

# Matériaux Biologiques

Source de réconciliation entre nos sociétés et les écosystèmes naturels ?

## MÉMOIRE

Auteur : Jean-Romain DALLE

Master « Nature-Inspired Design »

Promotion : NID 1 – 2020\_2021

Sous la supervision de : Charline KERNIN

# Table des matières

<u>Introduction</u>	<b>2</b>
<u>Partie 1 - De L'hyperconsommation Des Matériaux Synthétiques Au Déséquilibre De La Biomasse</u>	<b>3</b>
UNE HYPER-PRODUCTIVITÉ QUI ATTEINT DÉSORMAIS LA PRODUCTION DE LA BIOSPHÈRE	3
LES IMPACTS DE CETTE HYPER-PRODUCTIVITÉ	5
LES BESOINS MATÉRIELS DE NOS SOCIÉTÉS	7
<u>Partie 2 - Gestion Des Matériaux Bio-Inspirés</u>	<b>9</b>
LES MATÉRIAUX BIOLOGIQUES	<b>11</b>
ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET ABONDANCES	11
CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX DU VIVANT	13
LES MOLÉCULES DU VIVANT	14
LES PERFORMANCES DES MATÉRIAUX BIOLOGIQUES	20
STRUCTURATION DES MATÉRIAUX	24
ETUDE DE CAS : COLÉOPTÈRE NOSODERMA DIABOLICUS - UN DESIGN FONCTIONNEL AU CHEVET D'UNE PERFORMANCE REMARQUABLE	30
LA BIOSYNTÈSE ET LA BIOFABRICATION (« GREEN FOOD WEB »)	<b>38</b>
LA BIOSYNTÈSE OU PRODUCTION DE LA MATIÈRE	38
LA BIOFABRICATION	40
DÉCOMPOSITION ET BIODÉGRADABILITÉ ("BROWN FOOD WEB")	<b>48</b>
DÉCOMPOSITION DANS LA NATURE	48
RECYCLAGE BIO-INSPIRÉE	50
INTÉRACTIONS ENTRE LES CHAÎNES DE PRODUCTION ET DE DÉCOMPOSITION (« GREEN VS BROWN »)	<b>54</b>
<u>Partie 3 - Quelles Implications ? Quelle Réconciliation Possible ?</u>	<b>58</b>
UNE AUTRE FORME DE POLLUTION POSSIBLE ?	<b>58</b>
RECYCLAGE ENZYMATIQUE DES MATÉRIAUX SYNTHÉTIQUES, UNE TENTATION IRRÉSISTIBLE ?	<b>59</b>
IMMOBILISATION DES NUTRIMENTS PAR L'HUMAIN: QUELS IMPACTS ?	<b>60</b>
QUELLES CONSÉQUENCES EN FONCTION DE L'ACCEPTABILITÉ DE L'UTILISATEUR ?	<b>61</b>
À MESURE QUE L'ON SE RAPPROCHE D'UN MATÉRIAU BIOLOGIQUE, QUEL IMPACT SUR NOTRE MODÈLE DE SOCIÉTÉ ?	<b>61</b>
<u>Conclusion</u>	<b>62</b>

## Introduction

Depuis la sortie de la seconde guerre mondiale, nos sociétés ont entamé une transition accélérée vers un mode d'hyperconsommation, portée par notre démographie, les développements technologiques en matériaux de synthèse et par l'abondance d'énergie fossile. Aujourd'hui, cette hyper-productivité est considérée comme l'un des facteurs principaux responsables de nombreux impacts sur notre environnement contribuant au changement climatique : énergivore, forte émettrice de gaz à effet de serre, contamination des chaînes alimentaires, épuisement des ressources naturelles, pressions des écosystèmes naturels sont quelques exemples des impacts mesurés et alertés par les scientifiques depuis les années 70.

Au-delà de la tendance sociétale même, les matériaux synthétiques sont particulièrement visés par son impact. Ainsi, il est estimé qu'aujourd'hui, nous aurions produit et accumulé autant de matériaux synthétiques que la biomasse, et qu'il y aurait deux fois plus de plastique produit et en circulation à ce jour que d'animaux.

Or, nos sociétés, dans leurs modèles actuels, ont des besoins matériels pour maintenir leurs activités sociétales : que ce soit pour maintenir leurs infrastructures, ou assurer divers besoins primaires couvrant l'habillement, les réparations, la logistique, etc. Sans changements démographiques majeurs, et sans mesures coercitives sur la production et gestion de nos matériaux synthétiques, le constat semble se dessiner unanimement, le modèle est insoutenable avec un risque extrême sur la survie de nos environnements et sur celles de nos sociétés.

Quelles solutions alors peuvent émerger pour justement permettre la sortie de ce modèle insoutenable et d'assurer la survie de notre biosphère dont nous faisons partie et dont nous dépendons ? La mise en miroir de la biomasse et de notre masse anthropique peut représenter justement une voie à interroger. Car la biosphère et ses représentants (hors Sapiens) produisent également des matériaux : des matériaux biologiques conçues par et pour le vivant, répondants à leurs besoins fonctionnels pour leurs survies.

À la différence de nos matériaux synthétiques, cette masse de matériaux biologiques s'inscrit dans le développement des écosystèmes. Elle se repose sur des éléments qui s'assemblent pour donner une structure et une fonction, puis se désassemble pour nourrir, puis former de nouveaux matériaux.

Alors que nos matériaux synthétiques menacent les écosystèmes naturels, les matériaux biologiques, en sont les composants et les nutriments, participant au premier plan à leurs développements. Dès lors, est-il possible que ces matériaux biologiques puissent nous inspirer et nous accompagner vers un modèle plus soutenable où nos besoins matériels nécessaires au fonctionnement de nos sociétés puissent également s'inscrire dans la pérennisation de nos systèmes naturels ?

Autrement dit, de quelle manière les matériaux biologiques peuvent-ils réconcilier l'humain et la biosphère ? Répondre aux besoins matériels de nos sociétés tout en participant au développement de nos écosystèmes ?

Après une présentation du constat actuel porté sur l'impact de nos sociétés sur notre biosphère, ce mémoire explore de manière générale et circulaire la façon dont les matériaux biologiques sont gérés au sein de la biosphère, afin de dessiner une solution pour accompagner notre société vers un modèle plus soutenable, s'inscrivant dans le développement de nos écosystèmes. Enfin, ce mémoire tentera d'interroger les implications et les limites de ce nouveau paradigme et d'identifier de possibles déplacements de problèmes.

## Partie 1 - De l'hyperconsommation des matériaux synthétiques au déséquilibre de la biomasse

Depuis la sortie de la seconde guerre mondiale, l'humain est entré dans une nouvelle phase de son développement marqué par une hyper-productivité, soutenu par une démographie exponentielle (cf Fig. 1.1), un modèle économique libéral généralisé, une abondance d'énergie fossile à faible coût, et un développement effréné de nouvelles technologies, dont les matériaux synthétiques.

### Une hyper-productivité qui atteint désormais la production de la biosphère

Cette hyper-accélération de notre production et consommation est d'ailleurs illustrée de manière remarquable dans une étude de *Elhacham et al.* publiée dans *Nature* en décembre 2020<sup>1</sup>, estimant l'évolution de la masse totale de matériaux "anthropiques" et la comparant avec la biomasse globale.

Dans cette étude, les chercheurs considèrent la "masse anthropique" comme la masse créée par et pour les activités humaines. Ce terme regroupe ainsi les objets solides inanimés fabriqués par les humains qui n'ont pas encore été démolis ou retirés. Ce flux de matière proviendrait d'un environnement naturel et aurait pour destination le système socio-économique où ce flux s'accumulerait en une pile d'artefacts. Au sein de ce flux de matière, les auteurs ont inclus entre autres le *béton*, la *brique*, l'*asphalte*, les *métaux* (cuivre, aluminium, fer/acier), le *plastique*, et le *verre*.

Les auteurs comparent cette masse anthropique à la biomasse représentant la masse globale de toutes les espèces vivantes. Ceci inclut de facto les humains et le bétail même si ce dernier est dédié aux activités humaines.

L'étude publiée met en lumière plusieurs points intéressants à soulever. D'une part, l'analyse confirme quantitativement que notre production a suivi la courbe démographique post-guerre avec une croissance exponentielle de la production de ces matériaux synthétiques au lendemain de la seconde guerre mondiale (cf. Fig. 1.2) :

- Ainsi, au début du 20e siècle, la masse de ces matériaux synthétiques était égale à 3% de la biomasse globale.
- Dès 1950, cette masse a suivi une courbe équivalente à la loi de Moore, avec un doublement des quantités tous les 20 ans.

---

<sup>1</sup> "Global human-made mass exceeds all living biomass", Elhacham et al., *Nature*, décembre 2020

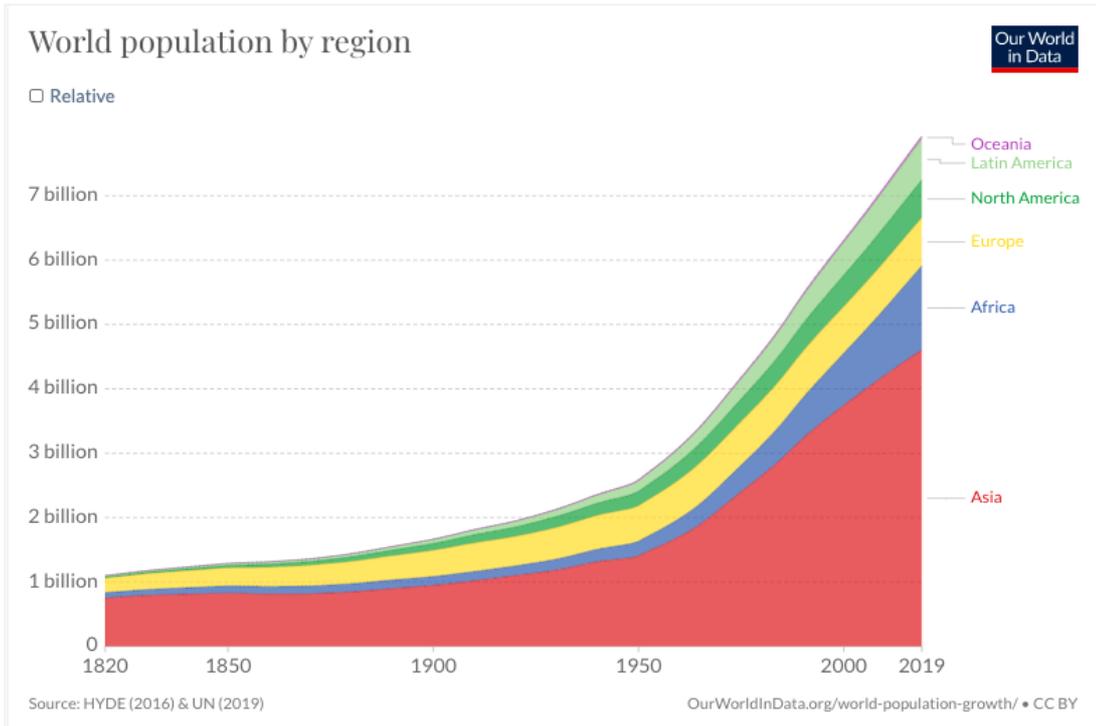


Fig. 1.1 : Evolution de la population mondiale : 1820-2019

Source : OurWorldInData.org

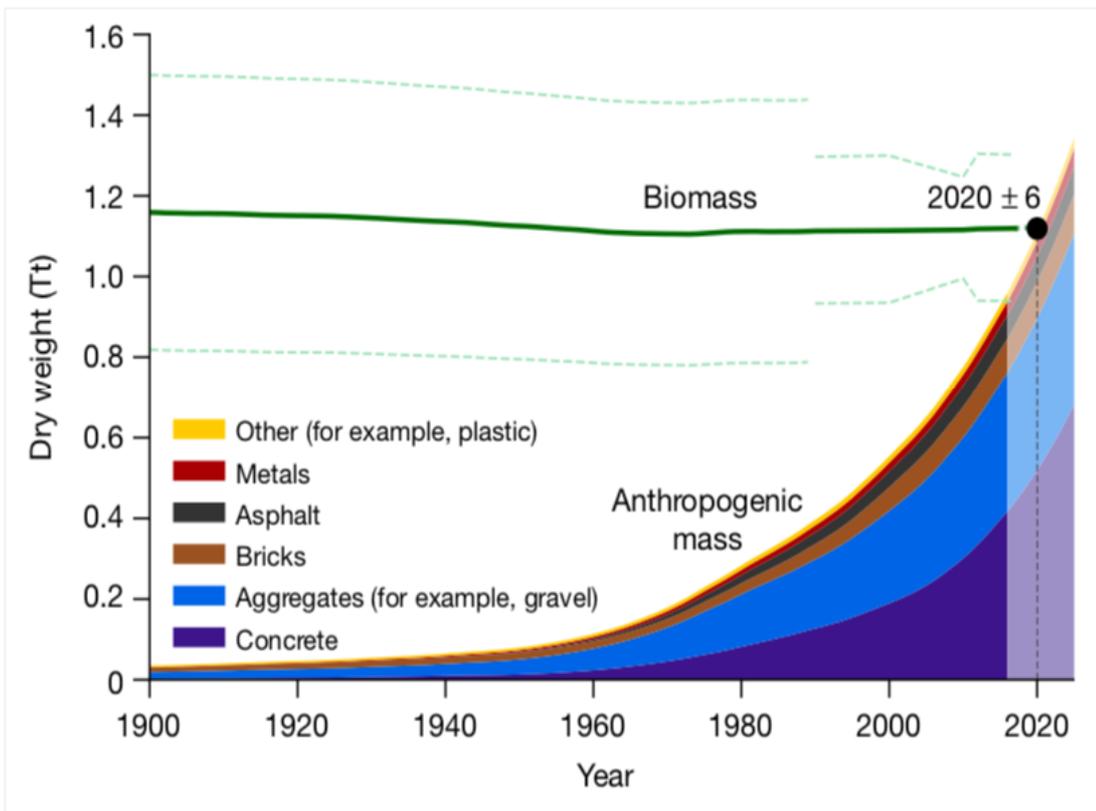


Fig. 1.2 : Évolution comparative de la production de la masse anthropique et de la biomasse : 1900-2020

Source : Elhacham et al.,

Cela nous amène à un second point clé de l'étude : en 2020, soit 120 ans ou encore quatre générations plus tard, cette masse est désormais équivalente à l'ensemble de la biomasse globale.

L'étude illustre l'ampleur de cet impact actuel par deux exemples comparatifs (cf. Fig. 1.3) :

- 1) La masse du plastique (8 Gt, Giga tonnes) est deux fois plus importante que la masse totale des animaux (4 Giga tonnes).
- 2) La masse totale des infrastructures humaines (1,100 Gt) est désormais supérieure à la masse totale composée d'arbres et buissons (900 Gt).

Ainsi, l'espèce humaine représentant 0,01% de la biomasse est responsable d'une production de matériaux synthétiques de masse équivalente à l'ensemble de la biomasse, imposant une pression significative sur les écosystèmes naturels risquant leurs effondrements.

Si cette dynamique n'est pas ralentie, l'étude prévoit que la masse anthropique atteindrait trois fois la taille de la biomasse globale d'ici 2040, au détriment de nos écosystèmes et de notre biodiversité (cf. Fig. 1.4).

### Les impacts de cette hyper-productivité

Pourquoi cette hyperproduction de ressources synthétiques est-elle si problématique ?

La première raison vient du fait que nos matériaux synthétiques sont très énergivores et polluants à la fabrication. Le béton notamment est responsable à lui seul de 5% à 7% des gaz à effet de serre<sup>2</sup>, dont près de 1 milliard de tonnes de CO<sub>2</sub><sup>3</sup>, en raison des étapes de fabrication nécessitant des combustions de plus de 1,000 °C alimentées par l'énergie fossile. Ces fabrications à haute température ne sont pas le monopole du ciment, puisqu'on le retrouve également pour les métaux, le plastique, et pour la fabrication du verre. Cette génération de gaz à effet de serre contribue dès lors au dérèglement climatique, impactant nos écosystèmes et nos sociétés.

La seconde raison vient du fait que nos matériaux synthétiques peuvent se retrouver dans les organismes vivants. Nos matériaux peuvent alors poser un vrai problème aux organismes biologiques puisque nos matériaux synthétiques leur sont inconnus. Dans ce cas, nos matériaux, pouvant créer un effet toxique, sont dits alors "*xénobiotiques*" : c'est-à-dire "étranger au vivant"<sup>4</sup>. Or, comme ce sont des molécules qui n'ont jamais été trouvées ou produites par la biosphère, les organismes ne savent pas s'en débarrasser. Ainsi, ils peuvent se dégrader lentement jusqu'à atteindre une taille nanométrique qui permettrait de passer les barrières de certains organes et tissus. C'est notamment le cas redouté du plastique<sup>5</sup>. Ils peuvent également s'accumuler jusqu'à créer une toxicité avec l'environnement biologique des organismes.

---

<sup>2</sup> <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/l-industrie-cimentiere-veut-reduire-de-80-ses-emissions-de-co2-d-ici-2050-146572.html>

<sup>3</sup> <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-fabrication-ciment-participe-t-elle-rechauffement-climatique-4090/>

<sup>4</sup> « Dépolluer la planète », Jean Weissenbach, CNRS éditions / De vive voix

<sup>5</sup> « Plastique, le grand emballage », Nathalie Gontard, éditions Stock



Fig. 1.3 : Exemples clés contrastant la biomasse globale et la masse anthropique en 2020  
 Source :

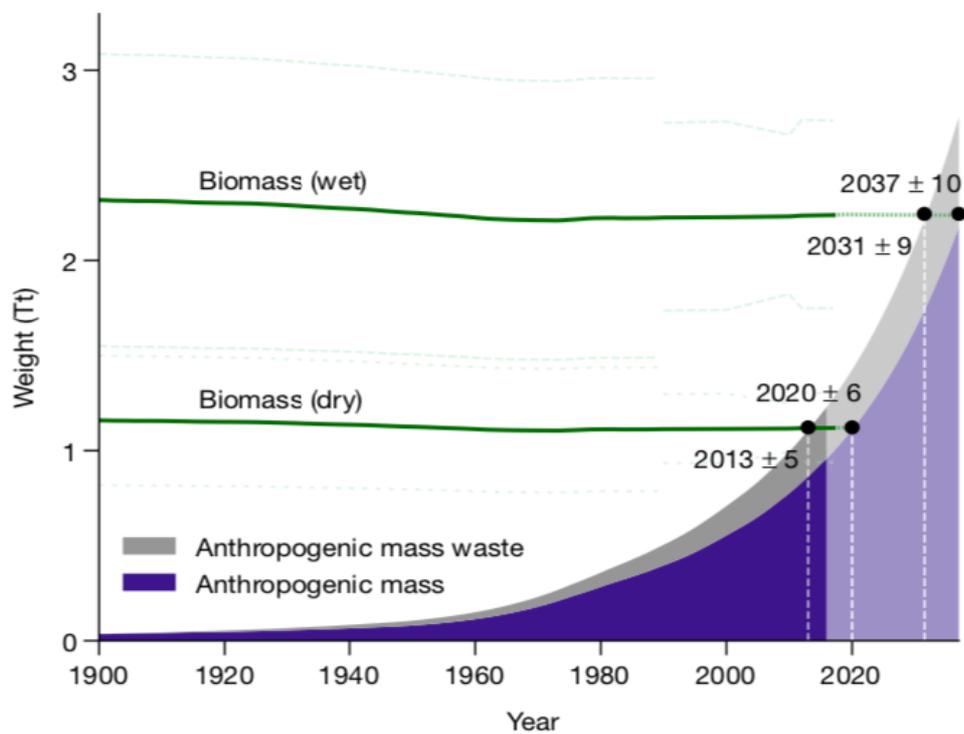


Fig. 1.4 : Biomasse, masse anthropique et déchets anthropique : 1900-2020 et prévisions 2040  
 Source :

L'association de plusieurs matériaux peut même créer une synergie toxique au sein de l'organisme. C'est le cas plus notoire des médicaments, des pesticides et des additifs alimentaires<sup>6</sup>. Cette dissémination de ces composés xénobiotiques ayant sévi depuis de nombreuses années, elle représente aujourd'hui une menace directe pour nos écosystèmes et leurs chaînes alimentaires, notamment aquatiques<sup>7</sup>, représentant dès lors une menace pour notre survie.

