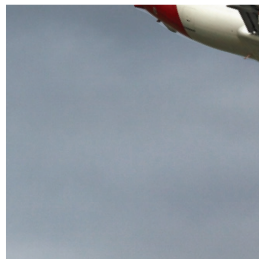
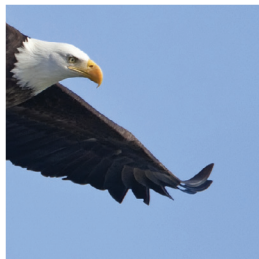
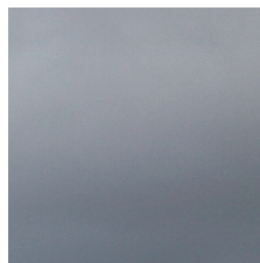
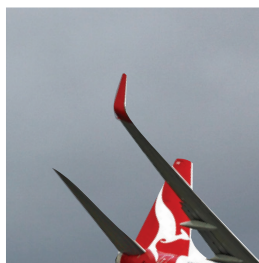


LES **AVIS**
DU CONSEIL
ÉCONOMIQUE
SOCIAL ET
ENVIRONNEMENTAL



Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement

Patricia Ricard

Septembre 2015



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LIBERTÉ - ÉGALITÉ - FRATERNITÉ



CONSEIL ÉCONOMIQUE
SOCIAL ET ENVIRONNEMENTAL


Les éditions des
Journaux officiels

2015-23

NOR : CESL1500023X

Mardi 15 septembre 2015

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Mandature 2010-2015 – Séance du 9 septembre 2015

LE BIOMIMÉTISME : S'INSPIRER DE LA NATURE POUR INNOVER DURABLEMENT

Avis du Conseil économique, social et environnemental
présenté par

Mme Patricia Ricard, rapporteure

au nom de la
section de l'environnement

Question dont le Conseil économique, social et environnemental a été saisi par décision de son bureau en date du 27 mai 2014 en application de l'article 3 de l'ordonnance n° 58-1360 du 29 décembre 1958 modifiée portant loi organique relative au Conseil économique, social et environnemental. Le bureau a confié à la section de l'environnement la préparation d'un avis et d'un rapport intitulés : *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*. La section de l'environnement, présidée par Mme Anne-Marie Ducroux, a désigné Mme Patricia Ricard comme rapporteure.

Sommaire

■ Avis 10

■ Introduction	10
■ Constat	11
■ Inspiration et réalisations biomimétiques : formes, procédés et matériaux, écosystèmes	11
■ Un potentiel économique certain, mais actuellement difficile à évaluer	12
■ Un cadre d'innovation déjà en place	12
■ La comparaison avec l'exemple allemand : l'importance des réseaux	13
■ Freins à la recherche biomimétique en France	14
■ Propositions	15
■ Donner de la visibilité au biomimétisme	15
■ Définir les termes	15
■ Identifier les activités biomimétiques	16
■ Structurer et pérenniser un réseau	16
■ Lever les obstacles aux applications du biomimétisme	17
■ Créer les conditions d'un développement des pratiques biomimétiques en agriculture	17
➤ Améliorer les connaissances	17
➤ Organiser le dialogue	18
➤ Développer la permaculture et la micro-agriculture dans les espaces contraints	18
■ Ouvrir des espaces pour l'innovation	19
■ Les procédés biomimétiques à encourager	20
■ Dynamiser la recherche et le transfert industriel	20
■ Ancrer le biomimétisme dans le paysage éducatif	22
■ Développer l'observation de la nature dans l'enseignement scolaire	22

■ Ouvrir les formations de l'enseignement supérieur	23
■ Progresser vers la durabilité	24
■ Développer les analyses du cycle de vie	24
■ Renforcer les liens entre biomimétisme et biodiversité	25
■ Déclaration des groupes	27
■ Scrutin	42
■ Rapport	47
■ Introduction	47
■ Qu'est-ce que le biomimétisme ?	48
■ Un concept non encore stabilisé...	48
■ Historique : le biomimétisme avant la lettre	48
■ Terminologie du biomimétisme : définitions et différences d'approches	50
➤ De la biomimétique au biomimétisme	50
➤ Du biomimétisme à la bio-inspiration	52
➤ Biomimétisme et nouveaux schémas d'organisation	52
■ ... mais un horizon prometteur	55
■ Les trois dimensions du biomimétisme	55
➤ Des formes particulièrement efficaces	55
➤ Des procédés et matériaux ultra-performants	57
➤ L'équilibre complexe des écosystèmes comme source d'inspiration	60
■ Une approche au service de la durabilité	62
➤ Des enjeux et des contraintes pressants	63
➤ Le biomimétisme dans l'économie de la connaissance	65
➤ Quelques principes de fonctionnement des écosystèmes	67
■ Les domaines d'application actuels et potentiels du biomimétisme	69
■ Des réalisations convaincantes	69
■ La progression de biomimétisme dans l'industrie	70

➤ Les secteurs d'élection du biomimétisme	71
➤ La bio-inspiration au service de la transition énergétique et écologique	75
■ Quel apport de l'approche biomimétique à l'agriculture ?	76
➤ Les principes du biomimétisme appliqués à l'agriculture	76
➤ Des pratiques agricoles qui évoluent	78
➤ L'exemple de la permaculture	78
■ Une architecture biomimétique émergente	81
➤ Quelques principes guident l'architecture biomimétique	81
➤ L'architecture biomimétique : une démarche de conception écologique	82
➤ Le biomimétisme appliqué à l'urbanisme	85
■ D'indéniables perspectives de création d'activités et d'emplois...	86
■ Le potentiel d'activités et d'emplois du biomimétisme recoupe de nombreux champs de l'économie verte	87
■ Le biomimétisme est porteur d'une dynamique pour de nombreux secteurs de l'économie	88
■ La réflexion économique prospective et la mesure du biomimétisme au moyen d'indicateurs clefs se développent, hors de France	89
■ ...mais des précautions à prendre comme pour toute innovation	90
■ Biomimétisme et enjeux de la prévention des risques	91
■ Biomimétisme et enjeux de la durabilité	92
➤ Durabilité environnementale	92
➤ Durabilité économique et sociale	93
➤ Durabilité sociétale	94
■ Les leviers du développement du biomimétisme, en Europe et en France	95
■ Un cadre européen a priori favorable au biomimétisme	95
■ L'importance accordée par l'UE à l'effort d'innovation peut favoriser le biomimétisme	95
■ Mais de nombreux facteurs, selon les acteurs économiques, freinent encore la diffusion de l'éco-innovation et du biomimétisme	97

■ Un effort de structuration de la démarche qui commence à se concrétiser sur le continent européen	100
■ Un travail récent de normalisation soutenu en France par AFNOR	101
■ Une prise en compte inégale de la démarche par le secteur de la recherche et de l'enseignement supérieur	102
➤ La prédominance allemande, conséquence d'un investissement historique en bionique	102
➤ Un développement rapide du biomimétisme en France, mais difficile à quantifier	103
■ L'émergence de stratégies par la constitution de réseaux d'acteurs européens et nationaux	108
■ Des entreprises de plus en plus nombreuses à s'ouvrir à la démarche	110
➤ Les acteurs industriels français face au biomimétisme	112
➤ Quelques exemples de TPE-PME françaises « biomimétiques »	114
➤ La promotion du biomimétisme auprès des entreprises	117

Annexes _____ 120

Annexe 1 : composition de la section de l'environnement	120
--	-----

Annexe 2 : liste des personnalités auditionnées et rencontrées	122
---	-----

Annexe n° 3 : définition normalisée du biomimétisme	125
--	-----

Annexe n° 4 : liste des références bibliographiques	126
--	-----

Annexe n° 5 : table des sigles	128
---------------------------------------	-----

Annexe n° 6 : liste des illustrations	129
--	-----

LE BIOMIMÉTISME : S'INSPIRER DE LA NATURE POUR INNOVER DURABLEMENT¹

Synthèse de l'avis

Aller chercher l'inspiration dans la nature n'est pas une idée neuve. La pratique a été courante tout au long de l'histoire de l'humanité.

Mais imiter la nature pour innover de façon durable, voilà une idée qui prend tout son sens au moment où la France s'engage dans une transition à la fois énergétique et écologique. C'est cette ambition que porte le biomimétisme.

Il s'agit d'une démarche qui invite l'homme à puiser aux multiples sources d'inspiration que lui présente la nature, qu'il s'agisse des formes, des matériaux ou des écosystèmes. Il lui propose d'observer les solutions mises au point et perfectionnées tout au long de l'évolution par le vivant, afin de les reproduire d'une manière qui facilite la résolution des problèmes des sociétés humaines et leur permette de satisfaire leurs propres besoins, tout en limitant la consommation de matières et d'énergie. Le biomimétisme se veut un outil au service du développement durable.

Dans les domaines scientifiques, techniques ou industriels le champ des applications du biomimétisme est vaste et varié : de l'agriculture à l'industrie en passant par l'architecture, les perspectives en matière d'innovation, de création d'activités économiques et d'emplois semblent prometteuses. S'il existe d'ores et déjà un cadre à l'innovation qui inclut une dimension environnementale en Europe comme en France, ainsi qu'un certain nombre d'outils mis à la disposition des acteurs économiques et dont le biomimétisme pourrait bénéficier, les freins à son expansion demeurent. Le présent avis a pour vocation de proposer des solutions pour les lever et aller plus loin. Pour cela, le CESE préconise de :

- **Donner de la visibilité au biomimétisme**

- *Définir les termes :*

Clarifier le champ et la nature du biomimétisme, affirmer son exigence de durabilité, préciser les concepts qui s'y rattachent pour que le biomimétisme devienne un outil clairement identifié de transformation des modes d'innovation et de production.

- *Inventorier les activités biomimétiques :*

Recenser les équipes françaises de recherches (publiques et privées) ainsi que les entreprises qui travaillent sur le sujet, ou adoptent une démarche biomimétique ; Réaliser une étude de marché à l'échelle nationale, européenne, voire internationale ayant pour objectif de rendre plus visible le potentiel économique du biomimétisme.

- *Structurer et pérenniser le réseau :*

Faire bénéficier dans un premier temps le Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis (CEEBIOS) d'un amorçage financier pour animer le réseau et produire les premières études ; constituer une plateforme de compétences sur le biomimétisme.

- **Lever les obstacles aux applications du biomimétisme**

- *Créer les conditions d'un développement des pratiques biomimétiques en agriculture*

¹ L'ensemble du projet d'avis a été adopté au scrutin public à l'unanimité des votants (voir l'ensemble du scrutin en annexe).

Améliorer les connaissances sur les pratiques écomimétiques en agriculture et en mesurer les résultats ; inclure cette thématique dans les programmes officiels des lycées agricoles et dans les formations continues ; organiser le dialogue entre les acteurs de l'agro-écologie et ceux de l'agriculture conventionnelle.

- *Développer la permaculture et la micro-agriculture dans les espaces contraints, en particulier urbains et périurbains*
- *Ouvrir des espaces pour l'innovation en architecture biomimétique*

Favoriser des projets innovants en accordant une souplesse réglementaire, en autorisant par exemple la création d'espaces d'expérimentation ou de démonstration ; ouvrir les cahiers des charges au biomimétisme.

- *Améliorer la recherche et développement en matière de biomimétisme :*

Inciter les industriels à recourir plus souvent à ces procédés innovants ; amplifier l'effort de recherche ; développer une organisation numérique des connaissances ; constituer des groupes de travail transdisciplinaires qui puissent réunir ingénieurs et chercheurs autour d'une même thématique ; inciter les Comités stratégiques de filières du Conseil national de l'industrie à se saisir de la thématique biomimétisme.

- **Ancrer le biomimétisme dans le paysage éducatif**

- *Développer l'observation de la nature à l'école*

Sensibiliser les élèves à la biodiversité dès la maternelle en accentuant le travail d'observation de la nature, premier pas vers la démarche biomimétique ; encourager l'enseignement interdisciplinaire au lycée autour de la thématique de la biodiversité.

- *Promouvoir le biomimétisme dans l'enseignement supérieur*

Identifier les modules d'enseignements relatifs au biomimétisme disséminés dans des enseignements plus larges, les recenser et organiser leur mise en réseau ; développer un réseau d'éducation numérique qui faciliterait la coopération entre institutions d'enseignement supérieur et recherche. Former des professionnels du biomimétisme, capables de servir de pont entre la biologie, la chimie et les sciences et techniques de l'ingénieur.

- **Progresser vers la durabilité**

- *Développer les analyses du cycle de vie*

Demander aux entreprises de procéder chaque fois que possible à des analyses du cycle de vie des produits et technologies biomimétiques et d'en diffuser les résultats ; promouvoir une réflexion systématique sur la totalité du cycle de vie des produits.

- *Renforcer les liens entre biomimétisme et biodiversité*

Traduire en termes de moyens affectés la volonté d'inscrire la biodiversité parmi les priorités des politiques publiques ; traduire dans les faits la volonté de confier à des structures publiques le soin de soutenir les filières du biomimétisme.

Avis

Le biomimétisme :
s'inspirer
de la nature pour
innover durablement

présenté au nom de la section de l'environnement

par Mme Patricia Ricard

Avis

Introduction

Le biomimétisme est une approche qui propose de puiser dans le génie du vivant une source d'innovation durable. Il consiste à observer et à reproduire des propriétés essentielles d'un ou plusieurs systèmes biologiques, pour mettre au point des formes, des matériaux et procédés à la fois innovants et durables. Si l'imitation de la nature par l'homme est présente depuis le début de nos civilisations, le biomimétisme, dans l'acception retenue par le CESE, se donne une exigence de durabilité qui est quant à elle toute récente. Son potentiel est accru par nos récentes avancées technologiques, notamment l'observation à l'échelle nanométrique, qui nous a ouvert un champ considérable d'investigations prometteuses.

Une nouvelle vague d'innovations se dessine, plus étonnante et plus riche que toutes celles qui l'ont précédée. Le biomimétisme est un élément de cette vague, au même titre que la chimie verte, les nanotechnologies, l'écologie industrielle et les énergies renouvelables. En raison peut-être de son rapport au vivant, à la biodiversité, il laisse enfin entrevoir une possibilité de réconciliation de la biosphère et de la technosphère.

Certaines des réponses techniques aux questions que soulève le développement durable ayant reçu une réponse dans la nature, il importe d'exercer notre regard à l'observation attentive du vivant. Nous avons besoin de la biodiversité et de ses services écosystémiques pour garder « les pieds sur terre ».

Les exemples de technologies bio-inspirées sont nombreux, ils sont souvent dignes d'intérêt, parfois porteurs d'enthousiasme et en tout cas facteurs de réussite au regard de nos critères actuels. Cet avis propose d'examiner la réalité des applications de cette approche et d'identifier les freins à son développement.

La France est engagée dans les transitions écologique et énergétique. Elle possède des territoires terrestres et maritimes divers et remarquables. Elle doit légitimement s'intéresser à cette démarche et la promouvoir. Elle dispose des savoirs et compétences auxquels cette méthode d'innovation fait appel. Ils existent déjà dans nos centres de recherche, nos start-up et nos entreprises! Il reste à organiser la collaboration de plusieurs disciplines scientifiques (chimie, biologie, architecture...), de chercheurs, d'ingénieurs, de designers, et bien sûr de naturalistes.

Décrypter une énigme de plusieurs milliards d'années demande un sérieux travail d'équipe : en effet tout est là sous nos yeux ou nos microscopes... façon puzzle. À nous de décider si nous voulons voir se dessiner une belle image de notre futur...

Constat

Inspiration et réalisations biomimétiques : formes, procédés et matériaux, écosystèmes

Pour imiter la nature, l'homme est invité par le biomimétisme à puiser à trois sources d'inspiration.

La première approche s'attache aux formes présentes dans la nature, la seconde aux procédés utilisés par le vivant pour répondre au mieux à une nécessité dictée par son environnement, la troisième aux écosystèmes, eu égard à la performance de ces derniers en matière de durabilité, de productivité, et d'adaptabilité.

Les formes, tout d'abord. De nombreux exemples illustrent l'intérêt qu'il peut y avoir à s'en inspirer. Végétaux, animaux et organismes vivants en général, les sources d'inspiration abondent. En 1941 Georges de Mestral a l'idée de créer un système de fixation auto-agrippant, le Velcro, inspiré des fleurs de la bardane, difficiles à retirer des vêtements ou des fourrures d'animaux où elles se sont accrochées. Plus récemment, l'avant du Shinkansen 500, train à grande vitesse japonais, a été dessiné par référence au bec et à la tête du martin-pêcheur, qui passe rapidement d'un milieu peu dense (l'air) à un milieu plus dense (l'eau). Les formes sont utilisées aussi bien dans la production d'objets usuels que de biens d'équipement ou d'énergie : des nageoires de baleine ont ainsi inspiré le dessin de pales d'éoliennes.

Les matériaux ensuite. Comment le vivant les fabrique-t-il ? Les recherches entreprises pour répondre à cette question ouvrent sur des perspectives en termes d'innovations et d'activités. Le processus de production du vivant propose des solutions alternatives à la synthèse des matériaux. Certaines recherches ont déjà abouti à des productions ou à des applications inspirées par le byssus, fil que produit et utilise la moule pour s'arrimer à son support, ou par la coquille de l'ormeau pour son exceptionnelle résistance. L'utilisation de revêtements imités de la peau de requin sert à optimiser l'hydrodynamisme et l'aérodynamisme d'engins de transport ou d'éoliennes : la phase de test opérationnel d'un vernis à microsillons a débuté en 2013 sur des Airbus de la Lufthansa, avec l'objectif de réaliser des économies de carburant.

Les écosystèmes enfin. Chercher à les imiter ou plus modestement à s'inspirer des interrelations extrêmement complexes qui les caractérisent constitue le stade le plus ambitieux du biomimétisme. Les ensembles pris pour « modèles » sont les écosystèmes « matures », dans lesquels les êtres vivants maintiennent un équilibre dynamique dans le long terme. Des exemples de tels systèmes sont fournis aussi bien par les forêts tropicales que par les récifs coralliens. Si les relations entre les espèces vont du mutualisme, parfois appelé symbiose, lorsque les relations sont bénéfiques pour les deux parties, à la compétition momentanée, l'un des enseignements tirés de leur observation est que les plus fondamentales des innovations d'adaptation aux contraintes du milieu se pérennisent le plus souvent par la coopération.

Les imitations de la nature sont le plus souvent inachevées ou incomplètes : il est rare de parvenir à reproduire les mêmes formes ou matériaux à l'identique, en utilisant les mêmes

procédés. De plus, au niveau actuel de ses connaissances, l'homme n'est pas en mesure de reproduire un écosystème entier.

Des exemples d'applications biomimétiques peuvent être recensés dans l'industrie, mais également en agriculture où de nouvelles pratiques inspirées du fonctionnement des écosystèmes voient le jour, ou encore en architecture où la structuration des écosystèmes alimente la créativité des professionnels. En agriculture, l'approche biomimétique ou éco-mimétique est une démarche fondée sur l'observation et l'imitation des écosystèmes naturels dans le but de construire des agrosystèmes productifs et durables. Plusieurs tendances agronomiques contemporaines s'orientent à des degrés divers dans cette voie. En architecture, et même si les bâtiments ou ensembles architecturaux inspirés de la nature demeurent encore trop peu nombreux, les premières réalisations concrètes témoignent d'un courant en développement.

Un potentiel économique certain, mais actuellement difficile à évaluer

La Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) souligne l'opportunité de développement économique et de créations d'emplois que représente la transition écologique. Dans cette stratégie, le biomimétisme accède au rang d'outil d'une innovation productrice de biens et services durables.

Le projet de loi sur la biodiversité le désigne par ailleurs comme étant l'un des outils des filières de la croissance verte, permettant de valoriser la biodiversité en tant que capital économique. Il le fait en ces termes : « *l'agence...soutient les filières de la croissance verte et bleue dans le domaine de la biodiversité, en particulier le génie écologique et le biomimétisme* ». Les filières de la croissance verte sont également mobilisées par la loi relative à la transition énergétique qui indique dans son article 1^{er} qu'elle « *se définit comme un mode de développement économique respectueux de l'environnement, à la fois sobre et efficace en énergie et en consommation de ressources et de carbone, socialement inclusif, développant le potentiel d'innovation et garant de la compétitivité des entreprises* ». Le biomimétisme doit prendre toute sa part dans cette mobilisation.

A ce stade cependant, pour l'ensemble des secteurs concernés, il n'est pas possible de quantifier quel pourrait être l'impact du biomimétisme en termes de création d'emplois de la transition énergétique et écologique. Faute d'outils appropriés, les réponses aux questions relatives à la part que pourrait prendre le biomimétisme dans cette dynamique restent imprécises.

Au total, il semble que peu d'indicateurs à ce jour prennent réellement en compte le biomimétisme en tant que tel. En France, les indicateurs existants ne mesurent l'activité que des seuls secteurs de l'économie verte : aucun outil ne permet encore ni d'évaluer ni d'anticiper les retombées économiques du biomimétisme.

Un cadre d'innovation déjà en place

Le CESE conçoit le biomimétisme comme une démarche d'innovation durable au service de la transition écologique. Les applications, notamment industrielles, qui en résultent, doivent respecter cette ambition. Selon l'INERIS, les innovations associées au

biomimétisme ne présentent par ailleurs pas de contraintes spécifiques quant à l'évaluation des risques. L'enjeu consiste de ce point de vue à appliquer la même démarche que dans tout autre domaine d'innovation.

Les leviers du développement du biomimétisme sont déjà identifiés pour la plupart et pourraient être rapidement mobilisés, en Europe comme en France. La recherche d'une croissance durable conduit l'UE à se doter de stratégies d'innovation dans lesquelles la dimension environnementale prend une place de plus en plus importante. Les entreprises qui veulent innover sont confrontées aux mêmes difficultés quand il s'agit de biomimétisme que dans n'importe quelle autre situation d'innovation. Elles devraient bénéficier des instruments déjà mis en place dans le cadre de ces politiques.

Le biomimétisme a également, dans certains domaines, fait l'objet d'actions ou de démarches, qui lui sont spécifiquement dédiées. Ainsi deux nouvelles normes internationales ISO ont été élaborées. La première fournit un cadre pour la terminologie relative à la biomimétique dans la science, l'industrie et l'enseignement, le deuxième spécifie les fonctions et les données d'application des méthodes du biomimétisme. Il est évidemment encore trop tôt pour juger de l'impact de ces nouvelles normes, importantes pour les entreprises désireuses d'investir dans ce secteur prometteur, mais qui peuvent représenter un frein aux innovations de rupture des PME et start-up les plus innovantes. C'est l'usage qui permettra de vérifier que le compromis établi sur les deux normes « biomimétisme » garantit un niveau d'efficacité optimale.

En quelques années, le biomimétisme a acquis en Europe une certaine visibilité qui traduit l'intérêt porté à la démarche au sein de cercles très divers qui vont du secteur de la recherche au monde de l'entreprise en passant par les médias. La France participe à ce mouvement.

La comparaison avec l'exemple allemand : l'importance des réseaux

En Allemagne, la bionique - inventée dès la fin des années 1950 - est enseignée depuis longtemps comme une discipline technique scientifique. Elle est synonyme de biomimétisme. De nombreux établissements d'enseignement en Allemagne proposent des formations en biomimétisme/bionique à des étudiants de tous niveaux, dont trois masters de formation initiale.

En matière de recherche, l'Allemagne accomplit un effort soutenu, elle a d'ailleurs joué un rôle moteur dans l'élaboration des normes ISO. Le biomimétisme a bénéficié d'importants financements publics. Plus d'une centaine de structures de recherches sont impliquées dans des activités tournées vers les applications industrielles en relation avec le biomimétisme.

L'émergence de stratégies par la constitution de réseaux d'acteurs européens et nationaux est à la fois une réalité et une nécessité : l'Allemagne, qui a été aussi pionnière en matière de réseaux, l'a compris. Son investissement est ancien. Depuis 2001, elle dispose d'ailleurs d'un réseau en matière de recherche bionique, appelé Biokon, associant scientifiques et organismes œuvrant au développement du biomimétisme et de la bionique, mais sans pour autant s'assigner la durabilité comme objectif exclusif.

En matière de réseaux en France, une initiative remarquable doit être mentionnée : le lancement, en 2012, du projet de Centre européen d'excellence en biomimétisme de

Senlis (CEEBIOS). Les objectifs stratégiques de ce centre sont notamment de constituer un réseau européen de compétences en biomimétisme pour le développement durable, de développer des actions de diffusion de la démarche, de formation et enfin de susciter l'émergence à Senlis d'un espace d'incubation d'innovations bio-inspirées, en lien avec les autres initiatives européennes telles que Biomimicry Europa.

Il pourrait aider à la définition pour la France d'une « feuille de route du biomimétisme », comme il en existe une en Allemagne ou aux Pays-Bas, qui concrétiserait cette ambition. Le financement d'amorçage, qui permettrait de structurer le réseau, d'organiser la communication et de réaliser les études françaises sur le potentiel et les perspectives, n'est cependant pas encore obtenu.

Freins à la recherche biomimétique en France

En matière de recherche comme d'enseignement supérieur, aucune cartographie complète des laboratoires, des structures universitaires ou des formations impliquées dans le biomimétisme n'a été établie à ce jour. Ce travail d'identification est rendu complexe par le fait que le biomimétisme n'apparaît pas toujours comme un objectif d'enseignement ou comme une méthode de recherche. L'inventaire de l'existant et des besoins en formation, en particulier de ceux des entreprises dans l'enseignement scientifique et technologique, reste à réaliser.

En 2012, la recherche liée au biomimétisme mobilisait en France près de quarante-cinq équipes, quatre-vingt-dix en 2015 selon la plus récente estimation, ce qui semble refléter le dynamisme de la démarche. En 2012, le CGDD indiquait qu'il n'existait officiellement en France qu'une seule formation universitaire en biomimétisme.

La recherche française est dynamique, mais elle semble en ce domaine encore insuffisamment organisée et structurée. Les collaborations entre laboratoires sont encore trop peu nombreuses, et le besoin de transdisciplinarité doit être une fois de plus souligné.

Propositions

Donner de la visibilité au biomimétisme

Clarification, identification et structuration sont nécessaires pour conférer de la visibilité au biomimétisme. Il s'agit de conditions indispensables à sa notoriété et son développement.

Définir les termes

Le champ lexical relatif au biomimétisme commence à peine à être ordonné, en particulier grâce aux travaux en cours des instances de normalisation. Cet effort louable, qui n'ira pas sans controverses néanmoins, devrait contribuer à donner au biomimétisme une visibilité qui lui fait encore cruellement défaut aujourd'hui. Non seulement le mot est inconnu ou confus pour le grand public, mais il demeure généralement flou pour les autorités politiques et les décideurs économiques, ce qui complique leurs échanges. Cette imprécision nuit au développement de cette approche et empêche d'en tracer clairement les perspectives.

Actuellement le biomimétisme inclut la bio-assistance. Selon les termes du rapport du CGDD, cette pratique *« consiste à utiliser des molécules d'origine biologique ou des organismes vivants entiers pour imiter des fonctions observées dans la nature, ou les détourner afin de répondre à des défis technologiques »*. Dans le présent travail, notre assemblée a pris en considération cette branche du biomimétisme mais d'aucuns estiment que l'utilisation de tout ou partie d'organismes devrait en être exclue. **Le CESE souhaite que les travaux sur les différents concepts qui se rattachent au biomimétisme se poursuivent et en clarifient en priorité deux dimensions : son champ et sa nature.**

Par ailleurs, certaines approches comme la bionique n'établissent pas forcément de lien entre biomimétisme et durabilité, s'attachant uniquement à l'apport d'une reconstitution artificielle de fonctions remarquables du vivant. **Le Conseil souhaite pour sa part que le biomimétisme devienne un outil de transformation des modes d'innovation et de production, lesquels doivent devenir plus durables : s'inspirer des fonctions et de l'organisation du vivant doit être l'occasion d'une réconciliation de la technosphère et de la biosphère.**

Une fois les termes définis, il importera d'intégrer le vocable approprié (biomimétisme, biomimétique...) de façon systématique dans les textes ayant un rapport avec la recherche, les appels à projets, les appels d'offre, les évaluations, les statistiques... alors que les projets en lien avec le biomimétisme n'apparaissent jamais en tant que tels aujourd'hui en raison de leur caractère transversal par nature. Ils pourront alors être plus facilement éligibles aux programmes et aux aides européennes et nationales. Le CESE appelle l'attention des départements ministériels sur cette question, en particulier ceux de la recherche, de l'industrie et de l'écologie. Il importe en effet de créer un réflexe « biomimétisme » dans la culture ministérielle pour crédibiliser la démarche et lui conférer reconnaissance politique et institutionnelle. Par ailleurs, pour informer et sensibiliser plus largement l'opinion sur la problématique du biomimétisme, notamment dans le but de susciter des vocations

et l'attrait des financeurs, des initiatives d'animation de type journée, festival ou autre événement relatif au biomimétisme pourraient être organisées.

Identifier les activités biomimétiques

Considérant que le biomimétisme est un marché aux perspectives de croissance significatives, de plus en plus d'entreprises s'y intéressent en tant qu'instrument d'innovation durable, principalement aux États-Unis, en Allemagne et en Asie.

En France, le mouvement s'est amorcé et ne demande qu'à s'épanouir, mais il reste encore trop souvent cantonné au niveau de la recherche. Le CESE peut témoigner d'un dynamisme certain et de la diversité des recherches liées au biomimétisme comme de leur écho international. Le nombre des entreprises impliquées dans ce champ d'investigation, le développement et la commercialisation de procédés ou produits biomimétiques demeurent en revanche modestes.

Afin de disposer d'une vision réaliste de ce que représente le biomimétisme en France, **le Conseil demande une actualisation du rapport du CGDD de 2012 consistant en un recensement de l'ensemble des équipes de recherche, universitaires ou autres, travaillant sur cette thématique, ainsi que les groupes et entreprises** de toutes tailles engagées dans des recherches ou productions biomimétiques. Cet inventaire doit être le plus exhaustif possible et servir de document de référence pour le travail de constitution de réseaux.

Afin de disposer d'une meilleure visibilité sur le potentiel économique du biomimétisme, le CESE préconise en outre la réalisation d'une étude de marché à l'échelle nationale, européenne, voire internationale. Elle devra être complétée par l'identification des outils permettant d'évaluer et d'anticiper les retombées économiques du biomimétisme, et d'en mesurer les impacts sur l'emploi. La seule étude prospective actuellement disponible sur l'impact du biomimétisme à l'horizon 2030 a été réalisée aux États-Unis. Cette étude très positive au regard du potentiel de cette démarche, notamment en matière d'optimisation des flux (énergie, matière, information) est en effet controversée. Il conviendrait donc de disposer à présent d'une étude plus aboutie et plus fiable, réalisée à partir d'un nombre suffisant et significatif d'initiatives de façon à lui conférer une réelle qualité prospective.

Structurer et pérenniser un réseau

L'absence d'espace commun d'échange et de réflexion ouvert aux différents acteurs du biomimétisme était une lacune. Elle est en partie comblée depuis la création du CEEBIOS. Le recensement des partenaires et des secteurs d'activité, celui des pistes d'innovations bio-inspirées, la cartographie des acteurs et des compétences et des travaux de recherche en cours a déjà commencé. **Le CESE estime toutefois que l'ampleur de ce travail et le comblement du retard pris sur un pays comme l'Allemagne dans ce domaine justifie un amorçage financier.** Pour financer la fédération du réseau, l'organisation d'événements, la sensibilisation des décideurs et des entreprises... le plus important réseau allemand, Biokon, a bénéficié au début des années 2000 de plus de huit millions d'euros sur six ans, dont trois environ pour les trois premières années.

En France, l'écosystème ouvert mis en place par le CEEBIOS, lieu de rencontre et de travail destiné à intéresser tous les secteurs et toutes les disciplines, est précieux. **Pour conduire le même type d'action qu'en Allemagne, le CESE demande que le CEEBIOS, seul exemple à ce jour d'animation de réseau, puisse bénéficier d'un amorçage comparable, qui pourrait être interministériel. Un tel soutien pourrait notamment s'inscrire parmi les objectifs soutenus dans le cadre des investissements d'avenir. Il constituerait une première phase.**

La seconde phase devrait clairement s'inscrire dans le cadre d'une politique industrielle.

À terme, **le CESE plaide pour la constitution d'une plateforme de compétences centrée sur le biomimétisme, avec une ouverture sur l'ensemble des financements de recherche existants.**

Lever les obstacles aux applications du biomimétisme

Par définition, toute innovation est susceptible de se heurter à l'environnement qui lui préexiste et de bouleverser des habitudes. Le biomimétisme ne fait pas exception à la règle.

Une dynamique d'ouverture à ces innovations mérite d'être enclenchée, dans tous les domaines.

Créer les conditions d'un développement des pratiques biomimétiques en agriculture

Dans le secteur de l'agriculture le biomimétisme prend la forme d'un écomimétisme puisqu'il prend pour modèle les écosystèmes naturels. Il se caractérise donc essentiellement par l'absence de recours aux intrants de synthèse par un travail du sol minimum et surtout par la préservation de la microfaune des sols, par le semi direct, - c'est-à-dire sans labourer - par la pratique du couvert végétal permanent, par une grande diversité spécifique et fonctionnelle, et enfin par des associations d'espèces destinées à améliorer la productivité de chacune d'elles.

Le CESE considère que les différents modes d'agriculture biomimétique, au premier rang desquels la permaculture, méritent des recherches encore approfondies. Ils doivent en outre pouvoir être comparés à des pratiques agricoles plus conventionnelles ce qui suppose de leur donner les moyens de s'exprimer. Ceci concerne en premier lieu les centres de recherche publics, qui doivent adopter une démarche active dans ce sens.

Améliorer les connaissances

La démarche écomimétique demeure encore peu répandue. Les résultats enregistrés dans les exploitations qui l'ont adoptée sont donc encore trop minces pour en tirer des conclusions précises et robustes pouvant être extrapolées. Une plus forte ambition pourrait conduire à mettre en place des agro-systèmes expérimentaux, associés à des études sur leurs performances. **Dans un premier temps le CESE trouverait judicieux de recenser les pratiques et expériences de cette nature et d'en mesurer les résultats, tant sur le plan agronomique que sur les plans écologique, ergonomique et économique.**

À cet égard, la ferme de permaculture biologique du Bec-Hellouin apparaît comme un modèle : exploitation opérationnelle, mais également expérimentale et objet d'étude pour des organismes tels que l'INRA et AgroParisTech. Notre assemblée estime que de tels exemples devraient être multipliés dans des contextes biogéomorphologiques variés de façon à enrichir les connaissances sur les avantages et les limites de ces modèles. L'agriculture étant avant tout une activité professionnelle, il convient d'éprouver le modèle économique de ce type de pratiques, en particulier les performances et les marges de manœuvre, tant pour leurs productions que pour leur possible mécanisation. La diversité des territoires, le professionnalisme des agriculteurs et agroforestiers et la compétence des agronomes sont autant d'atouts pour progresser dans cette voie. Il conviendra en outre d'assurer la publicité des résultats de ces études, en premier lieu à destination de la profession.

Le Conseil considère par ailleurs que l'étude et la discussion des principes de l'agriculture écomimétique pourraient être intégrées dans les programmes des lycées agricoles et que de nouvelles voies professionnelles autour de ces thématiques et des pratiques qui s'y rapportent devraient être proposées dans le cadre de la formation continue (ingénieurs conseil, etc.). Cela suppose de produire et diffuser de l'information technique de qualité et d'améliorer, formations professionnelles sur ces pratiques, en particulier la micro-agriculture, polyculture, permaculture.

Organiser le dialogue

Des cloisonnements existent dans toutes les professions. L'agriculture ne fait pas exception. C'est pourquoi **le Conseil appelle à la poursuite et au renforcement des échanges qui ont commencé à se nouer dans les structures professionnelles, notamment les chambres d'agriculture, entre tenants des différents systèmes d'agro-écologie, dont la permaculture, et les acteurs de l'agriculture conventionnelle.** C'est en effet par l'échange d'informations, de connaissances et la confrontation des retours d'expérience que les a priori réciproques pourront être levés et les avantages et inconvénients de l'écomimétisme examinés en toute sérénité. Le renforcement des coopérations entre agriculture conventionnelle et permaculture, par exemple, doit être recherché. Dans le même ordre d'idée, notre assemblée appelle de ses vœux le développement des échanges entre les pratiquants des différents modes de permaculture dans le monde.

Développer la permaculture et la micro-agriculture dans les espaces contraints

Au-delà de la mobilisation des acteurs, des professionnels des différentes filières agricoles se pose la question du développement de la pratique de la permaculture.

À cet égard, le CESE préconise de la développer sur un certain nombre de territoires ou d'espaces contraints, notamment urbains et périurbains, par exemple les toits, cours, espaces verts... On doit souligner que la durabilité de ce schéma ne réside pas uniquement dans la pratique agricole stricto sensu, mais aussi dans le fait que la production maraîchère alimente les circuits courts et de proximité, constitue des niches de biodiversité urbaine, voire des emplois locaux. Autant d'arguments militant pour le développement de ces agricultures au cœur ou en marge des villes.

Les aides à la surface prévues dans la PAC ne sont pas adaptées pour les exploitations aux superficies modestes. Il convient donc d'activer d'autres dispositifs

parfois peu connus pour aider les professionnels s'engageant dans cette voie à s'installer et rendre leur exploitation viable (mesures agroenvironnementales, crédits d'impôt, aides à l'investissement et à la recherche...).

