuisances sonores et de la consommation d'énergie (Shinkansen)



INDUSTRIES NAVALES & DE LA MER

- Stratégies anti-fouling bio-inspirées par texturation (Finsulate) ou sécrétions biochimiques (Polymaris, laboratoire Mapiem)
- Morphologie d'infrastructures pour la restauration des écosystèmes marins (SeaBoost, programme européen Marineff)
- Lutte contre l'érosion et renfort des ouvrages maritimes par biominéralisation (Géocorail, Biocalcis)



SANTÉ & COSMÉTIQUE

- Coloration structurale (sans pigment) pour produits de maquillage (L'Oréal)
- Colle chirurgicale pour tissus biologiques : biocompatible et biodégradable, inspirée du mucus des vers « châteaux de sable » (Tissium)
- Aiguille médicale indolore inspirée de la trompe du moustique de taille micrométrique (Nanopass 34G Terumo)
- Pompe cardiaque économe en énergie propulsant le sang par une membrane ondulante inspirée du déplacement ondulatoire des animaux marins (Corwave)



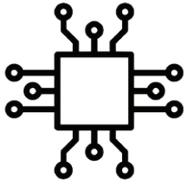
AGRICULTURE & ALIMENTATION

- Stratégies de biocontrôle des ravageurs, alternative aux pesticides pour la protection des cultures (M2I Life Science, ImmunRise)
- Peptides antimicrobiens de l'estomac du manchot pour la conservation alimentaire (Yvon Le Maho - Centre d'écologie et de physiologie énergétiques)



CHIMIE & MATÉRIAUX

- Procédés de chimie douce pour la biominéralisation (céramique et verre) à température et pression ambiantes, avec séquestration de CO₂ inspiré des éponges marines, des diatomées, des coccolites, des coquillages (Jacques Livage – Collège de France).
- Développement de revêtements fonctionnels (mouillabilité, optique, thermique, mécanique, antibactérien...) inspiré des surfaces de plantes (programme européen PlaMatSu)
- Solutions d'emballages non persistantes dans l'environnement pour substituer les plastiques (Ecovative, Skipping Rock Labs)



ÉLECTRONIQUE & NUMÉRIQUE

- Stockage des données numériques sur support ADN (CatalogDNA)
- Constructions d'infrastructures matérielles neuromorphiques hybrides biologiques / artificielles (GDR BioComp)



SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

- Récupération d'énergie des courants marins et fluviaux par une membrane ondulante (Eel Energy)
- Matériaux ultra-poreux bio-inspirés pour améliorer le rendement de la photosynthèse artificielle (programme européen ESCALED)
- Éoliennes à pales flexibles, déformables inspirés des ailes d'insectes (PMMH ESPCI Paris)



EAU, DÉCHETS, ENVIRONNEMENT

- Filtration de l'eau aux échelles moléculaires inspirés des canaux protéiques (aquaporines) ou inspiré des zones humides naturelles pour traitement complémentaire des micropolluants (Suez Environnement)
- Phytoremédiation des sols par des plantes hyper-accumulatrices de métaux lourds, développements de filtres et de biocatalyseurs (Claude Grison – ChimEco)
- Gel de dépollution des eaux (nanoparticules et micropolluants) inspirés du mucus des méduses (Alain Thiery – Institut Méditerranéen de Biodiversité et Ecologie / Philippe Barthélémy ChemBioPham)



TEXTILE, MODE & LUXE

- Développement de cuirs à base de champignons (Mycoworks)
- Textiles techniques et fonctionnels réagissant à l'humidité sur le modèle de la pomme de pin et plus généralement la nyctinastie (Inotek, Biofabric)
- Procédés de fabrication et origine des matières premières générant moins d'impacts pour l'environnement par activité microbienne : pigments et cellulose (Pili, Kombucha Fabric)



DÉFENSE & SÉCURITÉ

- Matériaux de protection composites renforcés par des fibres type soie d'araignée (BoltThread, AMSilk, Spiber, KraigBiocraft Laboratories)
- Capteurs moléculaires d'explosifs ultrasensibles inspiré des antennes du Bombyx du mûrier (Institut franco-allemand de recherche Saint Louis)
- Adhésifs secs et réversibles pour la manutention et la locomotion sur le modèle de la patte de gecko (nano-GripTech, Geckskin)



AÉRONAUTIQUE & SPATIAL

- Forme recourbée des extrémités des ailes d'avion (winglets), programme « fello'fly » de vols collectifs, ailes déformables et vibrantes (Airbus)
- Structures déployables et origamis bio-inspirés (PliFalTec)
- Fabrication de structures légères par manufacture additive aluminium servant de supports d'antennes de satellites (Koreast satellites par Thales Alenia Space)



GALERIES D'EXEMPLES DE MATÉRIAUX BIO-INSPIRÉS PAR MÉDIAS

BIOMIM' REVIEW

L'organisateur de Biomim'expo (NewCorp Conseil) événement rassemblant toutes les parties prenantes du biomimétisme en France (recherche, acteurs économiques, responsables politiques, étudiants, grand public...), publie un recueil d'exemples : la Biomim' review.