Enfin, notre hyper-productivité menace à moyen terme notre approvisionnement énergétique fossile, pilier du développement de nos sociétés. Car aujourd'hui, notre société fonctionne majoritairement grâce au pétrole. Que ce soit en termes de fabrication, transport, et même d'alimentation, pas un seul outil que nous utilisons n'a besoin ou eu besoin à un moment de cet or noir. Depuis les années 1970, nous prévoyons que nos sociétés atteignent un pic de pétrole représentant le moment où nous aurions consommé 50% de l'ensemble du pétrole existant sur Terre. Certaines analyses estiment que nous l'aurions déjà dépassé, quand d'autres le projettent pour la prochaine décennie<sup>8</sup>.

Dans tous les cas, aucune ne remet en question le fait qu'un jour où nous atteindrons les limites de l'extraction du pétrole. Or, sachant que les premiers barils de pétrole ont été extraits en 1865, nous pourrions imaginer pouvoir profiter encore de 150 ans d'exploitation si le pic s'avérait être atteint actuellement. C'est malheureusement sans compter sur le fait que nous sommes désormais 7 milliards d'humains à consommer (et presque 10 milliards à échéance 2050<sup>9</sup>), et que les poches actuellement exploitées sont les plus accessibles.

L'hyper-accélération après-guerre a ainsi conduit une situation où notre société cumule une production et consommation de matériaux de synthèse énergivores ayant un fort impact sur notre biosphère et menaçant la survie de nos écosystèmes de par la pollution qu'elle génère. Cette situation est par ailleurs insoutenable car nos ressources énergétiques actuelles ne peuvent subvenir à notre rythme de consommation qu'à l'ordre d'une voire deux générations.

### Les besoins matériels de nos sociétés

Devant cette situation alarmante, il apparaît donc urgent de ralentir ce modèle hyper-productif. Or, devant la dynamique démographique actuelle et la fragile stabilité de nos sociétés, il apparaît difficile de réduire drastiquement notre production, surtout par des moyens coercitifs, sans compromettre la survie de nos sociétés. Par ailleurs, nos sociétés continueront, de fait, à avoir des besoins matériels nécessaires pour leurs gestions et développements : que ce soit pour maintenir leurs infrastructures, ou assurer divers besoins primaires couvrant habillement, biens de consommation, réparations, la logistique, etc.

Dès lors, comment imaginer une transition de nos sociétés où les besoins matériels nécessaires peuvent être assurés, tout en préservant notre biosphère des risques de pollutions et climatiques soulevés par les autorités scientifiques, et dans un contexte de démographie croissante ?

---

<sup>6</sup> <https://www.geo.fr/environnement/xenobiotique-un-corps-etrange-dans-la-nature-169812>

<sup>7</sup> [https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/04/29/la-pollution-chimique-gagne-l-ensemble-des-oceans\\_6078512\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/04/29/la-pollution-chimique-gagne-l-ensemble-des-oceans_6078512_3244.html)

<sup>8</sup> <https://jancovici.com/transition-energetique/petrole/a-quand-le-pic-de-production-mondial-pour-le-petrole/>

<sup>9</sup> <https://www.lesechos.fr/monde/enjeux-internationaux/la-population-mondiale-pourrait-decliner-a-partir-de-2064-1223698#:~:text=Publi%C3%A9e%20dans%20la%20nuit%20de,10%2C9%20milliards%20en%202100.>

L'étude de *Elhacham et al*<sup>10</sup> mettant en miroir notre production de matériaux anthropiques à la biomasse globale peut ouvrir une piste pour répondre à cette question.

Car la biosphère repose également sur une production et consommation de matériaux gérées par les différents écosystèmes qui la composent. Ces matériaux sont divers, développés par les organismes vivants, et répondent à diverses fonctions et besoins.

Par ailleurs, ce modèle de production et consommation par le vivant s'inscrit directement dans le développement dynamique de la biosphère, puisqu'ils composent et nourrissent les écosystèmes.

Constatant que nos matériaux synthétiques portent un risque sur notre environnement, pourrait-on alors s'inspirer des principes appliqués par la biosphère pour réconcilier nos sociétés et les écosystèmes naturels, permettant une production et consommation s'inscrivant respectueusement dans le développement positif de la biosphère ? Dès lors, quels en seraient les principes ?

---

<sup>10</sup> Ibid, #1, p.5

## Partie 2 - Gestion des matériaux bio-inspirés

Comment la biosphère s'organise-t-elle pour gérer ses ressources de manière durable propice à son développement ?

L'un des principes bien connus de l'organisation du vivant est sa circularité. Quelle que soit l'échelle adoptée - écosystémique (flux de nutriments, chaînes alimentaires) ; physiologique (flux sanguin) ; cellulaire (homéostasie) - le phénomène de circularité dans le vivant se retrouve.

Ce phénomène s'illustre particulièrement bien dans la chaîne alimentaire : les flux de matières créés sur la base des nutriments circulent au travers des différents acteurs de la chaîne jusqu'à redevenir dans le sol des nutriments disponibles et prêts pour une nouvelle production de matières.

Au-delà d'une notion de circularité, les biologistes et écologues parleront d'ailleurs de *boucle de rétroaction* : une boucle dont les informations qui y circulent permettent de modifier et d'adapter en fonction des événements qui s'y passent. Car la biosphère est dynamique, et la circularité d'un flux peut amener constamment des impacts sur la croissance ou développement de l'écosystème lors des prochaines itérations du flux.

Cette circularité des ressources, l'humain s'y est d'ailleurs inscrit de tout temps dès lors que les ressources (i.e. tous produits ayant un usage) constituaient une valeur au sein de nos sociétés. Cette situation s'est toutefois amoindrie avec la révolution industrielle et a fini par se perdre dans nos sociétés industrialisées d'après-guerre, où l'abondance des ressources et l'augmentation de la consommation ont déversé logiquement une abondance de produits en fin de vie que nos sociétés n'étaient pas préparées à gérer. Nos sociétés occidentales développées se sont alors structurées par défaut dans un système linéaire de consommation des produits déversant ce flux de déchets dans des décharges. C'est vers la fin du 20e siècle, devant la croissance continue de nos déchets, que nos sociétés ont commencé à se structurer pour tenter de revaloriser ce flux de déchets croissants avec notre démographie et l'augmentation des richesses. On parle alors de revalorisation énergétique grâce à des structures d'incinération permettant de brûler tous ces déchets et de produire de l'énergie en retour, puis vient la revalorisation du produit en lui-même pour lui trouver un second usage : on parle alors de *recyclage*.

Le concept de recyclage, où l'on réutilise l'ensemble ou une partie du produit pour étendre sa durée de vie et réduire le volume de déchets, s'est vite accompagné de concepts dérivés - "upcycle", "recycle", "downcycle" - à mesure des difficultés rencontrées dans la revalorisation des produits en fin de vie. Cette limite au recyclage tient à plusieurs facteurs, que ce soit dans le manque d'intégration du recyclage lors de la conception, ou dans l'incapacité à recycler un certain nombre de matériaux synthétiques.

En effet, les matériaux synthétiques que nous produisons ne peuvent pas tous se recycler sur la base des technologies actuelles. C'est notamment le cas du plastique, bien que de nombreux messages inverses soient communiqués sur ce sujet. Nathalie Gontard, Directrice de recherche à l'INRA et spécialiste des polymères, le mentionne d'ailleurs sans détour : *"A notre connaissance, les seuls emballages en plastique qui peuvent être retransformés à l'identique et sans risque pour le*

consommateur sont les bouteilles en PET. Et cette sécurité n'est valable que pour un seul cycle de réutilisation.”<sup>11</sup>

Nous retrouvons ce même problème dans l'utilisation de matériaux composites, alliant plusieurs matériaux entre eux. C'est ainsi le cas dans le secteur automobile ou des polymères pétrochimiques sont renforcés aux fibres de lin. Ce matériau composite, associant deux matériaux différents, pose des difficultés au recyclage, car les technologies actuelles ne permettent pas de pouvoir dissocier et utiliser l'un ou l'autre de ses matériaux dans des conditions économiques ou écologiques possibles.<sup>12</sup>

Enfin, et même en acceptant les limitations des points précédents, il reste un dernier point critique au concept de recyclage actuel : l'humain est une espèce faillible. Elle abrite des biais cognitifs rendant les opérations de gestion sans incidents très difficiles. Les travaux de Daniel Kahneman le montre d'ailleurs de manière éclairante dans sa description de nos biais cognitifs à travers son concept : "Système 1, Système 2"<sup>13</sup>. Ces biais cognitifs amènent de nombreuses erreurs d'appréciation et de jugement pouvant mener à des incidents ou des actes volontaires polluants notre environnement.

Ainsi, parmi les plus de 3,000 conteneurs maritimes qui tombent en pleine mer, certains s'éventrant en tombant et déversant les cargaisons, il est établi que facteur principal de cette pollution résulte d'erreurs humaines, volontaires ou non.<sup>14</sup>

De fait, si l'on accepte la faillibilité de notre humanité et ses biais inhérents, le recyclage - tel que considéré aujourd'hui basé sur le modèle de circularité du vivant - est une solution imparfaite ne permettant pas de réconcilier l'impact de notre société et les écosystèmes de notre biosphère.

Toutefois, l'exploration des principes régissant le fonctionnement vertueux au sein de la biosphère, notamment via le modèle de la chaîne alimentaire, pourrait nous permettre d'identifier d'autres principes fondateurs pour nous rapprocher de cette réconciliation. En l'occurrence, et dans le cadre de ce mémoire, l'exploration de quatre notions va nous intéresser particulièrement :

- Les matériaux biologiques
- La chaîne « verte » portant la biosynthèse du vivant ("*Green food web*")
- La chaîne « marron » en charge de la décomposition du vivant ("*Brown food web*")
- L'interaction entre les chaînes de décomposition et celles de la biosynthèse

---

<sup>11</sup> Ibid, #5, p.7

<sup>12</sup> Entretien avec Charline KERLIN

<sup>13</sup> « Système 1 / Système 2 : les deux vitesses de la pensée », Daniel Kahneman, éditions Stock

<sup>14</sup> [https://www.bfmtv.com/economie/3000-conteneurs-perdus-en-3-mois-pourquoi-les-chutes-de-marchandises-dans-les-oceans-se-multiplient\\_AN-202102080177.html](https://www.bfmtv.com/economie/3000-conteneurs-perdus-en-3-mois-pourquoi-les-chutes-de-marchandises-dans-les-oceans-se-multiplient_AN-202102080177.html)

## Les Matériaux Biologiques

Dans ce contexte, les matériaux biologiques représentent les matériaux produits par le vivant, composant le vivant, et permettant la réalisation de fonctions nécessaires à sa survie.

Ainsi, que l'on observe les feuilles d'un arbre capturant l'énergie solaire, la carapace d'une tortue le protégeant des attaques, les bois d'un cerf pour se défendre, ou la soie d'araignées pour se déplacer et chasser ses proies, tous ces éléments représentent des matériaux composés de molécules biologiques permettant des propriétés et fonctions spécifiques pour la survie de l'organisme au sein de son environnement.

Dans cette partie, nous étudierons ce qui caractérise intrinsèquement les matériaux biologiques afin de voir de quelle(s) façon(s) ils pourraient nous inspirer à créer des nouveaux matériaux permettant de réconcilier nos sociétés avec les écosystèmes naturels.

### Éléments chimiques et abondances

Lorsque l'on fait défiler l'ensemble des matériaux observés dans le vivant, on peut rapidement oublier que tous ces matériaux ne se composent essentiellement que de 6 atomes de base : Carbone, Hydrogène, Oxygène, Azote, Phosphore et Soufre (CHNOPS)

Et pourtant, alors que nos chimistes se sont échinés depuis le 19<sup>e</sup> siècle à explorer l'entièreté du tableau de Mendeleïev pour découvrir et créer de nouveaux matériaux synthétiques toujours plus résistants et performants, 96% de la composition du vivant se fait avec ces 6 atomes, et le reste étant complété selon ses besoins avec 16 autres. (Cf. Fig. 2.1)

Ainsi, avec seulement 20 atomes le vivant arrive à produire et concevoir une incroyable versatilité de matériaux de propriétés et textures diverses, répondant à l'ensemble des besoins du vivant<sup>15</sup>.

Cette faculté de composer avec un nombre de molécules limités et présentes en (sur)abondance est une des premières caractéristiques du vivant. Ainsi, le vivant assure son développement sur la base d'un approvisionnement quasi-inépuisable d'éléments nécessaires à ses besoins, et sécurise également une fluidité dans la circularité de ses éléments.

---

<sup>15</sup> « Le vivant comme modèle, la voie du biomimétisme », Gauthier Chapelle, éditions Albin Michel

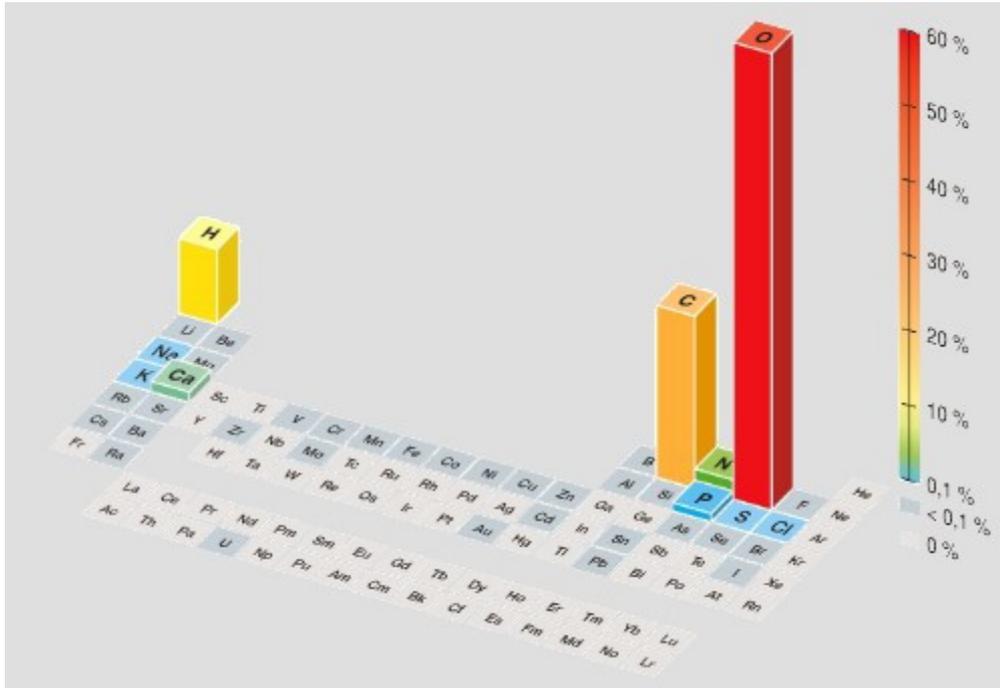


Fig. 2.1 : Atomes composant la biosphère, et abondance  
 Source : Bordas 2015, p.35

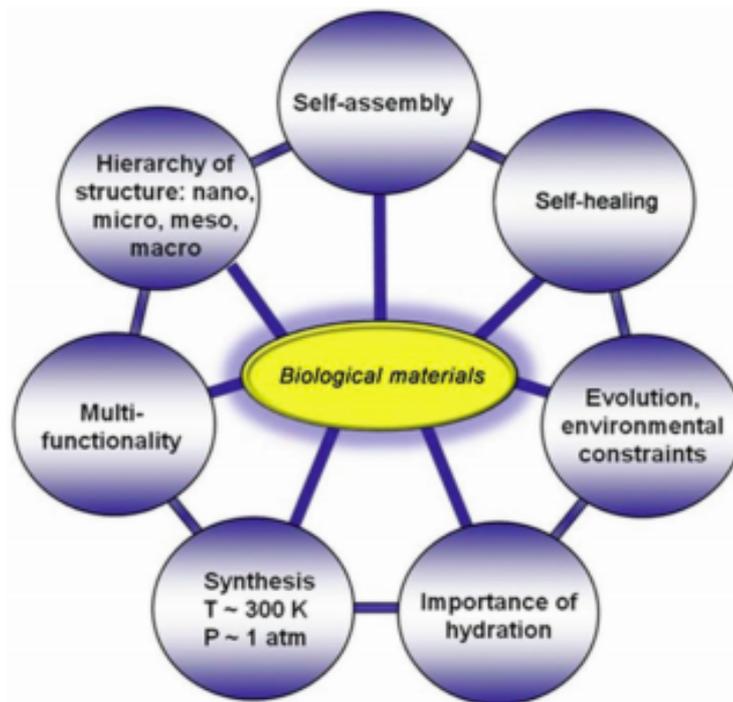


Fig. 2.2 : Sept caractéristiques unique des matériaux biologiques : l'heptahedron de Arzst  
 Copyright 2006, Elsevier

## Caractéristiques des matériaux du vivant

Au-delà d'un nombre limité d'éléments chimiques abondants les composants, les matériaux biologiques se distinguent des matériaux synthétiques par plusieurs autres caractéristiques.

Sept caractéristiques uniques des matériaux biologiques ont notamment pu être identifiées<sup>16</sup>, comme nous le montre le schéma ci-contre (Cf. Fig. 2.2)

Parmi ces sept caractéristiques, nous pouvons en citer quelques-uns particulièrement pertinents dans le cadre de notre contexte :

- Hiérarchie de la structure (nano-to-macro, multicouches, et composition multi-échelle) :  
Au sein d'un même matériau, il existe plusieurs niveaux d'échelle organisés allant de nano - à macro - qui confère des propriétés distinctes et traduisibles d'un niveau à un autre. (Plus de détails dans le paragraphe 4. : structuration).
- Synthèse à température et pressions ambiante :  
Contrairement à nos matériaux synthétiques qui ont besoin d'être conçus à forte température et/ou forte pression, les matériaux biologiques se conçoivent avec le moins d'énergie possible et dans des conditions ambiantes. Cette caractéristique rend les matériaux biologiques d'autant plus extraordinaires lorsqu'on songe aux organismes marins, tel que l'ormeau qui arrive à produire, en condition ambiante et sous l'eau, une nacre résistante, ou encore la moule qui arrive à produire et appliquer un adhésif performant.
- Auto-assemblage :  
À l'inverse de nombreux procédés synthétiques pour produire des matériaux, la structure de matériaux biologiques est faite en "bottom-up", plutôt qu'en "top-down". C'est l'un des critères clés à la croissance, puisqu'il n'y a pas la présence d'échafaudage à disposition. Cette caractéristique est appelée "auto-assemblage".
- Multifonction :  
De nombreux composants biologiques ont plus d'une fonction :
  - Par exemple, une plume peut avoir des capacités de camouflage, d'isolation et de portance pour voler
  - les os représentent un cadre structurant , promeuvent la croissance de cellules rouges et fournissent protection aux organes internes.
- Auto-guérison :  
Alors qu'un matériau synthétique subit un dommage ou une défaillance irréversible, les matériaux biologiques ont souvent la capacité d'inverser les effets du dommage en se soignant grâce à des réseaux vasculaires au sein de sa structure.

---

<sup>16</sup> "Additive Manufacturing as a Method to Design and Optimize Bioinspired Structures", Meyers et al., Adv. Mat., 2018

## Les molécules du vivant :

Comme nous l'avons vu précédemment, les matériaux du vivant sont composés d'un nombre limité d'éléments chimiques. Ces éléments sont assemblés ensemble en molécules plus ou moins grandes, et plus ou moins complexes. Ce sont ces catégories de molécules que nous verrons ici.

Pour les matériaux structurant le vivant, nous observons deux catégories principales :

- les biopolymères ;
- les minéraux

## Biopolymères

Les biopolymères sont des polymères issus de la biomasse. Tout comme les polymères synthétiques, parmi lesquels nous trouvons le plastique, les biopolymères sont de longues chaînes présentant de nombreuses répétitions d'une même molécule. On peut se le représenter comme un long collier de perles. Ces colliers de perles présentent des propriétés intéressantes de résistance à la tension, comme une fibre ou un cheveu flexible lorsqu'on le plie et résistant lorsque l'on essaye de l'étirer.