La permaculture pouvant être mise en œuvre sur de petites surfaces, à l'image du maraîchage urbain de jadis, le CESE suggère qu'une partie des espaces verts ouverts au public qui s'y prêtent soit dédiée à cette pratique. Le CESE pourrait être précurseur en la matière. Dans le cadre de son plan d'action en faveur du développement durable, le Conseil pourrait en effet affecter une partie de son espace intérieur engazonné à un potager permaculturel, ce type d'agriculture écomimétique pouvant notamment participer à l'enrichissement des sols.

Ouvrir des espaces pour l'innovation

Comme d'autres conceptions radicalement nouvelles, les innovations biomimétiques se heurtent à un ensemble de règles établies avant leur apparition. Ainsi, pour être mis en œuvre, les procédés de myco-remédiation évoqués dans le rapport (dépollution/restauration des sols par l'utilisation de champignons) ont dû bénéficier de dérogations. Le centre commercial d'*Easgate* à Harare (Zimbabwe) célèbre modèle d'architecture biomimétique, ne pourrait pas être édifiée en France, où il contreviendrait à la réglementation incendie.

Pour dépasser cette difficulté, en particulier **dans le domaine de l'architecture, le CESE préconise la création d'espaces d'expérimentation ou de démonstration**. Encadrés par des conventions appropriées, à l'image de ce qui se pratique dans un autre domaine pour les zones franches urbaines. Ces territoires pourraient accueillir des projets bio-inspirés répondant à des critères de durabilité.

Toujours dans le but d'accorder une souplesse réglementaire favorisant les projets innovants, le CESE estime que les parcs naturels régionaux pourraient être des acteurs du développement durable dans leur territoire en offrant la possibilité de déroger à des normes techniques dans des domaines comme l'économie circulaire, le génie écologique, la restauration des milieux, l'architecture... Le principe de ces dérogations serait acté dans la convention du parc et les projets soumis aux instances consultatives de l'organisme de gestion.

Par ailleurs, le CESE propose de mettre à disposition des acteurs publics des modèles de cahier des charges ouverts aux innovations biomimétiques. Le pouvoir adjudicateur pourrait ainsi se voir proposer des solutions techniquement plus performantes et/ou économiquement plus intéressantes en particulier grâce à une conception circulaire du fonctionnement du bâtiment (utilisation efficiente des ressources locales par échanges thermiques, récupération de chaleur des eaux grises, bio-climatisation et ventilation naturelle, récupération des eaux de pluie et régulation du flux hydrique, recyclage des déchets organiques des logements pour la régénération du substrat des espaces végétalisés favorables à la biodiversité et la qualité de vie, etc.).

Cette option favoriserait en outre l'ouverture de dialogues compétitifs en amont des marchés.

Les procédés biomimétiques à encourager

Les biotechnologies dites blanches appliquent des procédés naturels à la production industrielle dans un souci économique et environnemental. Elles occupent une place de plus en plus importante dans l'industrie des biotechnologies, elle-même en plein essor. Dans un rapport publié en 2009, l'OCDE prévoit que « *dans la zone de l'OCDE, les biotechnologies pourraient assurer 2,7 % du PIB en 2030* » contre moins de 1 % en 2009. Quant aux procédés biotechnologiques, le professeur Marc Fontecave, titulaire de la chaire Chimie des processus biologiques au Collège de France, a indiqué dans une conférence prononcée en mars 2015 que leur taux d'utilisation dans la production de produits chimiques devrait atteindre 30 % d'ici à 2040.

Alors que, la France dispose de compétences pointues dans ce domaine, des blocages subsistent néanmoins, qui freinent le développement industriel de ces procédés : défis technologiques, manque d'investissement... Pourtant, l'extension de l'utilisation des technologies blanches pourrait être un atout dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de moindre disponibilité à terme du carbone fossile. La biomasse apparaît plus que jamais comme un gisement considérable de carbone renouvelable pour les usages les plus divers (chimie, biocarburants, produits alimentaires ou non, textile...). Or, les biotechnologies blanches peuvent être mises à profit dans le domaine de la chimie du végétal.

En conséquence, **le CESE préconise de mettre en place des politiques d'accompagnement incitant les industries à davantage utiliser ces procédés innovants.** Ils présentent en effet de nombreux avantages environnementaux : conditions douces de température, pression et de potentiel hydrogène (pH), réaction biocatalytique peu polluante, consommation d'énergie modérée...

Le Conseil considère par ailleurs nécessaire de conduire en amont de leur exploitation des évaluations sur leurs performances économiques et environnementales de s'assurer de la prise en compte des exigences sociales dans leur mise en œuvre et de leur acceptabilité sociale en fonction de leur usage.

Dynamiser la recherche et le transfert industriel

Que ce soit au stade de la recherche ou à celui de la valorisation industrielle, les difficultés évoquées ci-après ne sont pas propres au biomimétisme. Elles sont cependant plus sévères encore pour ce domaine d'innovations transversal et mal connu. N'étant pas identifiable, le terme échappe aux nomenclatures habituelles.

Dans le domaine du biomimétisme comme dans tous les autres, le CESE souhaite d'abord rappeler que la recherche fondamentale demeure essentielle. Sans elle, point de découvertes sur les caractéristiques et les capacités des organismes ni sur le fonctionnement du vivant, à l'échelle d'un individu comme à celle d'un écosystème. **Le Conseil souhaite donc que l'effort public et privé de recherche soit amplifié,** car il en va de la compétitivité future de la France.

Cependant, la particularité du biomimétisme est de se situer au croisement de la science du naturaliste, du biologiste et de l'ingénieur. La valorisation du potentiel du biomimétisme

comme outil d'innovation au service de la transition énergétique et écologique passe donc par une facilitation de ces croisements. En conséquence, et en concordance avec les orientations de la Stratégie nationale de recherche, **le CESE appelle au développement de trois types de collaboration :**

- **entre différentes disciplines** (physique, chimie, biologie, agronomie...) autour de thématiques à fort potentiel de développement : matériaux, chimie douce... ;
- **entre recherche publique et recherche privée**. Cette collaboration est essentielle pour parvenir à bâtir une industrie biomimétique durable ;
- **entre instituts et équipes de recherches français et étrangers**. Ce type de collaboration apparaît de plus en plus indispensable : non seulement certaines thématiques ont une dimension planétaire, mais encore la mobilisation de compétences larges et variées et la réunion des masses critiques sont nécessaires pour faire progresser les connaissances.

Au niveau national, le recensement précédemment préconisé des projets d'unités de recherche publiques et privées permettra de broser un paysage précis des travaux en cours.

Pour nécessaire qu'elle soit, cette première étape est insuffisante. **Le Conseil estime nécessaire de mettre en place ou développer une organisation numérique des connaissances et de l'information sur le biomimétisme, dont le Muséum national d'histoire naturelle pourrait être partie prenante.**

Trois objectifs doivent être poursuivis :

- la mise à disposition des acteurs de chaque secteur concerné des pratiques issues de recherches biomimétiques ;
- la mise en place d'outils pour analyser et transposer les connaissances à d'autres domaines de façon à les rendre opérationnelles. La constitution de bases de données et de réseaux de diffusion de l'information est le complément indispensable à ce travail de mise à disposition adaptée ;
- la constitution de plates-formes numériques collaboratives de travail reflétant l'infrastructure physique du centre de recherche, universitaire ou autre. Les Allemands et les Américains utilisent avec profit de tels dispositifs.

Le CESE appelle de ses vœux la concrétisation de cette transdisciplinarité par des travaux communs effectués en groupes constitués autour de thématiques applicatives précises qui répondent à des attentes et/ou correspondent à une demande : l'habitat, les composites bio-inspirés... s'inscrivant dans le cadre de la transition écologique. Dans cette perspective, le CESE considère que dans des domaines comme celui de la chimie, le CEEBIOS doit construire des coopérations et des partenariats sur des sujets de recherche allant de sujets de recherche fondamentaux au développement de produits finis commercialisables. Cela suppose qu'en amont des filières, la chimie leur fournisse les matières premières dont elles ont besoin pour les produire. Un tel positionnement de celui-ci devrait permettre d'orienter judicieusement la R&D vers des innovations de rupture en plus de l'optimisation de l'existant. Sans ce travail collégial d'orientation, les schémas classiques risquent de se reproduire, chaque acteur valorisant le capital technique et industriel qui est le sien en proposant des produits qui ne correspondent pas nécessairement à un besoin.

Au-delà de la constitution de groupes de travail, le CESE entend insister sur l'importance que revêt pour chaque acteur la création de réseaux sur les thématiques nouvelles comme celles relevant du biomimétisme. Le noyau dur d'un projet ayant vocation à déboucher

sur un *business model* est en effet le partenariat. Or, le Conseil observe que le système de la recherche académique fonctionne actuellement sur des projets de court terme et des budgets limités. Cette brièveté, qui se traduit par des contrats de travail à durée déterminée pour les chercheurs, nuit à la capitalisation à long terme des connaissances. Or, ce sont ces connaissances qui, une fois capitalisées, génèrent des brevets et des royalties qui permettent de lancer un véritable business model d'autofinancement de l'activité recherche. **Le Conseil estime qu'une réflexion doit être impérativement engagée sur les conditions d'emploi des personnels et d'attractivité dans le domaine de la recherche.** Une des solutions passe par le développement de l'ingénierie territoriale dans le but de structurer des partenariats autour d'un projet fort.

Pour les innovations biomimétiques comme pour les autres, le passage du résultat de la recherche vers la valorisation industrielle se révèle périlleux. Une fois créée, l'entreprise porteuse du transfert, dite « entreprise dérivée » ou *spin-off* dépend de la confiance d'un groupe de partenaires publics et privés pour réussir son décollage. La suivante, celle de l'industrialisation et l'installation de lignes de production correspond le plus souvent à un changement d'échelle dans le besoin de financement. La *spin-off* devenue start-up entre alors dans la « vallée de la mort », phase critique durant laquelle une partie des entreprises, fait soit faillite, soit l'objet d'un rachat étranger. La valeur d'une chaîne équivalant à celle de son maillon le plus faible, il importe de poursuivre les efforts entrepris pour sécuriser cette phase, en particulier pour les entreprises porteuses d'innovations de rupture, qu'il s'agisse comme décrit ci-dessus de start-up ou d'entreprises déjà installées mais également fragiles dans la maturation de leurs processus d'innovation. **C'est pourquoi le CESE préconise que le Conseil national de l'industrie (CNI), à travers ses comités stratégiques de filière se saisisse de la thématique biomimétisme et propose des solutions d'accompagnement dans cette phase délicate de transfert.**

La plupart des entreprises françaises actives dans le champ du biomimétisme étant des start-up ou des PME, **le CESE appelle enfin à une sensibilisation particulière des acteurs des dispositifs mutualisés de transfert de technologie et des fonds régionaux d'amorçage à l'intérêt et au potentiel des innovations biomimétiques.**

La même démarche devrait être entreprise auprès de Bpifrance qui délivre les prêts pour l'innovation destinés à couvrir les frais liés à l'industrialisation et à la commercialisation d'une innovation.

Ancrer le biomimétisme dans le paysage éducatif

Développer l'observation de la nature dans l'enseignement scolaire

C'est probablement à l'occasion de l'éducation à la nature, dès l'école, que peuvent être semées les graines du biomimétisme. Le CESE a traité de l'éducation à la nature, à l'environnement et au développement durable dans quatre au moins de ses travaux.

Son avis « *Agir pour la biodiversité* » souligne que l'éducation à la nature reste un « énorme chantier ». **L'observation de la nature, dès la maternelle, doit permettre une sensibilisation aux enjeux de la biodiversité qui constitue un premier pas vers la**

compréhension de la démarche biomimétique. Il s'effectue au travers d'actions simples, ludiques, sources de réflexions, comme l'installation de nichoirs, d'hôtels à insectes, la réalisation de compost, l'implication dans des jardins potagers urbains et plus généralement grâce au développement des capacités d'observation et de compréhension du fonctionnement du vivant. L'association de classes de différents niveaux aux travaux réalisés dans la cadre de la saisine sur « *Vingt ans de lutte contre le réchauffement climatique* » a montré la capacité des plus jeunes à porter un regard mature sur les questions environnementales et à se saisir avec curiosité de questions complexes.

Le CESE rappelle son souhait que les développements interdisciplinaires portant sur la thématique biodiversité au collège comme au lycée soient encouragés. Il rappelle également son attachement aux sorties « nature ».

Ouvrir les formations de l'enseignement supérieur

Les cursus d'enseignement supérieur ou formations au biomimétisme existants dans certains pays européens, comme l'Allemagne, ou aux États-Unis, relèvent schématiquement de trois catégories identifiées par le CGDD : des formations générales à l'approche « biomimétisme », des formations très spécifiques dans certains domaines d'application du biomimétisme, comme la robotique, enfin des formations à l'ingénierie bio-inspirée dispensées soit par des universités soit par des instituts technologiques. Aucune de ces catégories de formation n'est réellement développée en France même si certains éléments constitutifs d'une offre de formation préexistent, dans certaines universités ou au CEEBIOS par exemple. À l'heure actuelle, un étudiant qui souhaite effectuer une formation complète en biomimétisme doit se rendre en Allemagne ou en Autriche.

Le CESE considère que la première condition du développement d'un enseignement structuré en France consiste à identifier et recenser les modules d'enseignements consacrés au biomimétisme disséminés dans des enseignements plus larges, scientifiques ou techniques, et d'organiser leur mise en réseau.

L'appel à projets Initiatives d'excellence en formations innovantes (IDEFI) du PIA, dont les lauréats ont été désignés en 2012, s'adresse à l'ensemble des établissements supérieurs. Les projets doivent promouvoir de nouvelles démarches de formation et de nouveaux contenus, qui sont jugés en termes d'attractivité, de pluridisciplinarité, d'employabilité, de lien avec la recherche et d'ingénierie de formation. Dans ce cadre a été retenu un projet dit d'Université de technologie ouverte pluripartenaire (uTOP), démonstrateur de formations innovantes à distance soutenu par les établissements du réseau Université numérique ingénierie et technologie (UNIT).

Le biomimétisme est intégré dans les formations innovantes constitutives du projet uTOP, il y est notamment représenté par une formation à part entière. **Cette première opportunité accordée au biomimétisme au sein de l'appel à projets IDEFI du Programme des investissements d'avenir devra être préservée, et après évaluation au terme de l'expérimentation, si possible développée.**

Le gouvernement a modifié à la fin de l'année 2014 la convention passée avec l'Agence nationale de la recherche pour engager un nouvel appel à projets IDEFI-N, axé sur le numérique et qui a vocation à accélérer la création de l'offre de MOOC. La sélection des projets est en cours en 2015.

Le développement d'un véritable réseau d'éducation numérique, anticipant sur ce qui apparaît, aux termes de la convention entre l'ANR et l'État, comme une révolution pour les systèmes de formation, répondant aux enjeux des nouvelles formes de coopération entre institutions d'enseignement supérieur et de recherche, constitue une opportunité pour le biomimétisme.

Un semblable réseau pourrait participer de la construction de formations pluridisciplinaires scientifiques « à la carte », permettant aux étudiants qui en bénéficieraient de devenir des spécialistes du lien entre disciplines et entre disciplines et techniques, pour développer sur des projets dans des domaines aussi divers que l'architecture, l'agriculture, la bionique, les biomatériaux... une démarche de biomimétisme. Un exemple type de synergie provient du développement rapide des technologies d'impression 3D qui ouvrent un champ important aux structures inspirées du vivant.

Certains pionniers en ces domaines se qualifient eux-mêmes de « biomiméticiens ». Il est vraisemblable que les services rendus à l'innovation par cette forme de transdisciplinarité, construite sur des connaissances pluridisciplinaires, dessinent peu à peu les contours de ce nouveau métier.

Progresser vers la durabilité

Développer les analyses du cycle de vie

De nombreux termes permettent de désigner les applications inspirées de la nature, ou se revendiquant comme telles. Il n'est pas possible d'affirmer que ces applications présentent toutes un caractère durable. Le biomimétisme ambitionne de lever cette ambiguïté et d'être le terme générique sous lequel peuvent se ranger les innovations s'inscrivant dans une démarche durable d'imitation de la nature. La reproduction des propriétés essentielles des systèmes biologiques obtenue dans le cadre d'une démarche de biomimétisme vise en effet, selon le ministère de l'Écologie, à « *mettre au point des procédés et des organisations permettant un développement durable des sociétés à un faible coût économique et environnemental* ».

Cette approche par la durabilité rejoint celle de l'économie circulaire : l'écoconception des produits est un élément important de cette dernière, qui converge avec le biomimétisme vers le même objectif de durabilité, en s'inspirant du bouclage des flux, caractéristique des écosystèmes durables. L'économie circulaire s'inspire à plusieurs titres de grands principes de fonctionnement du vivant. Les innovations biomimétiques quant à elles gagneraient à faire usage plus souvent des principes de l'économie circulaire. En effet, peu d'analyses du cycle de vie ont été réalisées, ou les données ne sont pas disponibles, ce qui peut paraître paradoxal s'agissant d'applications industrielles engagées dans la voie de la réduction de l'utilisation de matières et de la production de déchets.

Le CESE recommande aux acteurs du biomimétisme, en particulier les entreprises, de procéder à des analyses de cycle de vie des produits et technologies biomimétiques, dès le stade de la conception, et d'en diffuser chaque fois que possible les résultats, dans un souci de transparence et d'objectivité.

Plus globalement, la démarche biomimétique devrait systématiquement intégrer une réflexion portant sur la totalité du cycle de vie, l'approche en boucle fermée étant la plus durable.

Comme l'a souligné l'avis sur la « *Transition vers une industrie économe en matières premières* », c'est en effet, durant le processus de conception et de développement des produits bio-inspirés qu'il faut agir selon une méthode globale, multicritères, couvrant la totalité du cycle de vie. Les analyses principales doivent porter sur le choix des matières, les caractéristiques des matériaux, l'efficacité des processus de fabrication.

Renforcer les liens entre biomimétisme et biodiversité

Le CESE considère que le biomimétisme constitue l'une des démarches les plus prometteuses qui puisse être mise au service de la croissance verte telle que définie par l'article 1^{er} de la loi relative à la transition énergétique. La protection de la biodiversité peut trouver dans cette démarche un renfort et un allié, au travers d'une relation qui n'est pas sans rappeler la symbiose observée dans les écosystèmes, lorsque les relations sont bénéfiques pour les deux parties. L'inspiration biomimétique a besoin d'accéder aux informations stockées dans la nature, et la nature, parce qu'elle est enfin perçue comme la mémoire de l'évolution et des évolutions biologiques, accède au statut de bibliothèque universelle. Sa préservation, pour elle-même, est l'enjeu environnemental, la connaissance qu'elle renferme est l'enjeu économique, culturel et social.

Le projet de loi sur la biodiversité tel qu'adopté en première lecture attribue à la future Agence française pour la biodiversité (AFB) des missions de préservation ainsi que de gestion sur les milieux terrestres et marins. Elle participe également au développement des connaissances. Le projet de loi demande par ailleurs à l'AFB de :

- contribuer « *au développement des filières économiques de la biodiversité* » ;
- soutenir « *les filières de la croissance verte et bleue dans le domaine de la biodiversité, en particulier le génie écologique et le biomimétisme.* »

Cette rédaction résulte de deux amendements, le premier déposé par l'opposition, le second par le gouvernement. Ils vont tous deux dans la même direction qui est, selon les termes mêmes de la ministre de l'Écologie au cours du débat parlementaire « *de prendre acte de la diversité et de la richesse des entreprises dans les secteurs du génie écologique du biomimétisme et de la croissance verte* », avec l'objectif de « *leur donner de la visibilité et de faire en sorte qu'elles soient encouragées à investir et à créer des emplois dans ces secteurs qui sont vraiment ceux de l'innovation du futur* ».

Une convention de partenariat pourrait être dans ces domaines établie entre le CEEBIOS et l'AFB, afin d'accroître les synergies, d'identifier les entreprises porteuses d'innovations bio-inspirées majeures ou en cours de développement, et d'aider à la constitution de filières.

Le CESE ne souhaite pas plus aujourd'hui que dans son avis de septembre 2013 « *Agir pour la biodiversité* » se prononcer sur l'origine des ressources nécessaires au bon fonctionnement de l'Agence. Il considère cependant, comme il l'avait fait dans cet avis, que les moyens qui lui seront affectés devront être en adéquation avec les choix effectués, et en particulier celui « *d'inscrire la biodiversité parmi les priorités des politiques publiques* ».

Le CESE demande que la volonté de soutien aux entreprises exprimée dans la loi, et qui concerne directement le développement du biomimétisme, soit confirmée dans les faits.

En mars 2015, la ministre de l'Écologie a annoncé que le secteur de l'eau et de la biodiversité bénéficierait de soixante millions d'euros dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA) pour financer des appels à projets. Un premier a été lancé en juin dans le domaine de l'eau, un second suivra dans le domaine de la biodiversité. Ce second appel, axé sur les modèles économiques nouveaux, la recherche, le développement et la diffusion de technologies nouvelles, concerne bien entendu des entreprises, mais peut associer des laboratoires, voire des associations.

Le CESE souligne l'intérêt qu'il y aurait pour le ministère à encourager le dépôt de projets utilisant la démarche biomimétique, ce qui contribuerait à la faire connaître et permettrait le cas échéant de distinguer une innovation particulièrement intéressante en ce domaine.

Déclaration des groupes

Agriculture

Cet avis a ouvert à notre connaissance un immense champ des possibles. Les innovations liées à l'observation de la nature sont aussi nombreuses que l'est la biodiversité. Les différentes auditions, très riches d'enseignement, nous ont permis de mesurer l'ampleur des progrès envisageables.

La participation de l'agriculture au biomimétisme a fait l'objet de discussions importantes lors des travaux en section. Nous tenions à faire comprendre que tous les systèmes de production agricole cherchent à se rapprocher le plus possible des fonctionnements naturels car ce sont les plus efficaces. Les aides apportées à ces fonctionnements doivent être les plus respectueuses de l'environnement. Les agriculteurs sont donc preneurs de toutes les techniques qui leur permettront de produire, sans compromettre les ressources naturelles et sans mettre en danger l'équilibre économique des exploitations.

En ce sens, et à la condition expresse de ne jamais ignorer la dimension économique, toutes les expérimentations sont intéressantes et doivent être encouragées, à l'exemple de cette ferme en permaculture.

L'agriculture s'insère également directement dans des productions liées au biomimétisme par la chimie verte, les biomatériaux et la biomasse. Autant de secteurs qui sont porteurs de marchés nouveaux et également de processus durables.

D'une manière générale, nous approuvons toutes les propositions visant à favoriser la recherche, à dynamiser la diffusion des innovations, à renforcer la cohésion, la coordination et la collaboration entre les différentes structures de recherche. Il nous semble toutefois que cette nécessité ne concerne pas uniquement le biomimétisme.

Cet avis nous a également fait comprendre que le biomimétisme n'était pas encore assimilé ni par le grand public, ni par les décideurs politiques. Il souffre, comme cela est souligné, d'un manque de cadrage qui empêche son appropriation.

La diffusion de cette matière scientifique, dans les organismes de formation, et ce dès le plus jeune âge, pourrait certainement contribuer à mieux la faire connaître. La communication autour de réalisations concrètes serait également un outil déterminant.

Le groupe a voté l'avis.

Artisanat

En plus de la variété de substances qu'elle procure, la nature est une source d'inspiration considérable pour concevoir des biens ou des procédés innovants et durables dans de très nombreux domaines : énergie, industrie, santé, architecture ...

Ainsi, par exemple, les constructions « bio-inspirées » - reposant sur une utilisation efficiente des ressources locales et une logique d'économie circulaire où le recyclage tient un rôle essentiel - peuvent répondre aux enjeux qui se posent en milieu urbain, en termes de performance énergétique comme de qualité de vie des habitants.

L'approche du biomimétisme se retrouve également dans les métiers de l'artisanat.

Les professionnels du bâtiment notamment sont très attentifs aux innovations bio-inspirées, qui permettront d'améliorer la qualité des matériaux, le confort ou la sécurité des personnes.

Soucieux de développer cette approche, l'artisanat collabore au Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis (CEEBIOS), à travers l'implication de sa chambre des métiers de l'Oise.

Le biomimétisme peut présenter un atout économique dans de multiples secteurs d'activité, en favorisant des modes de production sobres en matière, en énergie et en déchets, mais aussi en tant que source d'innovations et donc de compétitivité.

C'est pourquoi la France doit renforcer son positionnement autour de cette démarche, prometteuse à la fois sur le plan économique et environnemental.

À cet égard, l'avis identifie les freins à lever :

- développer la recherche publique et privée, pour mieux intégrer la bio-inspiration dans les démarches d'innovation ;
- mobiliser les politiques publiques (la Banque publique d'investissement, notamment), pour mieux accompagner le passage de la phase de création à celles de développement puis de commercialisation ;
- enfin et surtout, il importe d'encourager et de développer la coopération entre les entreprises françaises impliquées dans ce domaine, que ce soit sur la recherche ou sur la production.

Leur mise en réseau est en effet essentielle si l'on veut favoriser l'essor d'une stratégie nationale autour du biomimétisme.

D'une manière générale, l'avis présente l'intérêt de mettre en lumière une démarche innovante et durable, mais aussi d'attirer l'attention sur la nécessité de prendre véritablement la mesure de son potentiel en termes d'activités et d'emploi, dans un objectif de croissance verte.

Le groupe de l'artisanat a voté cet avis.

Associations

En matière scientifique ou industrielle, le spectre des applications du biomimétisme est large : de la robotique à l'aéronautique, de la chimie à l'agriculture en passant par l'architecture, les perspectives en matière d'innovation, de création d'activité et d'emplois s'annoncent prometteuses.

Notre pays dispose des ressources naturelles, des savoirs et compétences requis, mais aussi des centres de recherche, start-up et entreprises. Pourtant, des obstacles au développement du secteur demeurent. La France, malgré ses nombreux atouts, a pris du retard sur l'Allemagne qui, depuis plus d'une décennie, a pu bénéficier d'investissements publics pour développer un vaste réseau de structures de recherche aux débouchés industriels.

Ainsi, la première priorité sur laquelle il faut agir est la recherche. En matière de biomimétisme, celle-ci demeure insuffisamment structurée. Le lancement, en 2012, du projet de Centre européen d'excellence (en biomimétisme) affiche l'ambition de devenir un espace d'incubation d'innovations bio-inspirées. Notre groupe rejoint la proposition de constituer un financement d'amorçage qui permettrait de structurer le réseau, d'organiser

sa communication et de réaliser les études sur les perspectives du secteur en France. Nous approuvons aussi la recommandation d'établir une cartographie des laboratoires, structures universitaires et entreprises impliquées, afin de connaître l'existant et d'être plus à même de l'organiser.

Nous faisons nôtres également toutes les préconisations visant à renforcer les conditions d'épanouissement de la recherche biomimétique en France : augmenter les collaborations entre différentes disciplines, entre recherche publique et privée, entre équipes de recherches françaises et étrangères ; développer une organisation numérique des connaissances et de l'information sur le biomimétisme ; mobiliser le Conseil national de l'industrie dans l'accompagnement des entreprises, spin off et start-up, durant la périlleuse phase de transfert.

La deuxième priorité concerne l'éducation. Les enjeux d'éducation à l'environnement et au développement durable ont déjà fait l'objet de nombreux travaux au sein de notre assemblée et nous réitérons notre souhait de voir les élèves être sensibilisés à la biodiversité dès le plus jeune âge. Soulignons à cet effet le rôle majeur du monde associatif et des fondations dans l'éveil des individus, petits ou grands, à l'infinie richesse de notre nature : qu'elles œuvrent dans les domaines de l'éducation populaire, du tourisme social, du sport de plein air ou de la protection de l'environnement, les associations et fondations forment toutes les générations (notamment futures) à mieux préserver notre patrimoine naturel pour, éventuellement plus tard, l'exploiter durablement.

Notre groupe témoigne ainsi de son attachement à un enseignement transversal de la biodiversité sur toute la scolarité, ainsi qu'à toutes les démarches d'observation du fonctionnement du vivant encouragées dans et en-dehors du milieu scolaire. Il rappelle que les sorties nature participent de ce processus. Enfin, il adhère aux préconisations visant à améliorer l'offre de formation dans l'enseignement supérieur, où l'enjeu consiste à identifier et à recenser les modules consacrés au biomimétisme disséminés dans des enseignements plus larges, et ce, afin d'organiser leur mise en réseau.

Le groupe des associations salue le travail de la rapporteure. La richesse d'information contenue dans le rapport et l'avis doit permettre de mieux faire connaître ce sujet, ses enjeux et potentialités auprès des décideurs publics. Le groupe a voté l'avis.

CFDT & UNSA

L'ambition d'examiner les conditions du développement du biomimétisme de façon durable, au moment où notre pays s'engage dans la transition énergétique et écologique, est louable. Mais la CFDT et l'UNSA, sans avoir d'opposition aux recommandations proposées, considère que nous sommes restés au milieu du gué.

La raison majeure tient au fait que l'étude envisagée par le rapporteur, avant même qu'elle ne soit réalisée, a été transformée en rapport et avis. À l'évidence, le biomimétisme méritait bien plus une étude approfondie, qu'un avis incomplet.

Les perspectives qu'offre le biomimétisme sont bien décrites au travers d'une multitude d'exemples. De même, les leviers et les obstacles à son développement, validés par les pairs, sont identifiés. Pour autant, ce constat aurait mérité d'être approfondi. Ainsi, les conditions de recherche de procédés de production comparables aux processus naturels, avec en particulier une faible consommation d'énergie et une réutilisation des déchets, n'ont pas été suffisamment investigués. Ces travaux sont menés de longue date par certains industriels,

avec des succès limités, souvent pour des raisons économiques. Ce sont les conditions de développement de l'innovation, biomimétique ou non, qui doivent être interrogées. La difficulté par exemple de faire communiquer les disciplines entre elles est identifiée comme un frein majeur, de même que l'absence de visibilité sur le potentiel économique. Sans prétendre pouvoir apporter toutes les réponses à ces constats essentiels, une analyse approfondie aurait peut-être permis de donner des pistes.

Le CEEBIOS Centre européen d'excellence du biomimétisme de Senlis, seule structure qui travaille sur l'approche biomimétique, est mise en avant dans le rapport et avis, mais la CFDT reste persuadée qu'il faut encourager et développer les nombreuses initiatives dans les pôles de compétitivité, les universités, les organismes de recherche et même dans l'industrie, en favorisant l'articulation avec le CEEBIOS, afin de faciliter la transdisciplinarité.

À l'heure où la société est face à ses responsabilités, notamment en ce qui concerne le climat et la biodiversité, regarder en quoi et comment le biomimétisme pouvait contribuer à corriger les excès de l'homme, est nécessaire. Cependant l'examen du biomimétisme durable, mis en avant à juste titre, n'est pas suffisamment exploré. Ainsi, la relation entre le biomimétisme et la transition énergétique et écologique reste seulement évoquée comme un potentiel.

Malgré l'insuffisance de cet avis la CFDT et l'UNSA l'ont voté.

CFE-CGC

Notre assemblée, par son pouvoir d'autosaisine, permet de faire écho à nombre de sujets peu ou mal éclairés et inciter la communauté des acteurs à agir. Cet avis sur le biomimétisme est de ceux-là.

Forts d'une loi sur la transition énergétique pour la croissance verte et à l'approche de la 21ème Conférence des Nations unies sur les changements climatiques (COP 21) de décembre prochain à Paris, il prend toute sa place.

La nature et le vivant inspirent depuis longtemps déjà le monde scientifique et industriel, les exemples sont légions.

Avec le travail de notre collègue Patricia Ricard, au-delà de l'aspect didactique, cet avis s'inscrit dans un horizon élargi. Les domaines tels l'agriculture, l'énergie, la construction, la science des matériaux, la santé entre autres, peuvent, si ce n'est doivent, tirer profit de ce que la nature met gratuitement à notre disposition. Le bio-mimétisme doit alors s'appréhender comme une démarche d'innovation durable de biens et de services, apprendre du vivant pour mieux vivre tout en étant plus respectueux de notre environnement.

En tout premier lieu, la sensibilisation à l'éveil et l'observation de la nature dès le plus jeune âge ainsi que la dimension éducative retiennent toute notre attention. Le caractère transdisciplinaire de l'approche du biomimétisme nécessite, au-delà du recensement des modules de formation existants, une meilleure structuration de l'enseignement particulièrement au niveau supérieur, école d'ingénieurs et universités. Et ce, afin d'y attirer des jeunes potentiels pour des formations initiales reconnues et valorisées en tant que telles.

À l'instar du modèle allemand, la CFE-CGC souligne tout l'intérêt d'un travail en réseau. À ce jour, seul le système ouvert CEEBIOS l'organise. Nous soutenons la recommandation d'un amorçage financier afin de renforcer cette structure dédiée.

Sans que les retombées économiques puissent être à ce jour clairement quantifiées, la CFE-CGC ne doute pas du potentiel que représente cette voie de l'innovation pour nombre de secteurs. Une collaboration plus étroite entre le monde scientifique et industriel doit être encouragée au travers des structures existantes (pôle de compétitivité, CNI...) et facilitée dans les procédures d'appels à projet. C'est là également une source de nouveaux emplois dont la France ne doit pas se priver.

Enfin, il apparaît important pour la CFE-CGC de se poser les questions d'éthique que peut soulever le développement de techniques « bio-inspirées », notamment avec la montée en puissances des biotechnologies. C'est en ce sens que nous encourageons notre assemblée à enrichir à nouveau ses travaux.

La CFE CGC a voté l'avis.

CFTC

Le biomimétisme est sans doute une véritable opportunité pour le développement du futur.

Pour cela la France doit se donner les moyens de développer cette science. En effet, comme le souligne l'avis, ce mot est encore inconnu ou confus. Il a besoin d'être mieux défini, mieux étudié et médiatisé auprès du grand public, d'où l'utilité de l'avis.

De plus en plus d'entreprises, surtout aux États-Unis, en Allemagne et en Asie s'y intéressent. Une dynamique émerge dans nos entreprises françaises, notamment dans le cadre de la recherche.

Les auditions ont permis de mieux prendre conscience de la richesse que le biomimétisme pouvait apporter dans les domaines scientifiques, techniques ou industriels.

L'avis recense différentes pistes qui, pour la CFTC, sont intéressantes et doivent être approfondies.

Il serait judicieux, de mieux mettre en évidence, les résultats des pratiques et des expériences, par un système de mesures dans le domaine agronomique. Cela permettrait d'en faire la promotion auprès des professionnels.

Pour ce faire, l'insertion d'un module de biomimétisme dans les lycées agricoles ainsi que dans la formation continue permettrait une sensibilisation à ce concept.

Le Conseil national de l'industrie serait un bon niveau pour se saisir de la thématique, afin notamment d'accompagner les entreprises novatrices dans ce domaine. Cela permettrait sans doute de créer à plus long terme, des emplois nouveaux en lien avec la recherche.

La CFTC approuve le fait de donner au CEEBIOS les moyens de continuer à travailler et de bénéficier d'un amorçage interministériel qui pourrait s'inscrire dans le cadre des investissements d'avenir.

Il conviendrait de même de créer un cursus de formation complet accessible à tous les étudiants intéressés. Actuellement ils doivent aller en Allemagne ou en Autriche !

Le biomimétisme et la biodiversité ne doivent pas être opposés car ils sont complémentaires.

La CFTC a voté cet avis.

S'inspirer de la nature, du vivant pour créer, produire est une démarche ancienne. L'originalité de la conception défendue dans l'avis sur le biomimétisme présenté aujourd'hui est de s'inspirer du vivant pour contribuer à une planète durable.

Il s'agit d'observer, d'extraire des connaissances des systèmes vivants, de la nature, ce que les avancées technologiques permettent de façon renouvelée pour étudier, comprendre les stratégies d'adaptation et d'optimisation de la matière, de l'énergie et de l'information qui ont été privilégiées au cours du temps. Le biomimétisme s'inscrit dans l'économie de la connaissance. Il s'attache à la fois aux formes présentes dans la nature, aux procédés utilisés par le vivant et aux écosystèmes.

La CGT apprécie cette démarche d'innovation durable, moteur possible de développement industriel de notre pays, tout en étant vigilante sur l'effective durabilité des innovations, certaines pouvant avoir un impact environnemental ou social élevé. Il ne s'agit pas de produire bio inspiré, dans un contexte social dégradé et d'envoyer la production à l'autre bout de la planète. Le biomimétisme requiert une vision globale, systémique des enjeux, ne sacralisant pas la nature et tenant compte de l'intervention de l'homme sur l'environnement au cours du temps.

Concernant les propositions de l'avis nous voudrions mettre l'accent sur deux points :

- les conditions d'une amplification de l'effort de recherche fondamentale qui supposent des choix en particulier budgétaires différents de ceux opérés ces dernières années au niveau de l'État et le besoin de transversalité entre disciplines et entre établissements. Cela s'oppose à la mise en compétition des universités, des territoires et appelle au contraire à des coopérations plus importantes et à l'intensification des liens entre les différents acteurs ;
- les conditions d'une transformation de l'appareil productif sur le moyen terme impliquent une intelligence collective pour limiter l'usage des énergies fossiles, des matières premières, une revalorisation du travail humain pour des innovations intégrant pleinement les enjeux environnementaux. D'ores et déjà, quelques acteurs industriels sortent d'un système de fonctionnement linéaire, d'une hyperspécialisation pour développer des complémentarités et réutiliser des outils et des infrastructures dans un contexte différent, voire concevoir un système circulaire où chaque matière, énergie, action produite par une entité sert à une autre dans le système.

Lors des auditions des exemples particulièrement intéressants d'écologie industrielle nous ont été donnés avec des échanges de matières, d'eau ou d'énergie permettant une réduction significative des matières premières consommées, s'inspirant des systèmes naturels. Toutes les filières industrielles sont potentiellement concernées par le biomimétisme dans une combinaison formes, procédés, systèmes. Cela implique une attention particulière portée aux questions de formation des salariés.