NewCorp
Conseil



Liens :

www.biomimexpo.com

www.flickr.com/photos/biomimexpo

NATURE = FUTUR !

Nature=Futur ! est une série documentaire coproduite par Ceebios, LaBelleSociété Production, le Muséum national d'Histoire naturelle, l'INSERM, le CNRS, Universcience, la Ville de Senlis, France TV Education, A way to wake up productions. Ces films présentent, en 4 minutes, 30 recherches et innovations fondamentales inspirées de la nature, dans de nombreux domaines : agriculture, alimentation, architecture, habitat, transport, santé, industrie, technologie, énergie durable, dépollution, traitement des déchets, urbanisme.



Liens :

<http://www.universcience.tv/categorie-nature-futur-935.html>

<http://www.mnhn.fr/fr/explorez/dossiers/nature-futur-biomimetisme>

<https://vimeo.com/channels/naturefutur>

<https://education.francetv.fr/matiere/developpement-durable/premiere/programme/nature-futur>





SÉRIE SUPERNATURE

Supernature, une nouvelle série documentaire accompagne Kalina Raskin, directrice de Ceebios, dans ses rencontres et interactions avec des chercheurs, ingénieurs, designers et entrepreneurs du monde du biomimétisme. Ce sont cinq épisodes de 50 minutes qui explorent chacun un grand thème : l'adhérence, la structure, la mobilité, la résistance et enfin la sensibilité. Elle est produite par PLANÈTE+ et TV ONLY, écrite par Sigrid Clément et Jérôme Scemla et réalisée par Frédéric Planchenault.

Liens :

<https://www.canalplus.com/articles/decouverte/supernature-votre-nouvelle-serie-documentaire-sur-planete>





A PROPOS DES AUTEURS

Ceebios se positionne en structure d'intérêt général, visant à catalyser la richesse des compétences nationales du monde académique, de l'enseignement et de la R&D industrielle dans le domaine de la bio-inspiration autour de 6 axes :

1. Fédérer le réseau de compétences en biomimétisme,
2. Accompagner les projets innovants,
3. Développer les outils méthodologiques et de gestion de la donnée
4. Contribuer à la Formation,
5. Communiquer, influencer,
6. Contribuer au développement de plateformes et démonstrateurs.

Des grands groupes tels que Air Liquide, Eiffage, ICADE, Renault, L'Oréal, LVMH, Rabot Dutilleul, Mäder, EGIS, Rte, EDF, Decathlon, Elan, Engie, Airbus, Suez, Naval Group, CNES, Corning, Faurecia, J&J, Maped, Salomon, Saint-Gobain et de nombreuses PME ont déjà adhéré à l'association Ceebios et plusieurs acteurs industriels et universitaires manifestent leur volonté de s'engager dans cette voie sur des enjeux à fort impact sociétal : éco-matériaux innovants, chimie verte, gestion de l'énergie et de l'eau, économie circulaire et nouveaux modèles agricoles.

Ceebios répond ainsi aux recommandations du Commissariat Général du Développement Durable en 2012²⁷, et celles du Conseil Economique Social et Environnemental en 2015²⁸ pour la structuration et mise en œuvre d'une feuille de route nationale du biomimétisme.

Ceebios accompagne la Région Nouvelle-Aquitaine depuis 2017 dans le déploiement du biomimétisme sur son territoire^{29,30} : par la cartographie des acteurs du territoire pertinents pour le biomimétisme, par une étude d'impacts économiques autour de l'innovation bio-inspirée et par la mise en place de groupes de travail régionaux.

<http://ceebios.com>



²⁷ Commissariat Général au Développement Durable, Etude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France, H. Durand, 2012.

²⁸ Conseil Economique, Social et Environnemental, Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement, P. Ricard, 2015.

²⁹ S'inspirer de la nature pour innover durablement – La Région Nouvelle - Aquitaine sur la voie du biomimétisme - Ceebios, 2016.

³⁰ La Nouvelle - Aquitaine, une région bio-inspirée – Cartographie des acteurs et évaluation des retombées socio-économiques – Ceebios, 2018