Pour les biopolymères structurant les matériaux du vivant, on en trouve deux types : soit des *protéines* - on peut parler de protéines fibreuses - soit des *polysaccharides*, qui sont des longues chaînes de sucre.<sup>17</sup>

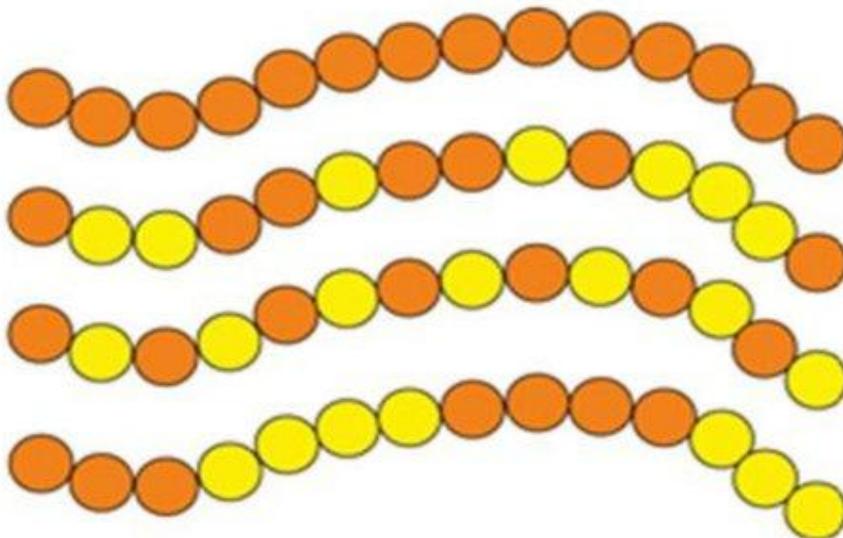


Fig. 2.3 : Illustration de chaînes de polymères sous forme de « colliers de perles »

<sup>17</sup> "Biological Materials Science", M.A. Meyers and P.Y Chen, Cambridge

## Protéines

Les protéines sont des molécules complexes se composant d'*acides aminés*. Dans le cas d'un polymère, il s'agit donc d'une longue chaîne présentant des répétitions d'un ensemble d'acides aminés. Parmi les matériaux biologiques, nous pouvons citer deux types fibres protéiques connus : le *collagène*, et la *kératine*.

- *Collagène*

Le collagène est un matériau structurant pour les corps durs et mous. Il est présent dans différents organes et tissus, et assure l'intégrité de la structure. Il assure un rôle de portage au sein des organismes vivants. Par exemple, au sein de notre corps, le collagène assure le portage de nos vaisseaux sanguins, de nos os, de nos muscles, de nos tendons (cf. Fig. 2.5), etc. De même chez les poissons, le collagène assure un rôle structurant pour ses écailles<sup>18</sup>.

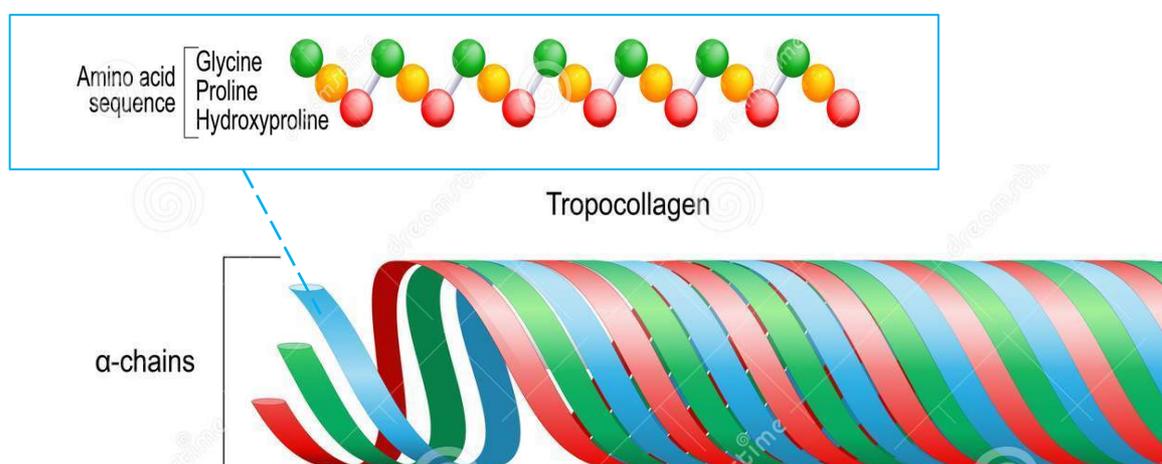


Fig. 2.4 : Structure moléculaire du collagène, et regroupement hélicoïdale en Tropocollagène  
Credit : Tetiana Zhabska / Alamy Stock Vector

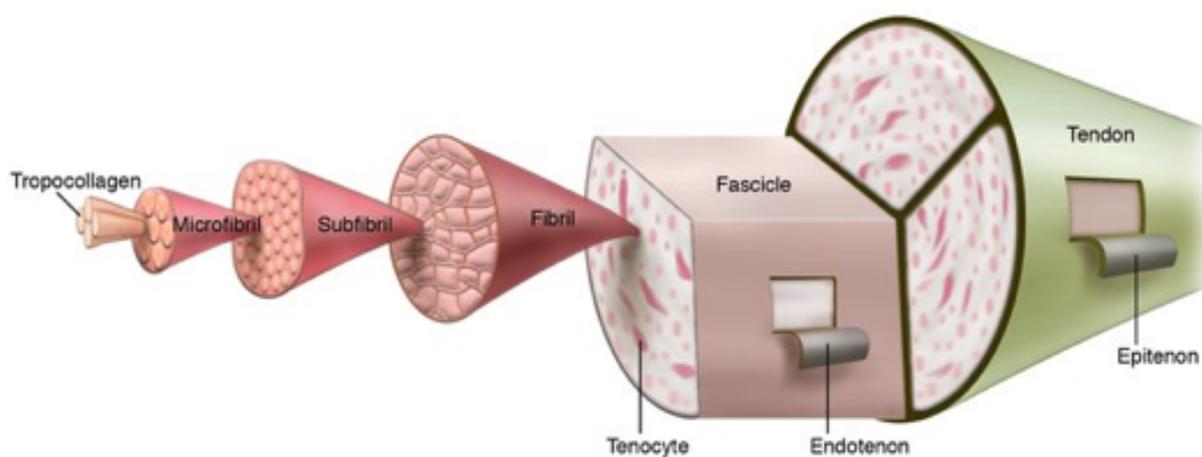


Fig. 2.5 : Structuration hiérarchique d'un tendon, depuis les chaînes de tropocollagène  
Source : « *Molecular targets for tendon neoformation* », Aslan et al., J Clin. Invest., 2008

<sup>18</sup> Ibid

- **Kératine :**

La kératine est une protéine structurante présente dans la plupart des vertébrés. On trouve deux types de kératine :

- *Kératine alpha* présente chez les mammifères et qui compose la peau, la laine, les poils (cf. Fig 2.6), les sabots et les cornes
- *Kératine beta*, communément appelé la kératine des ovariens et reptiliens, que l'on retrouve dans les serres, écailles, plumes et becs<sup>19</sup>.

De même les carapaces des tortues et pics de porc-épic sont composés de kératines, ainsi que l'armure flexible des pangolins.

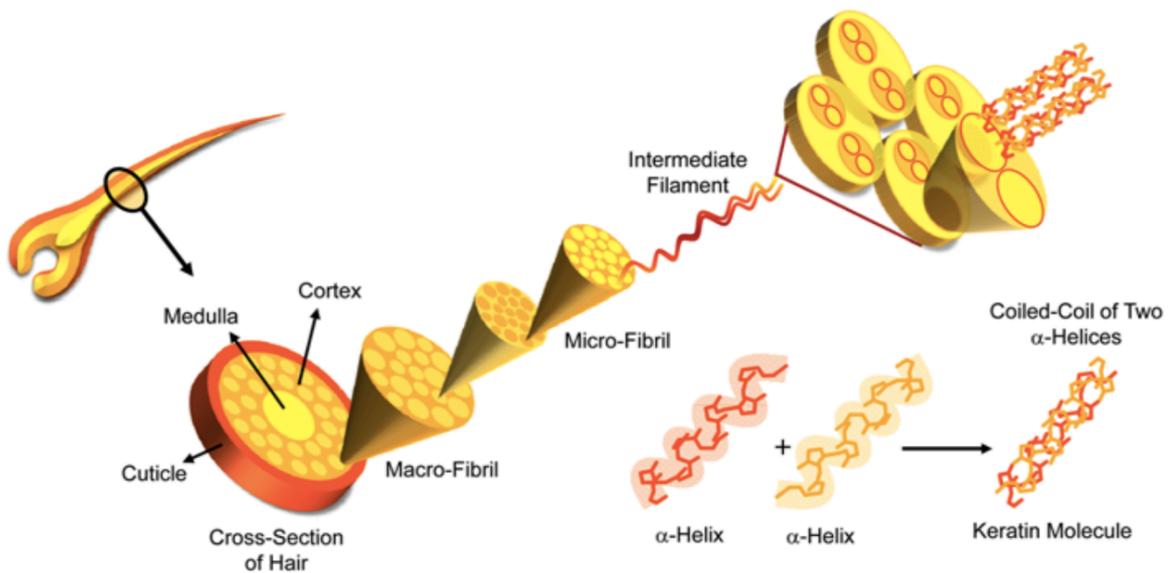


Fig. 2.6 : Structuration hiérarchique d'un cheveu, depuis les chaînes moléculaires de kératine

Source : « *Human Hair Keratin and Its-Based Biomaterials for Biomedical Applications* », Hanna Lee et al., issue Engineering and Regenerative Medicine, 2014

<sup>19</sup> Ibid

## Polysaccharides

Les polysaccharides sont des longues chaînes de carbohydrates (i.e. des glucides structurés uniquement à base de Carbone-Hydrogène-Oxygène). Les deux principaux polysaccharides structurants dans le vivant sont la *cellulose* et la *chitine*<sup>20</sup>.

- *Cellulose*

La cellulose est le polymère naturel le plus abondant sur Terre. On le trouve principalement comme éléments structurant les parois des plantes. Il s'agit de longues chaînes de 10,000 à 15,000 perles de glucose, que l'on représente par la formule  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , avec n le nombre de "perles" constituant la chaîne. La cellulose est couramment associée avec la lignine. On retrouve ainsi ce maillage de façon classique dans la composition du bois, ou les parois des plantes, fournissant force et rigidité.

Il convient de noter que la cellulose pure n'existe pas dans la biosphère. Les fibres de coton sont la forme la plus pure avec 95% de cellulose, et 5% d'autres substances.

- *Chitine :*

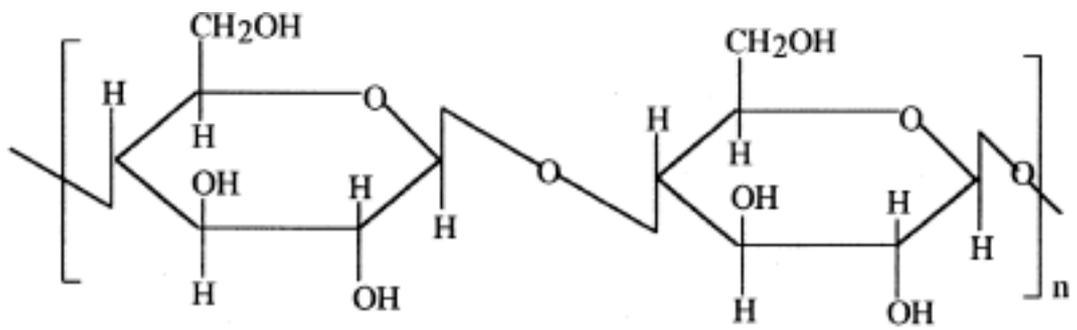
La chitine est le deuxième polymère naturel le plus abondant sur Terre. On la retrouve principalement dans les carapaces de crustacés, les simplons de seiches, les parois des exosquelettes des insectes, et les parois des champignons. Il joue un rôle très important de support et protection des organismes.

La structure chimique de la chitine est une structure linéaire en collier de perles très proche de celle de la cellulose (cf Fig. 2.7)

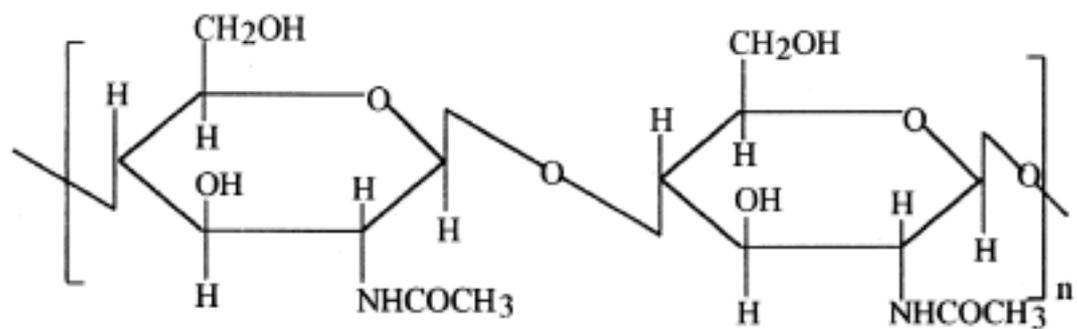
Toutefois, sa structure a toutefois la particularité de ne pas se composer de 100% de chitine. En effet, les perles assemblées se composent d'un mélange de chitine et de *chitosane*, un dérivé de la chitine de formule très proche. Lorsqu'il y a plus de 50% de perles de chitine, la chaîne de polymère est appelée communément chitine, lorsqu'il y a plus de 50% de perles de chitosane, la molécule est alors appelée *chitosane*.

---

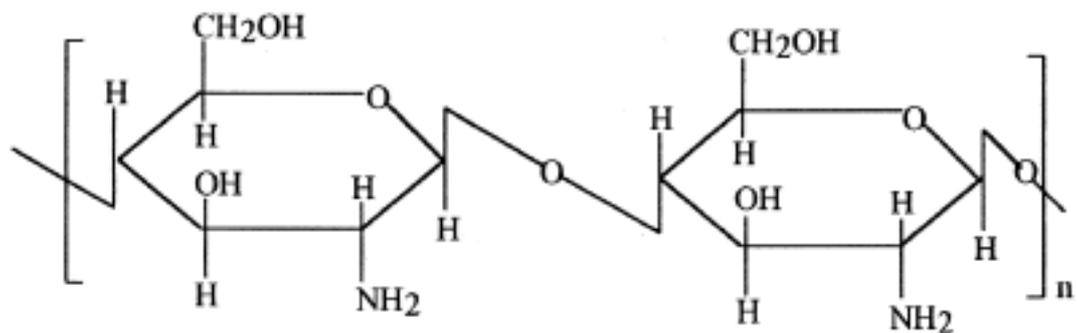
<sup>20</sup> Ibid



Cellulose



Chitin



Chitosan

Fig. 2.7: Structure moléculaire : Cellulose, Chitine, et Chitosane

Source : « *Effects of Chitin and Its Derivative Chitosan on Postharvest Decay of Fruits: A Review* », Zhang et al, *Int. J. Int. Sc.*, 2011

## Minéraux :

Bien qu'il y ait plus de 80 minéraux dans les systèmes biologiques, les plus importants sont :

- Le Carbonate de calcium (calcite, aragonite)
- Le Silica (Carbonate de silice)
- Le Calcium phosphate (Hydroxyapatite)

Les minéraux sont clés pour apporter une force à la *compression*, alors que les polymères sont importants pour apporter une *résistance à la tension*<sup>21</sup>.

La combinaison des polymères et des minéraux confère aux matériaux biologiques des propriétés mécaniques pertinentes aux contraintes de leurs environnements respectifs.

### • Carbonate de calcium

Le carbonate calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) est l'un des minéraux les plus abondants sur Terre. C'est le composé principal des coquilles d'animaux marins, du corail, et des coquilles d'œufs.

Le carbonate de calcium peut se cristalliser sous deux formes principales : la *calcite* et l'*aragonite* que l'on retrouve principalement dans les coquillages (Cf. Fig. 2.8)

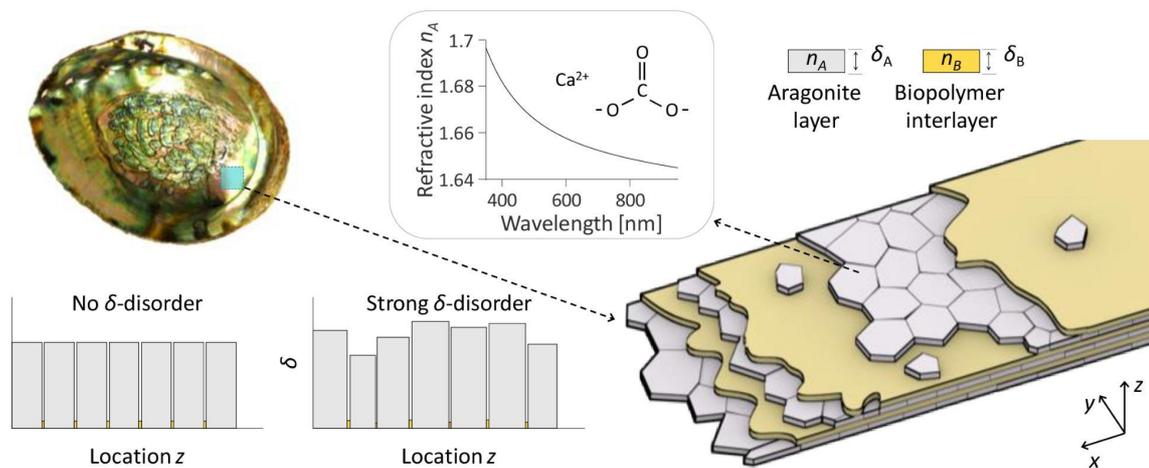


Fig. 2.8: Aragonite et nacre – structure d'une coquille d'ormeau

Source : « Naturally occurring order-disorder duality in photonic structures of the *Haliotis fulgens* abalone shell », Seung et al, *Optical Material Express*, 2019

<sup>21</sup> Ibid

## Les performances des matériaux biologiques :

Après avoir vu les molécules de base des matériaux du vivant, et quelques exemples représentatifs, la question de la performance survient : quelles sont les performances des matériaux biologiques ? Est-ce qu'ils sont comparables à nos matériaux synthétiques ?

Avant toute chose, il est nécessaire de rappeler que la performance d'un matériau va surtout dépendre du contexte, du besoin et des contraintes. Un matériau va être considéré comme performant s'il répond bien à des contraintes définies, et si cette réponse est maintenue pour les conditions d'usage du matériau à travers le temps. Ainsi, un matériau avec une excellente conduction thermique, comme le cuivre, sera bien considéré pour réaliser des objets pour la cuisson par exemple. Il le sera beaucoup moins pour la réalisation d'une table ou d'une chaise (outre l'aspect économique).

Ainsi, on peut trouver de nombreux critères de performances à analyser selon les propriétés mécaniques, thermiques, électriques, ou optiques nécessaires au projet.

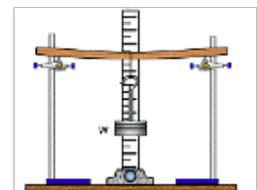
Concernant la performance mécanique des matériaux biologiques, un début de réponse nous est donné par le professeur Michael Ashby, spécialiste des matériaux. Ashby et son équipe ont mesuré et rassemblé les performances mécaniques de nombreux matériaux biologiques (cheveux, carapace, fibre de lin, soie d'araignée, etc..) et leurs composés de base (Cellulose, Chitine, Fibroïne, etc..).

Les deux graphiques ci-dessous (Cf. Fig. 2.9 et 2.10) permettent de comparer les performances des matériaux biologiques et synthétiques pour 2 propriétés mécaniques importantes :

### Le module d'élasticité (Module de Young) :

Il permet de déterminer la rigidité et la flexibilité d'un matériau :

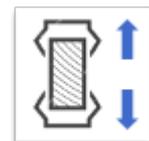
- Plus la valeur est élevée, plus le matériaux est rigide ;
- Plus la valeur est faible, plus le matériau est flexible



### La résistance à la traction :

En étirant le matériau de part et d'autre jusqu'à la rupture, la résistance à la traction peut être mesurée :

- Plus la valeur est élevée et plus le matériaux est considéré comme résistant à la traction.



En inversant les forces soumises de part et d'autre du matériau, on mesure alors la résistance du matériau à la compression



Les larges enveloppes colorées sur les graphiques délimitent les classes de matériaux :

- métaux, polymères, élastomères, céramiques et mousses pour les *synthétiques* ;
- tissus mous, tissus minéralisés, fibres ou matériaux semblables au bois pour les *biologiques*.