L'avis nous invite donc opportunément à « *réapprendre à apprendre de la nature* ».

La CGT l'a voté.

De manière continue, la nature développe des stratégies qui permettent aux organismes vivants de s'adapter à leur environnement. Le CESE a eu raison de s'intéresser à la recherche visant à transposer ces processus en technologie. Étudier la stabilité de la tête du cygne ou la solidité du fil d'araignée afin de développer un système de suspension pour drones ou des gilets pare-balles, tels sont des réalisations concrètes issues du biomimétisme.

Comme le propose l'avis, développer le biomimétisme dans l'Industrie est effectivement une idée intéressante. Cela est par exemple déjà le cas dans certains secteurs comme celui du traitement des eaux, de la dépollution des sols, ou du bâtiment et travaux publics (défenses de berges, etc.). Pour Force Ouvrière, le meilleur moyen d'installer ces notions dans l'industrie est de le faire à travers les questions d'innovation et de recherche.

Cela nécessite des moyens publics, tant financiers qu'humains, et des formations qualifiantes, notamment au niveau des chercheurs. De même, instaurer des formations aux pratiques biomimétiques dans les écoles d'ingénieurs semble un bon levier favorisant leur diffusion concrète dans les entreprises et les industries et *de facto*, offrant une meilleure visibilité au biomimétisme.

Dans le même ordre d'idées, le biomimétisme devrait être un sujet à ancrer et à développer dans la recherche publique, de façon interdisciplinaire, notamment le réseau scientifique et technique du ministère chargé de l'Écologie et le CNRS. FO soutient la préconisation de l'avis visant à ce qu'un tel sujet fasse l'objet d'un cahier des charges d'études du troisième programme des investissements d'avenir (PIA). En parallèle, la Banque Publique d'Investissement pourrait utilement financer des projets et opérations innovantes biomimétiques.

Recenser les méthodes, les expérimentations et les réalisations biomimétiques et ainsi constituer un premier réseau est une idée stratégique. L'avis a raison d'insister. Toutefois, pour FO, le Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis (CEEBIOS) devrait être relayé par un centre français assurant ce recensement et cette animation de réseau. Cela pourrait être adossé à un établissement de recherche existant. FO considère également que le travail normatif et de recensement de celles-ci permettrait de construire de la pratique durable en matière de biomimétisme.

Pour toutes ces raisons, le groupe FO a voté favorablement.

Coopération

Le biomimétisme se veut un outil au service du développement durable.

Cet avis est illustré par de nombreux exemples de technologies inspirées du biomimétisme. Le champ des applications est vaste et varié : de l'agriculture à l'industrie en passant par l'architecture.

Il est nécessaire de mieux appréhender cette démarche en clarifiant son champ et sa nature ; les travaux en cours des instances de normalisation devraient y contribuer. Les potentialités semblent réelles, elles restent à explorer et préciser.

Concernant l'agriculture, l'observation et l'imitation des écosystèmes naturels dans le but de construire des agrosystèmes productifs et durables n'est pas nouveau ; la montée en puissance de l'agro écologie s'inscrit dans cette démarche. Il faut encore améliorer les

connaissances sur les pratiques écomimétiques en agriculture et en surtout en mesurer les résultats.

Comme le souligne l'avis, il est essentiel d'améliorer la recherche et développement dans le biomimétisme : il faut créer plus de synergies entre les disciplines scientifiques concernées, chercheurs, ingénieurs, designers, naturalistes, et cela dans un cadre européen. Le lancement, en 2012, du Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis s'inscrit dans cette dynamique ; il doit contribuer à l'effort de notre pays pour allier croissance, environnement, sciences et industrie. Des coopératives agricoles à travers le pôle IAR y sont impliquées et travaillent à des complémentarités entre biomimétisme, chimie du végétal et biotechnologies industrielles. Amplifier l'effort de recherche est indispensable pour inciter les industriels à recourir plus souvent à ces procédés innovants. L'avis le souligne bien.

D'un point de vue général, il s'agit moins d'imiter la nature que de s'en inspirer. En effet, le vivant et les écosystèmes ne sauraient être considérés comme intrinsèquement vertueux. Et si l'avis salue le génie du vivant, l'apport du génie humain, de ses connaissances scientifiques et techniques, est incontournable pour développer des sources d'innovation durable.

Le groupe de la coopération a voté en faveur de l'avis.

Entreprises

Il est rare de pouvoir réfléchir librement et longtemps à des sujets aussi innovants et déconnectés du quotidien que ce qui nous a été donné de faire lors de la construction de cet avis. Dans une actualité chargée, souvent dramatique ces derniers temps, l'avis porté par notre collègue Patricia Ricard a été une parenthèse bienvenue.

Aristote disait que le début de la philosophie, c'est l'émerveillement. Il est vrai qu'au fil des millions d'années d'évolution, la nature a produit des espèces qui ont su s'adapter, façonné des formes résistantes et développé des écosystèmes remarquables d'efficacité. Ce sont là de puissantes sources d'incitation à l'innovation que le biomimétisme nous invite à explorer.

Ce sujet n'est pas théorique. Il s'agit de rechercher parmi les multiples modèles vivants dans la nature, l'inspiration de nouveaux modes de production et de fonctionnement, plus économes en ressources, déchets et énergie pour contribuer à une croissance plus pérenne pour le monde.

La Chine, les États-Unis et l'Allemagne ne s'y sont pas trompés au regard des transformations concrètes de leurs recherches en la matière.

En France, nous ne partons pas non plus de rien. Des chercheurs, des agriculteurs, mais aussi des entreprises sont déjà au travail. Des exemples concrets de solutions innovantes aux débouchés économiques avérés sont issus du biomimétisme, et c'est un encouragement pour l'avenir. On peut et on doit aller plus loin, travailler davantage en réseau comme le recommande l'avis, favoriser les collaborations entre acteurs comme le fait déjà l'Allemagne par exemple.

À l'heure où l'innovation est essentielle et où tout doit être mis en œuvre pour inciter aux transformations créatrices liées à l'adaptation au changement climatique, le biomimétisme en est l'une des approches et, dès lors, digne de la plus grande curiosité, au sens noble du terme.

Là encore, séduisante, inventive mais pas magique, la démarche biomimétique porteuse de solutions inspirantes devra faire ses preuves économiques, sociales et technologiques dans une logique de durabilité. Évaluée avec la même rigueur et les mêmes outils que les autres processus d'innovation, nous croyons à son potentiel dans de nombreux secteurs.

Le sujet du biomimétisme était diversement connu des membres de notre section. Notre rapporteure a su faire preuve tout au long de son travail d'un remarquable effort pédagogique dont nous la remercions ainsi que de son écoute.

Pour toutes ces raisons, le groupe des entreprises a voté l'avis.

Environnement et nature

Alors que l'on oppose trop souvent la nature et l'industrie, le biomimétisme, en s'inspirant des fonctions et de l'organisation du vivant, peut être source de réconciliation de la biosphère et de la technosphère. Cette approche offre désormais des potentialités qui inspirent l'innovation de ce XXI^{ème} siècle.

L'homme a toujours exploré le modèle de la nature pour favoriser son propre développement. On doit notamment à Darwin la révélation que le vivant n'est pas figé. En constante évolution, il développe des facultés d'adaptation dont le biomimétisme s'enrichit dans de multiples secteurs.

Cela dit, copier un modèle de type animal ou végétal ne signifie pas une production nécessairement opportune ou durable. C'est pourquoi, la section environnement a judicieusement choisi de s'attacher à la notion de biomimétisme dans une perspective de développement durable. Elle s'est attardée, par exemple, sur les techniques favorisant l'économie de la matière ou sur les procédés de constitution de matériaux ou de molécules permettant d'éviter les voies chimiques ou physiques agressives.

Le groupe environnement et nature apprécie tout particulièrement le travail effectué lors de cette saisine visant à donner un éclairage au biomimétisme qui reste méconnu, particulièrement en France. Quel est son potentiel, comme s'organise-t-il ?

La réponse à ces questions, qui constitue la première recommandation, nous paraît essentielle. Cela suppose également de pérenniser le rôle d'un espace commun d'échange et de réflexion ouvert à tous, en favorisant prioritairement les interactions avec le monde de la recherche. Il reste à structurer les réseaux, d'une part en reliant les équipes françaises entre elles et avec le reste de l'Europe, d'autre part en formant le maximum d'utilisateurs potentiels.

Le groupe environnement et nature soutient par ailleurs l'idée que l'école et l'enseignement supérieur ont un rôle à jouer dans la sensibilisation aux enjeux de la biodiversité à travers l'éducation à la nature. Celle-ci constitue la première étape vers une compréhension de la démarche biomimétique.

Le groupe environnement et nature souscrit à l'idée de favoriser une approche transversale entre secteurs professionnels et y voit la possibilité d'une dynamique d'innovations particulièrement intéressante.

Parmi les usages issus du biomimétisme, la permaculture, cette pratique générant une production agricole économe en énergie et respectueuse des êtres vivants, nous semble particulièrement opportune. Elle présente notamment un intérêt dans les espaces contraints

où elle permet le retour de la nature en ville et offre un potentiel de création d'emplois non négligeable.

Enfin, le groupe environnement et nature est persuadé, comme la rapporteure, que la communauté du biomimétisme, si elle est forte, offrira un atout non négligeable aux sciences de la nature actuellement en développement. Pour autant, il ne faudrait pas attendre du biomimétisme qu'il apporte toutes les solutions. Il peut même se révéler dangereux, tout dépend de l'usage que l'on fait du modèle de la nature.

Le groupe environnement et nature, sensible à l'originalité du biomimétisme et à ses potentialités, judicieusement traitées, a voté cet avis.

Mutualité

En préambule, nous remercions la rapporteure de nous avoir proposé de travailler sur le biomimétisme, d'appréhender son existence et sa réalité. Malheureusement méconnu, c'est un sujet dont l'intérêt ne fait pas de doute et qui s'avère même passionnant.

« La nature, c'est 3,8 milliards d'années de R&D et d'optimisation continue... une source d'inspiration inépuisable et renouvelable. Une source de solutions à nos enjeux contemporains, de développement pérenne, et de survie économique et écologique ».

Il est fascinant de constater comme il peut être simple de s'inspirer de la nature et d'apprécier la durabilité qui l'anime. La notion de durabilité est au cœur du concept du biomimétisme. Il est finalement un retour aux sources, basé sur l'observation et la modélisation.

Trouvant sa raison d'être dans de nombreux secteurs, spécialités, et applications, la difficulté de rester dans une définition suffisamment explicite et circonscrite est réelle. Nous en avons mesuré toute la complexité tout au long de nos travaux.

La définition et l'appréhension de ce qu'est réellement le biomimétisme sont plus claires dans les exemples existants. La locomotive du train à grande vitesse japonais inspiré de l'aérodynamisme du bec du martin pêcheur ; les vitres et peintures autonettoyantes suggérées par la feuille de lotus ; les *winglets*, ailettes verticales situées au bout des ailes des avions, copiées sur l'aigle des steppes pour augmenter la portance et ainsi gagner en énergie consommée, etc. Nombreux sont les exemples.

C'est pourquoi, le groupe de la mutualité soutient la nécessité de clarifier le champ et la nature du biomimétisme.

S'appliquant à tous les domaines d'activités, c'est un secteur porteur d'efficacité et de performance. Il propose des perspectives enthousiasmantes d'innovation et de développement durable. Le champ de ses perspectives est large : santé et implants biomédicaux ; matériaux ; aérodynamisme ; dépollution ; transports ; bio-textiles et matériaux hydrophobes ; emballages ; écologie industrielle ; permaculture...

Le biomimétisme est transversal, à la croisée de la biologie, de la chimie, de l'ingénierie... Par conséquent, il est indispensable d'assurer la promotion de l'interdisciplinarité permettant une coordination efficace entre les différentes spécialités. Dans ce cadre, nous pensons que la constitution de pôles de compétitivité est une des solutions répondant aux critères de collaboration et de performance industrielle.

Pour terminer, notre groupe partage pleinement les préconisations de l'avis concernant le soutien à la recherche, la mise en place de formations, l'élaboration d'une réglementation

adaptée, les développements interdisciplinaires portant sur la thématique biodiversité au collège comme au lycée, les sorties « nature ».

Plus globalement, la connaissance du sujet doit se développer à grande échelle en direction des spécialistes et du grand public.

Le groupe de la mutualité a voté cet avis.

Organisations étudiantes et mouvements de jeunesse

L'avis inscrit l'ambition portée par le biomimétisme dans le cadre de l'engagement de la France vers la transition écologique et énergétique et y voit l'un des outils d'une innovation productrice de biens et de services durables.

Dans le cadre de cette ambition, il souligne la faiblesse des formations universitaires dédiées au biomimétisme en France et préconise leur développement dans l'enseignement supérieur et en particulier dans les formations agricoles et la formation continue des ingénieurs. Les contours de ces métiers à venir restent encore largement à dessiner et il est nécessaire de souligner, comme nous avons déjà eu l'occasion de le faire, la difficulté de trouver le bon équilibre entre le développement de formations pointues et l'imprévisibilité d'un marché du travail clairement en train de se transformer. Il faut trouver le bon équilibre entre une nécessaire adaptation des formations aux nouveaux emplois et le souci de ne pas alimenter une bulle qui ne ferait que conduire les jeunes vers un chômage prolongé.

Notre groupe estime que le développement de la permaculture peut être une voie intéressante pour permettre à des jeunes de s'installer en agriculture avec l'envie de faire évoluer le modèle agricole. Pour cela, il est nécessaire de soutenir les projets menés dans des fermes telles que celle du *Bec Hellouin* ou de la *Bourdaisière* et le projet Fermes d'avenir.

L'avis souligne une fois de plus l'importance de sensibiliser dès le plus jeune âge et tout au long de la vie à l'observation et à la compréhension de la biodiversité, notamment par le développement de l'EEDD à l'école ainsi que par le développement des séjours de nature comme nous avons eu l'occasion de le défendre dans un précédent avis. Ainsi que le souligne l'avis, l'observation et la sensibilisation à la biodiversité constituent un premier pas essentiel vers la compréhension de la démarche biomimétique.

Enfin, à l'instar de ce que nous avons pu souligner dans le cadre de l'avis sur le développement de la pédagogie numérique, l'on voit bien la nécessité de structurer une filière et de permettre l'émergence d'un écosystème associant les acteurs publics, universitaires et privés. La création de ce contexte favorable doit être portée par des moyens dont la pérennité est assurée. Nous soutenons la préconisation relative à l'amélioration des conditions d'emploi et de financement dans la recherche.

Le groupe des organisations étudiantes et mouvements de jeunesse a voté en faveur de cet avis.

Outre-mer

Le biomimétisme repose sur la connaissance et l'observation des écosystèmes naturels et d'une biodiversité fragile. La France bénéficie, grâce à l'Outre-Mer, d'une diversité biologique extraordinaire, notamment celle des lagons, des récifs coralliens et des forêts

tropicales, qui représente 80 % du patrimoine naturel de notre pays. Cette diversité biologique, bien que très largement située en mer, est caractérisée par de nombreuses espèces endémiques, d'ailleurs souvent menacées par des espèces exotiques envahissantes (EEE) à l'origine de dommages écologiques majeurs.

Cette richesse biologique ultramarine est une source infinie d'innovations et représente un immense potentiel de développement pour la France. Cette dimension fondamentale n'est pas présente dans l'avis alors que, par ailleurs, le texte insiste précisément sur la mise en lumière de notre patrimoine biologique et sur l'observation méticuleuse de la nature.

S'agissant du renforcement des liens entre biomimétisme et biodiversité, la question de la décentralisation de la « *gouvernance de la biodiversité* » est fondamentale pour l'Outre-Mer. Quelles missions pour les futures délégations de l'Agence Française de la Biodiversité dans les Outre-mer ? Quels moyens pour l'exercice de leurs missions ? Autant de questions qui devront être tranchées lors à l'examen du projet de loi relatif à la biodiversité et qui conditionnent à plus long terme le développement du concept de biomimétisme durable.

De manière plus générale, l'avis met l'accent sur des pistes de réflexion pertinentes, notamment concernant l'innovation, la recherche et la question du transfert industriel. L'effort public et privé de recherche doit en effet être amplifié en développant la collaboration entre les différentes disciplines autour de thématiques à fort potentiel de développement. La création de filières scolaires et universitaires spécifiques en Outre-mer serait un signal fort en direction de la croissance verte et bleue que nous défendons. Ce modèle, générateur d'emplois nouveaux, ne saurait faire l'économie de compétences locales de haut niveau.

Quoique regrettant fortement l'absence de mise en lumière de la biodiversité ultramarine, nous approuvons les orientations générales de l'avis que nous avons voté.

Personnalités qualifiées

M. Jouzel : « À chaque fois que j'ai eu le plaisir de monter à cette tribune, j'ai le sentiment d'avoir systématiquement centré mes interventions sur le réchauffement climatique lié aux activités humaines, ses impacts et les solutions à mettre en œuvre pour en limiter l'ampleur. Au risque de vous lasser, j'aurais pu garder cette approche « climat » dans cette intervention au cours de laquelle je vais apporter mon soutien enthousiaste au projet d'avis que vient de nous présenter Patricia Ricard au nom de notre section de l'Environnement. Je n'aurais pas eu de problème car le rapport très documenté qui accompagne cet avis fourmille d'exemples portant sur la conversion directe de l'énergie solaire, la production d'hydrogène, la fixation et la séquestration du dioxyde de carbone, et aussi sur l'hydrodynamisme et l'aérodynamisme d'engins de transport ou d'éoliennes avec l'objectif de réaliser des économies de carburant. Nul doute que le biomimétisme est déjà source d'inspiration dans la mise en œuvre de solutions - généralement très élégantes - en vue de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique et qu'il devrait en être de même dans les années et décennies à venir.

Mais pour que ce soit le cas sur les nombreux aspects dans lesquels le biomimétisme offre des perspectives d'innovations et de développements - et surtout pour que notre pays soit aux avant-postes de cette dynamique et puisse bénéficier des créations d'emplois qui devraient en résulter - il est indispensable que recherche et enseignement, soient - dans ce domaine du biomimétisme - très largement renouvelés et réorganisés. Qu'ils en deviennent les fers de lance alors qu'ils en sont les parents pauvres. Recherche et enseignement sont

fortement mis en avant aussi bien dans le rapport que dans l'avis et c'est ce point que je souhaite mettre en exergue.

Tout au long de ma carrière de chercheur, je suis resté très proche de la recherche fondamentale que je me suis attaché et m'attache à défendre - elle est réellement en danger dans notre pays et au niveau de l'Europe - dans les instances telles que le Haut conseil de la science et de la technologie et le Conseil stratégique de la recherche. J'apprécie donc que la place essentielle de la recherche fondamentale soit rappelée et j'adhère pleinement au souhait que « *l'effort public et privé de recherche soit amplifié* ». À rebours de beaucoup, je me plais à redire que cette recherche fondamentale est, par essence, disciplinaire. Que pour un chercheur le premier objectif est l'excellence dans sa discipline. Et ce n'est pas si facile au vu de champs disciplinaires qui s'élargissent sans cesse et d'une compétition toujours plus exigeante sur le plan international.

Ceci étant, je sais la force de l'approche transdisciplinaire et la nécessité pour notre pays d'être beaucoup plus efficace dans le domaine de l'innovation et des transferts de technologie. Et je suis complètement en phase avec les recommandations portant sur le renforcement des collaborations - entre différentes disciplines, entre recherche publique et privée et entre instituts et équipes de recherches français et étrangers - et sur tout ce qui est de nature à faciliter le passage de la recherche vers la valorisation industrielle. J'apprécie tout autant les recommandations en matière d'enseignement. Au collège et au lycée où la thématique biodiversité doit être véritablement prise en compte. Et dans l'enseignement supérieur qui se doit de mettre en réseau des modules disséminés dans différentes formations et de faire émerger un véritable réseau d'éducation numérique dans le domaine du biomimétisme ».

M. Hochart : « Nous avions au cours d'une réunion de la section des Affaires européennes et internationales eu un échange sur les propos que tient Descartes dans Le Discours de la méthode, lorsqu'il promeut une nouvelle conception de la science, de la technique et des rapports qu'elles peuvent entretenir, apte à « *nous rendre comme maîtres et possesseurs de la nature* ».

Dans une réaction sans doute un peu primaire que j'avais eue, j'avais dit « *On peut être un grand savant et dire des bêtises* ».

Replacé dans le contexte de la révolution scientifique du XVII^{ème} siècle, c'est l'expression que l'homme peut quelque chose, qu'il peut donc influencer sur la nature. Ce faisant, il diminue la dépendance de l'homme à son environnement, il améliore sa situation collective : moins de famines, moins de maladies...

Aujourd'hui nous apparaît clairement que nous ne pouvons maîtriser la nature.

Non, nous ne pouvons maîtriser la nature, mais pouvons espérer croître en symbiose avec elle. Il nous faut considérer que nous sommes une partie du tout.

Sur un thème où j'ai quelques notions, l'agriculture, nous avons voulu croire, avec le soutien de la chimie - engrais de synthèse et pesticides - que nous pouvions maîtriser au moins pour partie la nature.

Force nous est de constater que nous sommes dans une impasse.

Nous comprenons que c'est en s'appuyant sur les processus biologiques naturels, en essayant de les comprendre dans leur incroyable diversité et complexité, en cherchant à les copier, les dupliquer ou les imiter que nous pourrions sortir de cette impasse.

Nous comprenons que cette voie représentée par l'agroécologie est une voie de découverte, d'innovation, de production durable intégrée dans une dimension territoriale essentielle.

Je me rappelle avec bonheur que nous avons préconisé le développement de l'agroécologie dans l'avis - *La future PAC après 2013* - dont j'ai eu le plaisir d'être rapporteur et que le CESE a adopté au tout début de cette mandature en mai 2011, avec l'immense majorité de vos suffrages.

Dans toute l'approche biologique que je viens d'évoquer, elle est un exemple probant des apports que nous pouvons attendre du biomimétisme, et le projet d'avis le souligne magistralement.

En identifiant le biomimétisme comme une voie de l'avenir, une source large d'innovation, nous nous accordons avec le siècle des Lumières dans une approche scientifique réelle tout en constatant que nous devons adopter de nouveaux paradigmes.

Trois siècles de connaissances accumulées n'y sont pas étrangers.

Merci à Patricia Ricard d'avoir eu la pugnacité qui nous permet de vivre cet après-midi ».

Professions libérales

Peu familier du grand public, le « biomimétisme » couvre une démarche qui consiste à s'inspirer du vivant pour mettre au point des systèmes inédits. Les hommes ont toujours trouvé dans le monde animal et végétal des sources d'inspiration, qu'il s'agisse des formes, des matériaux ou des écosystèmes. Ce n'est donc pas une idée neuve, mais sa théorisation est récente. Que ce soit dans les domaines scientifiques, techniques ou industriels, le champ de ses applications est très vaste : agriculture, industrie, architecture, urbanisme...

La structure en enchevêtrement de poutres du Stade olympique de Pékin lui a valu le nom de « *nid d'oiseau* ». Si Gaudi (notamment pour la conception de la « *Sagrada Familia* ») s'est inspiré de la nature pour en reproduire les formes, un nombre croissant de bâtisseurs vont aujourd'hui plus loin et tentent de copier non seulement l'esthétique du monde biologique mais également ses fonctionnalités.

La nature inspire de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de construction dont le monde de l'ingénierie tire profit en matière de structures, de ventilation, chauffage et régulation de la lumière, dans une démarche de développement durable. Frei Otto concepteur du toit du Stade olympique de Munich a trouvé son inspiration minimaliste en termes de surface, dans les toiles d'araignées.

La nature est un laboratoire immense de stratégies performantes et de procédés qui sont le plus souvent adaptés aux perturbations environnementales. Au moment où l'on s'engage dans une transition écologique, certains matériaux et procédés présentent un potentiel d'économies d'énergie important.

L'hyper-urbanisation a des impacts environnementaux et sanitaires désastreux. Plus l'écosystème urbain vivra au détriment des autres écosystèmes, sans leur restituer ce qu'il leur prend, plus la durabilité de l'ensemble sera compromise. La ville de demain inspirée des écosystèmes vivants pourrait donner autant qu'elle reçoit, s'autoalimenter et n'utiliser que ce dont elle a besoin. L'avis rappelle qu'il est nécessaire de laisser la porte ouverte à des terrains d'innovation, en autorisant la création d'espaces d'expérimentation ou de démonstration et en accordant une souplesse réglementaire.

Le biomimétisme est défini comme l'art d'extraire de la connaissance de la nature. Le frein majeur à son développement est le manque de matière grise pour les extraire, les utiliser et créer de la valeur économique. Les universités, les laboratoires et toutes les structures produisant de la R&D devraient se mobiliser sur ce sujet. L'avis a raison de préconiser entre autres, la promotion du biomimétisme dans l'enseignement supérieur et d'inciter les industriels à amplifier leurs efforts de recherche. À l'instar de l'Allemagne, pionnière en matière de réseaux, la France doit comprendre tout l'intérêt de constituer un réseau en matière de recherche, associant scientifiques et organismes œuvrant au développement du biomimétisme. Le CEEBIOS à Senlis témoigne de la capacité de la France à prendre le leadership dans ce domaine sous réserve qu'il puisse bénéficier de financements dans le cadre des investissements d'avenir.

Les hommes ont utilisé la nature comme une source de matières premières ce qui a conduit à l'appauvrir. Si on l'exploite comme une source de connaissance, cette source est inépuisable ! Cet avis est riche de cet enseignement, le groupe des professions libérales l'a voté.

UNAF

« *J'ai le souci de me mettre à l'unisson de la nature, bien plus que de la copier* ». Le présent avis, qui vise à encourager et à développer l'innovation de façon durable en s'inspirant de la nature rejoint la citation extraite des cahiers de Georges Braque, *Le jour et la nuit*.

Cet avis accompagné d'un rapport révèle toutes les facettes du biomimétisme et fait ainsi œuvre de pédagogie pour en détailler tous les atouts. Le groupe de l'UNAF retient en particulier que la démarche biomimétique implique que les différents scientifiques -physiciens, chimistes, biologistes, ingénieurs- travaillent ensemble : cette interdisciplinarité très large ne peut qu'être profitable à la science. Il en ressort des solutions en parfaite harmonie avec le monde qui nous entoure, non polluantes, efficaces et économes en énergie et en matériaux, pour le bien-être des familles et des générations futures.

Le groupe de l'UNAF partage les propositions de l'avis dans leur ensemble et souhaite mettre l'accent sur deux d'entre elles.

Premièrement, développer l'observation de la nature dans l'enseignement scolaire constitue une piste à investir. L'appropriation des multiples dimensions de la biodiversité, l'observation de la nature passent par l'éducation et, comme bien d'autres sujets, il faut concentrer les efforts sur les générations futures pour être sûrs que les messages sont bien passés et appropriés. La compréhension du patrimoine naturel et le maintien de sa diversité sont certainement le meilleur moyen d'une prise de conscience collective et d'un développement de pratiques responsables par le biais du biomimétisme.

La seconde proposition, sur laquelle le groupe de l'UNAF souhaite insister, est celle, qui vise à progresser vers la durabilité en développant les analyses du cycle de vie des produits et technologies biomimétiques et progresser ainsi dans l'économie circulaire. Le groupe de l'UNAF souligne les atouts pour les familles de l'économie circulaire, qui sont autant environnementaux qu'économiques. Le biomimétisme a toute sa place à prendre pour développer des produits plus durables.

Le groupe de l'UNAF a voté l'avis.

Scrutin

Scrutin sur l'ensemble du projet d'avis
présenté par Patricia Ricard, rapporteure

Nombre de votants..... 168

Ont voté pour 168

Le CESE a adopté.

Ont voté pour : 168

<i>Agriculture</i>	Mmes Bernard, Bonneau, MM. Ferey, Giroud, Pelhate, Mme Sinay, M. Vasseur.
<i>Artisanat</i>	Mme Amoros, MM. Bressy, Crouzet, Mme Foucher, MM. Griset, Le Lann, Liébus, Martin, Mme Sassano.
<i>Associations</i>	MM. Allier, Charhon, Mmes Jond, Prado.
<i>CFDT</i>	M. Blanc, Mme Boutrand, MM. Duchemin, Gillier, Mme Houbairi, MM. Le Clézio, Mussot, Nau, Mmes Nicolle, Pajères y Sanchez, MM. Quarez, Ritzenthaler.
<i>CFE-CGC</i>	M. Artero, Mme Couturier, MM. Delage, Dos Santos, Lamy, Mme Weber.
<i>CFTC</i>	M. Coquillion, Mme Courtoux, MM. Ibal, Louis, Mmes Parle, Simon.
<i>CGT</i>	Mme Crosemarie, M. Delmas, Mmes Dumas, Farache, Geng, Hacquemand, MM. Mansouri-Guilani, Marie, Michel.
<i>CGT-FO</i>	MM. Bellanca, Bernus, Chorin, Mme Fauvel, M. Nedzynski, Mme Nicoletta, MM. Peres, Pihet, Mme Thomas, M. Veyrier.
<i>Coopération</i>	MM. Lenancker, Verdier.
<i>Entreprises</i>	Mme Bel, M. Bernasconi, Mmes Castera, Coisne-Roquette, Dubrac, Duhamel, MM. Lebrun, Marcon, Mariotti, Mongereau, Placet, Pottier, Ridoret, Roger-Vasselin, Roubaud, Mme Roy, M. Schilansky, Mmes Tissot-Colle, Vilain.
<i>Environnement et nature</i>	MM. Beall, Bougrain Dubourg, Mmes de Béthencourt, Denier-Pasquier, Ducroux, MM. Genest, Genty, Guérin, Mmes de Thiersant, Laplante, Mesquida, Vincent-Sweet, M. Virlovet.
<i>Mutualité</i>	MM. Andreck, Beaudet.
<i>Organisations étudiantes et mouvements de jeunesse</i>	MM. Djebara, Dulin, Mmes Guichet, Trellu-Kane.
<i>Outre-mer</i>	MM. Budoc, Galenon, Janky, Lédée, Omarjee, Osénat, Paul, Mmes Romouli-Zouhair, Tjibaou.
<i>Personnalités qualifiées</i>	MM. Aschieri, Bailly, Mmes Ballaloud, Brishoual, Brunet, Cayet, Chabaud, MM. Corne, Delevoye, Mmes Dussaussois, El Okki, M. Etienne, Mmes Flessel-Colovic, Fontenoy, MM. Fremont, Geveaux, Mmes Gibault, Grard, Graz, Hezard, MM. Hochart, Jouzel, Mme de Kerviler, MM. Khalfa, Kirsch, Le Bris, Mme Levaux, MM. Lucas, Martin, Mmes de Menthon, Meyer, M. Obadia, Mmes Parisot, Ricard, M. Richard, Mme du Roscoät, MM. de Russé, Santini, Soubie, Terzian, Urieta.

<i>Professions libérales</i>	MM. Capdeville, Gordon-Krief, Noël, Mme Riquier-Sauvage.
<i>UNAF</i>	Mme Basset, MM. Damien, Farriol, Feretti, Fondard, Joyeux, Mmes Koné, L'Hour, Therry, M. de Viguerie.
<i>UNSA</i>	M. Bérille.

Rapport

Le biomimétisme :
s'inspirer de la
nature pour innover
durablement

présenté au nom de la section de l'environnement

par Mme Patricia Ricard

Rapport

Introduction

Aller chercher l'inspiration dans la nature n'est pas une idée neuve, la pratique a été courante tout au long de l'histoire de l'humanité.

Mais s'inspirer de la nature pour innover de façon durable, voilà une idée qui à l'aulne de nos interrogations écologiques, prend un sens nouveau. La précision de nos outils d'observation, notamment à l'échelle nanométrique, nous a ouvert un champ d'exploration inédit, une source de connaissances inattendues sur des formes, des matières et des fonctions efficaces et durables.

Toutes les espèces animales ou végétales doivent et savent s'adapter, pour peu qu'elles en aient le temps. Certaines ont même réussi à s'adapter à des changements parfois radicaux de leur environnement. Janine Benyus, biologiste américaine, a été une des premières à insister sur l'harmonie qui règne entre organismes d'un même écosystème. Elle tire de l'observation de la nature, de sa capacité à produire et à transformer à température constante, sans autre énergie que celle que lui procure le rayonnement solaire, une démarche d'imitation nommée Biomimicry. L'idée est née d'extraire de la nature des connaissances et non plus seulement des matières premières. La simplicité de cette approche et les résultats déjà observés dans de nombreux domaines attirent l'attention d'un nombre grandissant d'acteurs.

L'inspiration peut venir des formes animales ou végétales, d'une partie, même infime, d'un organisme, de stratagèmes performants ou des écosystèmes et de leur remarquable équilibre dynamique. Vivre et créer les conditions nécessaires à la poursuite de la vie, voilà la feuille de route du vivant. Elle rejoint en cela celle du développement durable. Au moment où s'engagent les transitions écologiques et énergétiques, ces facultés de la nature peuvent donc nous aider innover durablement. Le biomimétisme est ainsi un outil dans notre recherche de solutions permettant de répondre aux défis du réchauffement climatique et de la poursuite durable des activités humaines. La durabilité est en effet une dimension essentielle du biomimétisme, tel qu'il a été conçu. Cette condition de durabilité est présente tout au long du rapport, qui la considère comme inséparable du biomimétisme.

L'étude des espèces et de leurs interactions pour en tirer des procédés et les traduire en pratiques change notre regard sur la biodiversité et sa conservation. Le recyclage, l'économie circulaire, l'écologie industrielle, la sobriété énergétique appliquent certains principes de fonctionnement des écosystèmes. De nombreuses entreprises s'engagent dans la démarche, comme en témoigne le présent rapport.

Qui dans la nature a eu le même problème que moi et comment l'a-t-il résolu ? Tel est le fondement de la démarche. Les réponses existent, enfouies dans la nature. Revenir à nos savoirs fondamentaux sur le monde vivant, voilà ce à quoi nous invite le biomimétisme.

Comment construire et partager cette connaissance, comment organiser cette nouvelle façon d'innover durablement ? Quelle culture et quelle éducation devra-t-on associer à la démarche ? Quel est l'état de l'art de ce mouvement, quels en sont les acteurs, quels sont les perspectives et les freins de ces nouvelles explorations ? Quelle articulation peut-on envisager avec nos modèles existants ? Telles sont les questions auxquelles ce rapport s'efforce d'apporter des éléments de réponse.

Qu'est-ce que le biomimétisme ?

Forgé à partir de deux racines grecques, *bios*, vie, et *mimesis*², imitation, ce néologisme désigne la démarche immémoriale de l'espèce humaine qui consiste à observer la nature et à s'en inspirer pour innover, améliorer sa condition, ses productions... le biomimétisme se concrétise dans l'univers des formes, des matériaux, des procédés et des systèmes.

Bio-inspiration, bionique, biomimétique, biomimétisme sont autant de termes qui renvoient aujourd'hui à cette démarche, le dernier d'entre eux se singularisant par l'importance qu'il accorde à la dimension de durabilité.

L'acception moderne du terme « biomimétisme » est d'histoire toute récente, si l'on retient comme point de départ du processus de reconnaissance de cette approche, ou plutôt de cette méthode, la parution en 1998 du livre de Janine Benyus, *Biomimicry, innovation inspired by nature*, traduit en français en 2011 sous le titre *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables*³.

Un concept non encore stabilisé...

Historique : le biomimétisme avant la lettre

Une légende chinoise fait remonter la découverte de la soie au XXVII^{ème} siècle avant Jésus-Christ, plus précisément à l'observation par l'impératrice Leizu des nombreuses qualités du fil produit par une larve accidentellement tombée dans sa tasse de thé depuis les branches d'un mûrier. La légende n'est pas sans fondement : les plus anciens fragments de soie découverts ont été tissés il y a quatre mille cinq cents ans, voire au-delà. Le ver à soie resta, pendant de nombreux siècles, un secret jalousement gardé par la Chine.

Les élevages français de vers à soie - et par voie de conséquence tout un secteur industriel - furent menacés, à la fin du XIX^{ème} siècle, par des maladies auxquelles Louis Pasteur consacra une partie de ses recherches. Un chimiste et ingénieur, Hilaire de Chardonnet, fut associé aux travaux, et chercha à imiter en laboratoire le travail de la larve : il parvint en 1884 à fabriquer une fibre présentant les qualités de la soie, qui fut donc baptisée soie artificielle, à partir de cellulose et de collodion.

L'exemple de la soie est significatif à un double titre : il permet d'illustrer un premier niveau d'inspiration, qui consiste à observer la portion vivante de la nature en tant que productrice de richesses et à utiliser, contrôler, accroître à notre profit celles que nous savons identifier. Le deuxième niveau consiste, après observation, à tenter de reproduire ces productions en mobilisant les ressources scientifiques et techniques disponibles.

2 Voir aussi le dictionnaire de l'Académie : Mimétisme, « dérivé savant du grec *mimēteos*, adjectif verbal de *mimēisthai*, "imiter" ».

3 Janine M. Benyus ; *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables* ; Les éditions Rue de l'échiquier, traduction de Céline Sefraoui, 2011.

Les formes et leurs matières sont également des sources d'inspiration très anciennes et diverses. Dans ses *Commentaires sur la guerre des Gaules*, Jules César évoque à plusieurs reprises une formation de ses légions, la *tortuda* ou tortue, où les boucliers oblongs courbés en segments de cercles forment un mur à l'extérieur et un toit au-dessus des têtes. L'historien romain Dion Cassius écrit à propos de cette manœuvre qu'on l'appelle ainsi « *à cause de sa consistance et parce qu'elle couvre parfaitement* ». Le procédé retenu par la nature (les écailles) et la forme de la carapace inspirent la tactique militaire. Pour rester dans le même champ d'application, on rappellera que le camouflage est bio-inspiré depuis l'origine et qu'il a atteint au cours de la seconde Guerre mondiale une certaine forme de perfection dans l'imitation de la nature.

Léonard de Vinci conçut, à partir de l'observation des oiseaux, des projets d'hélice, de parachute ou de planeur. À la fin du XIX^{ème} siècle Otto Lilienthal, pionnier de l'aviation, étudia les capacités de portance de l'extrados de l'aile des oiseaux pour concevoir ses planeurs, avec lesquels il effectua plusieurs vols. Clément Ader s'inspira des ailes de la chauve-souris pour réaliser à partir de 1892 son « avion III » : « *comme tous les pionniers de l'aéronautique, Ader trouve son inspiration dans la nature. L'ingénieur a beaucoup observé la roussette... celle-ci ne se limite pas, comme les autres chiroptères, à battre fréquemment des ailes. Elle peut également effectuer de courts vols planés, singularité qui fournit à Ader un modèle aérodynamique original. Il imite l'ossature de la roussette pour construire son appareil*⁴. »

Plusieurs auditionnés ont également indiqué que Gustave Eiffel avait utilisé pour ses structures métalliques, en particulier celles de la célèbre tour éponyme, des travaux basés sur l'observation d'une coupe sagittale de fémur.

L'architecture plus généralement puise, depuis au moins l'Antiquité, son inspiration dans la nature : pour les colonnes de ses temples, l'Égypte antique substitue la pierre au bois des origines en conservant la forme du palmier, ou choisit celles d'autres végétaux comme le lotus et le papyrus. Beaucoup plus près de nous, Antoni Gaudi affirme avec force « *je n'invente rien, je copie le grand livre toujours ouvert de la nature* ». Il s'inspire des plantes et en particulier des arbres pour concevoir les colonnes inclinées et arborescentes qui l'ont rendu célèbre.

Dans ces domaines, comme dans de nombreux autres l'histoire des civilisations offre beaucoup d'exemples d'activités ou de réalisations humaines bio-inspirées, dont l'inventaire n'a pas été dressé à ce jour - si tant est qu'il puisse l'être. En effet, un des constats fondamentaux du biomimétisme est que la vie est née sur terre il y a 3,8 milliards d'années et a donc développé, en cet espace de temps, des capacités qui ont fait la preuve de leur efficacité et de leur durabilité. Bien que l'observation et l'imitation de la nature apparaissent comme des pratiques vieilles de plusieurs milliers d'années, voire plus anciennes encore, elles ne peuvent connaître leur plein développement que parce que l'espèce humaine dispose du recul nécessaire à la fois par rapport à sa propre histoire et par rapport à l'histoire de la terre. Par recul, on entendra disposer du savoir suffisant pour mesurer et apprécier l'inventivité, la complexité, l'efficacité, la robustesse, la résilience, la durabilité du vivant inscrites dans une histoire géologique tourmentée marquée par plusieurs vagues d'extinction massive des espèces et, enfin, l'avènement de ce que l'on appelle parfois aujourd'hui l'anthropocène.

4 CNAM ; *L'avion III de Clément Ader* ; Les carnets du musée des arts et métiers.

Gilles Boeuf⁵ rappelle à cet égard que « *quand on parle de bio-inspiration, il est important de rappeler l'étonnante résilience du monde vivant, résilience dont on gagnerait sans doute à s'inspirer davantage. Ce vivant a traversé plus de cinq crises majeures au cours des six cent derniers millions d'années. La crise Permien-Trias, par exemple, survenue il y a deux cent quarante cinq millions d'années, a vu l'extinction de près de 96 % des espèces. La vie a pourtant «résisté» à ces moments dramatiques ; elle s'est adaptée et a développé des «solutions» étonnantes, passées au crible de l'évolution.* »

C'est probablement l'observation des systèmes et écosystèmes puis l'analyse de leurs conditions d'efficacité (adaptation, exaptation, coopération, flux d'échanges ininterrompus...) qui tracent le périmètre d'inspiration le plus pertinent et présentent la plus forte valeur ajoutée du biomimétisme.

Terminologie du biomimétisme : définitions et différences d'approches

De la biomimétique au biomimétisme

Dans un article paru en 2006 dans la revue *Interface*⁶, intitulé *Biomimetics : its practice and theory*, les auteurs attribuent à un chercheur américain, Otto Herbert Schmitt, la création du mot *biomimetic* dans les années 1950. Les recherches d'Otto Schmitt ont porté notamment sur la mise au point d'un circuit artificiel imitant la propagation du signal électrique le long d'un nerf. Utilisant le terme *biomimetics*, Otto Schmitt indiquait que « *notre intérêt commun réside dans l'examen des phénomènes biologiques avec l'espoir de gagner en connaissance et en inspiration afin de développer des systèmes physiques ou composites biophysiques à l'image de la vie* ». L'approche retenue consiste alors à répondre aux questions de la biologie avec les théories et les technologies de la physique, et simultanément, à considérer les problèmes de la physique et de l'ingénierie avec un regard de biologiste.

Les auteurs de l'article précité précisent que le terme biomimétique fait son entrée dans le *Webster's dictionary* en 1974, qui en donne la définition suivante : « *l'étude de la formation, de la structure ou de la fonction de substances et de matières (comme par exemple les enzymes ou la soie) produits biologiquement ainsi que de mécanismes biologiques et de processus (comme la synthèse des protéines ou la photosynthèse) notamment dans le but de synthétiser des produits similaires au moyen de procédés artificiels imitant ceux de la nature* ».

Il semble donc, historiquement parlant, que les concepts de biomimicry/biomimétisme, biomimétique/biomimetic, qui ont la même étymologie et appartiennent au même champ lexical, soient non seulement très proches les uns des autres mais aussi souvent utilisés indifféremment.

Hermine Durand⁷ dans son étude réalisée, en 2012, pour le Commissariat général au développement durable (CGDD), utilise ainsi le terme biomimétisme et l'expression « d'applications biomimétiques » pour les produits et technologies qui en résultent.

5 Gilles Boeuf ; *Actes du colloque "Recherches bio-inspirées"* ; CGDD, décembre 2012, Références, juillet 2013.

6 Julian FV Vincent, Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer, Anja-Karina Pahl ; *Interface* ; Journal of the Royal Society, August 2006, Volume 3, issue 9.

7 Hermine Durand, MEDDTL/CGDD/DDD ; *Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers* ; Études et documents du CGDD, n° 72, octobre 2012.

Gilles Boeuf⁸, évoquant « *le biomimétisme ou la biomimétique* », en définit les contours : l'approche biomimétique « *prenant pour support d'analyse le monde vivant... traduit, par un effort d'abstraction, les modèles biologiques analysés en concepts techniques ou développements industriels. Il s'agit donc par construction d'une démarche interdisciplinaire sollicitant sciences fondamentales et sciences de l'ingénieur. Cette démarche n'est pas une nouvelle science mais plutôt une méthodologie ou une approche transversale, applicable dans nombre de domaines scientifiques et techniques et susceptible d'apporter des « réponses » aux questions techniques ou organisationnelles que l'on se pose pour ou hors du vivant* ».

L'usage de ces termes voisins traduit cependant des différences d'approches. Pour les Anglo-saxons, si la démarche scientifique baptisée *Biomimetics* est bien une source importante de recherche et d'innovation, « *elle ne s'inscrit quasiment jamais dans une démarche de développement durable*⁹ ». Elle privilégie en effet l'efficacité ou simplement l'efficacité de technologies maîtrisées. Bien qu'inspirées par la nature, celles-ci peuvent par exemple se révéler polluantes.

Biomimicry, la démarche forgée par Janine M. Benyus, ne réfute pas la précédente, mais elle y ajoute explicitement une dimension fondamentale, celle de la durabilité - qui peut être parfois sous-entendue dans d'autres contextes, mais ne se trouve pas exprimée en tant qu'objectif primordial.

Gauthier Chapelle¹⁰ résume ainsi ce changement de paradigme : « *l'intuition géniale de Janine M. Benyus, incarnée dans le mot Biomimicry... aura été de se concentrer sur la durabilité : non seulement les organismes vivants nous inspirent, mais ils sont passés experts pour « prospérer gracieusement et à long terme » sur Terre* ». L'inventrice du terme *Biomimicry* parle elle-même à ce propos d'une « *émulation consciente du génie de la vie, l'innovation inspirée par la nature*¹¹ », basée sur « *une imitation respectueuse* » de cette dernière, nécessitant humilité et volonté d'apprendre. En Europe, particulièrement en Allemagne, cette sacralisation de la nature suscite des réserves plus ou moins vives.

En France, la dimension durable du biomimétisme n'a pas été immédiatement mise en avant, même si elle se trouve déjà mentionnée dans les lignes que l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques consacrait, en 2007¹², à la démarche biomimétique. Celui-ci indiquait qu'elle « *vise à* :

- repérer un comportement remarquable dans la fabrication de matériaux par le vivant ;
- comprendre la relation qui s'établit entre le comportement de fonctionnement et la structure de fabrication ;
- *et à répliquer cette structure pour élaborer des matériaux durables, selon des processus préindustriels, c'est à dire de façon rapide, standardisée, en recherchant le moindre coût* ».

Par la suite, le ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) a fait sienne cette évolution. Il indique que « *le biomimétisme consiste à observer*

⁸ Actes du colloque « Recherches bio-inspirées », déjà cité.

⁹ Hermine Durand, étude citée.

¹⁰ Préface de la traduction française de Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables, de Janine M. Benyus.

¹¹ *Biomimétisme*, Janine M. Benyus, ibid.

¹² OPECST, Pierre Laffitte, Claude Saunier ; *Les apports de la science et de la technologie au développement durable* ; Rapport de Sénat, « La biodiversité : l'autre choc ? L'autre chance ? », Tome II, 12 décembre 2007.

et à reproduire artificiellement des propriétés essentielles (formes, matériaux, processus, interactions) d'un ou plusieurs systèmes biologiques, pour mettre au point des procédés et des organisations permettant un développement durable des sociétés à un faible coût économique et environnemental »¹³. La Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) 2015-2020 consacre un encadré au biomimétisme, qualifié de « démarche qui consiste à aller chercher notre inspiration, pour une innovation durable, dans la nature »¹⁴, qu'elle prévoit par ailleurs d'encourager.

Du biomimétisme à la bio-inspiration

Selon le CGDD, le biomimétisme, entendu dans un sens large, inclut la bionique, la bio-assistance et la bio-inspiration. Cette approche lexicale pourrait être remise en question par les travaux de normalisation en cours, consacrant la bio-inspiration comme terme générique.

Le terme bionique (*bionic* en anglais) est le plus ancien des trois - il est contemporain de *biomimetic*. Dès 1985, le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) lui consacrait une exposition sous le titre « *Inventions de la nature et innovation industrielle - la bionique* ». En 1987, un livre de Werner Nachtigal, *La nature réinventée*, préfacé par Allain Bougrain Dubourg, décrivait la bionique comme une « *nouvelle science, un regard insolite sur les inventions de la nature* », « *pratiquée par des ingénieurs, des architectes, des médecins et des roboticiens* ».

Selon le dictionnaire de l'Académie, le terme bionique, « *composé du radical de biologie et de la finale d'électronique* », est une « *science qui étudie les processus biologiques d'un point de vue technique, en vue d'y découvrir des principes pouvant s'appliquer au domaine militaire ou industriel* ». Elle examine en particulier les propriétés mécaniques du vivant, et s'efforce de les transposer dans le domaine de l'ingénierie. La bionique concerne la robotique, le développement de capteurs bio-inspirés, la biomécanique...

« *La bio-assistance*¹⁵ consiste à utiliser des molécules d'origine biologique ou des organismes vivants entiers pour imiter des fonctions observées dans la nature, ou les détourner afin de répondre à des défis technologiques. Au sein du biomimétisme, la bio-assistance est utilisée par exemple en agroécologie ou dans les biotechnologies (exemple : utilisation d'enzymes pour catalyser des réactions dans l'industrie chimique) ».

La bio-inspiration désigne de manière plus générale le fait de rechercher dans le monde vivant de nouvelles sources d'inspiration pour créer des objets ou inventer des procédés qui n'y sont pas présents naturellement. On parle souvent de bio-inspiration en design, en architecture et en science des matériaux, de même que pour tout ce qui relève de l'inspiration esthétique.

Biomimétisme et nouveaux schémas d'organisation

La réflexion sur les évolutions ou transformations à apporter aux schémas d'organisation des systèmes industriels et commerciaux est à l'origine de plusieurs concepts qui sont rattachés à un titre ou à un autre et par des liens plus ou moins étroits au biomimétisme, en raison de l'inspiration qu'ils puisent dans la nature.

¹³ Site internet du MEDDE, Développement durable, rubrique « biomimétisme ».

¹⁴ SNTEDD 2015-2020, Axe 6 ; *Orienter la production de connaissances, la recherche, l'innovation, vers la transition écologique* ; Priorité 2 « faciliter les démarches d'innovation avec tous les acteurs ».

¹⁵ Ibid.

Ces notions sont encore en devenir et les relations qu'elles entretiennent doivent continuer d'être explorées et précisées.

□ *L'écomimétisme*

L'écomimétisme tout d'abord, qui « désigne plus particulièrement l'étude de fonctionnements écosystémiques intéressants pour en reproduire les conditions et donc les avantages »¹⁶. La démarche ne s'applique ici ni aux matières, ni aux formes, mais au fonctionnement des écosystèmes en tant qu'ils peuvent inspirer des approches intégrées des systèmes de production, agricoles ou industriels.

Dominique Dron, alors commissaire générale au développement durable, écrivait en 2012, en avant-propos de l'étude, « la voie du biomimétisme et de l'écomimétisme consisterait plutôt... à partir de processus ou matériaux naturels, généralement effectués ou obtenus à pression et température basses, à partir de substances non rares et renouvelées intégralement recyclées et sans rejets toxiques » à « examiner ce qu'il est éventuellement nécessaire de « dégrader » ou de transposer de ces performances pour obtenir une production importante ou un effet à l'échelle souhaitée. » En agriculture par exemple, la démarche écomimétique consiste à observer et à imiter le fonctionnement des écosystèmes naturels. La permaculture en est l'exemple le plus abouti, mais la démarche peut concerner à des degrés divers différentes pratiques, depuis l'agriculture biologique jusqu'à l'agriculture conventionnelle.

L'écomimétisme, considéré comme l'une des dimensions du biomimétisme, est présent dans l'écoconception, dans l'écologie industrielle, dans l'économie circulaire, ou l'économie de fonctionnalité, mais il ne se confond pas avec ces dernières.

□ *L'écologie circulaire et l'écoconception*

L'écologie circulaire mérite le premier développement en raison de l'importance que lui accorde la SNTEDD 2015-2020. L'axe 2 de la stratégie s'intitule en effet « s'engager dans l'économie circulaire et sobre en carbone ». L'économie circulaire est présentée comme « inspirée des cycles de la nature où rien ne se perd, et tout se transforme ». La stratégie indique que « ce nouveau modèle d'économie circulaire, sobre en carbone et en ressources naturelles peut se définir comme un système économique de production, d'échange et de consommation conçu et organisé pour minimiser les prélèvements nets de ressources (énergies fossiles, matières premières, eau, foncier, milieux) et les émissions polluantes, sources d'impacts environnementaux et sanitaires négatifs, tant locaux que globaux. »

Un rapport et avis adopté par le Conseil économique, social et environnemental (CESE) en janvier 2014¹⁷ rappelait à ce propos la définition adoptée par le Conseil national des déchets : « on entend par économie circulaire un système de production et d'échanges prenant en compte la durabilité et le recyclage des produits ou de leurs composants de sorte qu'ils puissent redevenir soit des matières premières nouvelles soit des objets réutilisables. Ces démarches prennent en considération l'ensemble du cycle de vie des produits de l'amont vers l'aval et reposent sur l'éco-conception afin d'allonger leur durée de vie, faciliter leur réparabilité et anticiper leur recyclage. » L'avis précise que les « différentes démarches conduisant à réduire la consommation de matières premières relèvent de l'économie circulaire, processus inscrit dans

¹⁶ Étude du CGDD, 2012, citée.

¹⁷ Yves Legrain ; *Transitions vers une industrie économe en matières premières* ; Rapport et avis du Conseil économique, social et environnement, Les Éditions des journaux officiels, janvier 2014.

les engagements du Grenelle de l'environnement mais dont le concept n'est pas stabilisé et dont la déclinaison et les ambitions varient selon les promoteurs. »

Le même avis, sur la base de travaux de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) indique que *« l'économie circulaire est basée sur six éléments principaux :*

- l'utilisation modérée et la plus efficace possible des ressources non renouvelables ;*
- une exploitation des ressources renouvelables respectueuse de leurs conditions de renouvellement ;*
- l'éco-conception et la production propre ;*
- une consommation respectueuse de l'environnement ;*
- la valorisation des déchets en tant que ressources ;*
- le traitement des déchets sans nuisance. »*

L'écoconception apparaît donc comme un élément de l'économie circulaire. Cette démarche, toujours selon l'avis du CESE, *« repose sur des principes classiques de conception des produits, centrés sur les paramètres économiques et technologiques, et sur des éléments et des principes nouveaux dont l'objet est de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie. »*

De l'examen des deux définitions ci-dessus, on peut conclure que l'économie circulaire et l'écoconception sont bien l'une et l'autre soucieuses de durabilité et qu'elles peuvent être qualifiées de biomimétiques en ceci qu'elles s'inspirent du bouclage des flux, notamment celui du carbone, caractéristique des écosystèmes durables.

Cette inspiration est parfois explicite. Le rapport présenté par Yves Legrain étudie le cas de la certification internationale d'origine américaine *Cradle to cradle*, officialisée en 2002. Elle relève d'une démarche visant à copier le système de production et de consommation sur le modèle naturel, qui tend à transformer tout déchet en nourriture, à n'utiliser d'énergie que d'origine solaire, et où la diversité est la règle. *« La démarche «Cradle to cradle (C2C)», en français «du berceau au berceau», s'oppose à la conception actuelle des produits qui vont «du berceau à la tombe». Le C2C est, au dire de ses promoteurs, «une philosophie d'écoconception» qui suggère que l'espèce humaine et ses activités ne sont pas un problème pour la nature mais, au contraire, qu'il est possible d'avoir une empreinte positive sur la santé et l'environnement. »* La certification C2C a été évoquée également par Gauthier Chapelle, co-fondateur de Biomimicry Europa, lors de son audition devant la section.

L'écologie industrielle

Autre démarche, l'écologie industrielle *« vise à mettre en place au niveau local une organisation du système économique, caractérisée par un usage optimal des ressources et un fort taux de recyclage de la matière et de l'énergie. Il faut, pour ce faire, inciter les acteurs économiques à développer des synergies afin de réutiliser localement les résidus de production et mutualiser certains services et équipements »*, ainsi que le rappelle Yves Legrain dans le rapport du CESE relatif aux transitions vers une industrie économe en matières premières.

L'écologie industrielle est intégrée dans une démarche territoriale de mutualisation des services cherchant à optimiser la « circularisation » des flux de produits et déchets dans des circuits courts afin de limiter la consommation de ressources et les impacts environnementaux. L'écologie industrielle et territoriale contribue donc également au développement local. L'Europe occidentale a été pionnière à travers l'expérience danoise de Kalundborg, à laquelle ont succédé des expériences françaises, allemandes, anglaises,

suédoises, suisses et espagnoles, suivies d'autres, hors d'Europe. L'exemple de Kalundborg a été mentionné et même développé lors des auditions. Ingénieur écologue et docteur en océanographie, Tarik Chekchak a indiqué lors de son audition que ce projet d'écologie industrielle où « *plusieurs entreprises produisant des déchets s'associent de façon que les déchets de l'une deviennent les ressources de l'autre* » s'était construit « *autour d'une cogénération où la production de vapeur a servi à des fermes, à de la pisciculture, à des échanges de cendres, de boues pour des entreprises... l'idée étant de fermer les flux de circulation de matières et d'énergie* ».

Ainsi, l'écologie industrielle peut être clairement rattachée à l'une des sources possibles d'inspiration que fournit la nature dans le cadre du biomimétisme : le fonctionnement des écosystèmes, qui recyclent en permanence leurs déchets en matériaux. Gauthier Chapelle a défendu une idée similaire, indiquant que les démarches d'écoconception, d'écologie industrielle, d'économie circulaire, cherchant à reproduire certains grands principes de fonctionnement du vivant, recourent nécessairement, à un moment ou à un autre, la démarche biomimétique. On retrouve en effet dans ces différentes démarches l'écho, parfois net, parfois atténué, des deux principes fondateurs du biomimétisme : observer la nature, l'imiter de manière durable.

... mais un horizon prometteur

Dans un champ déterminé et pour atteindre un objectif clairement identifié, il est possible de mettre à profit les « inventions » de la nature. Gain de temps et amélioration des performances en résultent le plus souvent. Ce recours à la richesse du monde vivant s'inscrit alors dans un processus de conception de production ou de distribution traditionnel. L'innovation due à la nature constitue un élément parmi d'autres dans le système productif.

Cette utilisation souvent pertinente et efficace des ressources naturelles au profit d'un modèle existant le sert et le renforce. Cette approche utilitariste peut cependant être dépassée. Ce ne sont plus des éléments et procédés naturels qui sont copiés en étant éventuellement retravaillés, mais la nature elle-même dans son fonctionnement le plus intime qui sert de modèle. Les domaines d'application potentiels excèdent alors les biens et services produits pour s'étendre à la production elle-même, voire à l'organisation sociale. Autre chose est de déterminer si cette forme d'inspiration est souhaitable ou non.

Les trois dimensions du biomimétisme

Trois approches sont généralement distinguées pour ordonner les apports du biomimétisme aux productions humaines. Ces approches privilégient soit les formes que l'on trouve dans la nature, soit les procédés utilisés par le vivant pour répondre au mieux à une nécessité dictée par son environnement, soit les écosystèmes, eu égard à la performance de ces derniers en matière de durabilité, productivité et adaptabilité.

Des formes particulièrement efficaces

L'esthétique ou la forme des organismes vivants ou plus modestement d'une partie spécifique de ces organismes constituent la plus ancienne source d'inspiration des hommes.

Parmi d'autres, l'exemple de l'analogie de la structure des huttes primitives avec l'armature d'un squelette est souvent cité.

Toutefois, ce n'est qu'à la Renaissance que le rapport aux formes naturelles visibles et l'intérêt de les imiter a commencé à être interrogé. Le mouvement s'est poursuivi depuis. La finalité esthétique ou fonctionnelle dans l'architecture ou la production d'objets artisanaux ou manufacturés a été fluctuante¹⁸. La finalité technologique n'a fait que se renforcer. Il est cependant notable que dans les deux cas la nature est considérée comme une ressource au service des fins humaines. Dans le second, l'efficacité et l'efficience sont privilégiées.

Des exemples célèbres ou moins connus illustrent l'intérêt qu'il peut y avoir à s'inspirer des formes de végétaux, animaux et organismes vivants en général. Ces formes microscopiques ou de grande taille sont utilisées aussi bien dans la production d'objets usuels que pour la production de biens d'équipement ou d'énergie.

À l'échelle microscopique, on citera à titre d'exemple la découverte de ce biologiste qui, travaillant sur des mouches fossiles, s'est aperçu que l'œil exceptionnellement sombre d'une de ces espèces possédait une structure moléculaire anti-réflexion. Celle-ci permet à un maximum de lumière de descendre vers les capteurs de lumière de l'œil et à un minimum d'être réfléchi vers l'extérieur. Cette caractéristique de forme, observée depuis sur certaines mouches contemporaines, a servi à l'amélioration de la performance des panneaux solaires.

C'est en 1941 que germe dans l'esprit de l'ingénieur suisse Georges de Mestral l'idée de créer un système de fixation réversible inspiré des propriétés des fleurs de bardane, après avoir observé combien il est difficile de retirer les chardons bleus des Alpes des vêtements ou des fourrures des animaux où ils se sont accrochés. Chacune des capitules de ces plants se termine en effet par une sorte d'hameçon à mémoire de forme. Le Velcro, invention issue de cette observation, sera breveté après une décennie de mise au point.

L'avant du Shinkansen 500, train à grande vitesse japonais, a été dessiné par référence au bec et à la tête du martin-pêcheur. Pour se nourrir, cet animal passe en effet très rapidement d'un milieu peu dense (l'air) à un milieu plus dense (l'eau) avec une remarquable efficacité, les vibrations émises dans l'eau lors de ce passage étant extrêmement faibles. Les ingénieurs japonais, dont l'un était passionné d'ornithologie, ont eu l'idée de s'inspirer des propriétés de ce design, y compris la rainure du bec, pour résoudre les problèmes posés par le passage des tunnels : la compression à haute vitesse provoque des frictions, des nuisances sonores du type « bangs supersoniques » et un ralentissement du train.

Le profilage bio-inspiré de l'avant de la motrice s'est traduit par une réduction de la consommation électrique de 15 % dans des tunnels, une diminution des nuisances sonores et une augmentation de la vitesse de 10 %.

L'aéronautique présente des exemples aussi significatifs. Des perfectionnements récents proviennent eux aussi de l'observation et de l'imitation de la nature. Ainsi les ailettes quasi verticales ou winglets, placées aux extrémités de la voilure des avions pour améliorer l'efficacité du vol sont directement inspirées de la forme des ailes de l'aigle de steppe. L'amélioration qui en résulte, permet d'accommoder certains gros porteurs aux limites aéroportuaires et de garantir d'excellentes performances aérodynamiques, gage de réduction de la consommation et des émissions de polluants et de gaz à effet de serre dus à la combustion de kérosène. Récemment, l'industrie aéronautique s'est également inspirée

¹⁸ Elle fut dominante dans l'Art nouveau qui, en rupture avec l'académie du XIX^{ème} siècle, a tiré l'essentiel de son inspiration des formes naturelles d'origine végétale.

de la forme de la narine du faucon pour concevoir un volet d'entrée d'air compatible avec les vitesses variables des aéronefs. Les exemples de cette nature pourraient être multipliés concernant ce secteur industriel.

Toujours dans le domaine de l'industrie, un système français de production d'électricité grâce à l'utilisation des courants marins est actuellement en phase de développement. Le procédé utilisé a pour origine le constat d'un ingénieur, Jean-Baptiste Drevet, qui a réalisé que la manière la plus courante de se déplacer dans l'eau, donc probablement la plus efficace, est l'utilisation de l'ondulation. Une membrane ondulante, développée avec le concours de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) ; est déjà en essai à Boulogne.

Sur le même principe, cet ingénieur a aussi développé une pompe à membrane qui permet d'être beaucoup plus efficace et de consommer beaucoup moins d'énergie. Cette pompe est à l'essai dans un certain nombre de grands groupes industriels sensibles aux économies d'énergie générées par ce procédé bio-inspiré.

Des procédés et matériaux ultra-performants

Comment le vivant fabrique-t-il ses matériaux ? Les recherches entreprises pour répondre à cette question ouvrent sur un monde fascinant dont le potentiel en termes d'économie d'énergie et de matières premières est bien supérieur à celui de l'univers des formes.

Le vivant, au cours de sa longue histoire, a en effet produit une formidable variété de structures mécaniques aux qualités exceptionnelles pour répondre à ses besoins et aux contraintes de son environnement. Pour découvrir ces « inventions » de la nature, les analyser et les adapter à notre monde technologique, les hommes ont d'abord dû créer les outils mathématiques et scientifiques indispensables à l'observation, la compréhension et la transposition de ces systèmes naturels. L'approche biomimétique appliquée aux procédés et matériaux opère la jonction entre biotechnologies et sciences de l'ingénieur. Les idées et innovations qui en résultent sont nombreuses. Ce sont souvent des innovations de rupture qui ont permis d'améliorer les performances de systèmes existants ou de mettre au point de nouveaux matériaux. Le tour de force de la nature est non seulement de produire des matériaux très complexes et parfaitement fonctionnels, mais encore de les fabriquer à température et pression ambiantes, sans utiliser de produits toxiques. À ce titre, la chimie des matériaux du vivant est porteuse d'une véritable rupture voire d'une révolution s'il s'avère possible de s'en approcher. En toute hypothèse, le processus de production du vivant apparaît comme un modèle alternatif crédible à l'approche actuelle de la synthèse des matériaux, laquelle repose notamment sur un usage abondant d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz).

Dans un article publié dans Le Journal des Ingénieurs, Fabienne Monfort-Windels¹⁹ relève que les scientifiques sont aujourd'hui particulièrement attentifs à certaines caractéristiques des matériaux du vivant :

« - ils sont hautement organisés en une hiérarchie de structures emboîtées dont la plus petite est souvent nanométrique (...) [Or] la miniaturisation exigée aujourd'hui dans tous les domaines nécessite de produire des nanomatériaux au-delà des limites des techniques classiques

¹⁹ Responsable de l'information, de la veille technologique et de la cellule brevets chez SIRRIS (Centre collectif de recherche et d'innovation de l'industrie technologique belge).

de fabrication. Les stratégies de construction ascendante (bottom-up, auto-assemblage...), de mise dans la nature, commencent à se développer dans les nanotechnologies.

- la nature a conçu ses matériaux pour s'adapter à des contraintes extérieures variées (...), [Or] dans beaucoup d'applications, les matériaux actuels ont atteint leurs limites et l'ingénieur cherche à leur conférer des performances supérieures pour répondre à des fonctions précises. Il cherche aussi à exploiter des conditions extrêmes et à obtenir des propriétés exceptionnelles, tout en économisant ses ressources.²⁰ »

Enfin, comme précédemment indiqué, la nature produit dans des conditions « douces », en consommant peu d'énergie et sans générer d'effets polluants. « Là où l'industrie fabrique par exemple des céramiques à des températures de plus de 1 000°C, les diatomées s'enveloppent d'une squelette siliceux à la température des océans »²¹.

En dépit de l'intérêt que présente ce domaine de recherche, Gauthier Chapelle²² observe qu'il est quelque peu délaissé depuis la crise. Il est cependant possible de mentionner des domaines de recherche et de réalisations illustrant ce champ d'investigations et d'innovations.

Au premier rang des grandes quêtes des ingénieurs des matériaux figure la recherche de matériaux « cicatrisants » ou auto-réparants, à l'image de la peau ou d'un tronc d'arbre. Le seuil de la durabilité est encore loin d'être atteint et c'est grâce à des réactifs qui peuvent être toxiques que des phénomènes approchants peuvent être obtenus.

Depuis les premiers développements visant à l'auto-réparation des microfissures pour prévenir la survenue des dégradations plus profondes grâce au recours à un catalyseur encapsulé dans la matrice du composite et capable de le polymériser, des progrès ont été accomplis en se rapprochant du modèle biologique : l'agent réactif circule dans un réseau de canaux de façon à permettre une réparation répétée des microfissures. D'autres voies de recherche comme l'auto-cicatrisation induite électriquement ont également été empruntées, la capacité à s'auto-réparer restant un horizon pour la science des matériaux.

D'autres recherches ont déjà abouti à des productions ou applications. Le byssus, fil que produit et utilise la moule pour s'arrimer à son support, est la colle la plus performante connue à ce jour. En étudiant le fonctionnement des protéines dans la colle, en se servant des protéines de soja pour remplacer les protéines de moule et en comprenant l'architecture tridimensionnelle de la substance, il a été possible de créer une colle très efficace pour produire un contreplaqué marin qui ne diffuse aucun polluant dans l'environnement intérieur, à la différence des colles commerciales classiques. Mieux, le byssus est aussi le meilleur fil suturant connu de l'homme : non polluant, imputrescible, il permet de réaliser des sutures ne laissant quasiment aucune cicatrice.

Dans d'autres domaines comme la transformation de l'énergie lumineuse du soleil, le végétal ne fait appel qu'à des matériaux abondants et intégralement recyclables pour photosynthétiser des glucides (ou sucres...).

Plusieurs laboratoires travaillent sur des principes connexes soit en réalisant une « feuille » artificielle pour oxyder l'eau, et dégager de l'hydrogène utilisable pour produire de l'énergie (« photosynthèse artificielle »), soit en réalisant des cellules solaires organiques qui, par effet photovoltaïque, transforment l'énergie lumineuse en électricité.

²⁰ La nature, une formidable source d'inspiration, Le journal des ingénieurs n° 110, mars 2008.

²¹ Ibid.

²² Audition devant la section de l'environnement, le 18 février 2015.

Ces panneaux photovoltaïques organiques ont une durée de vie plus courte, mais ils pourraient être renouvelés plus fréquemment puisqu'ils ne coûteraient rien en énergie. L'enjeu est considérable car si l'on devait fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques classiques pour remplacer les combustibles fossiles utilisés pour produire de l'électricité, certains matériaux, tels les terres rares, d'accès difficile, pourraient venir à manquer à long terme. Par surcroît, certains matériaux entrant dans la constitution de panneaux solaires sont difficilement recyclables.

De très nombreux exemples d'innovations bio-inspirées pourraient être cités, tirées du monde végétal ou animal, qu'il soit marin, terrestre ou aérien.

Les océans offrent peut-être le plus riche potentiel. La nacre est un composite naturel particulièrement résistant. Celle produite sans pollution et avec très peu d'énergie par l'ormeau rouge présente des propriétés mécaniques supérieures à celle des céramiques de qualité militaire. Aussi l'ormeau a-t-il fait l'objet d'études en vue de produire de nouvelles céramiques à la fois résistantes et ductiles, des blindages légers et des matériaux pouvant résister à des hautes températures pour les besoins de la construction aéronautique. Cette étude a débouché sur la mise au point de nouveaux matériaux très durs, résistants, ductiles et légers... mais produits avec beaucoup moins d'économies de moyens que le mollusque.

Des modulateurs de lumière transparents, comme les fenêtres, ou réfléchifs, comme les capteurs et les écrans, ont été réalisés en imitant certains procédés de camouflage des céphalopodes, lesquels intéressent aussi la recherche militaire. L'hydrodynamisme et l'aérodynamisme d'engins de transport (bateaux, avions...) ou d'éoliennes ont été optimisés grâce à l'utilisation de revêtements inspirés de la peau de requin, meilleur revêtement anti-turbulences et antifouling au monde. Cette seconde qualité a aussi permis la réalisation de la meilleure peinture antifouling actuellement disponible.

Le mode de locomotion de la néréide²³ a servi de modèle pour le développement d'un endoscope²⁴ mécanique robotisé, présentant une flexibilité suffisante pour éviter les lésions et rendre moins pénible l'examen. Un autre ver de sable, l'arénicole, est riche d'une hémoglobine universellement transfusable (O-), cinquante fois plus oxygénante que l'hémoglobine humaine, qualité particulièrement précieuse pour la transplantation d'organes. Un greffon peut y être conservé huit jours puis être implanté sans phénomène de rejet alors que des lésions dues à la sous-oxygénation surviennent au bout de vingt-quatre heures dans les conditions de conservation ordinaires, les nécroses étant facteurs de rejet.

Le biomimétisme est également convoqué par les nano-biotechnologies. Le CNRS observe que *« pour créer de nouveaux dispositifs nanométriques, les chercheurs s'inspirent de la nature. Le cœur des cellules du vivant recèle une machinerie extrêmement complexe, capable de fonctions essentielles : sensibilité, sélection, adaptation des formes, autoréparation, multiplication massive avec un très faible taux d'erreurs, auto-assemblage, communication d'informations... »*²⁵

Trois fonctionnements intéressent plus particulièrement les chercheurs et les industriels : la mise en mouvement, l'état de surface et l'élaboration d'architectures en trois dimensions à l'échelle nanométrique. S'agissant des surfaces nano-structurées, domaine où

²³ Ver des sables, parfois appelé gravette.

²⁴ Instrument optique médical ou industriel. Ce tube optique muni d'un dispositif d'éclairage est essentiellement destiné à être introduit dans une cavité du corps humain pour l'examiner.

²⁵ Site web du CNRS.

le biomimétisme connaît des développements importants, on peut noter que la feuille de lotus a servi de modèle pour l'écoulement des fluides - la nano-structuration de sa surface la rend « super-hydrophobe » - ou bien que la structure à la surface des ailes de lépidoptères, elles aussi nano-structurées, a été imitée en laboratoire pour améliorer la communication par fibre optique - les structures de ces ailes dépourvues de pigments diffractent la lumière selon des longueurs d'ondes très précises.

Enfin, le biomimétisme moléculaire s'inscrit lui aussi dans cette grande catégorie relative aux processus et aux matériaux. Son but est de parvenir à la réalisation de produits performants et innovants en s'inspirant des processus moléculaires qui existent dans la nature. Il devient ainsi possible de dépasser le mode de fabrication traditionnel qui requiert chaleur, pression et traitement, pour reprendre la formule anglo-saxonne *heat, beat and treat*.

Cette forme de biomimétisme peut conférer de nouvelles fonctions aux produits ou améliorer leur efficacité (surfaces antimicrobiennes, anti-salissures...). Elle offre des solutions technologiques plus respectueuses de la santé, du bien-être et de l'environnement. Ce faisant, elle permet d'anticiper le probable renforcement de la réglementation européenne dans ces domaines au cours des prochaines années. Enfin, elle peut conduire à dépasser le cadre strict d'imitation/reproduction de la nature et à aboutir à la création de nouveaux produits ou procédés donnant lieu à des dépôts de brevets.