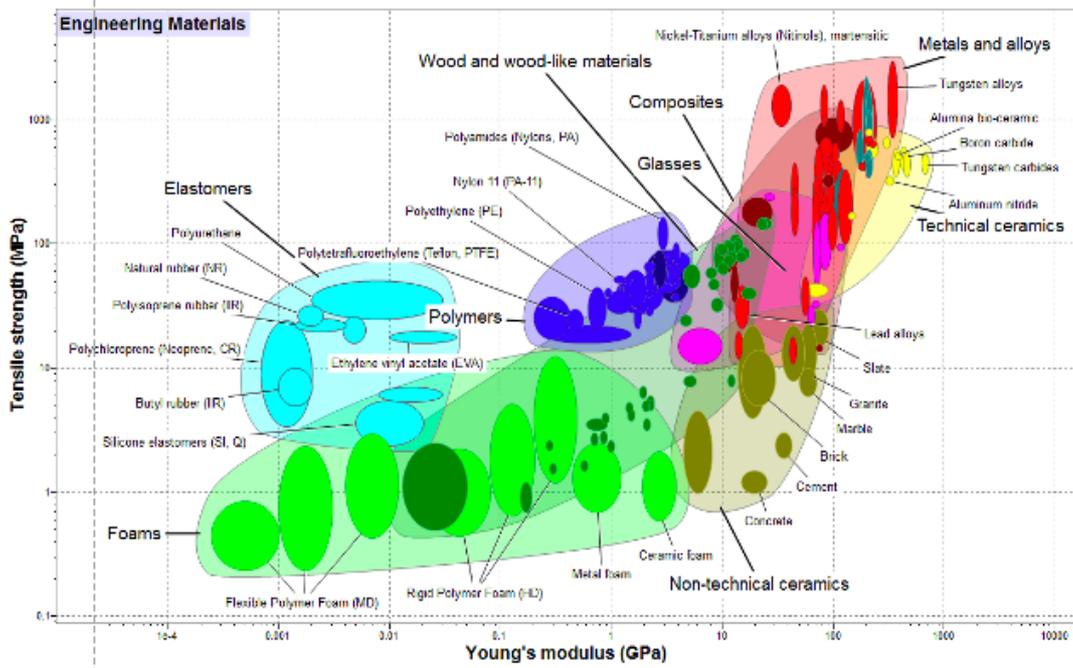


Fig. 2.9: Performance des matériaux synthétiques  
 Source : GRANTA teaching resources, Michael Ashby, Cambridge, 2016

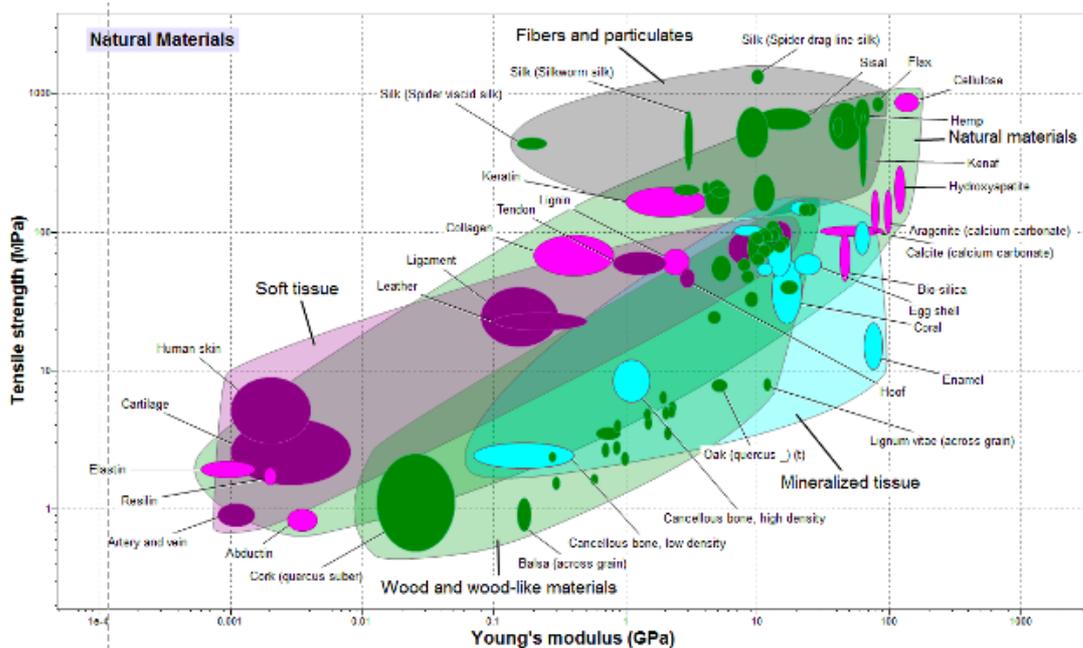


Fig. 2.10: Performance des matériaux biologiques  
 Source : GRANTA teaching resources, Michael Ashby, Cambridge, 2016

En comparant les deux graphiques, nous pouvons déjà constater que **les matériaux biologiques recouvrent une aire presque aussi importante que celle des matériaux d'ingénierie que nous utilisons de nos jours**. Cela implique de fait que les matériaux biologiques peuvent représenter une alternative aux matériaux synthétiques pour des propriétés mécaniques aussi importantes que la rigidité et la résistance à la traction.

Toutefois cela ne s'arrête pas là. Michael Ashby a démontré un autre aspect majeur : les matériaux biologiques sont bien plus versatiles et ont une bien meilleure réponse mécanique que nos matériaux synthétiques, notamment de construction<sup>22</sup>.

En effet, pour les matériaux de construction, il existe une forte corrélation entre 2 paramètres importants en performance mécanique : la résistance à la fracture, et la rigidité (capacité à résister à la déformation élastique). La résistance à la fracture d'un matériau va décroître très rapidement à mesure que sa rigidité augmente. Ainsi, plus un matériau synthétique est rigide et plus il sera fragile, notamment aux forces de tension. C'est le cas notamment de nos céramiques qui malgré d'intenses recherches n'ont permis pas d'augmenter fortement leurs résistances. A l'inverse, plus un matériau est résistant, et plus il sera flexible : C'est le cas notamment des métaux, comme le montre le schéma (Cf. Fig. 2.11). Entre les deux, on observe que les composites synthétiques que nous fabriquons sous-performent, combinant faible résistance et faible rigidité.

Or, sur ce même schéma, on voit que cette dynamique est inversée pour les matériaux biologiques. La résistance des matériaux biologiques reste élevée à mesure que la rigidité augmente, illustrant la supériorité des composites biologiques sur nos composites synthétiques.

Comment expliquer cette performance des matériaux composites ? Elle est due à l'imbrication d'une composante organique (protéines polymères) conférant sa résistance, avec une composante minérale (carbonate de calcium ou carbonate de phosphate) permettant d'assurer une rigidité, mais pas seulement. C'est en fait la structuration hiérarchique multi-échelle (Cf paragraphe 2) qui permet d'associer ces composantes minérales et organiques de manière à optimiser les performances en termes de résistance et rigidité.

Dès lors, les molécules biologiques peuvent représenter une alternative écologique aux matériaux synthétiques en fonction des propriétés mécaniques nécessaires. Mais c'est surtout l'exploration de cette structuration des matériaux biologiques composites qui permettrait d'allier matériaux écologiques et performants répondants à nos besoins matériels. C'est ce que nous verrons au prochain paragraphe.

---

<sup>22</sup> "Additive Manufacturing as a Method to Design and Optimize Bioinspired Structures", Meyers et al., Adv. Mat., 2018

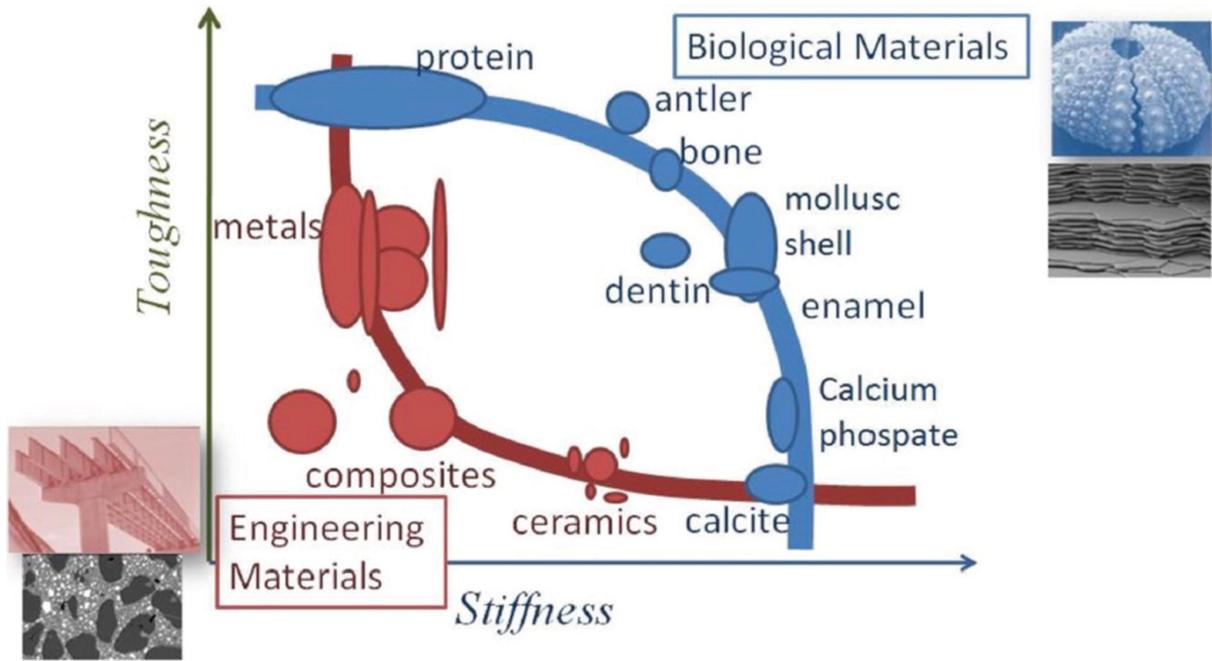


Fig. 2.11: Performance des matériaux synthétiques versus biologiques

Source : "Additive Manufacturing as a Method to Design and Optimize Bioinspired Structures", Meyers et al., Adv. Mat., 2018

## Structuration des matériaux

Comme nous l'avons vu, les matériaux biologiques reposent sur un nombre très limité d'éléments chimiques, et pourtant ils se composent d'une variété incroyable de matériaux avec des propriétés très spécifiques et des performances pouvant même dépasser celles de nos composites grâce notamment à la structuration hiérarchique multi-échelle.

Que sait-on de ces formes structurelles composant ces matériaux biologiques ? Selon Meyers et al.<sup>23</sup>, les matériaux biologiques utilisent huit principaux éléments structurels pour répondre à ses besoins fonctionnels et aux contraintes environnementales (Cf graphe ci-contre) :

- |                |                      |
|----------------|----------------------|
| 1) fibreuse    | 5) tubulaire         |
| 2) hélicoïdal  | 6) cellulaire        |
| 3) en gradient | 7) par suture        |
| 4) par couche  | 8) par chevauchement |

Chacune de ces configurations apporte des propriétés mécaniques qui viennent renforcer le matériau biologique au-delà de sa performance naturelle et ainsi assurer sa fonction dans le cadre de son environnement.

Nous détaillerons ci-dessous trois exemples d'éléments structurels que l'on retrouve dans la composition des matériaux biologiques : *fibreuse*, *hélicoïdal*, et *par couches*

---

<sup>23</sup> "Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration", Meyers et al., Adv. Mat., 2015

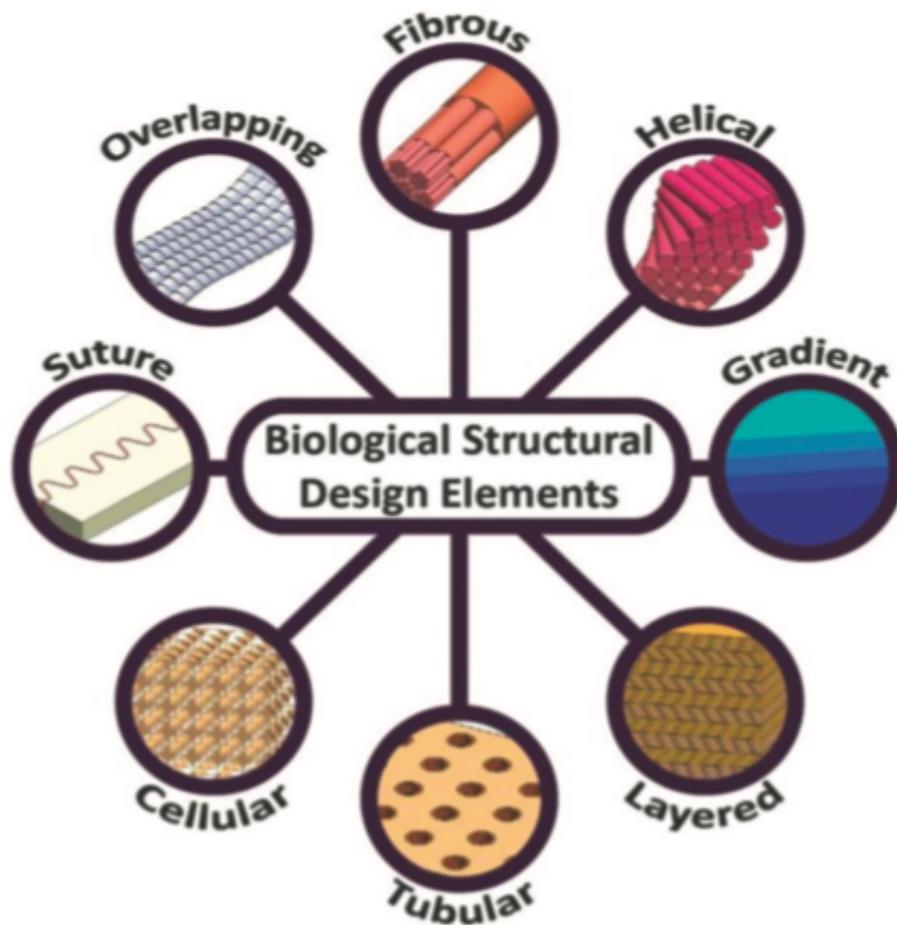


Fig. 2.12: Huit éléments structurels composant le vivant

Source : "Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration", Meyers et al., Adv. Mat., 2015

- *Structuration par Fibres*<sup>24</sup> :

Les matériaux biologiques qui ont besoin d'une forte résistance à la tension dans une direction particulière sont organisés en structures fibreuses.

Ces structures sont conçues avec de nombreuses fibres se composant au travers d'une hiérarchie d'échelle (Figure 2.13).. Ces structures se retrouvent communément dans les matériaux non minéralisés tels que les tendons, les muscles, ou les soies, mais également dans certains matériaux minéralisés tels que les fibres de chitine présentes dans l'exosquelette de crabes ou de fibres de collagènes présentes dans les os.

D'un point de vue mécanique, les structures fibreuses présentent une dichotomie de résistance, forte en tension, et faible - voire proche de zéro - en compression. Cela permet un comportement asymétrique tension-compression que l'on retrouve notamment dans les tendons et muscles. La fonction mécanique d'une structure fibreuse réside dans sa gestion de l'énergie. Enfin, cette structure hiérarchique joue également un rôle dans la consommation d'énergie. Ainsi, une structure fibreuse tel un tendon ou un muscle permet de grandes déformations avec une consommation d'énergie minimale, suivie d'une forte consommation d'énergie avant fracture. Cela permet ainsi d'économiser de l'énergie pour les petites tâches tout en maintenant une grande rigidité nécessaire pour le levage lourd.

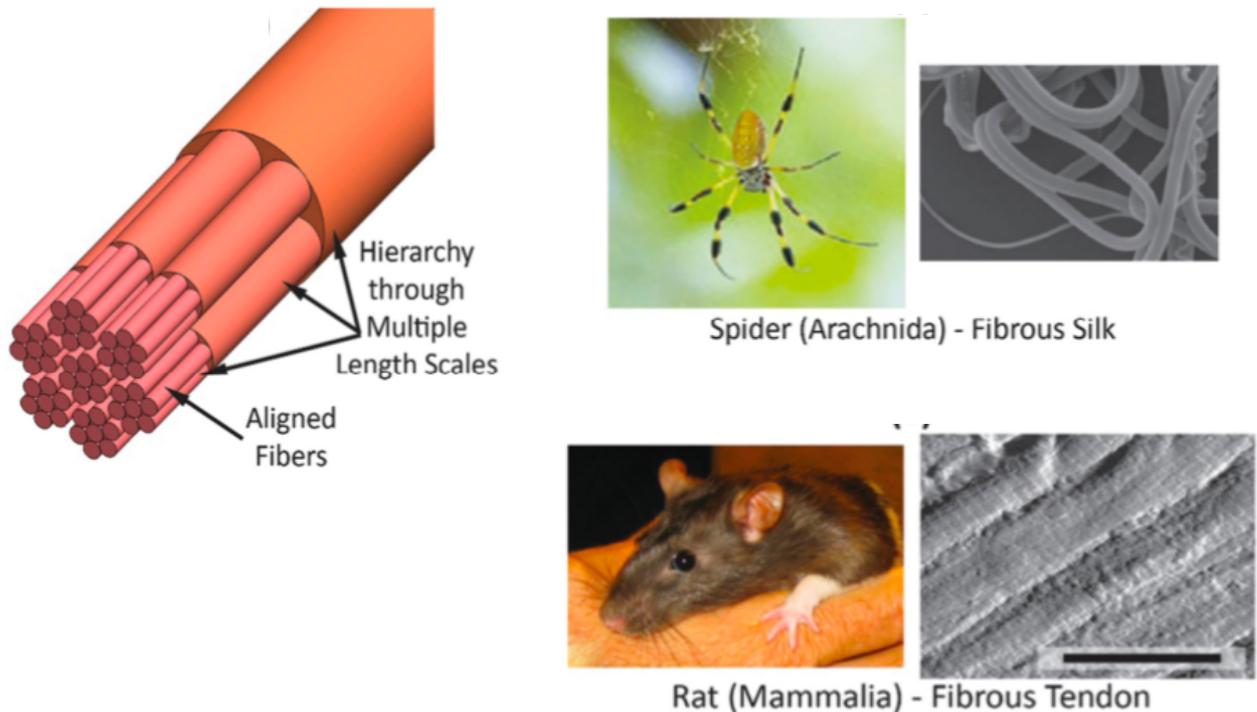


Fig. 2.13: Structure fibreuse: illustration et exemples

Source : "Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration", Meyers et al., Adv. Mat., 2015

<sup>24</sup> Ibid

- Structuration hélicoïdale<sup>25</sup> :

Les structures hélicoïdales sont composées de nombreuses fibres, fibrilles ou renforts disposés à des angles variables. Ce type de structure, souvent référé comme structure de Bouligand, est optimisée lorsque chaque couche de fibres est tournée par rapport à la couche empilée précédente d'un angle constant et l'arrangement effectue une rotation complète de 180°. (Cf. Fig. 2.14).

Ce type de structure offre généralement une résistance à la compression et à la tension accrues dans de multiples directions (Cf. figure).

Parmi les exemples spécifiques, citons les exosquelettes de crustacés, les exosquelettes d'éponges hautement minéralisés, et les exosquelettes d'insectes (par exemple, sauterelle).