Il reste que si des chercheurs français sont parvenus à déterminer la structure atomique en 3D des « moteurs moléculaires » qui sont au cœur de l'activité des cellules et si d'autres travaillent sur des architectures de circuits électroniques inspirées des interconnexions neuronales du cerveau, la science et la technique actuelles demeurent encore impuissantes à reproduire la complexité du vivant. Ainsi que le note Gauthier Chapelle, « *Quand notre chimie réussit une cascade de cinq ou six réactions en chaîne, nous sommes très fiers. La nature, elle, réussit à faire s'enchaîner des centaines de réactions, en équilibre les unes avec les autres, dans une seule cellule qu'on ne voit même pas à l'œil nu !* » Pour autant ce champ de la biomimétique est porteur de ruptures technologiques et « *le développement de structures ou de matériaux inspirés de la nature à partir de l'observation, de la modélisation et de la transposition industrielle de ces effets apparaît comme un des domaines d'évolution les plus prometteurs pour les prochaines décennies.* »²⁶

L'équilibre complexe des écosystèmes comme source d'inspiration

Chercher à imiter ou plus modestement à s'inspirer des écosystèmes et des interrelations extrêmement complexes qui les caractérisent constitue le stade le plus ambitieux du biomimétisme, mais aussi le plus potentiellement impactant. La durabilité est au cœur de cette démarche car les ensembles pris pour « modèles » sont les écosystèmes « matures », dans lesquels les êtres vivants maintiennent un équilibre dynamique dans le long terme. Des exemples de tels systèmes sont fournis aussi bien par les forêts tropicales que par les récifs coralliens. Selon Janine Benyus, ces écosystèmes fonctionnent suivant un certain nombre de principes qui seront évoqués infra.

²⁶ Fabienne Monfort-Windels, op. cit.

Les questions qui se rapportent à cet objet d'études sont assez simples à formuler : « comment fonctionnent les relations entre les parties dans un tel écosystème ? », « Qu'est-ce qui fait qu'une forêt reste une forêt ? », « Quels enseignements pouvons-nous tirer de ces exemples pour notre propre résilience et notre propre gestion de la complexité ? »

L'observation des systèmes mentionnés révèlent toujours des surprises. Ainsi, il arrive que la dynamique de la diversité, créatrice de complexité et de richesse, soit découplée avec la quantité de ressources disponibles à l'origine dans l'environnement. La luxuriance des forêts tropicales prend presque toujours racine dans un sol pauvre. Il s'enrichit, comme l'ensemble du système, à mesure que ce dernier se diversifie. Tout se passe comme si la vie créait et entretenait les conditions propices à la vie. Approfondir cette organisation suppose de s'intéresser à ce qui résulte des relations entre espèces, à la façon dont elles forment des écosystèmes doués d'une dynamique propre, plus ou moins résilients, fixateurs de carbone...

Les relations entre deux espèces sont relativement bien connues et analysées de longue date par les biologistes. Elles vont du mutualisme, parfois appelé symbiose, lorsque les relations sont bénéfiques pour les deux parties²⁷, à la compétition lorsqu'elles mettent en concurrence deux espèces occupant une même niche écologique pour l'accès à une ressource. Ce type d'interactions impacte négativement la fitness²⁸ des individus entrant en compétition. Entre ces deux extrêmes se placent la coexistence lorsque la relation est neutre, le commensalisme lorsqu'elle est favorable à l'une des parties et neutre pour l'autre et enfin le parasitisme ou la prédation quand la relation est positive pour une espèce et négative pour la seconde. Ces situations de base peuvent évoluer en fonction du contexte. Elles peuvent aussi cesser quand, pour sortir d'une situation de compétition par exemple, les espèces se spécialisent par un phénomène d'adaptation (modification du régime alimentaire...).

L'un des enseignements tirés de l'observation des relations entre espèces est que si la compétition conduit le vivant à des innovations, les plus fondamentales d'entre elles naissent toujours de la coopération. Sans les bactéries qui peuplent leurs intestins, le microbiote, la digestion des êtres humains serait bien moins efficace qu'elle ne l'est. Les mitochondries qui assurent la respiration au sein de chacune de nos cellules sont d'anciennes bactéries prédatrices qui ont établi une relation symbiotique avec les cellules qu'elles détruisaient précédemment.

Les chloroplastes, organismes qui assurent la photosynthèse, sont nés de l'alliance d'une algue bleue et d'une bactérie. C'est cette alliance qui a permis aux plantes d'émerger, puis celle entre une algue et des champignons qui a donné naissance aux premiers représentants de la végétation terrestre : les lichens. Le succès de la colonisation de la terre par les végétaux a donc tenu à l'association du réseau racinaire des champignons à la photosynthèse de l'algue. Sans mutualisation, rien ne se serait passé. Le mutualisme existe également entre animaux et végétaux, comme en témoigne notamment la relation symbiotique entre algues (la zooxanthelle en particulier) et coraux.

²⁷ « En biologie, le mutualisme est une relation durable entre deux espèces ou deux populations, avantageuses pour toutes les deux » (Larousse). La symbiose est un cas particulier de mutualisme dans lequel l'association est « constante, obligatoire et spécifique entre deux organismes ne pouvant vivre l'un sans l'autre, chacun d'eux tirant un bénéfice de cette association » (Larousse). Le terme symbiose est cependant souvent utilisé dans une acception moins stricte.

²⁸ Ce concept élaboré par Darwin décrit la capacité d'un individu doté d'un certain génotype à se reproduire.

Ainsi le fonctionnement du vivant ne saurait être résumé à la loi de la jungle et la sélection naturelle. Les symbioses, qu'elles soient obligées (les deux organismes meurent en cas de rupture de la relation) ou facultatives jouent un rôle fondamental et trop souvent passé sous silence. Cette intelligence collective du vivant prend parfois des formes inattendues. Lors de son audition Idriss Aberkane a indiqué que « *Les insectes sociaux ont toujours 10 % d'individus qui ne font rien. Et non seulement ils ne font rien mais ils gênent, ils se mettent en travers des ouvrières, ils les bloquent. On peut penser que ce n'est pas optimal* ». Pourtant, si on les retire, la fourmilière s'effondre. En réalité, ces fourmis que l'on pourrait penser contreproductives « *entraînent la communauté à résister, à réagir, à contourner les obstacles.* » Une autre illustration très imagée de cette intelligence a été apportée par Gauthier Chapelle à partir de l'exemple de la collaboration vieille de plusieurs millions d'années entre les arbres et les champignons. Le principe est connu de longue date : les arbres, qui savent photo-synthétiser, produisent des sucres qui profitent aux champignons, tandis que ces derniers récoltent eau et sels minéraux dont les arbres bénéficient. « *Depuis peu, il est apparu que cela leur avait permis d'inventer les allocations familiales et la Sécurité sociale. Les allocations familiales parce qu'on s'est rendu compte qu'un même champignon va connecter les petits et les grands arbres. Les grands arbres, qui fonctionnent au maximum vont produire plus de sucre et les livrer aux petits arbres qui sont à l'ombre des grands arbres, et vont ainsi bénéficier de leur aide.*

La Sécurité sociale, c'est aussi parce que le même réseau de champignons va connecter des arbres d'espèces différentes, et en fonction de la saison ou des conditions d'une année sur l'autre, tel arbre qui fonctionne bien va livrer ses excès de sucre à un arbre d'une autre espèce qui souffre, et cela finira par s'inverser quand les conditions s'inverseront. Cela change le regard sur la fameuse loi de la jungle, où l'on voit qu'une forêt est beaucoup plus coopérative que ce que l'on nous a raconté. Finalement, entre eux, ils appliquent l'adage « veiller sur la santé de ses voisins pour assurer la sienne » ».

Évidemment, les écosystèmes, en tant que vastes ensembles d'espèces, présentent des caractéristiques infiniment plus complexes. Pour autant, l'étude des écosystèmes matures²⁹ révèle qu'ils utilisent la même quantité d'énergie entrante que les écosystèmes moins durables mais, avec cette quantité identique, parviennent à faire davantage. Leur mode de fonctionnement repose sur des principes qui inspirent le modèle de l'écologie industrielle.

Une approche au service de la durabilité

Parmi les problèmes auxquels la planète est confrontée, ceux relatifs à la dégradation de l'environnement apparaissent comme les plus inquiétants à moyen-long terme. La

²⁹ L'évolution naturelle des écosystèmes s'opère schématiquement en trois stades. Le premier, dit juvénile (type I), se caractérise par une faible diversité biologique, peu d'interactions et un taux de croissance élevé. Lui succède un stade de transition (type II) dans lequel se forment des réseaux d'interactions complexes. Plus efficace que le premier, il n'est cependant pas durable et évolue vers un écosystème mature (type III), à la riche biodiversité et à la faible production. L'écosystème de type I repose sur un processus linéaire dans lequel les ressources et les déchets sont illimités. Celui de type II voit une diminution des ressources coexister avec une augmentation des déchets. L'écosystème de type III fonctionne de manière entièrement cyclique. Les ressources sont utilisées de façon optimale : tout ce que produit ou rejette un organisme est exploité par un autre, qui sera à terme recyclé pour être à nouveau exploité par le premier. Ce schéma est en partie théorique car dans la réalité différents stades de la succession écologique coexistent et tout milieu est en évolution constante.

nécessité d'une transition écologique et énergétique est reconnue par tous les acteurs, lesquels ont commencé à agir. Une autre évolution majeure de la société contemporaine est la place prise par la connaissance. C'est dans ce contexte que les conclusions tirées du fonctionnement de la nature prennent tout leur sens.

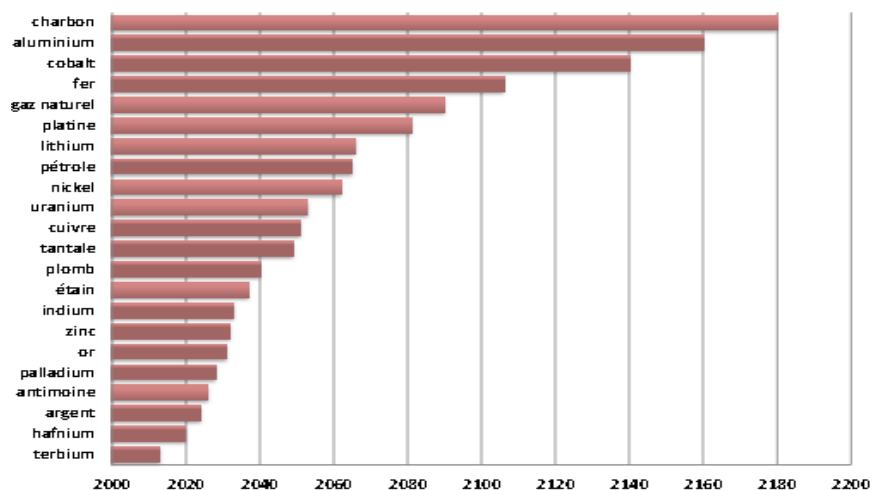
Des enjeux et des contraintes pressants

Au cœur de l'actualité depuis plusieurs années, la question des changements climatiques devient chaque jour plus prégnante en raison de ses conséquences incalculables et pour partie dévastatrices. La réalité du réchauffement de la planète et la responsabilité des activités humaines dans ce phénomène ne fait plus guère débat. Par ailleurs, en raison de l'inertie dudit phénomène, les sociétés vont devoir non seulement agir à la source en limitant les Gaz à effet de serre (GES), mais encore adapter les territoires aux conséquences du réchauffement. La capacité d'adaptation est une particularité des espèces vivantes qui va être fortement sollicitée dans les prochaines décennies. Il est d'autant plus urgent d'agir que plus nous attendons, plus le niveau de GES dans l'atmosphère va s'accroître et plus il nous sera difficile de faire face aux conséquences à long terme de cette augmentation.

Comme on le sait, la majeure partie des émissions de GES est due à la combustion massive d'énergies fossiles. Parmi elles, le pétrole tient une place à part : il est non seulement utilisé comme source énergétique mais se trouve aussi à l'origine de toute une branche de l'industrie, la pétrochimie. Les sociétés développées contemporaines en sont fortement dépendantes. Sa consommation continue nous rapproche chaque jour de la fin du pétrole « facile ». Pour le genre humain, espèce devenue extrêmement spécialisée, donc vulnérable, cela signifie qu'il va devoir modérer sa consommation d'énergie et s'orienter résolument vers les énergies renouvelables, même si toutes dépendent aussi en partie du pétrole. Le temps dont vont pouvoir disposer les sociétés pour assurer leur transition énergétique devient crucial.

S'ajoutent au réchauffement climatique et à la question énergétique la crise des ressources minérales. Toutes sont par nature finies et certaines d'entre elles risquent de manquer ou de devenir très onéreuses dans les prochaines années, malgré des évolutions technologiques tendant à les utiliser de manière plus rationnelle et à limiter les parties non valorisables. D'un point de vue général, la tendance à la baisse globale des concentrations moyennes des minerais, à l'augmentation de la profondeur d'extraction et les limites d'accès aux ressources conduisent à penser que le temps est compté pour l'exploitation des gisements « faciles » pour de nombreuses matières premières critiques, comme en témoigne le graphique ci-après.

Graphique 1 : Date d'épuisement au rythme actuel d'exploitation



Source : Graphique réalisé à partir des données de l'USGS (le service géologique des États-Unis) <http://minerals.usgs.gov/>, in Science & Vie hors série n°243, juin 2008.

Enfin, beaucoup de naturalistes et biologistes s'accordent à penser que l'on pourrait vivre la sixième extinction de masse de la biosphère dans laquelle l'homme est cette fois impliqué³⁰.

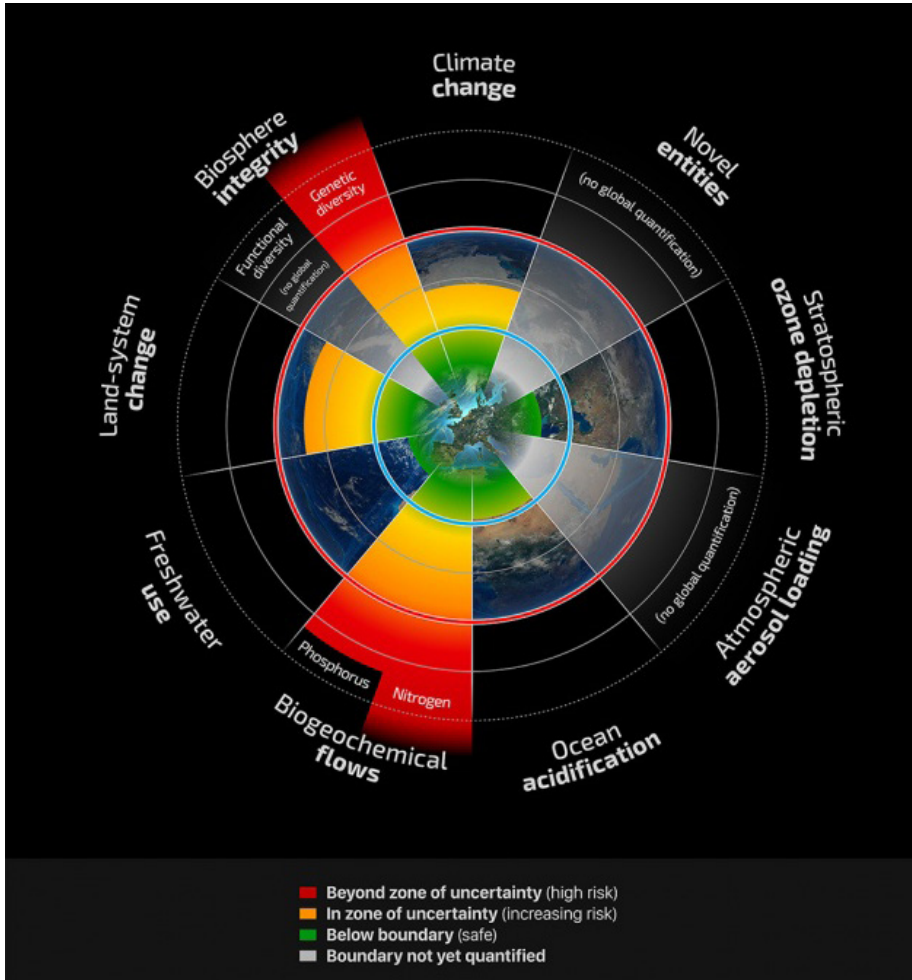
Selon Tarik Chekchak, « *un tiers des espèces terrestres pourrait disparaître d'ici à 2050 et tous les services écosystémiques rendus par cette biosphère seront altérés par cette disparition ; 9/10^{èmes} des espèces restent pourtant à décrire, surtout les petites, mais (...) on découvre chaque année des espèces pas si petites que cela et qui nous avaient échappé.* »³¹

Ce sombre constat, dont le trait n'est pas forcé, est synthétisé dans le schéma ci-après. Il est issu du travail d'un collectif de chercheurs qui s'est employé à définir la notion de limites par rapport à quelques grands enjeux. Au vu de cette illustration, il apparaît clairement que les limites de sécurité pour l'humanité ont été franchies pour ce qui concerne la perte de biodiversité, mais aussi le cycle de l'azote.

³⁰ Voir le magazine Science du 25 juillet 2014 : *Defaunation in the Anthropocene*, qui présente une synthèse des données disponibles sur ce thème. Selon des universitaires américains, mexicains, brésiliens, anglais... le recul de la biodiversité « contribue à ce qui paraît être les premiers jours de la sixième crise d'extinction biologique massive de la planète ».

³¹ Audition devant la section de l'environnement, le 18 février 2015.

Schéma 1 : Les limites planétaires



Source : Steffen et. al. Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 16 janvier 2015. Design: Globaïa

Dans un tel contexte, s'intéresser aux « recettes » de durabilité des écosystèmes matures paraît pertinent.

Le biomimétisme dans l'économie de la connaissance

La place de l'économie de la connaissance est appelée à gagner en importance. En effet, à la différence des matières premières, la connaissance est une ressource quasi infinie. À l'heure où l'humanité consomme davantage de ressources que la planète n'en peut offrir, y compris lorsque celles-ci sont renouvelables, la contradiction entre croissance illimitée et matières premières finies est avérée. En revanche, si la croissance économique se fonde sur la connaissance, cette contradiction disparaît.

L'économie de la connaissance est régie par trois grandes règles qui la distinguent radicalement de l'économie des matières premières :

- les échanges ne sont pas instantanés, ce qui constitue un handicap par rapport aux transferts de biens matériels ou de capitaux.
- En revanche :
- les échanges sont à somme positive puisque aucune partie ne se dessaisit de son savoir en le partageant. Mieux, quand on partage un bien immatériel on le multiplie ;
- les combinaisons de connaissances ne sont pas linéaires, car à la différence du groupement de biens matériels, celui de deux connaissances crée systématiquement une tierce connaissance, au pire insignifiante, au mieux révolutionnaire.

Le biomimétisme, en tant qu'art d'extraire de la connaissance de la nature, s'inscrit dans le paradigme de l'économie de la connaissance. Selon Idriss Aberkane³², il s'agit d'une « révolution sociale et environnementale avant d'être une révolution technologique parce qu'on peut résumer le biomimétisme de la façon suivante : (...) nous avons vécu dans une bibliothèque sans le savoir (...) il y avait des livres sur les étagères (...) nous ne savions pas qu'il s'agissait de livres et (...) nous les brûlions pour nous chauffer. »

Aujourd'hui « nous nous réveillons et nous voyons qu'il s'agit de livres, qu'ils contiennent des schémas, des technologies, des médicaments, des modes d'organisation sociale (...) quantité d'innovations (...) Cette bibliothèque, c'est la nature (...) lisez-la au lieu de la brûler [elle] est incroyablement high-tech. »

Au total, Idriss Aberkane considère que si l'on exploite la nature comme une source de connaissances, ce qui est l'objet même du biomimétisme, on a beaucoup plus à y gagner qu'à l'exploiter exclusivement comme ressource. En outre, cette approche permet de transcender le conflit d'intérêts croissance/nature, conçu pendant des années comme absolument inévitable.

Au regard de la dégradation de l'état de la planète d'une part, des ressources immatérielles à retirer de l'étude et de la compréhension de la nature d'autre part, il semble judicieux d'évoquer les principes de durabilité dont elle est porteuse.

La nature est déjà parvenue à résoudre la plupart des problèmes auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui. Les organismes vivants qui nous ont précédé ou que nous côtoyons ont déjà inventé des procédés et des modes de fonctionnement répondant aux défis que nous tentons de relever, le tout sans gaspiller d'énergie, sans polluer l'environnement et sans compromettre leur avenir. Ils apparaissent donc comme des modèles. Il est d'ailleurs rassurant de constater que les principes du développement durable recoupent largement ceux qui « guident » la nature et se retrouvent dans le développement fondamental du vivant.

Il a déjà été mentionné que les productions les plus étonnantes comme les plus modestes des espèces sont réalisées avec une grande économie de moyens, à température et pression atmosphérique ambiante et sans recours à des substances d'appoint toxiques. À cet égard, la performance est sans comparaison avec celle obtenue par les êtres humains dans leur processus de production. Les moyens déployés incluent le plus souvent des températures et/ou des pressions très élevées, ce qui induit une forte consommation d'énergie, ainsi que le recours à des produits chimiques.

³² Audition devant la section de l'environnement, le mercredi 25 février 2015.

Mais les principes du développement durable semblent également à l'œuvre dans les écosystèmes matures. Les scientifiques qui se sont attachés à les dégager, au premier rang desquels Janine Benyus, en recensent une dizaine qui se recoupent en dépit de variations lexicales.

Quelques principes de fonctionnement des écosystèmes

Se plaçant dans la perspective tracée par des auteurs comme Hardin Tibbs ou Braden R. Allenby qui ont travaillé sur l'écologie industrielle et envisagent le système industriel comme un cas particulier d'écosystème, J. Benyus s'est efforcée de dégager une dizaine de principes du fonctionnement des écosystèmes matures et complexes.

□ Utiliser les déchets comme ressources³³

Dans un écosystème mature, production de biomasse et circuits de recyclage s'équilibrent. Ainsi, dans une forêt, les végétaux morts sont récupérés et dégradés par des organismes (champignon, moisissures, bactéries...), ces derniers redistribuant sous forme de nutriments la matière ainsi transformée. Ce mode de fonctionnement n'est autre que le modèle de l'économie circulaire et plus encore de l'économie bleue, qui consiste à boucler les flux de matières et d'énergie.³⁴

□ Ne pas « souiller son nid »

Si des substances toxiques existent dans le vivant, toutes les molécules qui présentent cette qualité sont dégradables assez rapidement. En outre, les organismes ne les produisent qu'en cas de besoin.

Par ailleurs, la modération en matière d'utilisation d'énergie et de matériaux est généralement la règle.

□ Capter et utiliser l'énergie avec efficacité

À l'exception des organismes extraordinaires qui vivent dans la nuit des abysses et pratiquent la chimiosynthèse, les écosystèmes reposent tous sur la photosynthèse. Les photosynthétiseurs à l'œuvre sont exceptionnellement performants. En outre, le positionnement des feuilles optimise leur exposition. « *Ce processus efficace, qui recueille l'énergie pour tous les êtres vivants, est un modèle pour tout écosystème* » écrit Janine Benyus. Une fois que la végétation a utilisé l'énergie captée pour croître et se reproduire, il ne reste que 10 % d'énergie disponible au maillon suivant de la chaîne, les herbivores, puis 10 % à nouveau pour celui d'après, les carnivores, et ainsi de suite. C'est ainsi que « *la pyramide de la vie est une véritable distribution de l'énergie, une trace de la circulation de l'énergie solaire dans le système* »³⁵.

33 Cet intertitre et ceux qui suivent reprennent la terminologie utilisée par J. Benyus dans son ouvrage *Biomimétisme; quand la nature inspire des innovations durables*.

34 Les termes « économie bleue » ne font pas ici référence aux politiques et activités économiques relatives à la mer et aux océans, mais au concept développé par l'entrepreneur belge Gunter Pauli, dans son ouvrage : *L'économie bleue*. Il y est proposé de réinventer le modèle économique en s'inspirant de la nature et du fonctionnement des écosystèmes dans le but de parvenir à un développement véritablement durable.

35 J. Benyus, op. cit.

❑ Optimiser plutôt que maximiser

Un système mature se caractérise par un taux de croissance moindre qu'à son origine et une faible productivité. Il préserve la masse de ses matériaux et éléments nutritifs, et les organismes y sont « récompensés » pour leur efficacité et leur capacité à faire mieux avec moins. La diminution du rythme des flux conduit à une plus grande stabilité du système et une plus grande résilience.

❑ Ne pas épuiser les ressources

En adaptant la forme à la fonction, les organismes vivants optimisent leur production d'énergie et l'utilisation de matériaux. La structure en nid d'abeille, qui allie espace maximal et quantité minimale de matériaux de revêtement tout en assurant une parfaite solidité de l'ensemble constitue un exemple de cette alliance entre ingéniosité et minimalisme. Les termitières offrent également l'illustration de formes parfaitement adaptées à la fonction.

L'évolution a parfois permis l'adaptation d'une même structure pour deux ou trois fonctions. Ce réajustement permanent favorise l'adaptation et les chances de survie avec une économie de moyens maximale.

❑ Se diversifier et coopérer pour exploiter pleinement son habitat

Stimulée par les contraintes (climatiques, géographiques, géologiques...) les systèmes naturels développent une forme d'inventivité qui passe le plus fréquemment par le développement de coopérations, voire de relations symbiotiques. Cette stratégie permet aux organismes de s'attribuer des niches non concurrentes. Lorsqu'une niche est partagée l'allocation des ressources s'opère sans affrontements énergivores continues, de sorte que les richesses d'un habitat sont réparties de façons optimales. Pour évoquer ce mode de fonctionnement coopératif, l'écologiste Paul Colinvaux emploie l'expression de « coexistence pacifique » bien qu'elle ne résulte pas d'un pacte conscient entre les parties.

❑ Se nourrir d'informations

De nombreux canaux de communication sont présents dans les communautés matures. Plus la biodiversité est riche et le système complexe plus la coopération est efficace et plus les organismes se doivent de développer des techniques pour signaler leurs intentions à ses voisins et interagir avec eux.

Ces messages sont nombreux, éventuellement redondants et se révèlent performants dès lors que des mécanismes de rétroaction vers tous les membres de la communauté sont assurés. Un système qui permet aux changements affectant une composante de la communauté de s'étendre à l'ensemble, lui permettant de s'adapter lorsque l'environnement évolue, est gage de durabilité.

❑ Utiliser les matériaux avec parcimonie

Adaptant la forme à la fonction, ils construisent du « sur mesure » avec le strict minimum de matériaux (structure des rayons de miel...). L'évolution a en outre conduit ces organismes à mettre à profit les structures ainsi créées pour remplir d'autres fonctions. Avec cette adaptation, moins de dispositifs sont nécessaires à leur survie.

❑ *Rester en équilibre avec la biosphère*

Les conditions nécessaires à la vie résultent d'une série d'échanges des organismes avec leur milieu. Tout ce qui est prélevé dans les stocks des principaux éléments biochimiques qui composent la biosphère « à travers le processus de la photosynthèse, de la respiration, de la croissance, de la minéralisation et de la décomposition est remplacé dans les mêmes quantités : ainsi les stocks circulent mais ne diminuent pas. »³⁶

❑ *Se fournir localement*

Faute de pouvoir importer où de se déplacer sur de grandes distances, à l'exception notable des migrants, les organismes vivant deviennent des experts de leurs propres milieux.

La nature, en quelque sorte, « travaille sur place ».

Sur le fond comme sur la forme, des réserves peuvent être exprimées sur tout ou partie des principes schématiquement exposés ci-dessus. Ils demeurent cependant une source d'inspiration pour la stratégie des entreprises et/ou des économies.

Les domaines d'application actuels et potentiels du biomimétisme

La SNTEDD le souligne : « la biodiversité est une source d'innovation (bio-mimétisme, substances actives...) et représente dès lors une valeur potentielle importante. Mais d'autres activités dépendent également directement de ce capital écologique, comme la recherche et l'économie verte. »

Cette formulation mérite d'être complétée : la biodiversité inspire la démarche innovante qu'est le biomimétisme, lui-même source d'innovations bien réelles. De plus le biomimétisme, outre la contribution qu'il apporte à la résolution des problèmes écologiques, est un élément du développement de l'économie verte.

Des réalisations convaincantes

L'adaptation des sociétés développées contemporaines aux enjeux du développement durable passe par la création de nouveaux produits, services et modèles d'organisation. Pour relever ce défi, le biomimétisme est aujourd'hui reconnu comme un levier d'innovation pertinent. Les États-Unis et la Chine ne s'y sont pas trompés, qui dominent au niveau international, toutes les autres (cf. infra) nations quant au nombre de dépôts de brevets issus de cette démarche. En France, une centaine de projets de recherche et plusieurs dizaines d'entreprises sont en rapport avec ce type d'innovation responsable.

Des applications biomimétiques peuvent être recensées dans tous les secteurs de l'économie. Dans l'industrie tout d'abord, où produits et technologies s'inspirant de la forme ou de matériaux et procédés issus d'organismes vivants se multiplient. En agriculture ensuite,

³⁶ J. Benyus, op. cit.

où de nouvelles pratiques inspirées du fonctionnement des écosystèmes voient le jour et infléchissent parfois les pratiques conventionnelles. En urbanisme et en architecture enfin, où la structuration et des écosystèmes et de la matière organique alimente la créativité des professionnels de ces secteurs.

Ce mouvement, qui repose sur des créations et des applications biomimétiques ou écomimétiques et une plus grande durabilité tend vers ce qu'il est convenu d'appeler l'économie bleue, *blue economy* en anglais. Visant notamment l'efficacité et l'optimisation des ressources tout en limitant les impacts négatifs des activités aux seuils de tolérance des écosystèmes, elle se réfère volontiers à la nature, qui produit en cycle et non en ligne. Ellen MacArthur, comme Gunter Pauli ont développé des paradigmes qui démontrent qu'un système à « zéro déchet » peut rapporter beaucoup plus qu'un système traditionnel. Idriss Aberkane résume d'une phrase l'ouvrage de Gunter Pauli, *The blue economy* : « *ce n'est pas à la nature de produire comme nos usines, c'est à nos usines de produire comme la nature* ». Le système serait à la fois beaucoup plus rentable et respectueux de l'environnement.

La progression de biomimétisme dans l'industrie

Dans son rapport sur les apports de la science et de la technologie³⁷, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) relève que « *pour l'essentiel, beaucoup de procédés industriels que nous mettons en œuvre sont dispendieux en matières premières, coûteux en énergie et insuffisamment sélectifs* ».

« *à l'opposé de ces procédés industriels physicochimiques, l'évolution a produit des solutions biologiques, beaucoup plus sophistiqués que les artéfacts humains pour répondre aux pressions de sélection.*

« *cette «mémoire de réussite» que constitue la biodiversité du vivant doit conduire à une montée de l'industrie basée sur la biologie et la biotechnologie qui, jointe à la montée des nanotechnologies, sera un des ressorts de la prochaine révolution industrielle.* » Concrètement, la démarche consiste à analyser les propriétés complexes des matériaux et processus biologiques et à les valoriser à des fins industrielles. Ce concept d'innovation déjà très élaboré sur le plan théorique et largement utilisé dans les centres de recherche a commencé de se diffuser dans les entreprises privées. Le travail consiste à présent à catalyser les innovations en privilégiant celles capables d'alimenter le moteur économique des entreprises tout en réduisant les externalités négatives des systèmes industriels sur la biosphère (matériaux renouvelables, processus économes en énergie, matière et intrants et ne produisant pas de déchets...).

Les innovations auxquelles il est fait référence méritent d'être distinguées de la bio-assistance, qui repose sur l'utilisation de tout ou partie d'organismes vivants génériquement modifiés ou non dans le but d'obtenir un résultat déterminé dans le cadre d'un cycle de production. Selon Olivier Allard, « *Les entreprises sont au cœur des processus d'innovation et ont à ce titre un rôle central à jouer* »³⁸. C'est pourquoi des méthodes sont élaborées permettant d'identifier les domaines dans lesquelles les innovations sont nécessaires pour améliorer les produits ou le mode de fonctionnement des entreprises

³⁷ Ouvrage cité supra.

³⁸ Olivier Allard ; *Biomimétisme, comment les entreprises peuvent-elles intégrer le biomimétisme dans leur stratégie d'innovation ?* ; ITMP, ESIEE, chambre de commerce et d'industrie de Paris, 2012.

impliquées dans une démarche de développement durable. Elles participent de l'écologie industrielle. L'AFNOR a notamment décrit une méthodologie type employée en biomimétique, une structure linéaire et séquentielle représentant un cas idéal pouvant être potentiellement intégré dans l'ensemble de la chaîne de valeur. De jeunes chercheurs tels Pierre-Emmanuel Fayemi, Camila Freitas Salgueiredo ou Manuel Karim travaillent sur ces questions de méthodologie, notamment dans le cadre de thèses de doctorat. Inspirée des travaux de J. Benyus, la méthode proposée par O. Allard repose par exemple sur un cadrage de l'expression des besoins, un rapprochement du problème technique identifié avec un problème que rencontre la nature et qu'elle a résolu, la recherche de « champions » parmi les organismes végétaux ou animaux, l'imitation, si elle se révèle réalisable et offre un retour sur investissement intéressant, puis l'évaluation au regard des principes qui prévalent dans la nature.

Sur la base d'une méthodologie élaborée ou non, un certain nombre de secteurs industriels ont emprunté la voie du biomimétisme. Le panorama sommaire qui suit n'ambitionne pas l'exhaustivité. Par choix, les domaines en rapport direct avec la transition écologique seront distingués des autres.

Les secteurs d'élection du biomimétisme

□ Biomimétisme et chimie verte

La chimie verte, parfois dénommée durable ou écologique, comprend trois grands volets : la valorisation chimique des déchets, du CO₂ et la chimie du bio-sourcé. Cette dernière recouvre la chimie du végétal, qui correspond à l'utilisation d'agroressources pour la fabrication de produits chimiques. Deux approches coexistent dans ce domaine : la substitution des intermédiaires pétrochimiques par des produits bio-sourcés ou la conception de nouveaux produits avec une valorisation importante à la clé. Cette sous-partie de la chimie verte qui est la chimie du végétal continue d'avoir recours à la chaleur, donc à la consommation d'énergie, même si les efforts se poursuivent pour la réduire.

Le concept de chimie verte est dû à Paul Anastas et John C. Warner qui, en 1998, ont identifié des principes visant à diminuer les pollutions d'origine chimique en réduisant la production et l'utilisation de substances dangereuses tout en augmentant l'efficacité de certaines pratiques. La douzaine de principes dégagés par ces chimistes : économie d'atomes, utilisation ou création de substances faiblement ou non toxiques pour les humaines, suppression ou diminution des substances auxiliaires, minimisation des besoins énergétiques... recoupent largement ceux à l'œuvre dans la chimie du vivant.

Rappelons que cette dernière est en effet fondée sur l'utilisation d'un nombre très restreint d'atomes abondant dans l'environnement³⁹ et de polymères, que ses réactions mettent essentiellement à profit l'énergie solaire et sont réalisées à des pressions et températures ambiantes en utilisant les recyclage métabolique et la catalyse enzymatique pour produire des molécules biocompatibles et biodégradables dépourvues de toxicité à long terme. Cette convergence entre la chimie organique « naturelle » et les principes de la chimie « verte » s'exprime particulièrement dans la chimie bio-inspirée. Celle-ci repose essentiellement sur l'utilisation du métabolisme cellulaire et la catalyse enzymatique,

39 L'oxygène, le carbone, l'hydrogène, l'azote et plus marginalement le soufre et le phosphore constituent 98 % de la matière vivante. Le reste est constitué de minéraux (calcium, chlore, magnésium...) et d'oligo-éléments (fer, iode...).

en particulier dans le domaine des biotechnologies qui, avec celui de la production de matériaux biomimétiques, constitue le socle de la chimie « verte ».

▣ Les biotechnologies

En amont des biotechnologies se situe la bioprospection. Ses enjeux économiques pour des secteurs comme la cosmétologie, l'agriculture et la pharmacologie notamment, peuvent être particulièrement significatifs. On estime par exemple qu'environ 50 % de la pharmacopée sont issus de la biodiversité terrestre et marine. Par ailleurs, le trésors potentiel apparaît considérable. L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) estime à 1,9 millions le nombre total d'espèces connues à l'heure actuelle alors que le nombre total d'espèces excéderait dix millions selon la plupart des estimations.

Le potentiel naturel est donc encore fort peu exploité, même si beaucoup d'instituts de recherche travaillent en collaboration avec des entreprises sur les propriétés de substances produites par le vivant, en particulier les organismes marins, pour en tirer des produits à vocation thérapeutique.

L'OCDE définit la biotechnologie comme « *l'ensemble des technologies qui mettent à profit l'adaptation et la modification des organismes, processus, produits et systèmes biologiques présents dans la nature aux fins de la production de biens et services* ». Dans le champ industriel, les biotechnologies sont essentiellement utilisées dans la production alimentaire, de matériaux et de produits chimiques. Elles sont aussi utilisées dans le domaine de l'énergie via la production de méthane, voire dans celui de l'environnement, notamment pour le traitement des eaux usées et des sols pollués. Ces technologies ont commencé de se développer fortement nonobstant les interrogations éthiques qu'elles suscitent (transgénèse, clonage...) et les connaissances encore très parcellaires dont on dispose sur le matériel vivant et les fonctions de la biodiversité qui constituent les matières premières de ces technologies. Pour autant, l'OPECST estime que dans le demi-siècle à venir, « *les biotechnologies vont sortir des laboratoires et entrer à l'usine ; elles deviendront peu à peu un secteur de la production industrielle, avec des applications aussi variées que le sont celles de l'industrie actuelle.* »⁴⁰ On devrait notamment s'orienter vers une utilisation à grande échelle des propriétés des bactéries dans le domaine de la chimie. Des précautions seront à prendre en conséquence, l'action extrêmement efficace de ces organismes étant porteuse de dangers potentiels ou avérés.

Au regard des critères de durabilité, les biotechnologies présentent un certain nombre d'avantages par rapport à la chimie traditionnelle. Même si elles comportent des limites (faible rendement énergétique par exemple), les biotechnologies sont beaucoup plus économes en énergie, utilisent des matériaux renouvelables, ne génèrent pas de déchets collatéraux, contrairement aux produits chimiques⁴¹ et se révèlent beaucoup plus précises (sélectives) dans leur utilisation, le rendement de la réaction recherchée s'en trouve donc augmenté. En outre, l'utilisation d'un biocatalyseur pour effectuer une réaction chimique ne nécessite pas l'utilisation de solvants organiques toxiques.

Au total, l'emploi de biocatalyseurs dans le secteur industriel permet de réduire la consommation d'énergie, de produits chimiques et de déchets à traiter. C'est notamment pourquoi l'OCDE souligne que « *les conséquences du changement climatique ont nécessité*

⁴⁰ Rapport de l'OPECST de 2007, op. cit.

⁴¹ Les enzymes ne font qu'un seul produit alors que les produits chimiques génèrent des déchets collatéraux plus ou moins importants selon les cas.

la recherche de technologies moins néfastes pour l'environnement en émettant moins de gaz à effet de serre », conséquences auxquelles viennent s'ajouter des « dilemmes économiques et environnementaux convergents ».

Quelques exemples déjà anciens, qui présentent tous des bénéfices en termes de réduction des coûts ou de performances, témoignent de ces avantages environnementaux :

- la catalyse enzymatique pour la fabrication d'un antibiotique (la céphalosporine) produit cent fois moins de solvants résiduels destinés à être incinérés ;
- la production de vitamine B2 par des microorganismes ou métabolisme modifiés économise 75 % de matières non renouvelables et réduit de 50 % les émissions de composés organiques volatiles ;
- la fabrication d'un antibiotique (la céphalexine) par des microorganismes réduit les déchets d'un facteur de 3 à 7 ;
- en agroalimentaire, la catalyse enzymatique pour la démulcination des huiles végétales réduit de 92 % la quantité d'eau utilisée et de 88 % les boues résiduelles ;
- dans le domaine minier, l'extraction du cuivre de minerai sulfuré par des bactéries peut se pratiquer in situ (moindre transport) et évite d'utiliser des fours de fusion ;
- ... ;

Les exemples d'utilisation de la catalyse enzymatique, de l'action des bactéries ou de microorganismes pourraient être multipliés. Les propriétés recherchées dans ces processus sont globalement la réduction des coûts de production, l'amélioration de la productivité, de la qualité du produit, mais aussi les économies de matière, la réduction des déchets et des émissions de polluants, des réactions chimiques à basse température avec l'économie consécutive de consommation d'énergie.

Les perspectives de développement des procédés biomimétiques dans les biotechnologies sont impossibles à évaluer en tant que tels. Leur sort dépend en effet aussi bien des progrès de la recherche (certains processus naturels s'avèrent plus performants et économes que ceux de la chimie traditionnelle) que du développement des différentes filières ou encore du soutien des politiques publiques. Ainsi, bien que la biotechnologie industrielle aille bien au-delà des carburants liquides, on doit constater que les mesures publiques de soutien ont beaucoup bénéficié aux biocarburants (R&D, installations de pilotes et de démonstrateurs...), très peu aux produits chimiques renouvelables et aux produits biosourcés. Quant à l'essor des différentes filières, dans un contexte de mondialisation des marchés, il devrait entre autres dépendre du recours généralisé à l'analyse du cycle de vie des produits, ce qui n'est pas encore le cas.

□ Des écomatériaux aux propriétés remarquables

Les matériaux créés par le vivant peuvent présenter un intérêt pour diverses raisons : leur structure, leur composition, leur surface... La distinction s'opère souvent entre matériaux de structure et matériaux fonctionnels. Ils peuvent être utilisés en tant que tels ou entrer dans la composition de produits plus ou moins complexes. On citera ainsi, à titre d'exemple, un contreplaqué marin particulièrement résistant et ne diffusant aucun polluant dans l'environnement grâce à une colle inspirée de protéines à l'architecture tridimensionnelle fabriquée par la moule pour se fixer sur son support. Les modèles de bio-ciments, extrêmement nombreux dans les océans, présentent un potentiel suffisant

pour faire actuellement l'objet d'études dans le cadre de projets européens. On notera par ailleurs que les assemblages en multicouches se retrouvent souvent dans la nature⁴².

Au regard des produits issus de la fabrication industrielle, les écomatériaux présentent un rapport particulièrement remarquables entre leurs performances structurales, souvent supérieures à celles des produits industriels et le processus de fabrication : faible température, faible consommation d'énergie, de ressources et absence de substances toxiques rares sont les principales caractéristiques du processus de fabrication de ces matériaux. La quasi-totalité des matériaux vivants sont constitués par auto-assemblage à partir de trois familles de polymères et de quatre éléments principaux disponibles localement : le carbone, l'oxygène, l'azote et l'hydrogène⁴³ et en utilisant l'eau comme solvant. Ces matériaux souvent composites - ils allient une phase organique et une phase minérale - possèdent un degré d'optimisation très élevé des structures composites (la coquille d'ormeau a une résistance mécanique propre dix fois supérieure à celle de son composant, l'aragonite). Ils s'auto-organisent, se reconfigurent, s'auto-régénèrent à température et pression ambiantes et sont entièrement recyclables et biocompatibles.

Les combinaisons sophistiquées entre le biologique et le minéral produites par le vivant ainsi que les stratégies mises en œuvre pour y parvenir ont été largement imitées afin d'élaborer des matériaux aux performances physiques élevées (céramiques, soie d'araignée...). Cependant les procédés mis en œuvre par l'industrie pour y parvenir restent très traditionnels par l'utilisation importante d'énergie, le recours à la chimie classique et l'inclusion de composés toxiques.

Parmi les nombreuses applications sur lesquelles ont débouché les recherches biomimétiques, les auteurs du rapport de l'OPECST susmentionné citent les matériaux adaptatifs ou « intelligents » qui réagissent en fonction de leur environnement et des stimuli auxquels ils sont soumis en modifiant spontanément leurs propriétés physiques et les matériaux industriels qui reproduisent les propriétés de ceux issus du vivant.

Dans la première catégorie, on trouve par exemple les matériaux adaptatifs comme les verres photochromes, les matériaux à changement de phase ou les alliages à mémoire de forme ou encore les matériaux qui s'auto-assemblent imitant en cela l'auto-organisation de la matière vivante. Dans la deuxième catégorie se retrouvent des produits industriels comme les vitres autonettoyantes ou les pare-brise anti-pluie, imitant la structure en picots hydrophobes des feuilles de lotus, des rubans adhésifs extrêmement performants inspirés par la structure des pattes du gecko... Plus récemment une colle biocompatible résistant à un environnement dynamique et humide a été utilisée par une start-up française de biotechnologie. Inspirée par les coussinets plantaires de certains insectes et les sécrétions de limaces et de vers marins qui comprennent des éléments non nuisibles à l'eau. Cette innovation biomimétique permet de réparer des lésions dans un cœur en contraction continue. Cette colle est biodégradable et génère une réponse inflammatoire minimale.

42 Une double couche de cire cristalline tapisse par exemple l'intérieur de l'urne du népenthès (fleur carnivore). La couche supérieure, nanostructurée, contamine les organes avec lesquels les insectes s'accrochent à la paroi. La couche inférieure, différente de structure (composition, dureté, élasticité), réduit la surface de contact entre les pattes de l'insecte et le végétal et le fait glisser au fond du piège. Ce modèle de structuration pourrait être utilisé pour développer des surfaces antiadhésives (F. Monfort-Windels, Journal des ingénieurs n°110, mai 2008).

43 Les autres éléments le plus fréquemment utilisés sont le calcium, le soufre, le phosphore, le sodium, le chlore et le potassium.

Toujours dans le domaine médical, les scientifiques d'une société internationale ont mis au point un matériau qui reproduit les propriétés de la peau de girafe, laquelle fonctionne comme une combinaison anti-gravité pour prévenir la stagnation du sang dans les extrémités inférieures des pattes de l'animal. Des bandages de compression destinés aux personnes souffrant de problèmes de circulation sanguine sont fabriqués à partir de ce nouveau matériau élastique.

La bio-inspiration au service de la transition énergétique et écologique

Les systèmes naturels peuvent être une source d'inspiration et de progrès dans le domaine de l'énergie et de la séquestration du carbone mais également dans celui de la gestion de l'eau.

❑ *Vers la photosynthèse artificielle ?*

La compréhension et la reconstitution du mécanisme de la photosynthèse par lequel les végétaux et certaines bactéries produisent du sucre et de l'oxygène à partir du dioxyde de carbone et d'eau grâce à l'énergie du soleil présente un grand intérêt. La maîtrise du processus pourrait en effet déboucher sur trois grands procédés issus de la photosynthèse artificielle à base de protéines et d'eau :

- la conversion directe de l'énergie solaire en électricité par incorporation de pigments artificiels dans des cellules photo-électrochimiques ;
- la production d'hydrogène grâce à des micro-organismes photosynthétiques capables de synthétiser l'hydrogène ou à des catalyseurs artificiels bio-inspirés pouvant décomposer l'eau en hydrogène et oxygène ;
- la fixation par photosynthèse du dioxyde de carbone atmosphérique en combustibles comme en méthane ou le méthanol.

❑ *La compréhension des cycles naturels pour séquestrer le carbone*

Les océans, les sédiments et roches sédimentaires, l'atmosphère et la biosphère sont autant de réservoirs de carbone. Face à la menace climatique la séquestration du carbone est devenue un enjeu. Des programmes de recherches, mais aussi industriels ont été engagés pour tenter de reproduire ou utiliser les processus à l'œuvre dans ces différents portions de la nature pour recycler ou séquestrer le carbone présent dans l'atmosphère ou dissous dans l'eau : accélération du processus de bio-minéralisation ou production de chaînes carbonées à partir du CO₂ atmosphérique et de l'activité des micro-organismes par exemple. Ces derniers processus commencent à s'industrialiser via des systèmes utilisant des microalgues, des enzymes, voire des bactéries. Ils requièrent beaucoup de surface mais présentent l'avantage de produire ces chaînes essentiellement à partir de CO₂, d'eau et de lumière. Le principe consiste en définitive à « remonter la chaîne énergétique », ce que font les plantes par la photosynthèse. D'autres procédés plus familiers peuvent aussi être cités, comme la production d'agrocarburants ou la chimie biosourcée⁴⁴.

44 L'usage de microalgues se développe de façon très importante. Deux start-up françaises peuvent être citées à titre d'exemple : Ennesys, qui fabrique des murs de microalgues produisant de l'énergie en dépolluant les eaux usées et Fermentalg, qui a mis au point un lampadaire à microalgues permettant d'absorber une tonne de CO₂ par an.

□ *Le biomimétisme au service de la gestion de l'eau*

La vie trouve son origine dans l'eau et les organismes vivants ne sont sortis de ce milieu que très récemment à l'échelle des temps géologiques. L'eau continue de constituer la principale composante des cellules vivantes.

Depuis 3,8 milliards d'années, les organismes optimisent la gestion de l'eau. Dès lors rien d'étonnant à ce qu'ils aient inspiré de multiples innovations technologiques relatives à la gestion de l'eau. Elles concernent aussi bien la captation et le stockage du fluide que sa distribution ou son traitement (filtration et purification, dessalement...). Signalons par exemple que pour compléter la filtration rénale, les tortues marines disposent de glandes lacrymales modifiées qui leur permettent d'excréter les excédents de sel de leur circulation sanguine.

Au-delà des procédés de phytorestauration dans l'épuration des eaux usées, leur traitement via des procédés bio-inspirés est appelé à se développer. Il fait l'objet de travaux dans plusieurs laboratoires, notamment français.

Quel apport de l'approche biomimétique à l'agriculture ?

Le biomimétisme interroge l'agriculture et ses pratiques, certaines d'entre elles s'inspirant directement du fonctionnement des écosystèmes naturels.

Les principes du biomimétisme appliqués à l'agriculture

L'approche biomimétique ou éco-mimétique n'est pas un type d'agriculture mais une démarche fondée sur l'observation et l'imitation des écosystèmes naturels dans le but de construire des agrosystèmes productifs et durables. Plusieurs tendances agronomiques contemporaines s'orientent à des degrés divers dans cette voie.

L'approche biomimétique se fonde sur un ensemble de données scientifiques et quelques principes. Les données concernent la diversité biologique, la résilience, la productivité, la stabilité et l'auto-organisation. Six principes la guident :

- utiliser la complémentarité des caractères fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience ;
- maintenir la fertilité des sols sous couvert végétal ;
- encourager la coopération entre plantes aux fonctions différentes ;
- contenir les infestations de ravageurs à travers les niveaux/réseaux trophiques riches et complexes ;
- utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques dans la lutte contre les ravageurs ;
- reproduire la succession écologique après une perturbation.

Les types d'agriculture évoqués plus haut, qui s'inspirent plus ou moins fortement du mode de fonctionnement des écosystèmes naturels se réfèrent nécessairement à des éléments de la démarche éco-mimétique. On doit rappeler que la profession agricole est extrêmement diverse et souligner que certains agriculteurs sont déjà très fortement impliqués dans des pratiques agroécologiques à l'échelle de leur exploitation et qu'ils

diffusent leurs expériences et innovations dans les réseaux professionnels (coopératives, associations, réseau consulaire...).

Si l'on reprend les différents paramètres sur lesquels se fonde l'approche, on peut dresser le constat suivant⁴⁵ sur chacun d'eux :

- diversité biologique : plus la biodiversité d'un écosystème est riche, plus sa production primaire, sa rétention de nutriments et sa résilience augmentent ;
- Signalons enfin que la productivité d'un agroécosystème comportant plusieurs espèces reste complexe à évaluer en raison des interrelations qui se nouent entre elles.
- résilience : la capacité d'un écosystème à restaurer ses fonctions et sa structure après une perturbation dépend de son inertie, de son adaptabilité et de sa transformabilité ;
- stabilité : à cette notion, fortement contestée, car l'idée d'un équilibre optimal a été radicalement remise en question, ou préférera celle d'équilibre dynamique.
- Cependant, résilience et équilibre dynamique dépendent de la diversité des fonctions et des espèces présentes dans un écosystème. C'est donc cette diversité qu'il convient de préserver pour les renforcer.
- auto-organisation : l'évolution d'un écosystème dépend conjointement de facteurs internes et externes. L'auto-organisation est la capacité de cet écosystème à se réorganiser dans un environnement par nature instable. Reproduire cette capacité d'auto-organisation est un atout pour améliorer la résilience des agroécosystèmes.

Quant aux six principes de la démarche écomimétique évoqués plus haut, ils peuvent être ainsi synthétisés :

- utiliser les caractères fonctionnels complémentaires pour la productivité et la résilience suppose d'identifier les fonctions souhaitées, les espèces à même de les remplir et les mélanges d'espèces à cultiver pour jouer sur la complémentarité ;
- La rotation des cultures, leur association sur une même parcelle, l'agroforesterie... participent de cette démarche.
- maintenir la fertilité des sols grâce au couvert végétal permanent et le non-labour permettent de conserver une plus grande quantité de matière organique dans le sol et de préserver l'essentiel des interactions propres au système ;
- En plus, des pratiques déjà mentionnées, le semis direct sous couvert et le compostage s'inscrivent dans ce principe.
- encourager la coopération entre les plantes avec des fonctions différentes contribue à une meilleure distribution des nutriments ;
- Les cultures associées la rotation des cultures remplissent aussi cette fonction.
- contenir les infestations de ravageurs à travers des réseaux trophiques complexes correspond à une vision préventive et systémique car plus la diversité des espèces est grande et plus les ravageurs et leurs prédateurs sont divers, ce qui empêche l'explosion d'une de ces populations ;
- L'implantation d'habitats (arbres, haies...) et l'association de cultures contribuent à cette action.

- utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques pour contrôler les ravageurs revient à protéger les cultures avec des agents biologiques (macro ou microorganismes, champignons...);
- reproduire la succession écologique après une perturbation. Suivant les écosystèmes, ces cycles varient. La culture non brûlée fonctionne sur cette base. La rotation et l'association des cultures jouent en partie le même rôle.

Des pratiques agricoles qui évoluent

Les différents types d'agriculture n'empruntent pas tous nécessairement la même voie, la hiérarchisation des priorités n'étant pas toujours la même.

Le but est cependant toujours plus ou moins de maintenir les rendements et de diminuer si possible l'utilisation d'intrants non renouvelables et de conserver un outil de travail en bon état.

Le progrès de l'écomimétisme est d'autant plus difficile à mesurer que certaines pratiques comme l'agroforesterie, qui permet d'améliorer les rendements des forêts et des cultures prises séparément et appliquent des principes décrits plus haut (complémentarité fonctionnelle, maintien du couvert végétal, coopération des espèces...) avec des effets positifs (meilleure rétention et redistribution des nutriments, augmentation de la biodiversité, protection des cultures et du sol, meilleur stockage de l'eau...) peut néanmoins reposer en partie sur l'usage de produits phytosanitaires.

Il reste que l'imitation des propriétés des systèmes naturels progresse, que ce soit dans la culture des plantes annuelles et les systèmes agroforestiers ou arboricoles.

Les pratiques les plus fréquentes consistent, dans le premier cas, dans des associations intraparcellaires d'espèces, un couvert végétal permanent, le non-labour ou encore l'utilisation de solutions naturelles pour lutter contre les parasites et les ravageurs.

En arboriculture, l'hétérogénéité intraparcellaire et également pratiquée, de même que le couvert végétal permanent, notamment. Les agriculteurs recherchent en particulier par ces moyens le maintien de la biodiversité en particulier celle des sols, la protection de ces derniers et la diversification patrimoniale.

Dans ce panorama, un regard particulier mérite d'être porté sur la permaculture.

L'exemple de la permaculture

La permaculture est un concept formalisé en 1978 par deux Australiens, Bill Mollison et David Holmgren⁴⁶, sur la base de travaux de chercheurs du monde anglo-saxon. L'idée d'une agriculture permanente a été formulée en 1910 par un agronome américain, Cyril G. Hopkins, puis reprise par son confrère Franklin Hiram King en 1911 dans son ouvrage de référence sur les agricultures chinoise, coréenne et japonaise.

Inspirée du fonctionnement des écosystèmes naturels, la permaculture invite à un changement profond de paradigme. Elle repose sur la richesse de la biodiversité et des interrelations qui assurent le fonctionnement en boucle de l'espace mis en valeur : absence de déchets, autonomie, auto-fertilité, résilience... Il ne s'agit donc pas d'une technique agricole mais d'un système. Il a pour objet la création d'installations humaines

⁴⁶ Bill Mollison, David Holmgren ; *Permaculture 1, une agriculture pérenne pour l'autosuffisance et les exploitations de toutes tailles* ; Éditions Debard, 1986.

environnementalement durables et socialement équitables, économes en ressources et en énergie et d'une productivité élevée, réconciliant ainsi satisfaction des besoins alimentaires et préservation des milieux.

La permaculture repose sur des outils de design⁴⁷ global qui permettent de concevoir des systèmes bio-inspirés de toutes tailles pouvant potentiellement être mis en œuvre partout et par tous. Elle opère une synthèse inédite entre des traditions parfois multimillénaires et l'apport des sciences modernes. Elle est intensive en observation et en conception.

Pour être productive et économiquement performante, l'agriculture « permaculturelle » s'articule autour de quelques grands principes consistant à :

- privilégier l'énergie solaire et l'enrichissement des sols qu'elle permet plutôt que les énergies fossiles (plus que la machine, la main humaine peut prendre soin des sols, densifier les cultures et les associer) ;
- boucler les cycles, en particulier ceux de la fertilité. Cette circularité se démarque de l'agriculture linéaire, grosse consommatrice d'énergie et de matières premières, ce qui fragilise sa sécurité à moyen-long terme ;
- limiter le travail du sol en évitant le labour et en cultivant sur buttes permanentes, technique très productive pratiquée de très longue date dans de nombreuses civilisations, y compris en France ;
- donner aux arbres une place centrale, les plantes vivaces étant à l'origine des terres arables (l'INRA conduit actuellement une étude sur un système des vergers maraîchers associant arbres, petits fruits, légumes...) ;
- étager les cultures pour bénéficier d'un ensoleillement maximal, dans un souci de productivité ;
- associer les cultures pour obtenir, avec leur densification, huit rotations de cultures par an, alors que la moyenne en maraîchage bio est inférieure à deux rotations annuelles ;
- tirer parti des services écosystémiques, notamment en veillant à l'épanouissement de la biodiversité : un agrosystème diversifié est plus résilient, auto-fertile...
- On peut toutefois noter que les cultures peu mécanisées génèrent des conditions de travail difficiles pour les agriculteurs.

⁴⁷ Ce terme anglais n'a pas d'équivalent exact en français. Il signifie à la fois une conception, une création et l'aménagement d'un système. Le design est au cœur de la permaculture car les interactions constructives entre les différents éléments de l'installation dépendent du positionnement de ces derniers. Plus ce positionnement est pertinent, plus le système devient autonome, productif, économe en énergie et en travail. Le design et les outils qui lui sont associés permettent d'appréhender un territoire dans sa globalité, d'en évaluer les forces, les faiblesses et les potentialités. Il ne se prête pas à la reproduction car il est par nature étroitement associé au lieu et au territoire, population comprise, dans le cadre d'une approche résolument holistique.

Encadré 1 : L'exemple emblématique de la ferme biologique du Bec-Hellouin

Le contexte

Depuis 2006, les propriétaires-exploitants de la ferme du Bec-Hellouin (1,8 ha) appliquent les concepts de la permaculture à une agriculture biologique professionnelle. L'espace, très densément occupé, est constitué de beaucoup de petits milieux dans lesquels cohabitent intimement arbres, légumes, fruits, plantes élevées et sauvages... Près de mille espèces sont cultivées sur la ferme.

Parallèlement à l'exploitation a été créée une association (deux salariés) chargée de mener des recherches et une école de permaculture.

Les résultats d'exploitation

En 2011, grâce au soutien financier de plusieurs fondations, une étude a été engagée en collaboration avec AgroParisTech sur les performances économiques de la permaculture telle que mise en œuvre sur l'exploitation. Elle démontre que 670 m² cultivés* entièrement à la main, en maraîchage biologique diversifié, permettent de créer un emploi décentement rémunéré : 1 500 à 2 000 euros net par mois. Le temps de travail est de l'ordre de 2 500 à 3 000 heures par an. Depuis la saison 2012-2013, le chiffre d'affaires est passé de 35 000 à 55 000 euros par an, ce qui correspond à peu près au rapport pour un hectare en agriculture conventionnelle. L'écart est donc de un à dix par rapport à un maraîchage bio classique.

Cette étude apporte la preuve qu'il est possible de produire beaucoup et durablement sur très peu d'espace et d'en vivre décentement, tout en tenant compte de l'amortissement des investissements. Le calcul de l'étude ne prend pas en considération les aides publiques. Selon Charles Hervé-Gruyer, créateur de la ferme, les mille mètres carrés permettent de nourrir cinquante familles pendant un an sur la base d'un panier à vingt euros par semaine.

Les externalités

De nombreuses externalités positives ont par ailleurs été enregistrées : aggradation des sols (création d'un ou deux centimètres d'humus par an dans certains jardins), amélioration de la séquestration du carbone dans les sols et les arbres, enrichissement de la biodiversité, production importante de biomasse qui fournit à l'exploitation l'essentiel de l'engrais bio...

La permaculture est par ailleurs intense en main d'œuvre, donc potentiellement créatrice d'emplois. Les résultats enregistrés témoignent enfin de l'intérêt de développer la permaculture en vue de contribuer à une relocalisation de l'agriculture dans et autour des villes.

* L'espace de la ferme isolé pour les besoins de l'étude est de 1 000 m², mais seuls 670 m² sont effectivement cultivés. La surface restante est notamment constituée des allées.

Source : d'après l'audition de Charles Hervé-Gruyer.

Charles Hervé-Gruyer considère que le rôle de la formation est fondamental pour s'engager avec succès dans la permaculture. Les chambres d'agriculture et les groupements régionaux d'agriculture biologique deviennent actifs sur le sujet. Selon l'auditionné, des clivages profonds existaient entre agriculture bio et agriculture conventionnelle qui mettent du temps à se combler. La permaculture ne se trouve pas dans la même situation. Elle suscite un intérêt porteur d'échanges entre professionnels pratiquant de différents types d'agriculture. Cet esprit de dialogue et de coopération autour de préoccupations communes s'inscrit au cœur des réflexions sur la durabilité de notre modèle de développement.

Une architecture biomimétique émergente

Le grand architecte Antoni Gaudi était convaincu que « *l'architecte du futur construira en imitant la nature, parce que c'est la plus rationnelle, durable et économique des méthodes* ». On doit cependant constater qu'en dépit de réalisations remarquables, les bâtiments ou ensembles architecturaux inspirés de la nature, qu'il convient de distinguer de ceux intégrés dans la nature, demeurent peu nombreux. Pour autant, selon l'agence d'urbanisme URBEO le biomimétisme apparaît aujourd'hui comme un courant prometteur et en plein essor.

Il commence aujourd'hui à influencer l'urbanisme mais très peu de réalisations concrètes peuvent être analysées à ce jour. C'est pourquoi cette évolution ne sera qu'évoquée à la suite du développement sur l'architecture.

Quelques principes guident l'architecture biomimétique

Parmi les thématiques soulevées par les problématiques environnementales, celles des flux, des matériaux et de leur impact sur l'environnement naturel et la santé, de l'énergie, de la maintenance... deviennent prégnantes et la démarche globale consistant à reproduire les propriétés d'un ou plusieurs systèmes biologiques apportant des réponses à tout ou partie de ces questions s'en trouve revalorisée. Elle conduit les architectes à intégrer une information plurielle, ajoutant aux savoirs et savoir-faire propres à l'architecture une partie de ceux relatifs aux sciences du vivant. Il en ressort une série de principes issus de la transposition à l'architecture d'une partie de ceux qui guident la conduite des organismes vivants :

- un fonctionnement lié aux énergies renouvelables et une optimisation des ressources. En optimisant leur production d'énergie et minimisant leur utilisation de matière en agissant sur leur forme et leur structure, les organismes vivants constituent un modèle pour l'architecture dans la gestion des ressources ;
- une adaptation de la forme à la fonction. La forme peut offrir une réponse moins coûteuse que la matière première aux contraintes de l'environnement (climat, température, disponibilité en eau, nature du sol, exposition au vent, à la lumière...). Tous ces éléments influent sur la morphogénèse⁴⁸ des organismes vivants, qui s'adaptent de cette façon aux contraintes de leurs fonctions suivant des temporalités variables mais toujours sur le long terme ;
- un fonctionnement en boucle fondé sur le recyclage. Cela devrait inciter à la fabrication de matériaux biodégradables, réutilisables ou recyclables, notamment dans le cadre de réseaux intersectoriels où les déchets des uns deviennent les ressources des autres ;
- l'utilisation des ressources locales. Celle-ci permet de réduire les flux d'énergie, donc les émissions de carbone, en minimisant les distances.

⁴⁸ Loi qui détermine la forme, structure des tissus... concept utilisé par extension à l'architecture et l'urbanisme.

L'architecture biomimétique : une démarche de conception écologique

Une conception s'inspirant de l'esthétique et des fonctionnalités de la nature va nécessairement de pair avec l'identification des spécificités de chaque site et chaque projet. Elle repose sur trois dimensions.

□ L'inspiration formelle

En architecture biomimétique, la forme est avant tout une réponse à des problématiques architecturales. La morphologie, la structure et les matériaux constituent les trois champs d'intervention dont elle dépend. La forme peut être plus ou moins explicitement inspirée de la nature. Elle n'est cependant pas obligatoirement liée à la résolution d'un problème architectural particulier. C'est en revanche le cas de la structure. Or, selon l'architecte américain Richard Buckminster Fuller, « *l'efficacité optimale résidait pour l'essentiel dans la technologie naturelle qui est par essence dynamique, fonctionnelle et légère. L'architecte allemand Frei Otto était également fasciné par la résistance et la stabilité des structures tendues tant elles permettaient une stabilité maximale tout en offrant une structure ultra légère (...). R. Fuller et F. Otto ont finalement révélé que les caractéristiques nécessaires à une structure telles que l'aspect économique, esthétique, fonctionnel et durable sont déjà présentes dans la nature* »⁴⁹.

Le premier s'est inspiré des radiolaires et diatomées⁵⁰ pour concevoir des dômes géodésiques, dont le pavillon américain de l'exposition universelle de Montréal en 1967 est l'illustration la plus emblématique ; le second a conjugué les caractéristiques des ailes de libellules et des toiles d'araignées pour réaliser le stade olympique de Munich en 1972. Moins spectaculaire mais pour autant fondamental, soulignons que l'architecture des bâtiments antisismiques reprennent fréquemment la structure des nids d'abeilles, lesquels présentent une grande rigidité pour une faible masse et permettent d'atténuer les vibrations. En lien étroit avec la forme et la structure, les matériaux utilisés participent de la morphogénèse des édifices. Or, ceux produits par la nature sont compatibles avec leur environnement, intégralement recyclables et particulièrement performants : constitués de terre, de poussière de bois et de salive d'insecte, les termitières s'avèrent aussi solides que du béton ; les toiles d'araignée cumulent des propriétés de résistance et de souplesse que les productions humaines n'égaleront pas, etc. À tous ces égards, ils constituent des sujets de grand intérêt pour l'architecture, attentive aux progrès de la chimie verte sur ce point.

□ L'approche fonctionnelle, fondement de l'architecture biomimétique

Si, par méthode, on assimile un bâtiment à un organisme vivant, avec ses différentes fonctions, son comportement, son métabolisme... il apparaît que chaque niveau biologique fonctionnel (molécule, organe...) trouve des applications différenciées reproductibles en architecture). Or, au-delà des questions de résistance structurelle aux pressions, torsions, flexions..., c'est au niveau fonctionnel que se posent beaucoup de grandes problématiques

⁴⁹ URBEO ; *Le biomimétisme, une source pour l'architecture durable* ; Recherche et prospective, URBEO.

⁵⁰ Les radiolaires sont des protozoaires marins vieux de cinq cents millions d'années dont la taille est comprise entre cinquante et trois cents pm. Ils possèdent un squelette à base de dioxyde de silicium aux formes d'une exceptionnelle variété et présentant des caractéristiques physiques remarquables (solidité, légèreté...). Ces diatomées sont des algues microscopiques unicellulaires enveloppées par un squelette externe siliceux présentant une variété et un intérêt comparables à celui des radiolaires.

architecturales intégrant l'utilisation et l'exploitation du bâtiment. Celle de la thermique et de la ventilation peut servir d'illustration. C'est en effet par inspiration biomimétique que l'architecte Mick Pearce a conçu le centre commercial Eastgate à Harare (Zimbabwe), en copiant le principe de fonctionnement des termitières pour maintenir le bâtiment à température constante sans recourir à un système de climatisation. Cette tour désormais célèbre n'est pas un exemple d'innovation resté isolé. Le « concombre », immeuble de la City de Londres imaginé par Sir Norman Foster est directement inspiré par la structure des éponges de verre (hexactimellida). La structure en treillis de sa façade permet de résoudre à la façon de cet animal marin les problèmes de circulation d'air et de ventilation. D'autres systèmes ont été inventés sur le même principe : le centre d'art de Singapour, dessiné par Michaël Wilford, comporte des ouvertures automatiques fonctionnant selon le degré de luminosité destinées à réguler luminosité et chaleur interne du bâtiment. Ce système est paradoxalement inspiré du fonctionnement de la fourrure de l'ours polaire, les losanges en aluminium du bâtiment jouant le rôle des poils de l'animal.

Il est à noter que ces réalisations ne sont pas toujours reproductibles, car adaptées à un contexte géoclimatique particulier et un environnement réglementaire qui peut être radicalement différent d'un pays à l'autre. Ainsi, pour des raisons de sécurité incendie, l'Eastgate ne pourrait pas être édifié en France.

□ *L'approche écosystémique, à la pointe de l'innovation*

Le biomimétisme relationnel, ou écomimétisme, se propose d'imiter les principes relationnels des organismes qui composent un écosystème. En termes architecturaux, il s'agit de faire en sorte que les constructions s'inscrivent dans un réseau d'échanges et évoluent suivant des principes de durabilité dans son environnement. Cela se traduit notamment, au niveau de la conception, par le recours aux énergies gratuites (la tour Eastgate en est l'exemple le plus connu), l'utilisation des rétroactions, la prise en compte du recyclage, mais aussi le développement de coopérations. Les réalisations qui s'efforcent d'appliquer ces principes sont encore peu nombreuses, mais les projets - quelquefois les utopies - se multiplient.

Parmi les exemples autres que la tour Eastgate, on peut citer les réalisations de l'architecte et biomiméticien anglais Michael Pawlyn qui s'est inspiré du scarabée de Namibie pour concevoir le système de ventilation des hôpitaux anglais, la structure de la carapace de cet insecte lui permettant de récupérer en plein désert des microgouttes d'eau sur son dos. On peut également mentionner *La Pearl River Tower*, gratte-ciel chinois censé produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. C'est après avoir étudié la manière dont les éponges absorbent au mieux l'énergie disponible dans leur environnement au lieu de la renvoyer que l'architecte Adrian Smith a intégré dans la tour non seulement des collecteurs d'eau de pluie et des capteurs solaires, mais également des turbines éoliennes placées au milieu de la façade.

L'ambition biomimétique peut prendre des voies encore plus originales. Selon Olivier Scheffer, directeur de recherche et développement dans un cabinet d'architectes spécialisés, il doit être possible d'utiliser les principes de l'écologie industrielle pour créer des bâtiments que l'on appelle symbiotiques en associant deux activités complémentaires dans un même édifice, de façon que cette association soit bénéfique aux deux entités. L'encadré ci-après illustre cette ambition.

Encadré 2 : Une ferme verticale d'algoculture marine en synthèse avec le bâtiment

L'approche est fondée sur l'analyse métabolique d'un bâtiment (flux d'entrée et de sortie) et, dans ce cas de figure, l'analyse métabolique des micro-algues. Ces dernières sont le pilier de notre biosphère : elles captent deux à cinq fois plus de CO₂ qu'une forêt en pleine croissance, recyclent 50 % du carbone sur terre produisent environ les deux tiers de l'oxygène de l'atmosphère, sont à l'origine de la chaîne alimentaire marine, d'une grande richesse moléculaire (production d'oméga 3 et oméga 6...) ont la capacité de croître à partir de déchets.

Le principe mis en œuvre dans cette réalisation architecturale consiste à intégrer des cultures de micro-algues en façade de bâtiment, en symbiose avec lui. Il est fondé sur le bouclage des flux : le dioxyde de carbone émis par les chaudières à gaz est absorbé par les cultures de micro-algues, ce qui permet de neutraliser l'impact du chauffage en termes d'émissions de CO₂. Par surcroît, les algues vont transformer ce gaz en oxygène, lequel va permettre de produire un air purifié.

La symbiose avec le bâtiment hôte est non seulement thermique, mais encore chimique

Ainsi, les eaux grises (l'usine notamment) vont pouvoir être exploitées comme nutriments après traitement et les eaux de pluie pour irriguer les cultures.

Les déperditions thermiques du bâtiment sont également mises à profit pour les cultures de micro-algues, les serres mises en place agissant comme une double-peau. En retour, les micro-algues qui sont maintenues à température par l'algoculture vont assurer la régulation thermique du bâtiment (planchers chauffants notamment).

Au total une analyse circulaire de tous les échanges possibles entre cultures de micro-algues et bâtiment a été réalisée. Il résulte de cette analyse qu'un algoculteur va pouvoir cultiver des micro-algues en économisant 80 % de ses besoins de régulation thermique, ce qui représente 30 % de son coût de revient et que le bâtiment va économiser 50 % de ses besoins de régulation thermique.

Des prototypes de ce projet, labellisé par un fonds unique interministériel, fonctionnent depuis deux ans. Un projet pilote avec une bio-façade de 200 m² sera mis en service en 2015 sur le site du CSTB à Champs-sur-Marne. Il s'agit d'un programme de recherche collaboratif avec le CNRS, des start-up biotechnologiques et des entreprises industrielles.

Les échanges peuvent également être organisés entre plusieurs unités aux fonctions différentes (logements collectifs et centre commercial par exemple). L'optimisation des échanges possibles entre deux ou plusieurs bâtiments peuvent aboutir à la constitution d'îlots écosystémiques. Il doit être souligné que certains projets innovants impliquant un acteur public, une collectivité par exemple, peuvent être remis en question à la suite d'une élection. Les innovations architecturales bio-inspirées s'en trouvent fragilisées.

Source : d'après l'audition d'Olivier Scheffer.

Encore jeune et novateur, le mouvement biomimétique en architecture est en butte à une série de critiques :

- la copie de la nature est impossible et l'on doit s'en servir comme d'une source d'inspiration partielle ;
- l'architecture comporte des dimensions politiques, sociales, morales... auxquelles la nature est totalement étrangère et pour lesquelles elle n'est d'aucun apport ;

- le biomimétisme est le reflet des préoccupations de notre société et cautionne des réalisations qui ne sont pas nécessairement vertueuses d'un point de vue environnemental ;
- l'approche est par trop technique, scientifique et fonctionnelle et débouche par surcroît sur des conditions de mise en œuvre particulièrement complexe.

En dépit de ces critiques, l'architecture biomimétique apparaît bien comme une nouvelle tendance affirmée et appelée à se développer. Des agences se spécialisent sur ce créneau et travaillent essentiellement sur des projets répondant à cette conception.