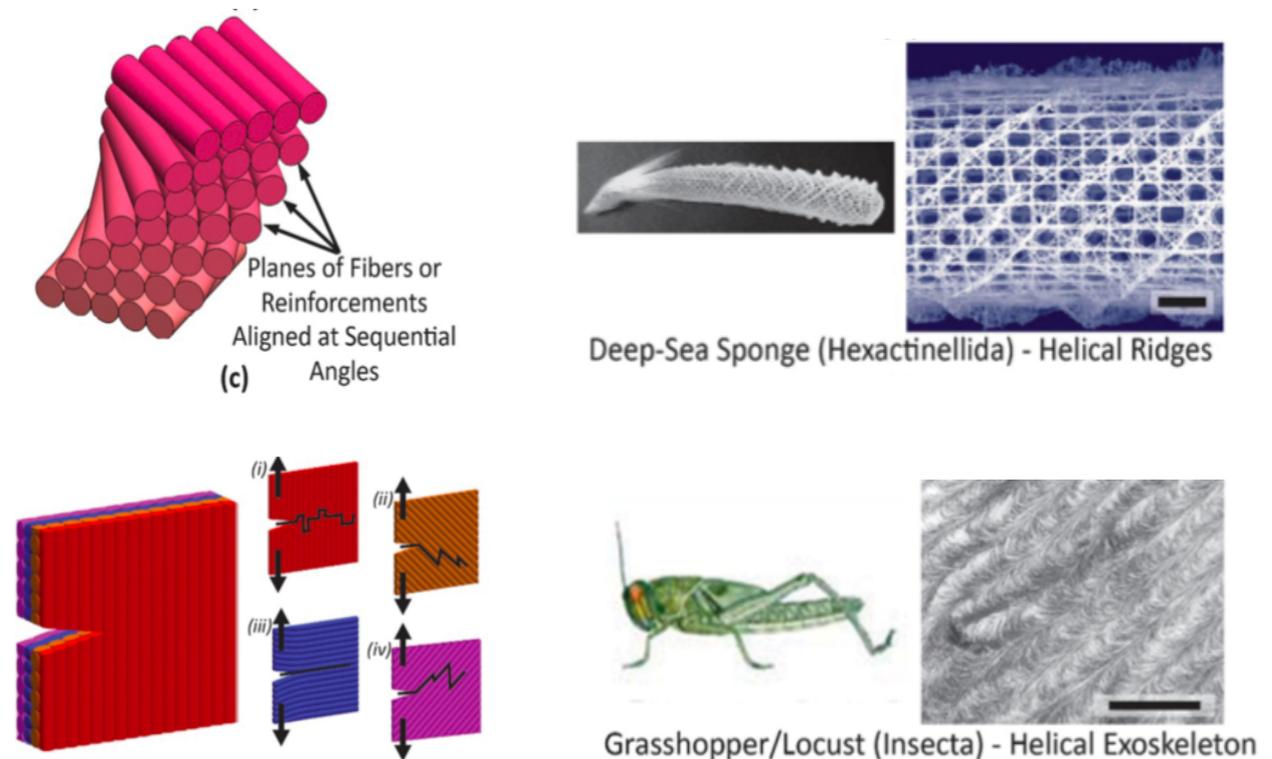


Fig. 2.14: Structure hélicoïdale: illustration, exemples et résistance mécanique

Source : "Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration", Meyers et al., Adv. Mat., 2015

<sup>25</sup> Ibid

- Structuration par couche<sup>26</sup> :

Les structures en couches sont des matériaux composites constitués de plusieurs couches ou interfaces et sont souvent utilisées pour améliorer la robustesse de matériaux fragiles (figure 6a). Les interfaces des structures en couches présentent des changements abrupts et souvent importants des propriétés mécaniques. Les structures en couches sont présentes dans la microstructure des matériaux biologiques. Parmi les exemples spécifiques, nous pouvons observer la structure en briques et mortier de la coquille de l'ormeau (cf. Fig. 2.15), les couches de nombreuses écailles de poissons, et les exosquelettes d'insectes tel que les coléoptères.

D'un point de vue mécanique, les structures en couches augmentent principalement la résistance à la compression d'un matériau biologique par l'introduction de nombreuses interfaces, qui contiennent souvent une deuxième matière plus ductile (i.e. protéines).

Contrairement aux structures hélicoïdales que l'on trouve généralement dans des matériaux plus ductiles, les structures en couches sont le plus souvent composées de constituants fragiles (par exemple, le carbonate de calcium, l'hydroxyapatite, la silice et d'autres biominéraux), bien que les deux types de structures confèrent de la résistance à la compression. Ainsi, en reprenant l'exemple de l'ormeau, son architecture stratifiée de type brique et mortier lui confère une résistance à la rupture sous compression jusqu'à sept fois supérieure à celle de son principal constituant, le carbonate de calcium, qui représente environ 95 % de sa masse.

Une autre propriété importante d'une architecture stratifiée par couche est sa capacité à minimiser les propagations d'une fissure. La stratégie principale permettant cette minimisation consiste à augmenter l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure par un chemin plus long incluant de multiples déviations à différents angles.

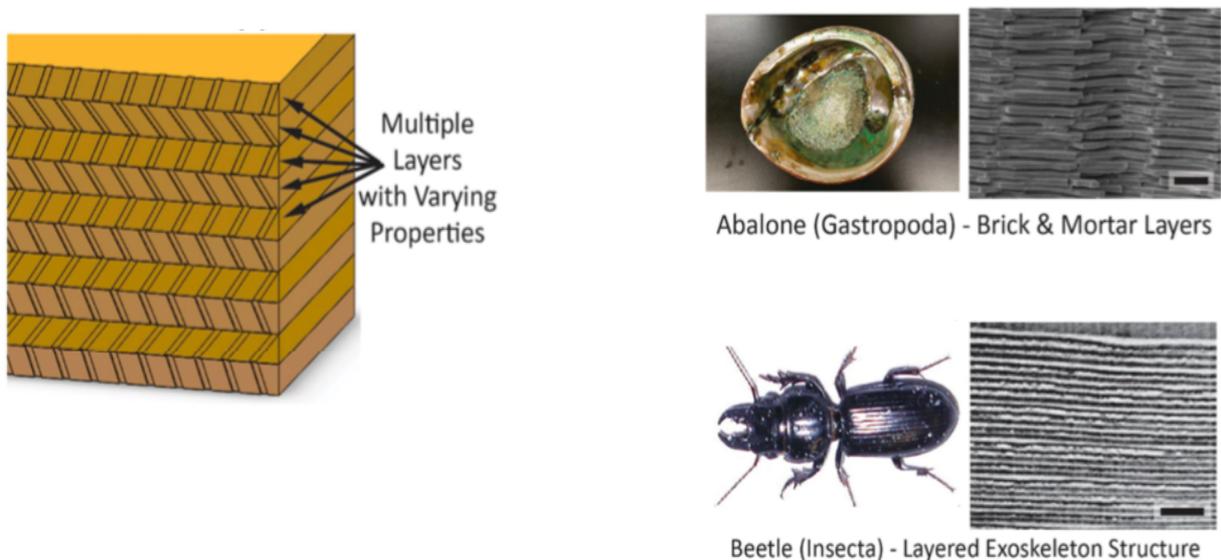


Fig. 2.15: Structure par couches: illustration et exemples

Source : "Structural Design Elements in Biological Materials: Application to Bioinspiration", Meyers et al., Adv. Mat., 2015

<sup>26</sup> Ibid

Par ailleurs, ces propriétés de structurations peuvent se combiner hiérarchiquement pour améliorer les performances selon différentes contraintes.

Nous pouvons le voir de manière assez éclairante en prenant l'exemple des crustacés dont l'exosquelette est réputé pour sa résistance à la compression. Le graphique ci-dessous (Cf. Fig. 2.16) permet d'illustrer cette hiérarchie structurelle à travers l'exosquelette d'une araignée de mer :

- de chaînes de chitine à l'échelle nanométrique ;
- ces chaînes de chitine se regroupent ensuite en nanofibrilles ;
- à une échelle proche du micromètre, les nanofibrilles de chitine se regroupent en une fibre de chitine, constituant ainsi la structure fibreuse multi-échelle ;
- ces fibres de chitine se regroupent ensuite longitudinalement en "matelas" de fibres, matelas dirigé de manière unidirectionnel ;
- ces matelas de fibres se superposent les uns aux autres avec un décalage directionnel constant à chaque couche, nous retrouvons la structure hélicoïdale, et en particulier la structure de Bouligand.

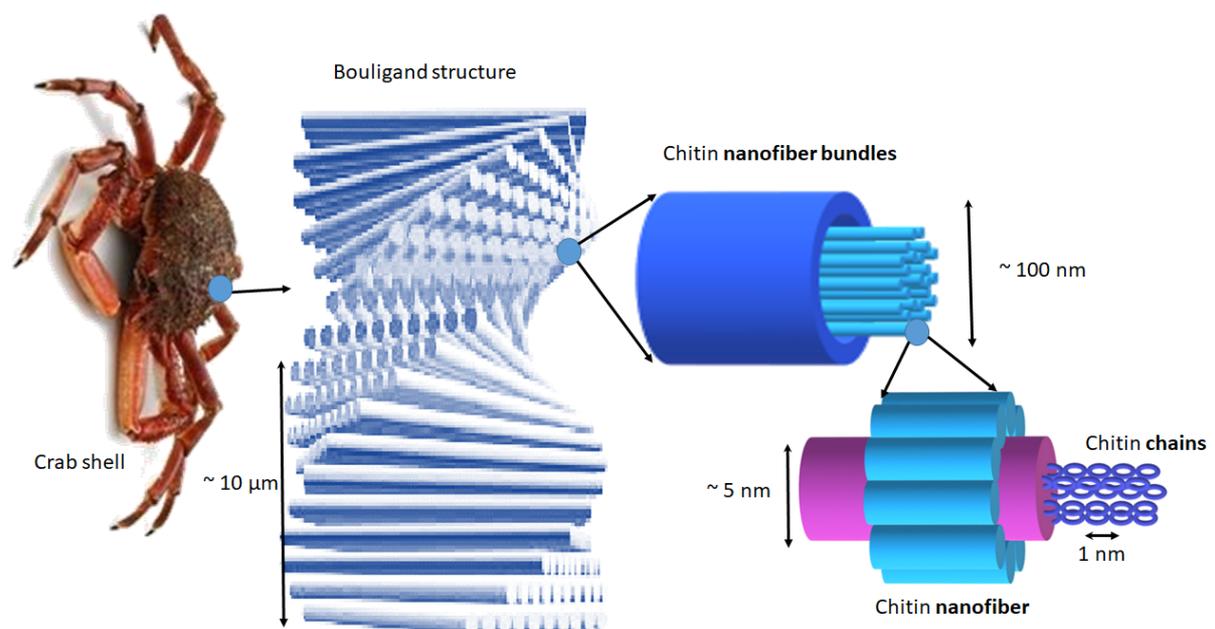


Fig. 2.16: Structure hiérarchique d'une carapace de crustacés  
Source : glycopedia.eu

Après avoir vu les éléments structurels des matériaux biologiques permettant aux organismes vivants d'améliorer leurs performances mécaniques, est-ce qu'il est possible que ces derniers - au travers de l'évolution - aient d'autres ressources pour améliorer leurs performances au-delà de ce que nous avons vu ?

C'est-ce que l'on va voir avec cet exemple publié dans Nature en Octobre 2020, présentant le cas singulier d'un petit coléoptère diabolique : *Nosoderma diabolicus*<sup>27</sup>

### Etude de cas : Coléoptère *Nosoderma diabolicus* - un design fonctionnel au chevet d'une performance remarquable

*Nosoderma diabolicus* (anciennement "*Phloeodes diabolicus*") est un petit insecte de l'ordre des coléoptères, mesurant entre 1 et 2 cm de long cm que l'on trouve sur la côte ouest des Etats-Unis. (Cf. Fig. 2.17)

Cet insecte est localement connu pour deux particularités :

- Tout d'abord, contrairement à bon nombre de ses cousins coléoptères, il ne vole pas, préférant, au fil de son évolution, souder ses ailes et rester un insecte parcourant le sol.
- Sa seconde particularité est d'être considéré comme indestructible. Vous pouvez tenter de l'écraser à coups de pied, ou de rouler par-dessus en voiture, il en ressortira indemne. L'équipe de Riviera et al. a tenté de comprendre comment ce scarabée arrivait à être aussi résistant.

Après analyses, ils ont pu confirmer que cet insecte avait une résistance extraordinaire à la compression, nécessitant au minimum 150 Newton de force (N), soit l'équivalent de 39,000 fois son poids. À titre indicatif, les chercheurs précisent que le passage d'une voiture soumettrait 100 N de force via son pneu, et la force exercée entre notre pouce et l'index, de 25 N à 62 N.<sup>28</sup>

Comment cet insecte parvient-il à une telle résistance, doublant celle de ses autres cousins coléoptères (max. 68 N) ?

La solution révélée par l'équipe est double. Elle résiderait dans une structuration optimisée de son exosquelette, et surtout dans un design spécifique permettant de gérer et dissiper les forces de compression autour de ses organes vitaux.

---

<sup>27</sup> « Toughening mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle », Riviera et al., Nature, 2020  
<sup>28</sup>



Fig. 2.17: *Nosoderma diabolicus*

Source : « Toughening mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle », Rivera et al., *Nature*, 2020

- a. Une structuration renforcée de son exosquelette

#### Description de l'exosquelette<sup>29</sup>

L'exosquelette de *N. diabolicus* (ND) est composé de deux parties principales structurant son exosquelette : 2 élytres soudés mécaniquement à sa médiane, une cuticule ventrale.

- Élytres :

Les élytres correspondent à deux membranes extérieures recouvrant et protégeant les ailes des coléoptères lorsqu'ils sont au repos. Dans le cas de *N. diabolicus*, ses 2 élytres se sont soudés mécaniquement par le dessus et le long de l'abdomen. Ces 2 élytres soudés forment donc une carapace supérieure qui sera l'interface principale avec toute charge extérieure menaçant le coléoptère.

- Cuticule ventrale :

Cette carapace repose sur une *cuticule ventrale*, c'est-à-dire la partie inférieure protégeant et supportant les organes par le dessous. Cet emboîtement entre ces 2 parties de l'abdomen se fait via 3 supports latéraux, que nous verrons plus en détail par la suite.

Le graphique 2.18 illustre la coupe médiane et la configuration de ces 2 parties principales le long de l'abdomen.

---

<sup>29</sup> Ibid

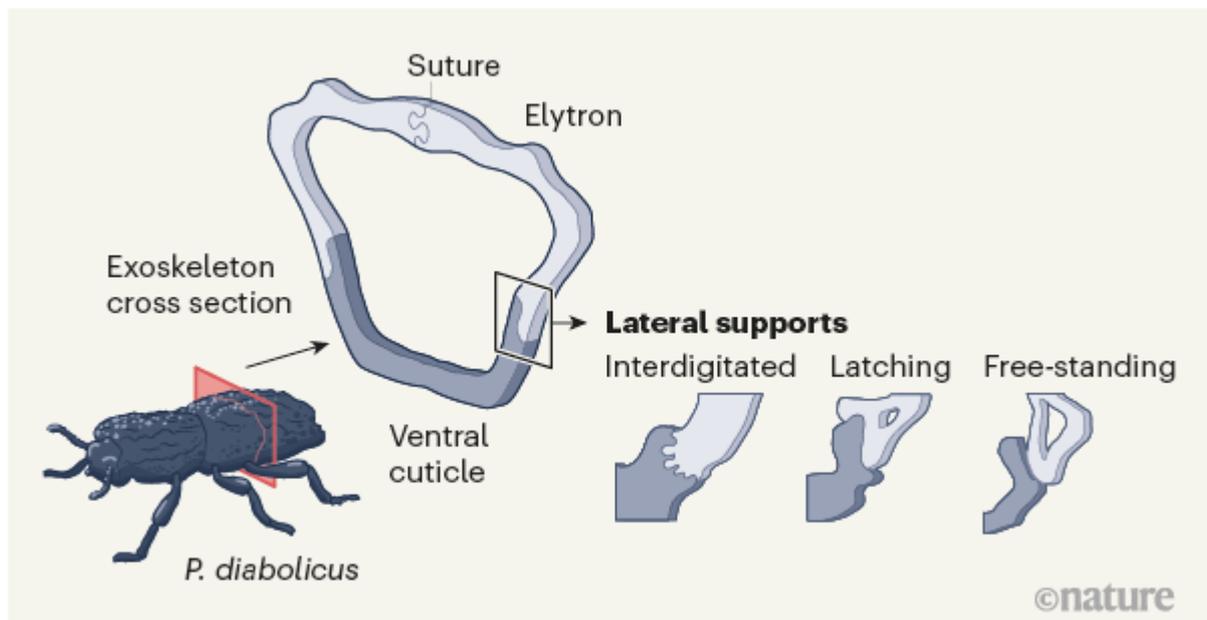


Fig. 2.18: Nosoderma diabolicus - Coupe transversal et support latériaux

Source : « Toughening mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle », Rivera et al., Nature, 2020

### Composition et structuration de l'abdomen<sup>30</sup>

La structure soudée formée par les élytres est composée principalement de chitine. La chitine est structurée hiérarchiquement selon trois motifs (Cf. Fig. 2.19) :

- D'abord, *en fibres* de chitine regroupant des nanofibrils pour l'échelle la plus basse ;
- Puis, ces fibres se torsadent de manière pseudo-*hélicoïdal* ;
- Enfin, ces fibres torsadées s'assemblent *par couches* se superposant de manière concentrique les unes sur les autres jusqu'à la surface des élytres.

Cette structuration hiérarchique permet donc d'assembler 3 motifs autour de la chitine afin d'assurer une résistance à la compression et à la tension de manière verticale et le long de l'abdomen.

Au-delà de sa composition, l'exosquelette de ce "cuirassé" possède deux caractéristiques supplémentaires et distinctes impliquées dans cette protection hors-norme : la *suture médiane* qui fusionne les deux élytres, et une *interface latérale* qui relie et soutient les élytres à la cuticule ventrale (Cf. fig. 2.18).

### Suture Médiane<sup>31</sup>

Comme nous n'avons vu plus haut, la suture médiane fournit un verrouillage mécanique entre les deux élytres. Ces sutures emboîtées ont été adoptées comme stratégie dans de nombreux systèmes biologiques pour améliorer les performances mécaniques.

Dans ce cas précis, la suture médiane consiste en un agencement de segments saillants - appelés "lames" - s'emboîtant comme deux pièces de puzzle sur toute la longueur de l'abdomen (cf fig. 2.19).

L'équipe de chercheurs en ont déduit que cet emboîtement associé au nombre de lames permet une *distribution relativement uniforme* des contraintes à travers la suture et à empêcher la rupture entre ces éléments mécaniquement imbriqués. Il s'agit donc là d'une première stratégie mécanique pour jouer sur les contraintes appliquées à la surface du scarabée.

Une autre stratégie observée par les chercheurs au niveau de la suture correspond aux couches stratifiées de fibres de chitine parcourant le tour de la suture. De manière remarquable, il a été observé que lorsque la pression exercée sur le scarabée approche le point de rupture au niveau de l'emboîtement des lames, les couches stratifiées de chitine se désolidarisent les unes des autres afin de dissiper de manière significative la pression exercée et éviter une fracture totale. Ainsi, et contrairement aux matériaux homogènes, qui se rompent généralement au niveau de leur col ou de leur partie la plus fine, cette "délamination" des couches stratifiées permet une libération considérable des contraintes et une dissipation de l'énergie, évitant ainsi une rupture catastrophique au niveau du col des pales de la suture.

---

<sup>30</sup> Ibid

<sup>31</sup> Ibid

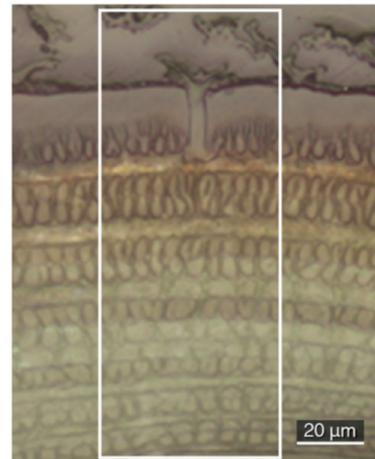


Fig. 2.19: *Nosoderma diabolicus* - Structuration hiérarchique des élytres au niveau de la suture médiane  
 Source : « Toughening mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle », Rivera et al., Nature, 2020

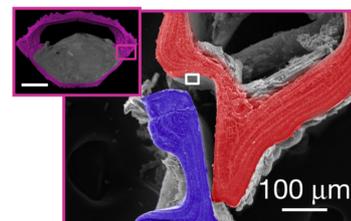
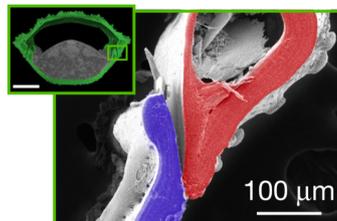
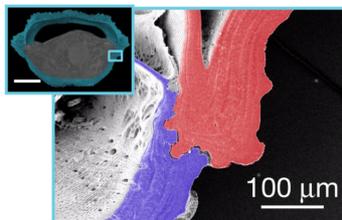
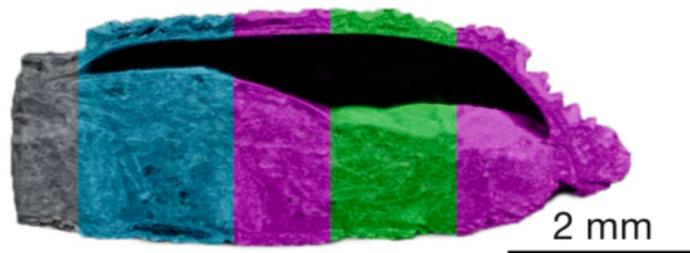
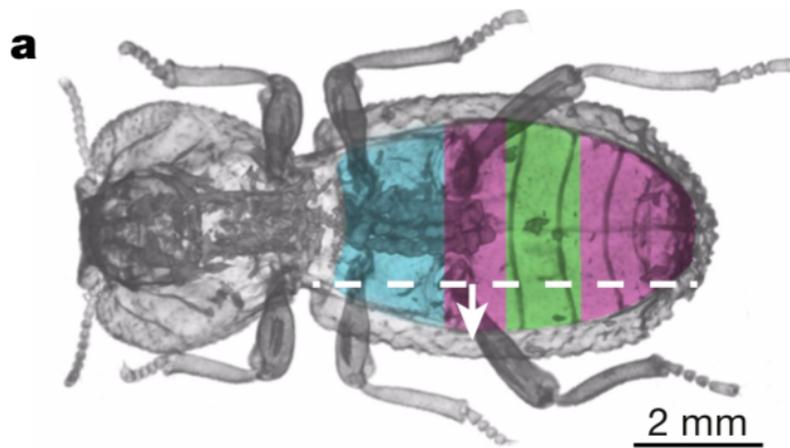


Fig. 2.20: *Nosoderma diabolicus* - Coupe transversal et support latéraux: “emboîté”, “à loquet”, et “autoporteur”  
 Source : « Toughening mechanisms of the elytra of the diabolical ironclad beetle », Rivera et al., Nature, 2020

Ainsi la carapace supérieure formée la soudure mécanique des deux élytres a deux rôles : d'une part uniformiser la pression exercée sur celle-ci, et par ailleurs, elle inclut une sorte de valve de secours en désolidarisant la structure fibreuse interne dans le cas où la pression exercée menace la suture des élytres.