Au total, les architectes poursuivent des objectifs variés lorsqu'ils s'inspirent de la nature. Certains mènent une recherche esthétique ou symbolique, s'intéressant principalement à la forme, d'autres cherchent à copier des fonctionnalités organiques. En architecture, il convient donc toujours de distinguer biomimétisme et biomorphisme, ce dernier copiant les formes sans gain en durabilité. Pour que les constructions intégrant des éléments biomimétiques satisfassent aux critères du développement durable, on peut penser que biologistes, ingénieurs et architectes devront collaborer de plus en plus étroitement dès les premiers dessins d'un bâtiment, ainsi que le suggère Michaël Pawlyn qui considère que « *nous devons passer à un modèle en « boucle fermée » où tout peut être réutilisé et recyclé, comme dans le vivant* ».

Le biomimétisme appliqué à l'urbanisme

L'hyperurbanisation qui caractérise le monde moderne à l'échelle planétaire engendre des impacts environnementaux et sanitaires très conséquents.

Il va notamment falloir répondre à la cause et aux effets du recul des terres agricoles, de la déforestation, de l'artificialisation/imperméabilisation des sols et la fragmentation écologique des habitats naturels qui s'ensuit. Rien qu'en France, l'artificialisation des sols représente annuellement l'équivalent de cent soixante-quatre stades de football. C'est la première atteinte à la biodiversité.

Au regard de ce constat, la question se pose de savoir si les sociétés humaines vont être en capacité de concevoir et de maintenir en équilibre un univers urbain résilient à partir de concepts clés déjà cités : diversité, coopération, processus cyclique...

En Inde et en Chine, les premières villes inspirées du fonctionnement des écosystèmes naturels et des principes du vivant dans le but de trouver des solutions durables aux enjeux sociaux, économiques et environnementaux voient le jour. Une grande agence internationale d'architecture (Cabinet Hok), qui s'est associée avec la Biomimicry Guild, a conçu une ville nouvelle en s'inspirant des principes de biomimétisme, Lavasa, située à une centaine de kilomètres au Sud-Est de Bombay. La ville se divise en cinq grands villages de 30 000 à 50 000 habitants. Implantée dans une zone de mousson, elle est soumise à une courte, mais intense saison des pluies (neuf mille litres par mètres carrés en trois mois) à laquelle succèdent des sécheresses importantes. Les deux partenaires ont étudié l'écosystème actuel puis conclu que le partage aujourd'hui aride était autrefois une forêt humide, les arbres maintenant la qualité du sol, gardant l'eau pour la saison sèche et canalisant l'évaporation. Au total, six grands services ont été identifiés⁵¹. Il sera intéressant d'évaluer les apports de cette approche à long terme.

⁵¹ Collecte d'eau, captation de l'énergie solaire, séquestration du carbone, filtration de l'eau, évapotranspiration et cycle de l'azote et du phosphore.

Ces services ont été pris en compte par l'agence pour orienter la conception urbaine afin que la ville se comporte comme une forêt humide du point de vue fonctionnel. Ainsi, les toits des bâtiments participent à l'évacuation des pluies de la mousson canalisant et récupérant les eaux de ruissellement grâce à des tuiles imitant la morphologie des feuilles de figuier des banians⁵², le revêtement des chaussées laisse pénétrer l'eau dans le sol, les fondations des immeubles fixent la terre et l'eau à l'image des racines d'un arbre.

Quant à l'évacuation du surplus d'eau pendant les inondations, l'agence s'est inspirée du système élaboré par des fourmis locales pour préserver leur habitat, consistant en un réseau très dense de petits canaux.

La même méthode a été appliquée pour une autre zone urbaine indienne plus peuplée : Khed. Le travail demandé par ce type d'opération est considérable car il requiert une connaissance fine du fonctionnement des écosystèmes et de la biosphère et exige de s'inscrire dans la durée.

Si la vision écosystémique de la ville progresse, le défi auquel elle est confrontée est d'autant plus complexe que la ville n'est pas qu'un ensemble d'interactions fonctionnelles. Elle est aussi un centre décisionnel, économique, culturel... au cœur de tous les enjeux humains, civilisationnels et environnementaux, avec des impacts sur la qualité de vie. Une approche purement organiciste, aussi sophistiquée soit-elle, ne permettrait donc pas de le relever.

D'indéniables perspectives de création d'activités et d'emplois...

L'étude du CGDD sur « *la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte* » rappelle d'emblée que cette dernière a été définie par le Programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) dans un document de 2011, intitulé « *vers une économie verte : pour un développement durable et une éradication de la pauvreté* ». L'économie verte « *entraîne une amélioration du bien-être humain et de l'équité sociale tout en réduisant de manière significative les risques environnementaux et la pénurie de ressources* ».

En France, le potentiel de l'économie verte est important, la SNTEDD insiste d'ailleurs sur l'opportunité de développement économique et de créations d'emplois que représente la transition écologique. Dans cette stratégie, le biomimétisme accède au rang d'outil d'une innovation productrice de biens et services durables. Le projet de loi sur la biodiversité le désigne par ailleurs comme étant l'un des outils des filières de la croissance verte, permettant de valoriser la biodiversité en tant que capital économique.

52 Le figuier des banians, ou banians de l'Inde est un arbre de grande taille appartenant au genre Ficus.

Le potentiel d'activités et d'emplois du biomimétisme recoupe de nombreux champs de l'économie verte

La SNTEDD souligne que le biomimétisme s'inscrit, parmi d'autres éléments, dans la dynamique économique de la transition, et affirme sa volonté de les renforcer : « *Des innovations ont d'ores et déjà permis d'améliorer les performances environnementales des procédés. Ces progrès restent insuffisants et nécessitent des technologies de rupture et des innovations partagées... Ces innovations pourront notamment s'inspirer du fonctionnement du vivant, le biomimétisme permettant de produire des biens et services plus durables. L'ensemble des activités industrielles et agricoles sont concernées. Des dispositifs de soutien à ces innovations seront mis en place pour financer les opérations de la recherche de base jusqu'à la mise en place opérationnelle, notamment dans le cadre des trente-quatre plans de reconquête industrielle dont une large part est déterminante pour la transition écologique* ».

L'encadré ci-dessous, inséré par le MEDDE dans *L'environnement en France*, édition 2014, résume une situation complexe et où le biomimétisme, qui n'est ni un produit ni une activité, mais une démarche transversale, peine à trouver sa place dans la statistique publique.

Encadré 3 : Éco-activités et filières vertes

« DONNEES OU METHODOLOGIE

Le périmètre des éco-activités diffère de celui des filières vertes. Ces deux approches n'ont pas les mêmes finalités :

- les éco-activités couvrent des activités économiques ayant une finalité environnementale (protection de l'environnement ou gestion durable des ressources). Leur identification repose sur une nomenclature de produits préconisée par Eurostat ;
- les filières vertes couvrent une partie de ces activités ainsi que celles n'ayant pas de finalité environnementale mais qui se transforment pour intégrer des enjeux de développement durable. Par ailleurs, les filières vertes concernent uniquement le secteur industriel, contrairement au périmètre des éco-activités qui prend également en compte les entreprises de services et les administrations. »

Source : L'environnement en France, SOES, édition 2014.

Le biomimétisme est susceptible de concerner plusieurs domaines d'éco-activités : la réhabilitation des sols et des eaux, les déchets, la nature et la biodiversité, les énergies renouvelables ou la maîtrise de l'énergie, ou bien des activités transversales d'ingénierie, de R&D environnementales... L'édition 2014 de *L'environnement en France* invite à considérer globalement les évolutions possibles avec optimisme : « *la dynamique d'évolution est particulièrement liée aux domaines des EnR (l'emploi a augmenté de 11,6 % en moyenne par an sur la période 2004-2012), de la réhabilitation des sols et des eaux (+ 12,1 %) et de la recherche et développement (+ 8 %).* »

Dans le reste de « l'économie verte » - gestion des espaces verts, transports ferroviaires, construction, produits industriels favorables à une meilleure qualité environnementale - le biomimétisme peut aussi s'appliquer.

Dans l'ensemble de ces secteurs il n'est pas possible d'isoler puis de quantifier quel est actuellement et quel pourrait être à l'avenir l'impact du biomimétisme en termes d'emplois de la transition. Les évolutions signalées par le CGDD sont intéressantes en pourcentages,

mais elles portent sur des volumes d'activités et d'emplois relativement modestes. Les questions relatives à la part imputable au biomimétisme et à la dynamique dont il serait éventuellement porteur restent à ce stade sans réponse.

Le biomimétisme est porteur d'une dynamique pour de nombreux secteurs de l'économie

La biodiversité est identifiée au vivant, dont s'inspire le biomimétisme. Le projet de loi sur la biodiversité, en cours d'examen au Parlement, le proclame dans l'exposé des motifs : *« La biodiversité est aussi une force économique pour la France... Si l'évaluation complète des services rendus et donc le coût de leur disparition ne sont pas encore connus, plusieurs études ont montré l'importance de la biodiversité en tant que capital économique... la biodiversité est une source d'inspiration (biomimétisme, substances actives...) et représente dès lors une valeur potentielle importante. »*

Pour concrétiser cette vision, l'Assemblée nationale a modifié en première lecture l'article du texte déposé par le gouvernement qui détermine les missions de la future Agence française pour la biodiversité (AFB). Dans la version que l'Assemblée a adoptée et transmise au Sénat, l'AFB *« soutient les filières de la croissance verte et bleue dans le domaine de la biodiversité, en particulier le génie écologique et le biomimétisme »*.

L'étude d'impact du projet de loi traite plus précisément de l'intérêt économique de la biodiversité dans sa présentation des dispositions relatives à la mise en œuvre par la France du protocole de Nagoya - Protocole sur l'accès et le partage des avantages découlant de l'utilisation des ressources génétiques et des ressources traditionnelles associées (dit APA). Par utilisation des ressources génétiques, selon la définition du projet de loi, il faut entendre *« les activités de recherche et de développement sur la composition génétique ou biochimique de tout ou partie d'animaux, de végétaux, de micro-organismes ou autre matériel biologique contenant des unités de l'hérédité, notamment par l'application de la biotechnologie, ainsi que la valorisation de ces ressources génétiques, les applications et la commercialisation qui en découlent »*, et par utilisation de connaissances traditionnelles associées aux ressources génétiques *« leur étude et leur valorisation »*.

L'étude d'impact souligne que la composition génétique et biochimique des espèces est à la base de nombreuses innovations.

Elle rappelle que le secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (CDB) estime que les médicaments issus des ressources génétiques génèrent de 25 à 50 % des six cent quarante milliards de dollars du marché pharmaceutique mondial. Le chiffre d'affaires de l'industrie du médicament en France s'élève à cinquante deux milliards d'euros, deux autres secteurs sont particulièrement concernés, le secteur cosmétique (seize milliards d'euros) et l'industrie agroalimentaire (cent cinquante-neuf milliards d'euros).

L'étude d'impact avance un chiffre de quatre cent soixante-neuf mille emplois en France dans les secteurs concernés par l'utilisation des ressources tirées de la biodiversité, dont quatre-vingt-neuf mille pour le secteur de la recherche (biotechnologies, sciences physiques et naturelles...). Elle estime l'investissement en R&D de ces secteurs à 70,5 millions d'euros.

Ces chiffres sont des estimations globales, ils ont fait l'objet de débats avec les organisations de la société civile et sont contestés par certains acteurs qui les jugent peu étayés. En tout état de cause, ces résultats ne sont imputables que pour une petite partie au biomimétisme.

La note d'impact souligne que les mesures qui seront mises en œuvre permettront de sécuriser l'emploi existant, ainsi que de développer des filières locales d'approvisionnement et d'innovation dans les zones riches en biodiversité. Elle ne donne cependant pas d'estimation chiffrée de ces impacts sur l'activité et l'emploi.

La réflexion économique prospective et la mesure du biomimétisme au moyen d'indicateurs clefs se développent, hors de France

Certaines initiatives ont été prises pour démontrer l'intérêt et la viabilité sur le plan économique du biomimétisme, ou de concepts qui s'en rapprochent comme l'économie circulaire. Des travaux sont ainsi conduits aux États-Unis. Un avis du CESE de janvier 2014, déjà cité⁵³, indique par exemple que « *le dernier rapport de la fondation MacArthur estime que la mise en œuvre d'une économie circulaire permettrait de réaliser, pour le secteur des biens d'équipements, des gains de matière pouvant représenter de 340 à 380 milliards de dollar par an en Europe sans réglementation spécifique et jusqu'à 520 à 530 milliards de dollars par an dans un scénario avancé. Ceci confirme au niveau sectoriel l'intérêt économique de démarches engagées par de multiples entreprises qui ont fait évoluer leur système de production sur tout ou partie des éléments concourant à un principe d'économie circulaire, voire qui ont changé de modèle économique.* »

Plusieurs auditionnés, en particulier Tarik Chekchak, ont indiqué que le dépôt de brevets constituait un indice de la vitalité du biomimétisme. Leur nombre serait en effet en hausse.

Un rapport réalisé en 2010 par le *Fermanian Business and Economic Institute (FBEI)*, dépendant d'une université de Californie, évaluait le potentiel économique du biomimétisme aux États-Unis à trois cents milliards de dollars de PIB en 2025 et 1,6 million d'emplois. Ce rapport a été réactualisé⁵⁴, et donne cette fois pour 2030 des chiffres encore plus prometteurs : 425 milliards de dollars et 2,4 millions d'emplois. L'étude précise que ces montants résulteront soit du remplacement de technologies ou produits anciens par de nouveaux, soit de la mise sur le marché de biens et services entièrement nouveaux, ou bénéficiant d'améliorations. En 2030, toujours selon cet institut, 10 % des industries du textile, 12 % de celles des matières plastiques et 15 % de celles de la chimie auront des activités bio-inspirées. Ces chiffres sont obtenus à partir d'une analyse basée sur le nombre de brevets, de publications scientifiques et de produits en cours de développement ou mis sur le marché. En France, l'association chimie du végétal (ACDV), estime que l'objectif du Grenelle de l'environnement d'une chimie biosourcée atteignant 15 % en 2017 devrait être atteint et même dépassé pour certaines productions (20 % des polymères et de la chimie organique).

⁵³ Transitions vers une industrie économe en matières premières.

⁵⁴ *The Fermanian Business & Economic Institute ; Bioinspiration : an economic progress report ; Research and produced, Point Loma Nazarene University, november 2013.*

L'indice Da Vinci Index 2.0, mis au point par le FBI⁵⁵ en 2011 pour les seuls États-Unis, prend en compte quatre types de données : le nombre d'articles scientifiques publiés, le nombre de brevets, le nombre de bourses de recherche⁵⁶ et leur montant. Entre 2000 et 2014 l'indice a été multiplié par sept. La hausse de la courbe est ininterrompue depuis quatorze ans, elle est particulièrement forte depuis 2012. En 2014, le Da Vinci 2.0 a progressé de 7 % ; la hausse du nombre de brevets délivrés a été de 12 %.⁵⁷

Datant de 2014, le Da Vinci Global Index cherche à donner des indications de même nature, non seulement pour les États-Unis mais aussi pour le reste du continent américain, l'Asie, l'Europe et le Moyen Orient à partir des publications d'articles scientifiques et des dépôts de brevets. Sur la base d'un indice 100 en 2000, et après une hausse continue, celui mesuré pour 2013 est de 690, mais 2014 enregistre une baisse à 630. Le taux de croissance pour 2015 semble devoir effacer cette baisse.⁵⁸

Selon la même source, les publications relatives à la recherche bio-inspirée à travers le monde sont d'abord américaines (25 % des publications en 2012), puis chinoises (23 %), l'Allemagne et le Royaume-Uni étant derrière autour de 7 %. La France vient dans ce classement en cinquième position (5 %). La chimie et la science des matériaux sont les principaux domaines concernés.

Le biomimétisme confirme, au travers de ces analyses, son attractivité et le rôle qu'il est susceptible de jouer dans les années qui viennent en tant qu'outil de réflexion d'innovation durable. Les chiffres relatifs à l'impact potentiel du biomimétisme sur l'économie et l'emploi doivent être confirmés, notamment parce qu'ils résultent pour partie des résultats d'une enquête réalisée auprès d'un échantillon restreint de chefs d'entreprises concernés⁵⁹, ce qui limite la représentativité sinon la validité de l'indice.

Pour mémoire, on rappellera que si l'Agence européenne pour l'environnement ne mesure pas les brevets relevant du biomimétisme, elle estime que la moyenne des brevets déposés en Europe portant sur la biodiversité représente 9 % du total⁶⁰. En France, une recherche à partir de mots clefs sur le site de l'Agence nationale de la recherche (ANR) permet d'identifier les projets relatifs au biomimétisme.

Au total, il semble que peu d'indicateurs à ce jour prennent réellement en compte le biomimétisme en tant que tel. En France, les indicateurs existants ne mesurent l'activité que des seuls secteurs de l'économie verte : aucun outil ne permet ni d'évaluer ni d'anticiper les retombées économiques des nouvelles dynamiques insufflées par le biomimétisme.

...mais des précautions à prendre comme pour toute innovation

Toute innovation scientifique ou technique présente un certain nombre de risques. Les innovations issues de la démarche biomimétique n'échappent pas à ce constat. Il y a donc

⁵⁵ PLNU forward ; *The Da Vinci Index and biomimicry* ; Site internet de l'université.

⁵⁶ Attribuées par les *National institutes of health* et *National science foundation*

⁵⁷ La courbe retraçant cette évolution, protégée par un copyright, est consultable à l'adresse suivante : <http://www.pointloma.edu/experience/academics/centers-institutes/fermanian-business-economic-institute/forecasting-and-expert-commentary/da-vinci-index-b>

⁵⁸ Idem.

⁵⁹ Cf. étude du CGDD, octobre 2012.

⁶⁰ Voir l'étude d'impact du projet de loi, citée.

lieu de s'assurer qu'elles ne présentent de dangers ni pour l'homme, ni pour l'environnement, ni pour les biens.

Toute innovation, quels que soient ses domaines d'application, répond à une ou plusieurs fins. Le biomimétisme, tel que l'envisage Janine M. Benyus, doit devenir un outil écologiquement, économiquement et socialement durable. Les applications, notamment industrielles, qui en résultent, doivent respecter cette ambition.

Biomimétisme et enjeux de la prévention des risques

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) - « *maîtriser le risque pour un développement durable* » - a pour mission essentielle la prévention des risques associés aux activités économiques, que ces risques concernent les personnes, l'environnement ou les biens. Philippe Hubert, directeur des risques chroniques de l'INERIS, auditionné devant la section, a rappelé que le rôle de l'institut est d'accompagner l'innovation pour en maîtriser les risques. L'institut n'a pas vocation à innover, mais doit vérifier l'absence de dangerosité de telle ou telle innovation. La direction des risques chroniques de l'INERIS traite principalement des dangers provenant de la pollution causée par les substances chimiques et des moyens de la prévenir. Les phytotechnologies utilisées par la communauté d'agglomération de Creil pour effectuer de la phytodécontamination et de la phytostabilisation sur des terrains pollués par des métaux lourds rentrent, par exemple, dans ce cadre d'étude. L'intervention de l'INERIS a consisté notamment à examiner la manière dont il était possible de boucler le cycle de la décontamination en transformant en déchets les plantes et arbres utilisés pour la décontamination - c'est-à-dire en les brûlant - et par conséquent à examiner la dangerosité de la combustion et des cendres. L'INERIS s'est ainsi engagé dans une démarche de recherche qui est elle-même une démarche de biomimétisme.

L'INERIS imite ou reconstitue par ailleurs, afin de mieux comprendre les phénomènes de toxicologie et d'éco-toxicologie, des systèmes naturels.

Enfin l'institut évalue directement des innovations bio-inspirées ou biosourcées : insecticides utilisant des procédés de confusion sexuelle par diffusion de phéromones, reproduction par l'industrie chimique de molécules naturelles comme les pyrèthres, évaluation d'agroressources, etc.

L'auditionné a par ailleurs présenté les étapes de la démarche d'évaluation des risques. Il s'agit tout d'abord d'entrer dans une logique d'identification du cycle de vie complet du produit - sont concernés aussi bien le début du cycle que la phase d'utilisation ou que la transformation en déchet, le risque pouvant exister à chacune de ces trois étapes. Cet examen complet du cycle de vie se rapproche de la démarche mise en œuvre par l'économie circulaire.

Une autre phase importante du processus d'évaluation consiste à examiner les procédés de fabrication sous l'angle du risque, par exemple de relâchement dans l'air ou dans l'eau, ou dans l'environnement, d'explosion...

Le troisième point important est l'anticipation : les dangers potentiels doivent être examinés le plus en amont possible de la phase de développement du prototype.

Un autre point mérite par ailleurs attention, celui de l'utilisation des bactéries dans le secteur des biotechnologies.

Au total, il apparaît que les innovations associées au biomimétisme ne présentent pas de contraintes spécifiques quant à l'évaluation des risques, hormis, parfois, « *une certaine euphorie* ». L'enjeu consiste donc à appliquer la même démarche par étapes que dans tout autre domaine, comme elle devrait être mise en œuvre à chaque évaluation.

Biomimétisme et enjeux de la durabilité

Seront considérées ici comme innovations durables, dans le plein sens du mot, des innovations respectueuses de l'environnement mais également créatrices de richesses économiques et d'emploi. Elles demandent pour cadre une société soucieuse du développement et de l'épanouissement humains, mettant en œuvre ses engagements tant en interne qu'à l'international.

Durabilité environnementale

Dans son étude de 2012 sur l'apport du biomimétisme à l'économie verte le CGDD envisageait déjà la durabilité au regard de l'environnement comme un enjeu central.

Le terme « biomimicry » a été inventé avec l'ambition de fédérer toutes les démarches bio-inspirées afin qu'elles produisent des innovations durables. Or, à ce stade, les techniques et les procédés imités de la nature ne remplissent pas systématiquement cette condition.

En effet, il « *existe des applications biomimétiques ne présentant aucun avantage environnemental par rapport aux produits qu'elles remplacent, voire créant de nouvelles difficultés d'ordre technique ou éthique* », par exemple lorsque la consommation de ressources et de matières reste tout aussi élevée, ou dans certaines utilisations de la transgénèse.

D'autres applications biomimétiques qui présentent un avantage environnemental peuvent procéder d'un détournement d'une fonction du vivant et non de son imitation.

Enfin, si le biomimétisme peut permettre de déboucher sur des innovations de rupture, l'impact d'une même innovation peut se révéler favorable au regard de certains objectifs, et moins favorables, ou neutre par rapport aux technologies existantes, au regard d'autres objectifs, comme l'amélioration du cycle de vie : « *c'est le cas par exemple d'une peinture antifouling imitant la texture de la peau de requin : même si elle permet de réduire de façon optimale les frottements au niveau de la coque du bateau, et donc de réduire d'autant la consommation de carburant, sa production industrielle nécessite toujours de fortes conditions de température et de pression.* »

Force est de constater que par manque d'informations sur les produits procédés techniques, matières imitant ou reproduisant la nature, il est difficile de confirmer que toutes les innovations décrites ou se revendiquant comme du biomimétisme le sont véritablement, au sens de la durabilité environnementale. Le manque de données fiables est donc un obstacle au développement du biomimétisme, notamment parce qu'il existe peu d'analyses du cycle de vie de ces produits.

Une démarche qui ambitionne d'aider la société à avancer sur la voie de la transition énergétique et écologique se doit bien évidemment d'être aussi vertueuse qu'il est possible de l'être, compte tenu de nos connaissances et des techniques actuelles, sur le plan environnemental.

Le PNUE, synthétisant pour les décideurs son texte sur l'économie verte de 2011, évoqué plus haut, fait sienne cette exigence en ces termes : *« celle-ci ne sera possible que si les piliers environnementaux et sociaux du développement durable sont traités sur un pied d'égalité avec le pilier économique, c'est-à-dire si les moteurs souvent invisibles du développement durable, des forêts à l'eau douce, bénéficient d'un poids égal ou supérieur dans le développement et la planification économique ».*

Durabilité économique et sociale

Par ailleurs, une innovation ne peut présenter un caractère réellement durable que si elle se situe dans une démarche globale intégrant, outre les aspects environnementaux, la dimension économique et la préoccupation sociale. Le PNUE rappelle que l'économie verte, telle qu'il la conçoit et telle qu'il souhaite la voir se développer, *« se caractérise par un faible taux d'émission de carbone, l'utilisation rationnelle des ressources et l'inclusion sociale. Dans ce type d'économie, la croissance des revenus et de l'emploi doit provenir d'investissements publics et privés qui réduisent les émissions de carbone et la pollution, renforcent l'utilisation rationnelle des ressources et l'efficacité énergétique et empêchent la perte de biodiversité et de services environnementaux. »*

L'avis, déjà cité, sur les emplois de la transition écologique, souligne que l'innovation, *« le progrès technique et sa diffusion peuvent eux-mêmes être source de déstabilisation des stratégies établies et des marchés associés à la transition écologique ».* Ils n'est pas exclu qu'ils soient dans un futur plus ou moins proche à l'origine de ruptures technologiques, économiques et sociales qui remettront en cause certaines activités de la transition tout en ouvrant de nouvelles perspectives de développement dans l'industrie et les services.

Le biomimétisme comme plus globalement les innovations liées au développement durable *« constituent des opportunités de montée en gamme des produits et services des entreprises, d'acquisition de compétences, d'exportations et donc d'emplois. »* La mise en place de « boucles courtes » par les entreprises, optimisant la consommation de matières, valorisant les déchets pour les transformer en sous-produits et en produits dérivés, est ainsi créatrice d'emplois.

Les enjeux de la transition sont à cet égard à la fois qualitatifs et quantitatifs : *« pour favoriser les créations d'emplois, il faut faire en sorte que l'appareil de formation initiale et continue accompagne la transformation des activités ».*

La SNTEDD, qui affiche un objectif de création de cent mille exemples d'ici la fin de 2016, met en avant quatre exigences pour la transition :

- anticiper les mutations économiques et leurs effets sociaux, c'est-à-dire se mettre en position d'identifier les besoins (en emplois, en compétences) des salariés et des entreprises ;
- accompagner les transitions professionnelles liées à la transition écologique par une politique de formation initiale et continue permettant de sécuriser les parcours professionnels, cet « outil » étant à considérer comme un investissement et non comme un coût ;
- informer, inciter et conseiller tous les acteurs économiques afin de faire comprendre et partager les enjeux en terme de mutations sociales et professionnelles, l'enjeu premier étant la mobilisation des acteurs publics et privés ;

- faire de la responsabilité sociale/sociétale des entreprises et des organisations un levier pour accompagner les mutations sociales et professionnelles.

Ces exigences applicables à la « la transition écologique vers un développement durable » sont bien évidemment valables pour les outils de sa mise en œuvre, et en particulier pour le biomimétisme.

Durabilité sociétale

Il faut enfin rappeler que le biomimétisme trouve aussi une source d'inspiration dans l'observation des schémas d'organisation du vivant, pour tenter d'en appliquer le modèle aux activités humaines. Il s'agit d'une forme d'innovation.

Comme cela a été rappelé plus haut, des démarches prometteuses, comme l'économie circulaire ou encore l'écologie industrielle, prennent pour partie leur source dans l'observation des schémas d'organisation du vivant. Elles tendent à appliquer ces modèles aux activités humaines pour résoudre des problèmes qui sont à la fois économiques et environnementaux. Le développement de l'économie circulaire, par exemple, est soutenu par l'Union européenne (UE), et bénéficie en France de programmes de l'ADEME.

Si la bio-inspiration nous offre donc des pistes de réflexion précieuses quant à l'amélioration de nos organisations, son impact sur nos sociétés humaines ne doit pas pour autant être systématiquement pensé comme durable et nécessairement positif.

Il est commun de désigner l'organisation « sociale » d'une ruche et des abeilles qui la peuplent comme un modèle pertinent d'efficacité - voire même d'ordre - qu'il serait bon d'imiter, alors même qu'il s'apparenterait à une société de type totalitariste s'il était exactement calqué à notre monde. Certaines « utopies » ont d'ailleurs tenté, d'autres pourraient l'être encore, de transposer aux sociétés humaines les hiérarchies et la division du travail propres aux insectes que l'entomologie qualifie de sociaux.

Sous cet angle « sociétal », la démarche biomimétique n'est pas intrinsèquement durable. Une forme de veille ou de vigilance s'impose, ce qui n'exclut pas l'imitation de ce que ces organisations complexes ont de meilleur, comme leur capacité à optimiser les échanges d'informations.

Les leviers du développement du biomimétisme, en Europe et en France

Les leviers du développement du biomimétisme préexistent et sont déjà mobilisables pour la plupart, en Europe comme en France. En effet le biomimétisme peut, ou devrait, bénéficier d'instruments d'innovation déjà mis en place dans le cadre de politiques plus globales. Il a également, dans certains domaines, fait l'objet d'actions, ou de démarches, qui lui sont spécifiquement dédiées.

Un cadre européen a priori favorable au biomimétisme

La recherche d'une croissance durable conduit l'UE à se doter de stratégies d'innovation dans lesquelles la dimension environnementale prend une place de plus en plus importante.

L'importance accordée par l'UE à l'effort d'innovation peut favoriser le biomimétisme

La stratégie « *Innovation au service d'une croissance durable : une bioéconomie pour l'Europe* »⁶¹ concerne essentiellement :

- La gestion, au sens large, des ressources biologiques de l'UE ;
- En vue de leur transformation en produits à valeur ajoutée (denrées alimentaires, bioproduits, bio énergie...) ;
- Tout en assurant une utilisation durable des ressources et en allégeant la pression sur l'environnement (réduction de la dépendance à l'égard des ressources non renouvelables, lutte contre le changement climatique et adaptation).

Cette stratégie pourrait, parmi les outils à sa disposition, faire figurer le biomimétisme. Force est de constater que ce n'est pas le cas. On signalera cependant que la Commission européenne a organisé un groupe de travail en vue de définir un agenda 2020 de R&D ayant pour objet les solutions inspirées de la nature et la renaturation des villes. Le rapport de ces experts⁶², édité au début de l'année 2015, met en avant le biomimétisme comme l'une des solutions disponibles.

La situation est un peu différente concernant « *Le plan d'action en faveur de l'éco-innovation (PAEI)* »⁶³, qui complète plusieurs initiatives phares d'Europe 2020 (Politique industrielle, Europe efficace dans l'utilisation des ressources, stratégie pour des compétences

61 COM (2012) 60 final, 13 février 2012, communication de la Commission.

62 « *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions and re-naturing cities, Final report of the horizon 2020 expert group* ».

63 COM (2011) 899 final, 15 décembre 2011, communication de la Commission.

nouvelles et des emplois...). L'UE a adopté ce plan en décembre 2011, quelques mois seulement avant sa stratégie bioéconomique. Les dernières actualités du plan concernent la refonte de la stratégie européenne d'économie circulaire, en 2015, qui comprendra notamment un chapitre sur la labellisation.

Afin de faciliter les évolutions, un Observatoire de l'Eco-Innovation (EIO) a été créé sous l'égide de la Commission. L'essentiel de sa production (rapports et données, tableaux de bord par pays...) concerne les années 2010 à 2014. Il vise à fournir une source d'information intégrée sur l'éco-innovation pour les entreprises et prestataires de services d'innovation.

Selon l'Observatoire, l'éco-innovation est l'introduction de tout produit nouveau ou sensiblement amélioré (bien ou service), procédé, changement au sein de l'organisation ou solution de marketing qui réduit l'utilisation des ressources naturelles (y compris les matériaux, l'énergie, l'eau et le sol) et diminue l'empreinte écologique sur l'ensemble du cycle de vie. Le plan d'action précise que sont visées les innovations « *contribuant ou visant à réaliser des progrès importants et démontrables vers la réalisation de l'objectif d'un développement durable respectueux de l'environnement* ».

Le biomimétisme, l'économie circulaire et l'analyse du cycle de vie font partie du glossaire d'innovations de l'Observatoire.

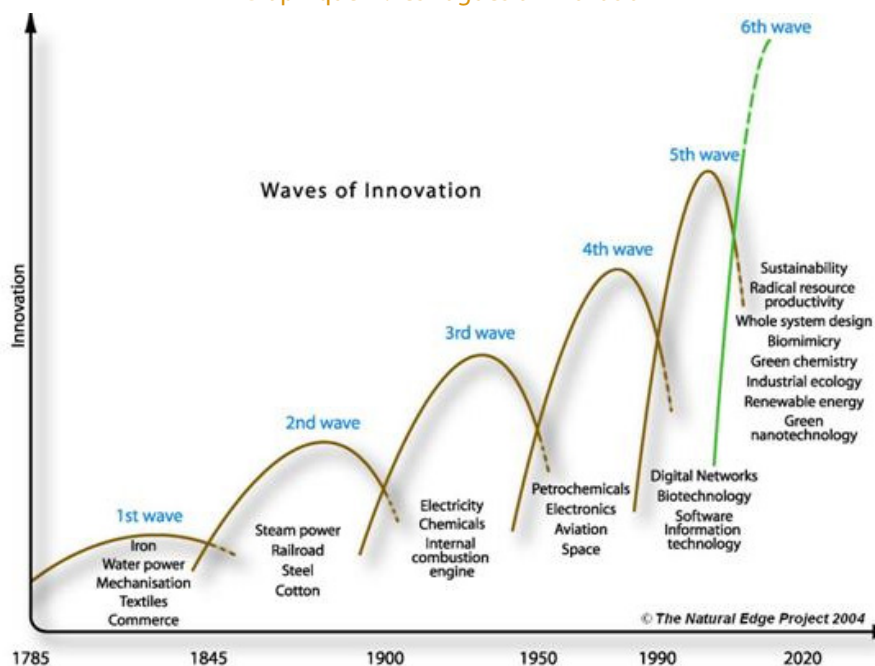
Ce dernier établit depuis quatre ans un tableau de bord européen de l'éco-innovation et des indicateurs par pays. Le dernier tableau de bord, publié en mai 2014, place la France en huitième position dans ce domaine.

Cette évaluation européenne est réalisée à partir de données collectées aux niveaux nationaux, sectoriels et thématiques. Certaines sont relatives à l'économie circulaire mais aucune, semble-t-il, au biomimétisme, ce qui paraît regrettable.

Plusieurs rapports de l'EIO⁶⁴ consacrent cependant des développements au biomimétisme. Le rapport annuel 2013 contient le graphique suivant, qui situe le biomimétisme parmi les outils de la « sixième vague d'innovation » survenue depuis 1785.

⁶⁴ Par exemple, EIO Horizon scanning report, décembre 2010 et décembre 2011.

Graphique 2 : les vagues d'innovation



Source : The natural edge project (<http://www.naturaledgeproject.net/keynote.aspx> AS of Oct 26, 2012).

Mais de nombreux facteurs, selon les acteurs économiques, freinent encore la diffusion de l'éco-innovation et du biomimétisme

Une enquête Eurobaromètre réalisée en 2011⁶⁵ sur les attitudes des Petites et moyennes entreprises (PME) européennes à l'égard de l'éco-innovation propose un certain nombre d'enseignements sur les obstacles à surmonter et sur les facteurs susceptibles d'être favorisants, tels que perçus par les PME.

Le plan d'action européen en faveur de l'éco-innovation en tire des enseignements et la commente en ces termes : elle « *démontre que l'incertitude à l'égard de la demande du marché et le retour sur investissement sont les deux principaux obstacles tandis que les prix élevés de l'énergie et des matières, les nouvelles réglementations et normes et l'accès aux connaissances, constituent les principaux facteurs favorisants* ».

Le plan d'action en tire les conclusions suivantes : « *l'Union peut stimuler davantage l'éco-innovation à l'aide de politiques et d'actions bien ciblées. En particulier, des mesures sous forme d'incitations réglementaires, de marchés publics et privés et de normes et des objectifs de performance peuvent contribuer à renforcer et stabiliser la demande du marché en faveur de l'éco-innovation. Des ressources*

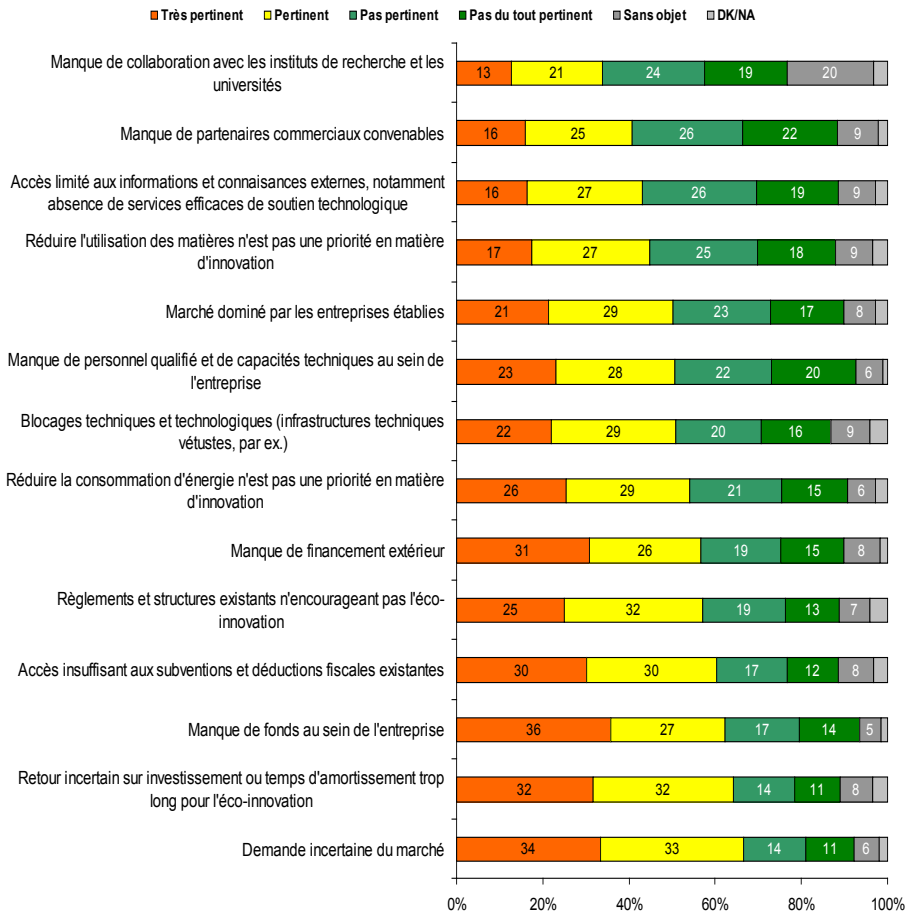
⁶⁵ Eurobaromètre flash n° 315, attitudes des entrepreneurs européens à l'égard de l'éco-innovation, mars 2011.

financières supplémentaires doivent également être mobilisées pour encourager les investissements dans l'éco-innovation, et des mesures sont nécessaires pour diminuer et gérer les risques encourus par les entrepreneurs et les investisseurs.