Toutefois, ces stratégies n'expliquent pas encore complètement l'ensemble des performances. En effet, les derniers ressorts de *N. diabolicus* pour échapper à la pression se situe au niveau des interfaces latérales.

### Interfaces Latérales

Tout le long de l'abdomen, la partie supérieure des élytres protégeant le scarabée se repose sur la cuticule ventrale. Ce support est assuré via trois architectures latérales distinctes : support emboîtée ("*interdigitated*", support à loquet ("*latching*"), et un support autoporteur ("*free-standing*") (cf Fig. 2.18). Ces architectures se fondent les unes dans les autres et varient selon les différentes parties de l'abdomen sur toute la longueur du corps (cf Fig. 2.20).

Lorsqu'une charge menaçante est appliquée sur le périmètre supérieur de la cuticule, ces supports ont des rôles distincts et complémentaires.

#### *Support emboîté*

Le *support emboîté* incorpore un emboîtement sutural presque complet reliant les élytres à la cuticule ventrale et présentant la réponse mécanique la plus rigide. Cette articulation hautement intégrée se situe à l'avant de l'abdomen, et offre une protection maximale au thorax et aux organes vitaux en fournissant un support fixe à la base des élytres arqués pour résister aux moments de flexion. (cf Fig. 2.20, zone bleue). Il s'agit donc d'un mécanisme protégeant la partie critique du scarabée.

#### *Support à loquet*

Le deuxième support se trouve un peu plus à l'arrière de l'abdomen (cf Fig. 2.20, zone verte), où ne se trouve aucun organe vital. Il comporte un système de verrouillage qui s'enclenche lors de la compression, permettant un déplacement de la charge vers l'arrière avec une contrainte minimale à l'interface.

#### *Support autoporteur*

Le dernier support se situe à l'arrière de l'abdomen, de part et d'autre du support à loquet (cf Fig. 2.20, zone violette). Ne supportant aucune charge, ce support est dépourvu de toute véritable connexion mécanique entre les élytres et la cuticule ventrale. Ainsi, lorsqu'une contrainte est appliquée, celle-ci diminue sensiblement le long de ce support, par rapport au *support emboîté*.

Dès lors, il est supposé que les supports *autoporteurs* et les supports *à loquet* permettent la déflexion des élytres et augmentent donc l'absorption d'énergie pendant les événements d'écrasement en fournissant de la souplesse, tandis que les supports *emboîtés* augmentent la rigidité.

L'assemblage de ces différentes caractéristiques permet donc d'activer au sein de sa structure des stratégies diverses et complémentaires dédiées à la protection de *N. diabolicus* lors de contraintes extérieures sur son exosquelette, rendant ce scarabée cuirassé quasiment indestructible au sein de son environnement

Nous avons ainsi vu que les matériaux biologiques représentent une alternative crédible aux matériaux synthétiques, à la fois par leurs caractères écologiques intrinsèques - se basant uniquement sur un nombre limité d'atomes abondants, et se synthétisant à température et pression ambiante - par leurs performances mécaniques intrinsèques se situant au même niveau que nos matériaux synthétiques, et peuvent même être atteindre des performances résistance-rigidité supérieures à nos composites en combinant différents types de structures.

Toutefois, il est nécessaire de comprendre comment ces matériaux sont produits dans la nature, afin de pouvoir dessiner des possibilités où nous pourrions produire et assembler des matériaux biologiques.

## La biosynthèse et la biofabrication (« green food web »)

Une fois que nous avons abordé l'intérêt des matériaux biologiques, la prochaine étape consiste à savoir et comprendre comment faire pour assembler ces matériaux et concevoir des produits répondants à nos besoins ?

### La Biosynthèse ou production de la matière

En effet, comment font les organismes pour produire leurs matériaux ? L'araignée pour produire cette soie enviée par nos scientifiques et industriels ? L'ormeau pour produire une nacre extrêmement résistante à la compression ?

Ici, nul besoin, de chaleur à plusieurs centaines de degrés, ou de solvant toxiques. Le vivant, minimisant l'énergie, s'appuie sur un outil biologique particulier - les "enzymes" - via un procédé de *biosynthèse*, appelé également *anabolisme*.

Les enzymes sont des protéines produites par les micro-organismes permettant d'assembler les molécules en molécules plus complexes, ou à l'inverse de les désassembler en molécules plus simples. Dans le cas de la biosynthèse, les enzymes impliquées se comportent comme un "poste à souder" moléculaire. En la présence d'un composé chimique, ces protéines permettent donc d'assembler ensemble deux éléments chimiques simples en une molécule plus complexe.

Toutefois, la particularité des enzymes tient du fait que selon l'enzyme utilisé, cette dernière ne va pas souder tous les composés à proximité. Elle ne va garder son action d'assemblage qu'à certains composés bien spécifiques, telle une serrure ayant besoin de sa clé - ou en l'occurrence ces deux clés - pour s'ouvrir (Cf. graphe 2.21).

Dans le schéma ci-contre, deux molécules simples (une de couleur jaune, et une autre de couleur bleue) sont présentes. Une fois qu'elles sont mises en contact avec les emplacements spécifiques et respectifs de l'enzyme, cette dernière se met en action et procède à l'assemblage des deux molécules en une chaîne de molécules plus longues. Nous obtenons alors un sous-ensemble d'un biopolymère (couleur verte). Les enzymes n'étant pas altérés après réaction, ils sont alors de nouveaux disponibles pour itérer ce processus de multiples fois jusqu'à l'obtention d'un polymère de taille de plusieurs milliers de perles.

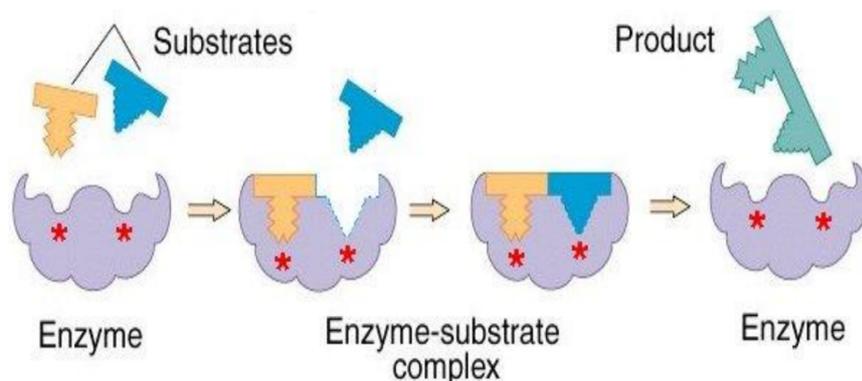


Fig. 2.21: illustration de l'action d'une enzyme lors de la biosynthèse

Ainsi, la biosynthèse consiste en la génération de produits naturels au travers de réactions enzymatiques, ne nécessitant ni forte chaleur, ni forte pression. La figure ci-dessous (Cf. Fig 2.23) permet d'ailleurs de comparer la différence des procédés de fabrications entre matériaux synthétiques et matériaux biologiques pour trois familles de matériaux : verre, céramique et fibres.

Ces procédés sont à la fois très similaires dans leurs principes, et très différents dans leurs fonctionnements, mettant en avant leurs impacts respectifs. Ainsi, alors que la céramique est produite en chauffant et pressurant le kaolin à hautes valeurs, les coquillages créent leurs nacres en procédant à la biominéralisation du carbonate de calcium à température et pression ambiante, et dans l'eau !

Dès lors, comment pourrions-nous nous inspirer de ces procédés biologiques pour créer des matériaux biologiquement inspirés avec nos technologies ?

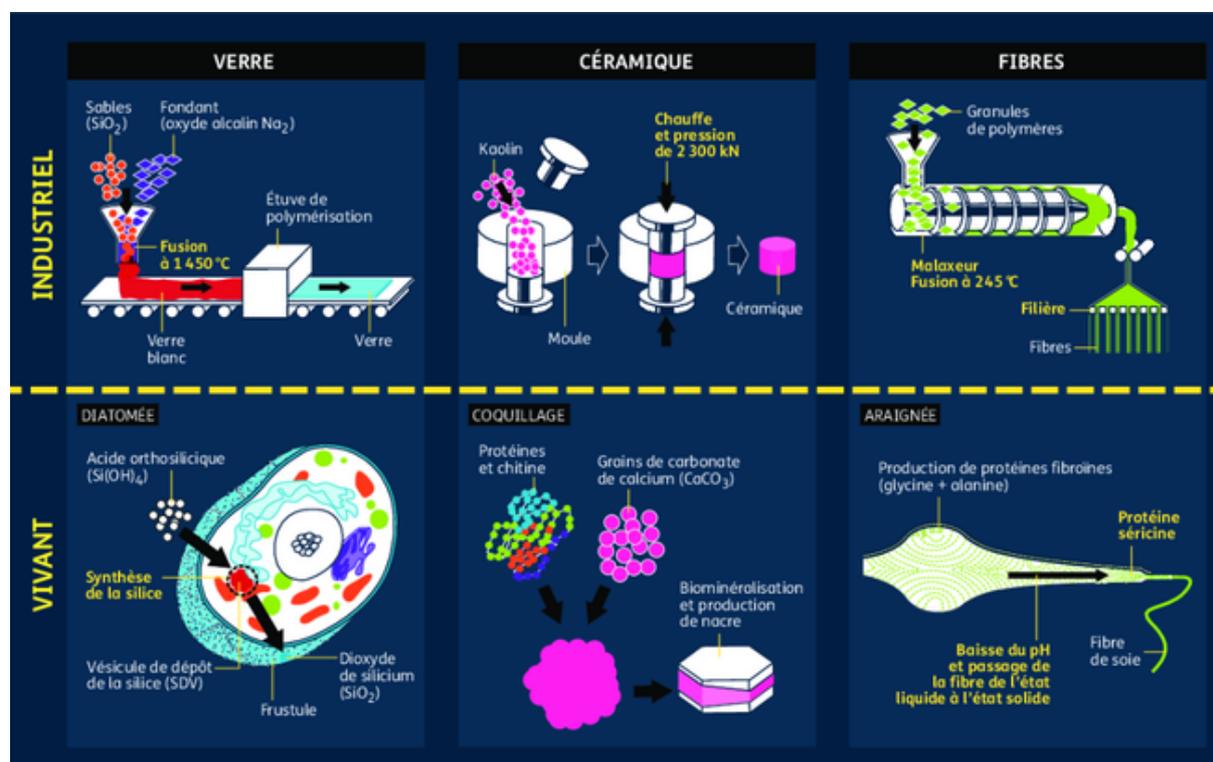


Fig. 2.22: illustration comparative des procédés de fabrication de matériaux synthétiques versus biologiques

## La Biofabrication

La biofabrication est un procédé se reposant sur le vivant et ses mécanismes biochimiques pour concevoir et créer. Elle utilise de nouveaux moyens disruptifs alliant biologie, biotechnologie, design et technologies (i.e. imprimante 3D) pour concevoir de nouveaux matériaux et de nouvelles formes.

Cette discipline, qui a émergé à la fin des années 1960 sous l'impulsion d'artistes associant Arts et Vivant, s'est petit à petit structurée jusqu'à aujourd'hui pour y inclure biotechnologies et nouvelles technologies. Aujourd'hui, au sein d'une communauté de plus en plus nombreuse d'acteurs et regroupant toujours plus de projets et d'initiatives, on trouve principalement deux approches en biofabrication :

- 1) une fabrication en collaboration avec le vivant
- 2) une fabrication utilisant la biologie de synthèse

### *Une fabrication en collaboration avec le vivant*

Dans cette première approche, les projets se consacrent à la création et à la conception en collaborant avec le vivant. C'est le vivant qui est au centre de la création et l'humain intervient pour la guider dans le sens de la création voulue.

#### *Collaboration avec des vers à soie - Nori OXAM, 'Silk Pavilion'*

Nori OXAM, fondatrice du Mediated Matter Lab au sein du MIT Media lab, explore à travers son projet '*Silk Pavilion*' cette collaboration entre le vivant et les technologies 3D. Grâce à cette association, ils ont pu créer un pavillon en 3D tissée en soie grâce à la collaboration de 6500 vers à soie.<sup>32</sup>

Pour ce projet, l'équipe a monté un échafaudage dont l'armature en fer dessinait 26 panneaux. Une imprimante 3D a alors permis de compléter cette structure primaire en tissant 1 seul fil de soie à travers cette structure aidée par un logiciel d'optimisation (Cf. Fig. 2.23).

Une structure secondaire est alors développée uniquement sur la base des vers à soie (Cf. Fig. 2.24).

Dans cette seconde partie, plus de 6500 vers à soie sont posés à un endroit précis de la structure (Cf. Fig. 2.25) et leur cheminement a permis de tisser et recouvrir les espaces de la structure primaire.

Le résultat est une structure 3D extrêmement complexe qu'il aurait été difficile, voire impossible de réaliser par une autre méthode. (Cf. Fig. 2.26)

---

<sup>32</sup> <https://mediatedmattergroup.com/silk-pavilion>



Fig. 2.23: Structure primaire du pavillon  
Credit : Mediated Matter Group

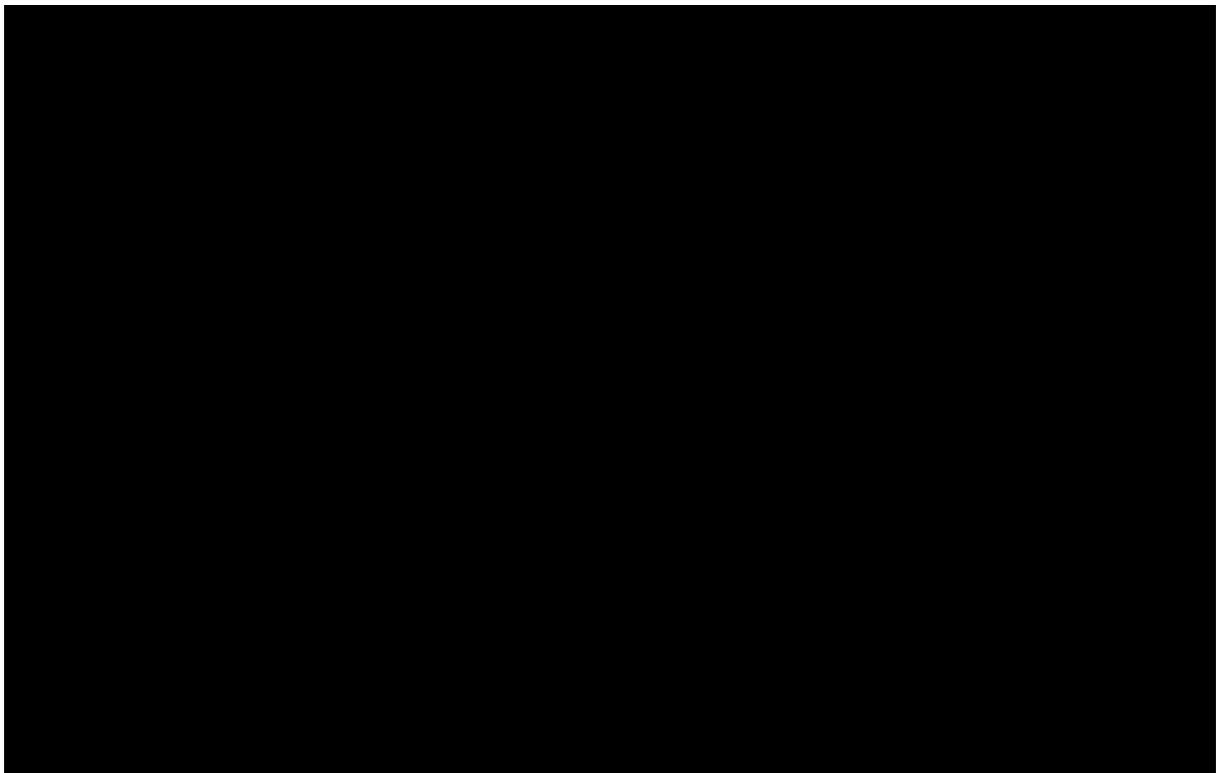


Fig. 2.24: Vers à soie parcourant la structure primaire et tissant la structure secondaire  
Credit : Mediated Matter Group



Fig. 2.25: Vue d'ensemble des vers à soie et de la structure secondaire produite  
Credit : Mediated Matter Group



Fig. 2.26: Rendu final de la structure produite en bio-collaboration  
Credit : Mediated Matter Group

### Collaboration avec des bactéries pour la biominéralisation - BioMASON

Dans le cadre de la biominéralisation, c'est la collaboration avec la bactérie *Sporosarcina Pasteurii* qui est intéressante. Cette bactérie - en la nourrissant de certains nutriments - va sécréter un composé chimique qui va engendrer une transformation du carbonate de calcium (i.e. ce qui constitue le calcaire) en pierre (plus précisément en une de ses formes cristallisées, nommée *calcite*).

De fait, en injectant ces bactéries au sein d'un milieu contenant beaucoup de calcaire, il est possible de transformer ce milieu en une nouvelle forme monolithique.

C'est ainsi que la start-up BioMASON a utilisé ce procédé pour construire des briques en pierre, sans besoin de four pour cuire des briques à plus de 1,000°C. (Cf. Fig. 2.27)



Fig. 2.27: Rendu des produits biominéralisés via la bactérie *Sporosarcina Pasteurii*  
Credit : BioMASON

Enfin, pour compléter cette partie, nous pouvons citer Ecovative, entreprise américaine, qui réalise des produits destinés au packaging en collaborant avec les champignons.

Ce procédé consiste à faire pousser du mycélium sur un substrat qui permettra au champignon de se nourrir et de se développer. Le mycélium va alors se propager sur l'ensemble du substrat, qui deviendra alors un nouvel objet prêt à être utilisé (Cf. Fig.2.28).

Ce projet est intéressant pour plusieurs raisons. D'une part, le mycélium possède de nombreuses propriétés : c'est un isolant acoustique et thermique, il est léger, et ininflammable, ce qui en fait un matériau parfait pour le packaging.

L'autre aspect intéressant est que la création d'objets en mycélium peut s'adapter à la forme du substrat. Il est alors facile de pouvoir concevoir des formes sur mesure pour certains objets, comme une protection pour les bouteilles de vin, par exemple (Cf. Fig. 2.29)



Fig. 2.28: Culture de mycelium se développant sur substrat, et rendu final de plaque de mycelium  
Credit : Ecovative



Fig. 2.29: Exemples de produits finaux à base de mycelium développé par Ecovative  
Credit : Ecovative

### *Une fabrication utilisant la biologie de synthèse*

La seconde approche consiste à faire intervenir les biotechnologies pour produire des composés qu'une collaboration avec le vivant ne permettrait pas. Dans ce contexte, on modifie génétiquement des bactéries type E.coli pour permettre une production de composés organiques voulue, notamment des enzymes.

Cette approche soulève de nombreuses questions notamment éthiques, car les possibilités de dérives et d'incidents incontrôlés sont non négligeables, surtout avec des législations variant selon les pays. Nous y reviendrons dans la partie 3.

Nous pouvons citer deux exemples illustrant le potentiel de cette approche.

#### *Soie d'araignée - AMSilk / Thunderbolt*

AMSilk et Thunderbolt sont deux entreprises ayant réussi à produire de la soie d'araignées synthétiques. En utilisant des procédés biotechnologiques, ils ont pu produire les enzymes nécessaires à la production des protéines constituant les toiles d'araignées.

Cette prouesse biotechnologique a permis la conception de quelques produits emblématiques - une cravate tissée (Cf. Fig. 2.32) - ou des collaborations marquante comme avec Adidas (Cf. 2.33) ou Stella McCartney.



Fig. 2.30: Production de soie d'araignée par AMSilk  
Credit : AMSilk

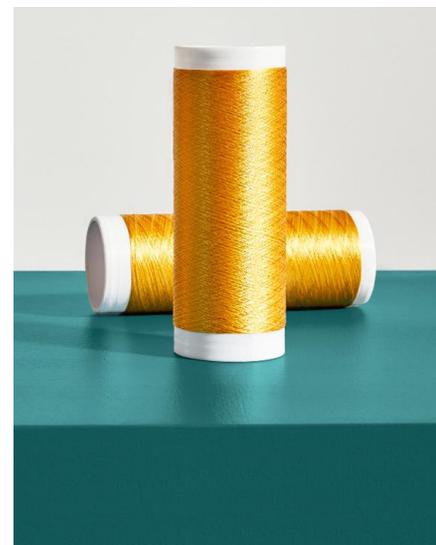


Fig. 2.31: Fils de soie d'araignée par Thunderbolt  
Credit : Thunderbolt



Fig. 2.32: Cravate tissée en soie d'araignée par Thunderbolt  
Credit : Thunderbolt



Fig. 2.32: Collaboration Adidas x AMSilk  
Credit : AMSilk

*Woodoo - Bois translucide - Lignine remplacée par une résine naturelle*

Woodoo est une jeune entreprise française qui a réussi à modifier la composition du bois pour la rendre translucide. Pour réussir cet exploit, l'entreprise a créé une enzyme modifiée lui permettant de décomposer efficacement la lignine, cette "colle" opaque qui permet de structurer le bois. En injectant cette enzyme dans le bois, ce procédé leur permet par la suite de réinjecter une résine naturelle transparente tout en gardant la structuration du bois.

Cela leur permet d'obtenir une nouvelle forme de matériau naturel que l'on ne pensait possible (Cf. Fig. 2.34).

Par ailleurs, la composition de ce nouveau bois permet également de remodeler si besoin le bois de façon à obtenir des formes pouvant répondre à des nouveaux usages (Cf. Fig. 2.35)



Fig. 2.34: Échantillon de bois translucide produit par Woodoo  
Credit : Woodoo

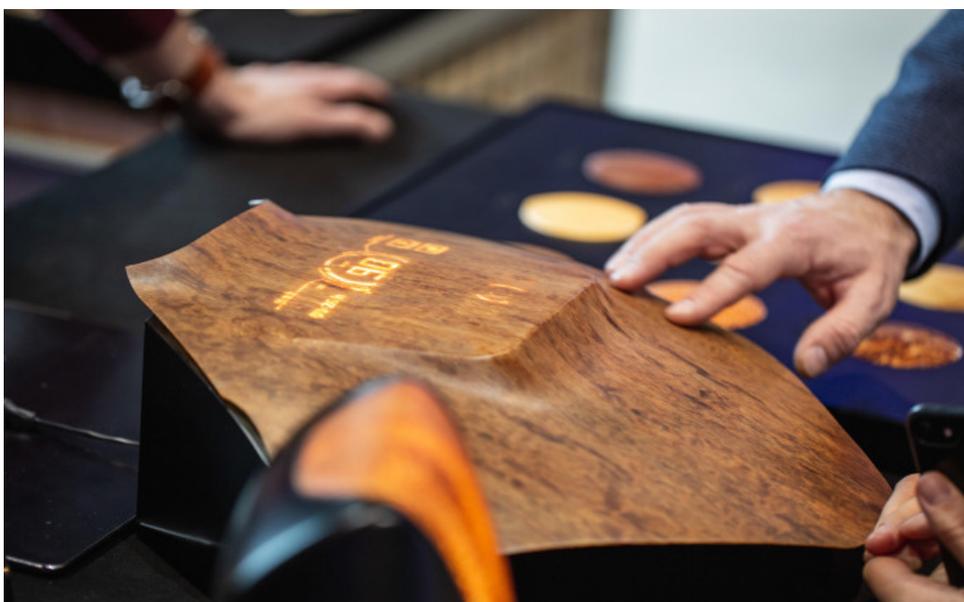


Fig. 2.35: Prototype de bois translucide et moulé produit par Woodoo  
Credit : Woodoo

## Décomposition et biodégradabilité (“brown food web”)

### Décomposition dans la Nature

Le développement et renouvellement naturel de la biosphère se réalisent principalement grâce à un phénomène : *le cycle des nutriments*. Les nutriments nourrissant les producteurs primaires sont transformés en matériaux biologiques et sont transmis le long de la chaîne alimentaire à chaque consommation par les prédateurs, jusqu'à ce qu'ils soient remis à disposition dans le sol, lors de la fin de vie des organismes ou bien lors des décharges d'excrétions.

Sans ce cycle, les sources de nutriments ne seraient pas renouvelées et on pourrait difficilement imaginer la biosphère se développer au-delà de quelques cycles, une fois que l'ensemble des nutriments seraient complètement utilisés. La biosphère se retrouverait alors dans un modèle similaire au modèle industriel linéaire du 19<sup>e</sup> siècle et 20<sup>e</sup> siècle avec les conséquences que nous connaissons.

Dès lors, cette gestion de la fin de vie des matériaux biologiques et ce retour des nutriments à la base de la chaîne alimentaire devraient nous intriguer. Car ce système est la clé permettant de fait un modèle circulaire régénératif vertueux, ouvrant une perspective de circulation des ressources, et une production quasi infinie de matériaux contribuant à son propre développement, le tout presque sans énergie.

### *Comment cette gestion naturelle fonctionne-t-elle ?*

Comme l'énonce Jean WEISSENBACH dans son ouvrage “Dépolluer la planète”<sup>33</sup>, tout composé (i.e. molécule) chimique présent dans la nature subit 3 destins :

- 1) Ce composé reste en l'état, car il n'interfère pas avec les éléments composants la biosphère. C'est par exemple le cas du charbon qui s'est formé par l'accumulation de composés aromatiques. Cette accumulation a pu se faire car aucun élément n'a interféré avec ce composé.
- 2) Ce composé est utilisé tel quel par le vivant. Ce composé répondant exactement au besoin de certains organismes, il est assimilé comme ressources sans transformation particulière. C'est le cas notamment des graisses ou sucre qui ne sont donc présents qu'à l'état de traces dans la nature.
- 3) Ces composés sont dégradés en éléments plus simples jusqu'à un certain stade. Dans ce cas, on peut observer deux types de dégradation :
  - a) Une dégradation de la matière résultant d'éléments abiotiques, comme par exemple : les rayons du soleil, les frottements, la chaleur, l'humidité, ou encore de l'oxygène. On parle alors de *décomposition abiotique*.
  - b) La dégradation est le fruit de l'action de micro-organismes, insectes ou champignons. On parle alors de *biodégradation*.

---

<sup>33</sup> Ibid, #4, P.7

Le cas de la biodégradation mériterait que l'on s'y attarde un peu plus, car il s'agit d'une dégradation active nécessitant peu d'énergie. Comme pour la biosynthèse, la biodégradation s'effectue par l'action des enzymes.

Toutefois, dans le cas de la biodégradation, les enzymes ne jouent plus le rôle d'assembleur, mais sont plutôt des "ciseaux" moléculaires, découpant les liaisons au sein d'une molécule complexe pour en faire deux molécules plus simples (Cf. Fig. 2.36).

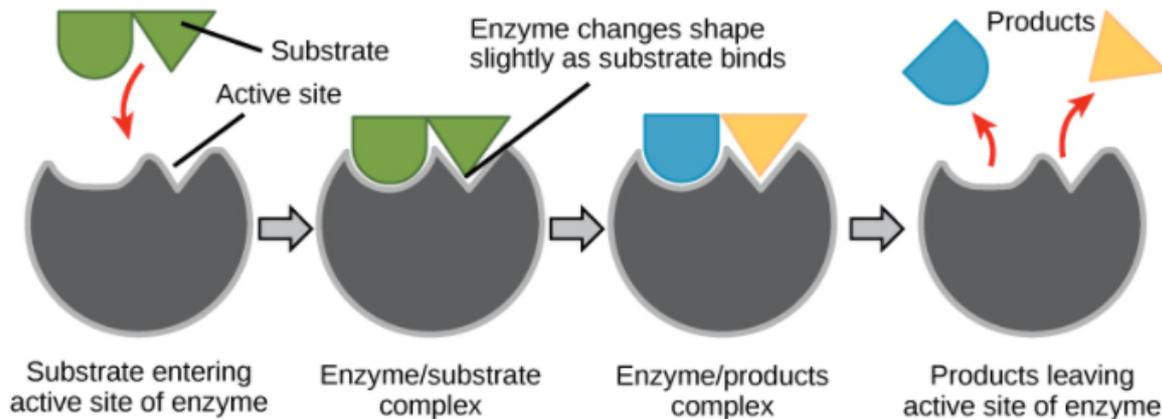


Fig. 2.36: Illustration de l'action d'une enzyme lors de la biodégradation  
Credit : OpenStax College, Biology, CC BY

Comme dans le cas de la biosynthèse, ces "ciseaux" ne sont spécifiques qu'à certains composés. Ainsi, la cellulose, présente en abondance dans les plantes, peut être découpée de différentes façons grâce à l'action d'une enzyme particulière, type "cellulase". Cette cellulase n'agirait ainsi que sur les molécules de cellulose, mais n'agirait pas sur d'autres composés, permettant ainsi de cibler les matériaux à décomposer de manière précise.

C'est d'ailleurs le cas pour les humains et ruminants. Lorsque nous ingérons des plantes contenant de la cellulose, notre estomac arrive à la décomposer au moyen de bactéries composant notre flore intestinale et produisant de la cellulase<sup>34</sup>.

Nous retrouvons ce même couplage avec l'enzyme *kératinase* pour les polymères de kératine, *chitinase* pour les chaînes de chitine, etc...

Ces deux mécanismes de dégradations - abiotiques et biotiques - s'effectuent de manière superposée et influent sur la vitesse de dégradation de la matière organique.

Ainsi, la première clé d'analyse sur la capacité de la biosphère à recycler ses nutriments, consiste notamment à des mécanismes biologiques - et non biologiques - permettant de dégrader les molécules du vivant jusqu'au niveau des nutriments.

<sup>34</sup> <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellulase>

## Recyclage bio-inspirée

Que représenterait un mécanisme de gestion bio-inspirée des matériaux au sein de cette “chaîne alimentaire marron” ?

Deux options peuvent être imaginées :

- 1) Une option passive se reposant sur la biodégradation naturelle
- 2) Une option active consistant au recyclage enzymatique des matériaux

Ces deux options représentent selon Nathalie GONTARD, spécialiste des polymères, les deux étapes ultimes du recyclage<sup>35</sup>.

### 1) Biodégradation naturelle et régénérative

Dans ce premier cas, il s’agirait de laisser la place à la biodégradation naturelle, grâce aux micro-organismes, à l’humidité et autres conditions naturelles. Il s’agit d’un processus long mais vertueux permettant de remettre en circulation les nutriments empruntés par nos produits bio-inspirés, et donc d’obtenir l’opportunité de remettre ces composés et nutriments dans nos écosystèmes naturels.

#### *Exemple 1 - Laboratoire de Biarritz (Matériaux non structurants)*

Nous pouvons trouver ce type de procédé avec le projet des laboratoires de Biarritz et leur crème solaire bioinspirée. Cette crème solaire associe uniquement des composés d’origine naturelle dont un composé anti-UV venant d’une algue rouge locale (*Gelidium Corneum*). Lorsque la crème est enlevée par la mer lors des baignades, tous les composés sont assurés d’être biodégradés par l’environnement marin et de redevenir des composés assimilés par les chaînes alimentaires.

#### *Exemple 2 - Matériaux structurants*

Dans le cas de matériaux structurants, il s’agirait d’exercer une pression mécanique sur les produits composés de matériaux bio-inspirés afin de les broyer, puis de concentrer ce réduit dans un compost industriel dans des conditions favorisant la biodégradation naturelle. Ce type de système est déjà utilisé notamment dans le cas de méthaniseur, et pourrait donc s’étendre aux matériaux bio-inspirés. Le compost qui résulterait pourrait permettre la régénération des écosystèmes naturels dégradés et des surfaces agricoles.

---

<sup>35</sup> Ibid, #5, p.7

## 2) Recyclage enzymatique des matériaux :

L'autre possibilité serait de séparer les composés organiques et minéraux de ces produits bio-inspirés par l'action d'enzymes, pour être ensuite recyclé comme source de composés primaires pour la conception de nouveaux matériaux et produits.

### *Recyclage enzymatique des polymères synthétiques - CARBIOS*

Ce type de procédé de "recyclage enzymatique" fait office de nombreuses recherches, et commence à voir le jour. Nous pourrions citer l'exemple industriel de CARBIOS, qui a réussi à concevoir une solution performante de recyclage des packaging plastiques PET. Grâce à une solution d'enzymes modifiés, CARBIOS est capable de dissocier les colliers de perles des polymères, de récupérer ces perles tout en éliminant ceux qui se sont attachés aux colliers, et ré-attacher les perles en collier. Le résultat est un plastique recyclé comme neuf, sans dégradation des performances et des structures de polymères.



Fig. 2.37: Illustration des produits plastiques recomposé grâce aux plastiques recyclés par Carbios  
Credit : Carbios

### *Allons plus loin - le concept de bioraffinerie*

Un autre concept qui est en train de se développer avec le recyclage enzymatique, est le concept de "bioraffinerie". C'est notamment ce concept qu'explore le laboratoire de Recherche MANTA via ces recherches dans la revalorisation des déchets marins - on utilise plutôt le terme de co-produits - grâce aux actions enzymatiques et à la chimie verte. Le but de ce concept serait notamment de pouvoir décomposer les déchets organiques des industriels en leurs composants principaux, et les isoler de façon à pouvoir être réutilisé par d'autres acteurs.

Ainsi, les centaines de tonnes de crustacées d'un transformateur industriel pourraient être décomposées en ces composés primaires à savoir : chitine, carbonate de calcium, colorant astaxanthine, et le reste de protéines. Ces composés pourront ensuite être revendus à d'autres acteurs ayant besoin de ces matériaux pour leurs activités.

Exemple circulaire complet - Transducteur piezoelectrique (Prototype)

Un autre exemple pourrait être illustré par les résultats de recherche d'une équipe coréenne<sup>36</sup>. Celle-ci a réussi à créer un transducteur – c'est un à dire un composant transformant une forme d'énergie en une autre, comme un microphone par exemple – uniquement à base de chitine et d'une lame en argent.

À la fin de son utilisation, ils ont ensuite baigné ce prototype dans une solution d'enzyme de chitinase, ce qui leur a permis d'obtenir d'un côté la lame d'argent qui pouvait être réutilisée, et une solution de nutriments issus de la dégradation de la chitine.

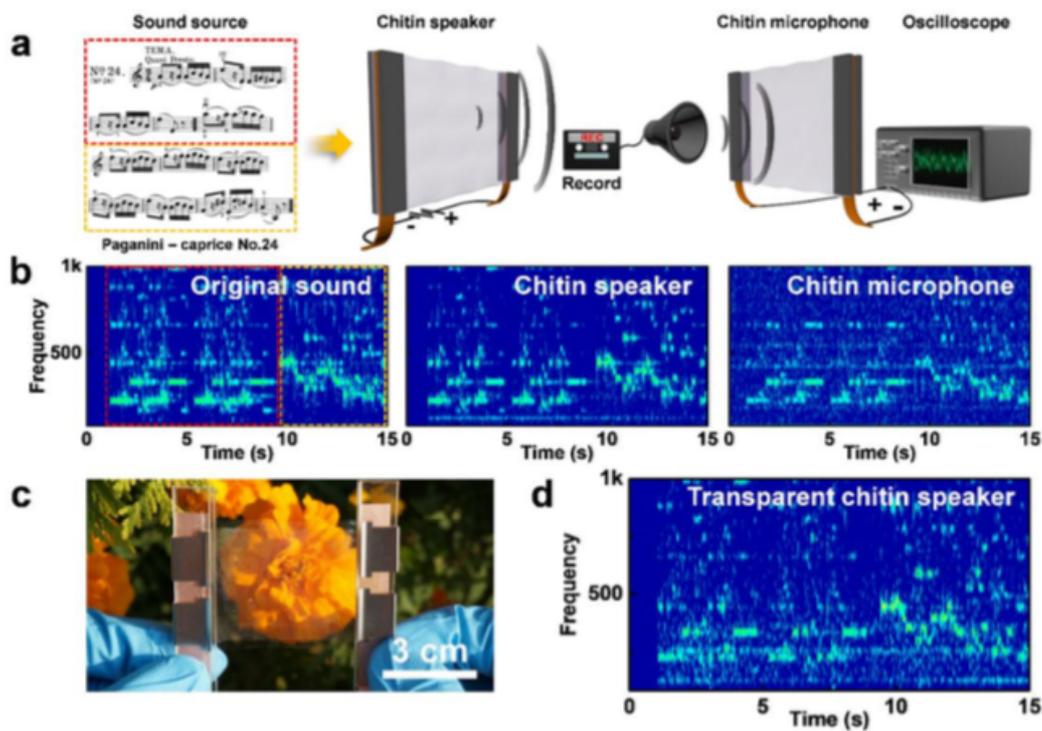


Fig. 2.38: Illustration du prototype piezoelectrique à base de chitine et lamelles d'argent

Credit : « Biodegradable, Electro-active Chitin Nanofiber Films for Flexible Piezoelectric Transducers », Kim et al., Nano Energy, 2018

<sup>36</sup> « Biodegradable, Electro-active Chitin Nanofiber Films for Flexible Piezoelectric Transducers », Kim et al., Nano Energy, 2018

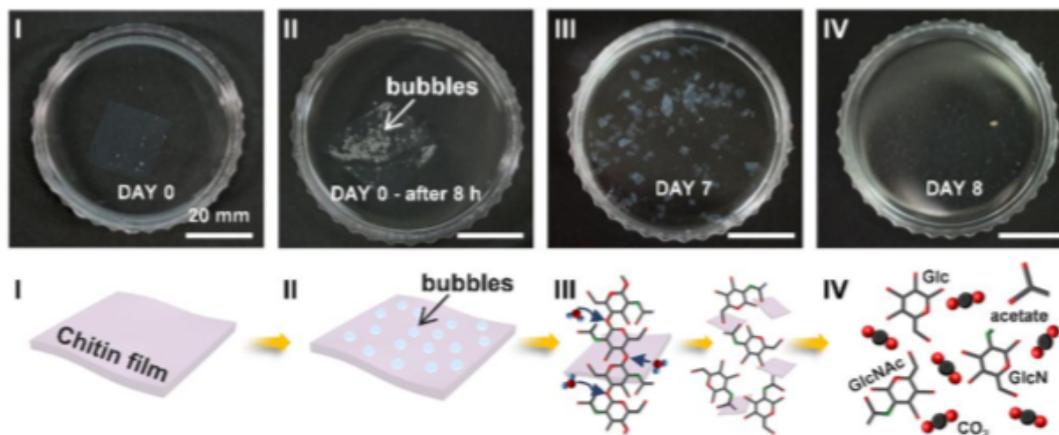


Fig. 2.39: Biodégradation du transducteur à base de chitine en le baignant dans un bain de chitinase  
 Credit : « Biodegradable, Electro-active Chitin Nanofiber Films for Flexible Piezoelectric Transducers », Kim et al., Nano Energy, 2018

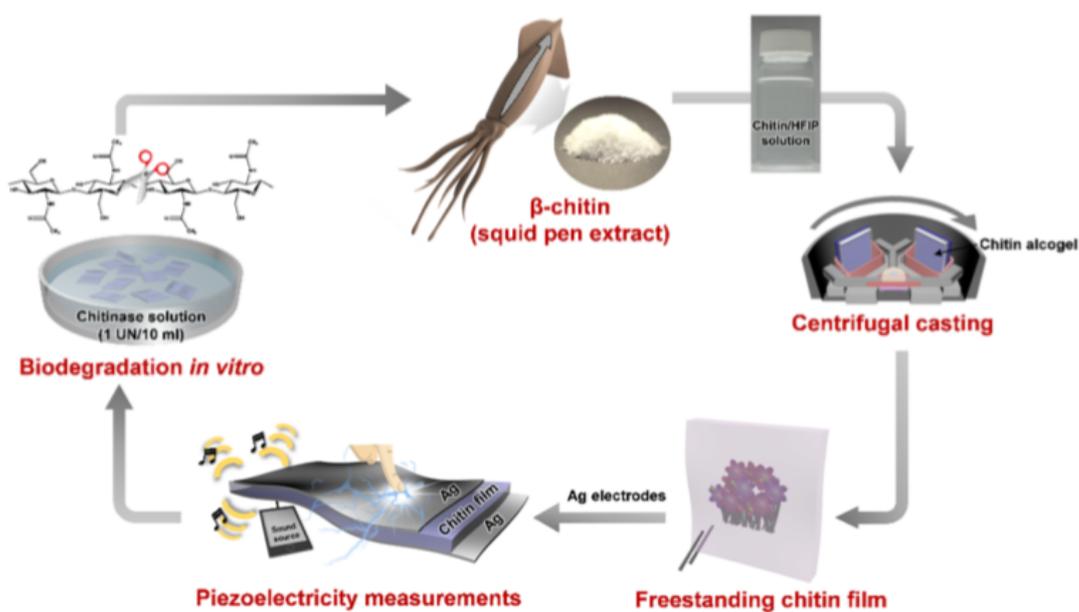


Fig. 2.40: Vue d'ensemble de la fabrication et biodégradation d'un composant piezoélectrique bio-inspirée  
 Credit : « Biodegradable, Electro-active Chitin Nanofiber Films for Flexible Piezoelectric Transducers », Kim et al., Nano Energy, 2018

## Interactions entre les chaînes de production et de décomposition (« Brown Food Web »)

Alors que la biosynthèse et la décomposition peuvent nous inspirer vers un nouveau modèle soutenable se basant sur des matériaux biologiques s'inscrivant dans le développement et la régénération des écosystèmes, il serait intéressant de se pencher sur les interactions qui peuvent lier ces deux processus.

Car s'inscrire dans ce modèle implique que ces nouveaux matériaux s'assemblent, se désassemblent et reviennent soit dans la composition de nos produits de manière circulaire, soit dans nos écosystèmes en démobilisant ces ressources et les réinjectant sous forme de nutriments au bénéfice du vivant. Dans le premier cas, ce flux de matière circulaire créera de facto une interaction entre les "acteurs-producteurs" et les "acteurs-décomposeurs", avec des changements dynamiques à prévoir sous forme de boucle de rétroactions. Comprendre les interactions et les paramètres sous-jacents entre ces deux processus pourrait ainsi nous permettre d'identifier des facteurs clés à instaurer pour une gestion optimisée entre nos besoins et la régénération de nos écosystèmes.

*Kejun Zou*, chercheur à l'Institut Marie Curie, s'est justement penché sur les interactions dans nos écosystèmes entre les chaînes alimentaires vertes (production primaire) et marrons (décomposition)<sup>37</sup>. À travers ses travaux de recherche, il a pu analyser le cycle des nutriments et ses effets potentiels sur ces deux chaînes alimentaires et ses impacts.

Plusieurs analyses clés issus de ses travaux peuvent être relevées dans le cadre de notre problématique.

---

<sup>37</sup> *Effects of interactions between the green and brown food webs on ecosystem functioning*, Kejun Zou, 2017

### *Le rôle structurant du cycle des nutriments*

Le cycle des nutriments joue un rôle structurant au sein de nos écosystèmes en parcourant l'ensemble des chaînes alimentaires. Dans un cas, les nutriments peuvent limiter le développement des populations et influencer les chaînes alimentaires. Dans un autre cas, les interactions entre les groupes fonctionnels des chaînes alimentaires peuvent influencer le flux de nutriments. Dès lors, ce flux circulaire est dynamique s'ajustant et impactant le développement des écosystèmes sous forme d'une boucle de rétroaction.

### *Le recyclage des nutriments*

Autre point abordé dans ses travaux, les nutriments sont massivement recyclés au sein des écosystèmes, représentant une forte interaction entre producteurs et décomposeurs. En effet, dans de nombreux écosystèmes, le volume de nutriment gardé au sein du flux représente un volume bien supérieur à ce qui est ajouté et retiré du cycle des nutriments, permettant ainsi au système de compenser éventuellement un possible déficit externe de nutriments.

Par ailleurs, des travaux de recherches modélisant le cycle des nutriments ont mis en évidence l'impact de la dynamique de ces flux sur la résilience des écosystèmes. Les modèles suggèrent qu'une forte dynamique du flux de nutriments permet d'accroître la production de la biomasse, mais cette biomasse sera restaurée plus difficilement en cas de déficit des nutriments. Ainsi une trop forte circularité des nutriments entre producteurs et décomposeurs peut rendre les écosystèmes moins résilients aux perturbations.

### *Interactions chaîne verte-marron: Compétition vs Mutualisme*

Les producteurs primaires au sein de la chaîne "verte" et les décomposeurs au sein de la chaîne "marron" ont des interactions à la fois compétitives et mutualistes. (Cf. Fig. 2.41)

- **Compétition** : La relation de compétition se produit généralement lorsque deux organismes se disputent une même ressource. Dans le cas de l'interaction producteur-décomposeur, la relation de compétition se produit lors de l'immobilisation des nutriments pour leurs propres besoins de développement.
- **Mutualisme** : Le mutualisme est une interaction entre deux organismes entre au sein de laquelle les deux partenaires bénéficient de leurs activités respectives. Dans le cas de l'interaction producteur-compositeur, ce mutualisme est effectif : les producteurs primaires rejettent des détritiques qui sont une source de nourriture pour les décomposeurs, et les décomposeurs utilisent ces détritiques pour reminéraliser les réserves de nutriments dans lesquelles puisent les producteurs primaires pour leurs développements. Toute perturbation au sein de cette relation mutualiste peut sévèrement impacter le cycle des nutriments et la dynamique des écosystèmes.

### Composition stoichiometrique:

La composition stoichimétrique des flux de nutriments peut également jouer un rôle important entre les producteurs et décomposeurs. Dans le cas où un déséquilibre se produirait dans l'immobilisation ou le besoin de nutriment pour les décomposeurs, une augmentation forte de l'immobilisation des nutriments par les décomposeurs se produisent renforçant dès lors l'intensité de la compétition avec les producteurs et affaiblissant leurs relations mutualistes.

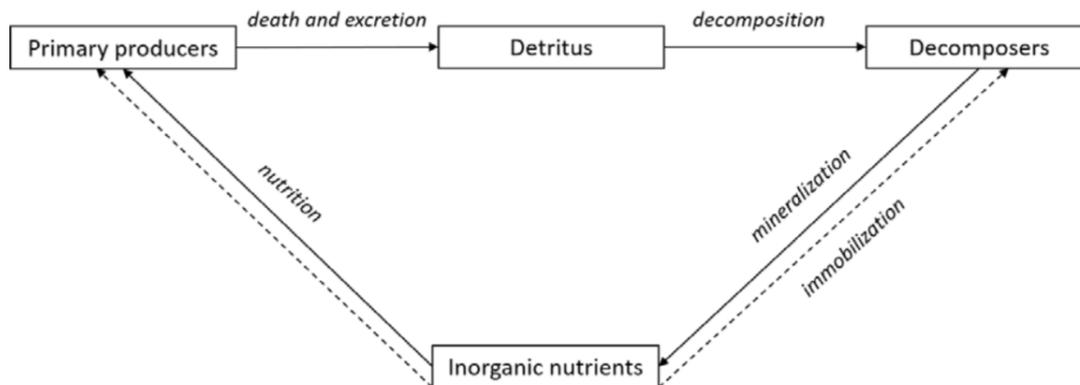


Fig. 2.41: Schéma des interactions compétition/mutualisme entre producteur primaire et décomposeur

Source : "Effects of interactions between the green and brown food webs on ecosystem functioning", Kejun Zou, 2017

La transition vers un design et une gestion bioinspirée telle que nous l'avons vu, pourrait donc permettre à nos sociétés de : (1) produire des matériaux avec beaucoup moins d'énergie via la biofabrication, (2) de concevoir avec des matériaux composants déjà abondamment le vivant et donc compatible avec nos environnements naturels, et (3) surtout de pouvoir gérer la biodégradabilité et le recyclage complet grâce aux enzymes associés aux matériaux produits.

### 1. Réduction drastique de la pollution actuelle

Ce nouveau paradigme pourrait réduire drastiquement la pollution actuelle générée par nos activités. D'une part, nous passerions d'une production se reposant sur des processus énergivores à fortes températures et fortes pressions à une biofabrication à basse température, et basse pression impliquant des cultures de bactérie, ou biologie de synthèse.

D'autre part, nos matériaux synthétiques issus de la pétrochimie deviendraient des matériaux biologiques qui en cas d'accident, ou se retrouvant dans la nature, seraient au contact de conditions plus propice à la biodégradation que ceux de la pétrochimie. Et si la quantité dépassait la capacité de dégradation naturelle, nous pourrions recourir à la biorémédiation via la production d'enzyme ou bactéries actifs<sup>38</sup>.

### 2. Répondant à nos besoins matériels

Ce paradigme permettrait dès lors d'offrir une alternative crédible à nos matériaux synthétiques 'étranger au vivant' (*xénobiotiques*). Nous pourrions développer des matériaux à performances équivalentes, qui pourraient répondre à des besoins pour le développement ou le maintien de nos sociétés actuelles. Ces matériaux seraient structurés différemment, et n'auront sans doute pas la même texture, mais offriraient une réponse crédible aux mesures de limitation de nos matériaux synthétiques à fortes énergies de production, et aux matériaux extraits dont le coût futur pourrait devenir prohibitif à mesure de la raréfaction des ressources.

### 3. Régénératif / Maillon dans le cycle du vivant

Mais, cet imaginaire futur propose surtout de pouvoir se baser sur les mêmes bases que le vivant, empruntant la quantité de nutriments nécessaire à nos besoins afin de soit la réinjecter dans nos écosystèmes en fin de cycle et contribuer à son développement, soit la recycler dans nos cycles de production de manière récursive et dynamique.

Il serait alors possible d'entrevoir une solution pour accompagner notre société vers un futur souhaitable, réconciliant nos besoins matériels nécessaires au fonctionnement de nos sociétés, et une cohabitation, voire un partenariat, avec nos écosystèmes.

Toutefois, quelles seraient les implications possibles de ce nouveau paradigme ? Est-on bien sûr que l'on ne déplacerait pas le problème ? Peut-on identifier des limites possibles ?

---

<sup>38</sup> Ibid, #4, p.7

## Partie 3 - Quelles implications ? Quelle réconciliation possible ?

Ce nouveau paradigme - des matériaux bio-inspirés composés avec les mêmes briques de base que le vivant et gérés de manière circulaire - peut soulever de nombreuses questions.

### Une autre forme de pollution possible ?

#### *La nature est sujette à des pollutions naturelles*

Même si la production et la gestion de ce nouveau genre de matériaux bio-inspirée peuvent significativement réduire les pollutions anthropiques que l'on observe aujourd'hui, il reste un risque que notre production et consommation puissent produire certaines formes de pollution.

En effet, une pollution s'opère lorsqu'une quantité d'un composé produit un effet toxique sur l'environnement. Or, cet effet toxique n'est pas forcément dû au composé en soi, il peut s'activer à partir d'une certaine quantité : "c'est la dose qui fait le poison", selon Paracelse. Tout comme boire trop d'eau ou trop de caféine peut avoir un effet toxique pour notre corps, ou tout comme le rejet d'une trop grande quantité de phosphore peut avoir des effets toxiques dans un milieu aquatique, un tel déséquilibre peut survenir avec des composés naturels.

Ainsi, effectuer une transition vers un système où les molécules biologiques sont assemblés, utilisés puis désassemblés à l'échelle industrielle amène ce risque de déséquilibre de la dose et de la capacité de l'environnement à l'absorber. Ainsi que se passerait-il lors d'une fuite d'un grand volume de solution concentré en carbonate de calcium ? Ou d'un accident impliquant un dévers d'enzyme de cellulase dans un environnement naturel ?

### *Une pollution corrélée au comportement ?*

Car le risque est surtout là, dans le comportement de nos sociétés à pouvoir manipuler et utiliser ces composés sans risque. Or, l'humain est faillible et rempli de biais cognitifs l'incitant aux erreurs d'appréciation et de jugement, comme l'a révélé Daniel Kahneman avec sa description de "Système 1, Système 2".

Et si ces composés font partie du vivant, quels risques ferait-on courir à la biodiversité et à nos écosystèmes en cas d'incidents de notre part ? Est-ce que ce risque serait supérieur ou inférieur au risque de pollution actuel par des composés xénobiotiques ?

### *Une pollution de matériaux biologiques modifiée (reproduit par l'homme)*

Par ailleurs, alors qu'une façon de produire des composés biologiques peut être faite à l'heure actuelle en modifiant le génome de bactéries. Quels seraient les risques si ces bactéries modifiées se retrouvaient dans la nature ? Ne serait-on pas en train d'ouvrir la boîte de Pandore, aux conséquences non mesurables ?

Nous pourrions bien évidemment mettre en place des protocoles sécurisés pour éviter au maximum les accidents au sein de notre pays, voire de l'Union Européenne comme nous pouvons le voir avec le règlement REACH. Mais qu'en est-il dans des pays où la législation serait plus libérale, ou les protocoles et les gestions des substances biologiques seraient laissés à l'appréciation des industriels ?

## Recyclage enzymatique des matériaux synthétiques, une tentation irrésistible ?

Si accéder à des nouvelles technologies moléculaires peut permettre de vraies alternatives pour la survie de nos écosystèmes et de nos sociétés, à quel point cela sera-t-il tentant pour des industriels de rester sur nos acquis, et de les utiliser sur nos matériaux synthétiques ?

Prenons l'exemple de CARBIOS par exemple. En créant ce recyclage enzymatique pour les matières plastiques de type PET, il sera très difficile désormais d'avancer vers des alternatives à ce plastique. Désormais, les industriels du packaging ou de distribution de biens de consommation peuvent conserver leurs structures de production, sans remettre en question l'impact de leurs produits sur nos écosystèmes.

## Immobilisation des nutriments par l'humain: quels impacts ?

Dans cet imaginaire proposé ici, les nutriments, nourrissant le vivant, seraient alors les mêmes briques de base utilisées pour le développement de nos produits. Ils seraient soit créés synthétiquement grâce à des enzymes, soit récupérés par nos déchets organiques, puis assemblés en nouveaux produits pour nos usages avant d'être décomposés et recyclés. Pendant tout ce processus, ces nutriments seraient dès lors immobilisés temporairement, et ne pourraient être utilisés par nos écosystèmes pour leur propre développement.

Est-il possible que cette immobilisation puisse nuire à nos écosystèmes ?

Dans le cas de la revalorisation de ressources organiques existantes, cela peut effectivement devenir le cas, notamment lorsque :

- L'approvisionnement en composés biologiques se fait principalement par cette revalorisation de nos déchets organiques. Cela peut amener une pression à extraire plus de ressources naturelles au détriment de son développement et de sa capacité à se régénérer. Nous pouvons le voir notamment pour les coproduits de la pêche dans des zones non protégées par des quotas, provoquant l'effondrement de certains crustacés notamment.
- L'approvisionnement se fait directement sur des ressources organiques non réglementées. Nous pouvons dans ce cas citer l'initiative d'une jeune start-up "Re-Leaf Paper" qui a créé un processus de production de papier en revalorisant les feuilles mortes. Or, récupérer ces feuilles mortes, c'est immobiliser toute une panoplie de régénération des nutriments qui ne seront dorénavant plus accessibles aux détritivores et producteurs primaires dans le temps imparti pour leurs développements.

C'est pourquoi la bio-collaboration ou la production d'enzyme sont des étapes indispensables afin de lever le stress que peut poser l'approvisionnement par revalorisation.

Enfin, à l'échelle de nos sociétés et de notre démographie, que penser de cette immobilisation des nutriments pour notre production et consommation ? Est-ce qu'il est possible que la quantité nécessaire à notre consommation puisse nuire à l'abondance de nutriments de notre biosphère ? Dans un monde fini, est-il possible que nos sociétés puissent un jour atteindre cette limite où même en termes de nutriments nous pourrions parasiter le développement de nos écosystèmes ? Ou est-ce qu'au contraire, cela amènera une collaboration symbiotique entre nos sociétés et nos écosystèmes, où nos produits pourront régénérer nos écosystèmes dès qu'une limite est atteinte ?

Quelles conséquences en fonction de l'acceptabilité de l'utilisateur ?

*Matériaux biologiques : les nouveaux matériaux "cheap" vecteur d'une nouvelle hyperconsommation ?*

Que se passerait-il si les matériaux bio-inspirés de demain étaient perçus bas de gamme ? Après tout, ils sont composés de molécules naturelles, ils sont censés être biodégradables, ils viennent de matériaux abondants. Si une maturité des processus de biofabrication fait chuter le coût, est-ce que cela pourrait réduire la valeur de ces matériaux aux yeux des usagers ? Et si oui, est-ce que cela ne risque pas de devenir le nouveau matériau bas de gamme que l'on jette pour n'importe quelle raison à nos pieds, pour aller s'empresser d'en acheter un "nouveau" ? Ne risque-t-on pas dès lors de voir émerger une sorte d'effet rebond en termes de consommation qui pourrait amoindrir l'économie de ressources engendrée par ce nouveau paradigme ?

*À performance similaire, qui prime : l'expérience utilisateur ou la fin de vie ?*

Il paraît naïf de penser que les matériaux biologiques puissent répondre à tous nos besoins. Certains métaux seront sans doute nécessaires de par leur conductivité thermique par exemple.

Toutefois, il serait sans doute intéressant de se demander si dans le contexte écologique actuel, nous ne devrions pas repenser notre façon de concevoir et la place à accorder à l'utilisateur ? Car dans un contexte où les matériaux biologiques seraient potentiellement moins "parfaits" que certains matériaux synthétiques en termes de toucher ou d'usage, mais tout aussi performant que ceux synthétiques, quel choix primerait lors de la conception : l'expérience utilisateur ou la fin de vie ?

À moins que la solution ne soit pas dans cette opposition frontale entre un choix écologique au détriment de l'utilisateur ? Peut-être que le design pourrait justement permettre de raconter une nouvelle histoire ou l'utilisateur deviendrait acteur de l'écologie ?

À mesure que l'on se rapproche d'un matériau biologique, quel impact sur notre modèle de société ?

Un matériau biologique a de nombreuses propriétés comme nous l'avons vu. La plupart ont la capacité de se régénérer.

Que se passerait-il alors si à mesure de nos innovations bio-inspirés nos matériaux pouvaient également se régénérer et de fait multiplier son temps de vie ? Quel impact cela aura sur notre modèle économique ? Quel modèle de société devons-nous imaginer pour résister à la tentation de revenir en arrière au détriment de notre biosphère ?

## Conclusion

Les matériaux biologiques et leurs gestions par nos écosystèmes peuvent représenter une solution permettant de répondre à nos besoins matériels tout en participant au développement positif de notre environnement.

De fait, on peut les considérer comme un levier puissant pour réconcilier nos sociétés et notre biosphère, et s'ancrer dès à présent vers un futur souhaitable pour les générations futures.

Toutefois, ce levier amène d'autres questions qu'il faudra répondre afin de pouvoir adapter nos sociétés vers un équilibre compatible avec ce nouveau paradigme

Par ailleurs, ce levier n'est pas suffisant à lui seul car d'autres facteurs indépendants des matériaux continuent de menacer notre biosphère. En effet, même si nous effectuons une transition complète vers une société où tous nos besoins sont répondus par des matériaux biologiques bio-inspirés, notre biosphère et la diversité qui l'habite continuera d'être menacé par notre urbanisation et développement territoriale, par exemple.

Cette piste est donc une voie possible, à explorer, à étudier, à analyser pour nous diriger vers un futur souhaitable.