Une stratégie à long terme pour l'éco-innovation, basée sur le partenariat, consolidera l'éco-innovation en augmentant la masse critique nécessaire, en permettant l'échange d'idées et de bonnes pratiques et en créant des réseaux et des relations commerciales. »

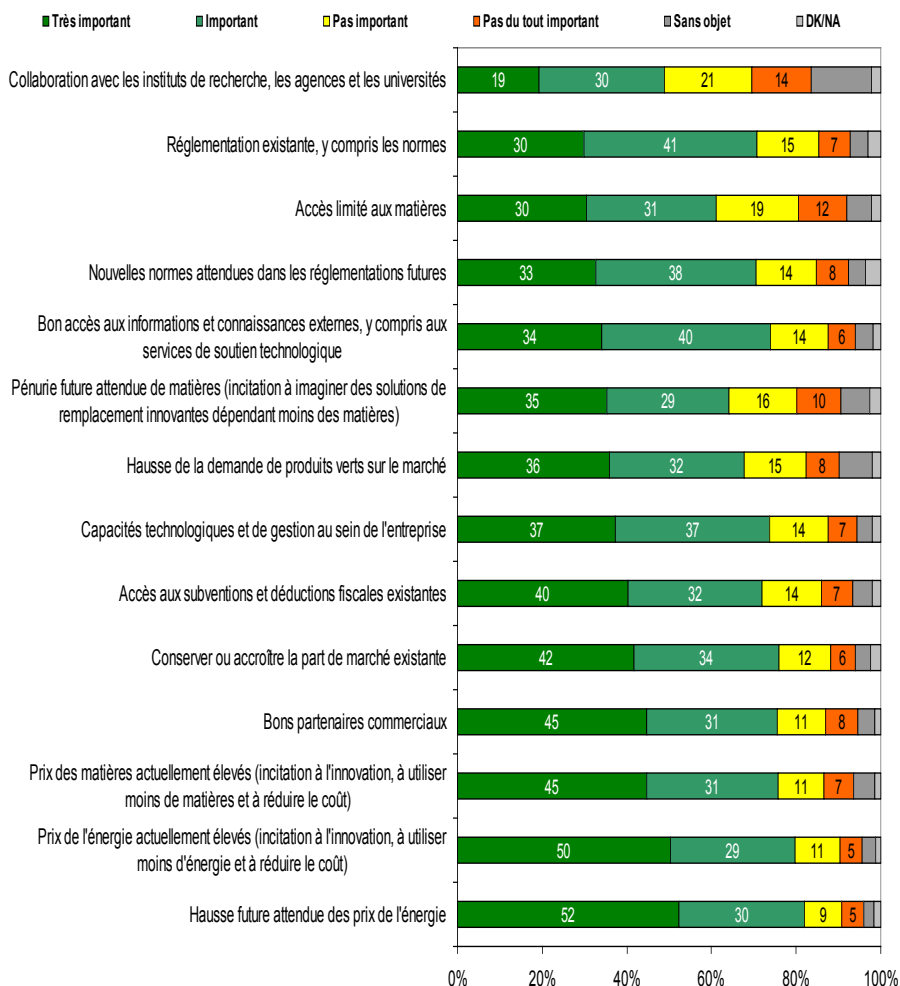
Ces obstacles doivent être mis en regard des réponses aux autres questions posées dans la cadre du baromètre et notamment celles sur les parts respectives d'investissement total dans l'innovation et dans l'éco-innovation réalisées par les entreprises. Si 82 % d'entre elles ont investi dans des innovations dans les cinq dernières années précédant le baromètre, 6 % seulement ont consacré plus de 50 % de leur investissement à de l'éco-innovation et 35 % y ont consacré moins de 10 %. Pour 29 % des entreprises qui ont éco-innové dans les deux années précédant le baromètre, ces éco-innovations ont concerné les process et méthodes de production, pour 25 % la mise sur le marché d'un produit ou service et pour 24 % les modes d'organisation. Afin de réduire leurs coûts, respectivement 56 %, 53 % et 52 % des entreprises interrogées ont investi dans des technologies plus efficaces, en ont développé, ou modifié leurs pratiques de recyclage. Le biomimétisme, en tant qu'il s'inspire de l'efficacité et de l'économie de matières rencontrées dans la nature, propose aux entreprises une méthode d'innovation facilitant l'atteinte de leurs objectifs, mais soumise aux mêmes obstacles et contraintes que toute éco-innovation.

Graphique 3 : Obstacles à l'intégration et au développement rapides de l'éco innovation pour les entreprises



Source : Eurobaromètre 315, Plan d'action en faveur de l'éco-innovation.

Graphique 4 : Facteurs susceptibles d'accélérer l'intégration et le développement de l'éco-innovation



Source : Eurobaromètre 315, Plan d'action en faveur de l'éco-innovation.

Un effort de structuration de la démarche qui commence à se concrétiser sur le continent européen

En quelques années, le biomimétisme a acquis une visibilité et une notoriété qui traduisent l'intérêt porté à la démarche au sein de cercles très divers qui vont du secteur de la recherche au monde de l'entreprise en passant par les médias. La France participe activement à ce mouvement.

Un travail récent de normalisation soutenu en France par AFNOR

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a initié ses travaux sur le biomimétisme en 2011⁶⁶, en constituant un comité technique suite à une proposition allemande. L'Allemagne disposait en effet déjà de normes nationales relatives au biomimétisme, notamment pour les matériaux. La France s'est montrée favorable à cette proposition comme un certain nombre de pays d'Europe mais aussi l'Argentine, la Chine, le Japon, la Malaisie ou la Thaïlande... L'Association française de normalisation (AFNOR) représentant de la France à l'ISO a constitué en 2012 sa propre commission de normalisation.

Dans ce domaine très transverse par nature, l'ISO s'est donné comme objectifs de préciser la terminologie et les définitions, parfois sources de confusion, et de travailler sur la méthodologie applicable, de la conception à la réalisation. La normalisation concerne les méthodes, les matériaux, logiciels, processus et produits pendant toute la durée de vie.

Le chef de projet pour l'AFNOR précisait en 2013 que les travaux avaient fait apparaître le besoin de bien séparer le champ de la terminologie de celui de la méthode, cette dernière devant aborder « *les différences entre les méthodes biomimétiques et conventionnelles, aborder les limites de la méthode sous l'angle environnemental* », car « *biomimétique n'est pas synonyme de durable* ». Ce point est déterminant puisque l'objet de ce rapport est précisément de consolider le lien entre biomimétisme et durabilité, dans la perspective de la transition écologique.

Deux nouvelles normes internationales ont donc été élaborées selon ces deux axes. Elles ont été publiées en mai 2015. La première, la norme ISO 18 458 « *Biomimétique - terminologie, concepts et terminologies* », fournit un cadre pour la terminologie relative à la biomimétique dans la science, l'industrie et l'enseignement.

La seconde, la norme ISO 18 459, « *Biomimétisme - optimisation biomimétique* » spécifie les fonctions et les domaines d'application des méthodes d'optimisation de la biomimétique, qui traitent de la conception idéale pour allonger la durée de vie et réduire le poids des composants. Deux autres normes AFNOR sont actuellement à l'étude.

Il peut être utile de rappeler ici que les normes ISO, contrairement à la réglementation (qu'elles peuvent cependant soutenir) émanant des autorités publiques nationales ou européennes, sont volontaires et non obligatoires. Selon la définition de l'ISO, une norme est un « *document, établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu, qui fournit pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leur résultat, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné* ». Elles traduisent l'engagement des entreprises qui y souscrivent à satisfaire un niveau de qualité et de sécurité reconnu et approuvé.

Il est évidemment encore trop tôt pour juger de l'impact de ces nouvelles normes. D'un côté, elles sont importantes pour les entreprises qui sont désireuses d'investir dans ce secteur très prometteur, elles jouent un rôle dans la structuration du marché. De l'autre, elles peuvent représenter un frein aux innovations de rupture des PME et start-up les plus innovantes.

⁶⁶ Voir la revue de l'AFNOR, Enjeux, janvier 2013, n° 330.

Le reproche est souvent adressé aux normes de pénaliser certaines activités ou entreprises, d'en favoriser d'autres, ou de se révéler inadaptées. Au total, l'effet des normes sur l'innovation est ambivalent, il est jugé positivement par certains entrepreneurs, alors que d'autres expriment un point de vue plus critique.

Ce regard critique porte au-delà des normes au sens de celles qui viennent d'être adoptées pour le biomimétisme, il confond souvent « les normes » au sens courant du terme avec la réglementation publique, qu'elle soit européenne ou nationale. Il n'entre pas dans l'objet du présent rapport d'en traiter, même si de telles critiques ont été formulées devant la section par des acteurs du biomimétisme rencontrés au CEEBIOS.

C'est l'usage qui permettra de vérifier que le compromis établi sur les deux normes « biomimétisme » garantit un niveau d'efficacité optimale.

Une prise en compte inégale de la démarche par le secteur de la recherche et de l'enseignement supérieur

La comparaison ci-dessous se limitera aux cas de l'Allemagne et de la France, pays qui présentent de notables différences dans la mise en œuvre de la démarche biomimétique, mais où elle est désormais reconnue.

La prédominance allemande, conséquence d'un investissement historique en bionique

En Allemagne, la bionique - inventée, comme cela a été rappelé plus haut, dès la fin des années 1950 - est enseignée depuis longtemps comme une discipline technique scientifique. Le biomimétisme en tant que tel l'est nécessairement depuis moins longtemps. Dix-huit établissements d'enseignement supérieur allemands proposent des formations en biomimétisme/bionique à leurs étudiants, selon le réseau national Biokon.

Ce réseau national, l'association Biokon, sur laquelle on reviendra un peu plus loin, regroupe les professionnels de la bionique. La discipline est enseignée de façon spécifique dans plusieurs établissements techniques du supérieur, comme l'université appliquée de Brème ou celle de Rhein-Waal près d'Aix-la-Chapelle. D'autres étudiants font leur thèse sur les aspects relevant de la biologie ou sur ceux relevant de l'ingénierie dans les centres de recherche comme l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT).

Les techniques de biomimétisme, si l'on retient la définition allemande qui l'identifie à la bionique⁶⁷, représentent donc avant tout une pratique au service de l'optimisation des matériaux, des structures ou des surfaces. Elles sont mises au service de l'efficacité énergétique, de l'aérodynamique ou des transferts thermiques, ou encore inspirent les créateurs des logiciels et des systèmes d'automatismes. Les griffes d'insectes, la narine du faucon ou les nervures d'une feuille d'arbre inspirent les ingénieurs.

Ainsi, la société Festo (2,5 milliards d'euros de CA, 17 000 employés) a mis en place un laboratoire de création de prototypes robotisés s'inspirant de la nature. Lors de la Foire industrielle de Hanovre (HMI) de 2015 la société présentait des fourmis-robots qui

⁶⁷ Cf. annexe n° 1.

agissent de concert et de façon autonome pour soulever une charge à plusieurs. Selon les responsables de ce laboratoire, l'équipe comprend informaticiens, spécialistes des matériaux et de la robotique, et seulement un seul biologiste. À noter que l'automaticien revendique son caractère civil sans usage militaire, alors qu'aux États-Unis, le financement militaire (le « DARPA⁶⁸ ») est le moteur essentiel de la robotique des universités et des centres de recherche.

Pour toutes ces technologies, la synergie est très importante entre le développement de l'impression 3D et le biomimétisme. C'est en particulier le cas pour les optimisations structurelles de pièces mécaniques, que l'on peut désormais former de façon beaucoup plus libre.

En matière de recherche, l'Allemagne accomplit un effort soutenu, ce qui semble cohérent avec son classement dans les indicateurs mentionnés plus haut et le rôle qu'elle a joué dans l'élaboration des normes ISO. Selon le CEEBIOS, en quinze ans, le biomimétisme allemand a reçu plus de soixante-quinze millions d'euros de financements publics, bénéficiant du soutien conjugué de trois ministères, ceux de l'industrie, de la recherche et de l'écologie. Plus d'une centaine de structures de recherches sont impliquées dans des activités en relation avec le biomimétisme.

Par exemple, plusieurs universités, universités techniques ou instituts allemands - huit en 2012, neuf en 2015 - disposent de laboratoires ou de réseaux de laboratoires centrés sur le biomimétisme, la bionique ou les biomatériaux. On en dénombrait en 2012, selon un décompte non exhaustif du CGDD cinq au Royaume-Uni.

Un développement rapide du biomimétisme en France, mais difficile à quantifier

□ La recherche

En 2012, la recherche liée au biomimétisme mobilisait en France près de quarante-cinq équipes. En 2015, le CEEBIOS en identifie quatre-vingt-dix qui travaillent sur des thématiques liées au biomimétisme (cf. tableau ci-après), ce qui semble refléter le dynamisme de la démarche.

Kalina Raskin, confirmant lors de son audition la vitalité de la recherche française sur le sujet, a cependant souligné son insuffisante interdisciplinarité. En Allemagne au contraire, des groupes de travail thématiques, réunissant des experts de plusieurs disciplines, sont mis en place sur de grands enjeux de recherche comme l'énergie pour aborder les sujets sous l'angle du biomimétisme. Elle a indiqué que plusieurs tentatives avaient été conduites en France, sans succès, par plusieurs acteurs du biomimétisme et de la recherche, pour conduire des travaux sur la sociologie de l'innovation. De tels travaux, dont il aurait pu être tiré bénéfice pour faciliter le passage à la R&D, ont été jugés trop complexes.

68 *Defense Advanced Research Programs Administration (DARPA).*

**Tableau 1 : Laboratoires de recherche travaillant
sur des thématiques liées au biomimétisme**

Biochimie, biologie cellulaire, physiologie	
Total laboratoires impliqués : 5	Mieux comprendre le mouvement cellulaire dans les métastases ; Nano-systèmes pour des applications biomédicales ; Aspect moléculaires du vivant ; Génie en enzymatique et membranes biomimétiques etc.
Biocatalyse, biomimétisme en chimie	
Total laboratoires impliqués : 20	Biocatalyse ; Biopiles ; Catalyse bio-inspirée pour l'énergie ; Bio-inspiration pour la synthèse organique ; Catalyseurs facilement recyclables ; Conception, synthèse de systèmes chimiques bio-inspirés ; Auto-organisation programmée ; Maîtriser la synthèse de polymères/stockage de l'information ; Chimie inorganique bio-inspirée : chimie supramoléculaire et auto-assemblage ; Moteurs moléculaires ; Produire de nouveaux médicaments ou de nouveaux échafaudages biomimétiques pour délivrer des molécules, etc.
Énergies, Photocatalyse et photosynthèse artificielle	
Total laboratoires impliqués : 8	Photoproduction d'hydrogène par voie biologique ou biomimétique ; Bioénergétique moléculaire et photosynthèse ; Photo-catalyse ; Photosynthèse Artificielle ; Matériaux hybrides et nanomatériaux ; Systèmes énergétiques du vivant ; Biocatalyse - l'étude de la structure, de l'activité et de la régulation des systèmes biologiques complexes transportant et utilisant des ions métalliques etc.

Physique, biophysique et science de matériaux	
Total laboratoires impliqués : 28	Matériaux et biologie - Imitation physico-chimique de la synthèse de fibres de verre par différents organismes vivants ; Imitation de la structure de la coquille de l'ormeau ; Matériaux naturels et biomimétiques ; Chimie biomimétique des matériaux de transition ; Interface matériaux-matières biologiques ; Phosphates de calcium biomimétiques ; Préparation de nanoparticules inorganiques par voie de solution ; Élaboration de catalyseurs hétérogènes inspirés de la structure et de la réactivité des métalloprotéines ; Apatites biomimétiques : élaboration, fonctionnalisation, mise en forme et applications biomédicales ; Application biomédicales (telles que les biomatériaux et bio-nanomatériaux, les agents thérapeutiques, les biocapteurs, les outils spectroscopiques) ; Coloration structurale, Iridescence, papillon morpho ; Surfaces super-hydrophobes - Surfaces inspirées du lotus ; Biomimétisme et mouvement rapide des végétaux ; Détecteur d'explosif inspiré du bombyx du mûrier ; Élaboration de surfaces antimicrobiennes pour lutter contre la formation de biofilms etc.
Physiologie et écophysiologie	
Total laboratoires impliqués : 2	Écophysiologie fonctionnelle - Découverte d'un peptide permettant de conserver les aliments à 37°C dans l'estomac des manchots, i.e. en milieu salin, pendant plusieurs semaines ; Collaboration avec Renault - motorisation hybride bio-inspirée.
Biomécanique	
Total laboratoires impliqués : 6	Biomécanique & biomimétique végétale ; Fibres et interfaces (en particulier mise au point de valves cardiaques artificielles) ; Physique de la locomotion bio-inspirée ; Micro-rhéologie dans la sécrétion d'insectes ; Diversité fonctionnelle des plantes de la forêt tropicale humide comme source d'innovations biomimétiques etc.
Robotique, systèmes complexes, traitement de l'information	
Total laboratoires impliqués : 11	Drones à ailes battantes ; Robots autonomes ; Algorithmes biomimétiques ; Robot nageur inspiré de l'anguille ; Pilotage automatique inspiré de la mouche et œil composé artificiel ; Algorithmes bio-inspirés ; Microcapteurs et microsystèmes biomédicaux ; Senseurs micro-mécaniques etc.
Santé et médecine	
Total laboratoires impliqués : 6	Ligands biomimétiques pour la perturbation cérébrale ; Nanosystèmes bio-inspirés et diagnostic ; Biocapteurs bio-inspirés ; Pancréas artificiel et bio-artificiel ; Modélisation et ingénierie des systèmes complexes biologiques pour le diagnostic ; Stratégie intelligentes de vectorisation dans le traitement du cancer
Agro-écologie	
Total laboratoires impliqués : 4	Interactions biotiques au sein des agrosystèmes afin de concevoir des systèmes de culture innovants et respectueux de l'environnement ; Dynamique de l'écologie des peuplements (végétaux) en milieux forestiers ou ouverts et anthropisés (GEP), l'écophysiologie des plantes soumises à différents intrants et l'écophysiologie et la dynamique des populations d'insectes phytophages et stratégie de contrôle des ravageurs (BIPE) ; Agricultures urbaines ; Conséquences de la mobilisation de la biodiversité dans les systèmes cultivés sur la dynamique de la biodiversité des espaces non cultivés etc.

Source : CEEBIOS et CGDD.

Les laboratoires recensés dans ce tableau dédié à la recherche publique sont nombreux à être rattachés à des universités, de grandes écoles, de grands établissements publics se consacrant ou non à la recherche. Leur liste n'est pas exhaustive car, comme l'a souligné Kalina Raskin, de nombreux mots-clefs renvoient au biomimétisme. De plus ces mots-clefs ne sont pas eux-mêmes toujours utilisés dans les intitulés de recherches ou d'études.

Si de tels inventaires permettent de dégager une tendance générale favorable, ils n'ont donc qu'une valeur indicative. La recherche française est dynamique, mais elle semble en ce domaine encore insuffisamment organisée et structurée. Les collaborations entre laboratoires sont encore trop peu nombreuses, et le besoin de transdisciplinarité doit être une fois de plus souligné.

De nombreux projets sont également identifiables à partir de mots-clefs comme biomimétisme et biomimétique sur le site de l'Agence nationale pour la recherche. Le tableau ci-après, lui aussi probablement incomplet, montre cependant que le biomimétisme bénéficie depuis plusieurs années déjà de marques d'intérêt de l'ANR.

Tableau 2 : Projets financés par l'ANR dont le sujet concerne en partie le biomimétisme

Année	Nombre total de projets financés par l'ANR	Nombre de projets de 42 mois ou plus	Nombre de projets de 36 mois ou moins	Financement moyen pour un projet de 42 mois ou plus	Financement moyen pour un projet de 38 mois ou moins
2006	10	2	8	500 000 €	312 541 €
2007	11	3	8	664 819 €	329 487 €
2008	3	1	2	1 124 447 €	428 486 €
2009	9	1	8	200 000 €	408 599 €
2010	3	1	2	599 991 €	487 500 €
2011	6	-	6	-	242 671 €
2012	12	6	6	902 522 €	451 290 €
2013	4	2	2	521 034 €	271 166 €
2014	11	10	1	428 670 €	148 044 €
Janvier – juin 2015	1	-	1	-	204 880 €

Source : ANR.

L'enseignement supérieur

En 2012, le CGDD indiquait qu'il n'existait officiellement en France qu'une seule formation universitaire en biomimétisme, dispensée à l'université de Cergy-Pontoise.

Cette situation semble devoir évoluer dans le cadre de la mise en œuvre des investissements d'avenir. L'ANR a en effet été chargée de l'appel à projets Initiatives d'excellence en formations innovantes (IDEFI). Doté de 150 millions d'euros, l'appel à projets IDEFI permettra un soutien pluriannuel de ses lauréats. Il s'adresse à l'ensemble des établissements d'enseignement supérieur, universités et écoles, et vise à soutenir des projets emblématiques et innovants en matière d'enseignement supérieur. Il s'agit de valoriser l'innovation en matière de formation par le soutien d'un nombre limité d'initiatives ambitieuses, à la hauteur des standards internationaux. Les projets doivent préfigurer les formations universitaires du futur et promouvoir de nouvelles démarches de formation, de nouveaux contenus. Les innovations attendues se situent sur le plan de l'attractivité,

de la pluridisciplinarité, de l'employabilité des étudiants, du lien avec la recherche, et de l'ingénierie de formation.

Dans ce cadre, le projet uTOP, pour université de technologie ouverte pluri-partenaires, a été retenu en 2012. Il a pour objet de développer des formations à distance, qualifiantes ou non, orientées vers les métiers technologiques, et est porté par l'université de Lorraine.

Cette initiative s'inscrit dans le prolongement des campus numériques et des universités numériques thématiques. Elle vise à construire une offre globale tout au long de la vie, sur un modèle, adapté au contexte français, d'université ouverte (*open university*). Ce démonstrateur vise le développement et la création de formations innovantes, à distance et avec différents partenaires : universités, écoles, entreprises... D'une durée de quatre années et doté d'un budget de cinq millions d'euros, uTOP est composé de vingt-cinq partenaires et soixante membres du réseau Université numérique ingénierie et technologie (UNIT). La fondation UNIT agit en qualité de coordinateur du projet IDEFI uTOP et est l'interface entre l'ANR et les partenaires. Le biomimétisme est présent dans les modules proposés par UNIT (à titre d'exemple, les textiles biomimétiques dans le cadre d'un module sur les matériaux textiles fonctionnels intelligents), il l'est également au sein d'uTOP, dans le parcours de formation en agro-écologie, et surtout dans l'action d'expérimentation de dispositifs de formation comme celle au biomimétisme en collaboration avec le CEEBIOS. Cette formation est dite d'apprentissage mixte (*blended learning*) combinant formation en ligne et hors-ligne.

Cette place accordée au biomimétisme au sein des formations innovantes identifiées par le programme des investissements d'avenir constitue une forme de reconnaissance encourageante. Il faut espérer que la démarche sera validée au terme de l'expérimentation et surtout qu'elle essaimera dans d'autres établissements d'enseignement supérieur.

En matière de recherche comme d'enseignement supérieur, aucune cartographie complète des laboratoires, des structures universitaires ou des formations impliquées dans le biomimétisme n'a été établie à ce jour. Ce travail d'identification est rendu complexe par le fait que le biomimétisme n'apparaît pas toujours comme un objectif d'enseignement ou comme une méthode de recherche. L'inventaire de l'existant et des besoins en formation, en particulier de ceux des entreprises dans l'enseignement scientifique et technologique, reste à réaliser.

L'émergence de stratégies par la constitution de réseaux d'acteurs européens et nationaux

Janine Benyus a fondé son propre réseau aux États-Unis en 2006, le *Biomimicry institute*, qui est à l'origine d'un réseau d'éducation, le *Biomimicry Education Network*, et d'un site de recherches *AskNature* qui se présente comme un catalogue des solutions que propose la nature.

Un réseau européen s'est constitué en s'inspirant de ce modèle, l'Alliance européenne du biomimétisme (*European Biomimicry Alliance*), en cours de développement. Ce réseau européen est implanté dans neuf pays de l'UE, il réunit autour du choix de la durabilité les réseaux de *biomimicry* nationaux, au nombre de cinq (Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Italie, Suisse, recensés sur le site du *Biomimicry Institute*) et six autres réseaux dont les actions sont parfois plus ciblées (santé, éducation, stratégies...). Deux sont situés en Allemagne, un en Belgique, deux en France (*Biomimicry Europa* et le *CEEBIOS*), un au Royaume-Uni. À ce jour, Biokon n'en fait pas partie.

Des initiatives ont par ailleurs été prises dans un certain nombre de pays, parfois antérieures à la constitution de cette alliance.

L'Allemagne a été aussi pionnière en matière de réseaux. Elle l'est en raison de son investissement ancien en matière de recherche bionique. Depuis 2001 elle dispose d'ailleurs d'un réseau, appelé Biokon, associant scientifiques et organismes œuvrant au développement du biomimétisme et de la bionique. Ce réseau est devenu international en 2009 sous le nom de Biokon international - l'association biomimétique. La foire de Hanovre, à laquelle participe Biokon, est chaque année l'occasion de présenter les plus récents développements en matière de biomimétisme. Biokon attribue un prix annuel à des chercheurs.

Si bionique et biomimétisme sont étroitement associés en Allemagne⁶⁹, la bionique bénéficie de l'antériorité et de ses réseaux structurés associant enseignement, recherche et entreprises. Ce réseau de compétences a bénéficié pour sa constitution de financements (BIOKON I et II) de la Fondation fédérale allemande de l'environnement (DBU), qui continue à s'associer à Biokon pour organiser des forums, des salons autour de ces thèmes.

Selon Kalina Raskin, « l'amorçage » de ce réseau a aussi été réalisé avec un financement important du ministère de la Recherche, notamment pour sensibiliser décideurs et entreprises. Biokon a bénéficié au total d'un financement de 8,5 millions d'euros entre 2001 et 2007. L'Allemagne disposerait d'une dizaine de réseaux nationaux et régionaux associés au biomimétisme.

Au Royaume-Uni le *Biomimetics network for industrial sustainability* (BIONIS) a été constitué en 2002, avec l'appui du gouvernement.

Aux Pays-Bas, le réseau s'est illustré notamment dans la construction d'une feuille de route pour le biomimétisme à l'horizon 2020, publiée en 2013. Un groupe de discussion et d'enquêtes réunissant une centaine de participants a travaillé sur le développement du biomimétisme selon 3 axes :

⁶⁹ Ce lien tient en grande partie à la définition retenue par l'Allemagne du terme bionique et au primat accordé par ce pays à la dimension technologique et aux applications industrielles du biomimétisme.

- développer la R&D et l'innovation (renforcer la coopération entre les différents domaines/secteurs) ;
- développer l'éducation et les formations ;
- créer une structure, une organisation pour donner une ligne directrice et connecter les différents réseaux entre eux.

En France, Biomimicry Europa, association née en 2010, constitue le comité français d'une association éponyme créée en 2006 à Bruxelles. Elle se consacre à la promotion du biomimétisme en France, afin notamment de « *favoriser l'accélération d'innovations durables par l'aide à l'identification des modèles biologiques et des niveaux d'échelle pertinents* ».

Un paragraphe spécifique doit être consacré au CEEBIOS. Le projet CEEBIOS est né en 2012. Il a bénéficié dès le début du soutien de la ville de Senlis, qui lui a procuré à la fois son ancrage territorial et son futur lieu d'implantation - l'ancien quartier militaire Ordener. Parmi les membres fondateurs, des personnalités comme Gilles Boeuf, alors président du MNHN, des pôles de compétitivité, la Chambre de commerce et d'industrie de l'Oise, ou encore des acteurs de la chimie. Biomimicry Europa, la Fondation UNIT et l'Institut Inspire en font également partie.

La montée en puissance du CEEBIOS doit se dérouler en cinq phases jusqu'en 2020, la troisième, qui comprend notamment l'ouverture du site, la recherche de partenariats recherche/industrie et le début des actions de formation, vient de s'ouvrir.

Les objectifs stratégiques du CEEBIOS sont les suivants :

- constituer un réseau européen de compétences en biomimétisme pour le développement durable ;
- susciter et accompagner l'émergence de produits innovants, transdisciplinaires et collaboratifs, pour créer de nouvelles filières ;
- former et sensibiliser les professionnels, par métier, mais aussi des étudiants, l'opinion publique, les industriels et les politiques ;
- communiquer et diffuser sur le biomimétisme ;
- valoriser le site retenu comme démonstrateur d'innovations bio-inspirées et durables.

Le CEEBIOS est donc lancé, avec l'ambition de devenir un réseau national du biomimétisme, qui lui donnera de la visibilité, jouera un rôle structurant, et aidera le sujet à atteindre sa « taille critique » dans le paysage national de l'innovation. La définition pour la France d'une « feuille de route du biomimétisme » concrétiserait cette ambition. Le financement d'amorçage, qui permettrait de structurer ce réseau, d'organiser la communication et de réaliser les études françaises, à ce stade manquantes, sur le potentiel et les perspectives, n'est cependant pas encore obtenu. Kalina Raskin a rappelé en section que le terreau est nécessaire au développement des graines : « *le CEEBIOS est un terreau qui pourrait permettre au biomimétisme d'émerger* ».

Des entreprises de plus en plus nombreuses à s'ouvrir à la démarche

Le biomimétisme est déjà passé du stade de l'idée à celui de la recherche puis de la pratique. Pour autant, les décideurs publics et privés ne sont pas tous encore convaincus de l'absence de risques à s'engager dans cette stratégie d'avenir ni des bénéfices à en tirer. Les stratégies d'optimisation de la matière, de l'énergie et de l'information sélectionnées au cours de l'évolution par les organismes vivants ont pourtant tout lieu d'apparaître comme des processus à appréhender, analyser et, éventuellement, imiter dans une optique de rentabilité et de durabilité. Un des enjeux contemporains en matière de biomimétisme est bien de faire comprendre à l'ensemble des parties prenantes, en particulier aux acteurs économiques, qu'il est possible de s'inspirer de ces systèmes et de repenser la performance de façon écosystémique. Le second enjeu consiste à convaincre qu'il s'agit d'une tendance de fond particulièrement perceptible dans des pays où la recherche et l'industrie sont demeurées puissantes et en relations constantes : les États-Unis, les pays d'Asie et, au niveau de l'UE, l'Allemagne. Un nombre croissant de produits et de procédés bio-inspirés dans les domaines de la chimie, des matériaux, des technologies de l'information et de la communication... voient le jour, souvent protégés par des brevets.

Bien que la France puisse apparaître en retard sur la structuration d'une filière autour de cette thématique de la bio-inspiration par rapport à des pays comme l'Allemagne, Kalina Raskin estime que la situation présente est plutôt encourageante. En effet, l'agence Paris région entreprises⁷⁰ et le CEEBIOS ont identifié *« une soixantaine d'entreprises impliquées sur le biomimétisme aujourd'hui, dont des grands groupes industriels, par exemple Renault, Air liquide ou Eiffage⁷¹, qui s'intéressent à ces problématiques et qui commencent à l'appliquer ou qui l'appliquent depuis quelques années, et un très grand nombre de PME, toujours dans les mêmes grands secteurs d'activités. »*⁷²

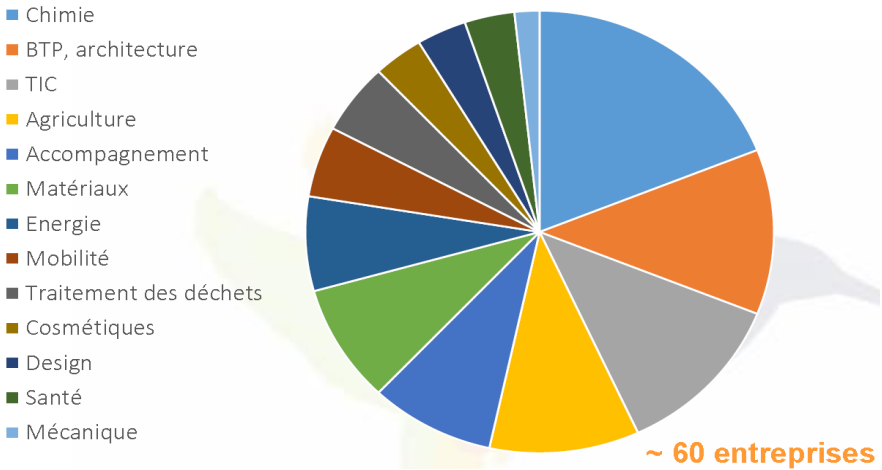
Le graphique ci-après témoigne de la diversité du champ d'application des innovations biomimétiques.

⁷⁰ http://www.innovation-idf.org/fr/attachments/3403_RA-2013.pdf

⁷¹ On pourrait ajouter à ces exemples un groupe comme l'Oréal, qui a rejoint le CEEBIOS, ou d'autres cités dans le tableau suivant.

⁷² Kalina Raskin, audition par la section de l'environnement.

Graphique 5 : Les entreprises françaises



Source : CEEBIOS, Paris Région Entreprises.

La chargée du développement scientifique du CEEBIOS relève que toutes les parties prenantes identifient les mêmes leviers et les mêmes obstacles. Les leviers résident dans l'innovation de rupture et l'intégration concomitante des enjeux environnementaux. Les principaux obstacles tiennent à la difficulté de faire communiquer les disciplines entre elles (ingénierie et biologie par exemple), à l'absence de visibilité et à un manque d'outils pour systématiser l'approche.

Après ceux de la compréhension et de la conviction, le troisième enjeu est celui de la mise en œuvre. C'est majoritairement par un cheminement de la biologie vers la technologie que se concrétisent les innovations bio-inspirées.

Deux voies peuvent être empruntées :

- une propriété remarquable d'une fraction du vivant est observée ; un ingénieur la transpose dans le domaine de la technologie (voire celui des sociétés humaines) ;
- dans une approche plus systémique, on part d'une problématique technologique ou sociétale et l'on essaie de trouver dans le vivant des solutions ou des modèles.

Une illustration du premier cas de figure est fournie par le célèbre exemple du velcro évoqué dans le premier chapitre et dont les applications industrielles dans la production de biens de consommation ont été innombrables.

Un exemple de la deuxième démarche est apporté par une société de planeurs sous-marins autonomes destinés à effectuer des mesures scientifiques. Le constructeur était confronté à un problème : comment faire en sorte que les planeurs restent en sustentation au-dessus d'un point défini du fond marin ? Trouver une solution d'arrimage a conduit un étudiant du Massachusetts Institute of Technology (MIT) à dépouiller une volumineuse documentation sur les stratégies d'ancrage des organismes marins. Il en est résulté la conclusion que les mollusques bivalves de type couteaux étaient les plus intéressants à imiter compte tenu de l'efficacité de leur technique d'enfouissement. Sur cette base, de petits automates très légers capables de s'enfoncer dans le sol et de jouer le rôle d'ancrage ont été construits.

Une des difficultés dans le passage du biologique au technique tient au fait que dans beaucoup d'entreprises, notamment celles dont le cœur de métier ne touche pas aux sciences du vivant, il n'existe pas de réflexe d'intégration des connaissances du vivant vers d'autres champs disciplinaires. La nature et la qualité de la formation des étudiants et des professionnels revêtent à cet égard une importance particulière.

Le dernier grand enjeu en termes d'appropriation de la problématique du biomimétisme réside dans les outils. La question se pose aujourd'hui de la structuration des bases de données du vivant afin de rendre les connaissances disponibles et transposables vers d'autres disciplines. Disposer d'outils qui interprètent les sciences du vivant et les rendent accessibles aux ingénieurs ne pourrait que dynamiser l'inspiration biomimétique au niveau des entreprises.

Les acteurs industriels français face au biomimétisme

La France bénéficie d'une recherche académique dont la qualité est reconnue et sur laquelle elle peut s'appuyer. Elle compte en outre des ingénieurs et des industriels qui s'intéressent au biomimétisme et travaillent sur cette thématique au sein de leur entreprise ou dans le cadre de programmes de R&D de certaines grandes entreprises dans ces secteurs les plus divers : chimie, construction, agroalimentaire, pharmaceutique, environnement... Pourtant, contrairement à d'autres pays au développement économique comparable la France, n'enregistre pas de mobilisation particulière autour des technologies ou produits biomimétiques. Peu sont disponibles qui puissent être qualifiés à la fois de biomimétiques et durables.

Sur la base de la taille et des moyens dont elles disposent pour fonctionner et se développer, les entreprises impliquées dans le biomimétisme peuvent se classer dans deux grandes catégories : les start-up, TPE et PME d'une part, les sociétés importantes et les grands groupes de l'autre.

Les start-up et les PME s'emploient généralement à développer de nouvelles technologies biomimétiques dans un secteur particulier. Les grosses sociétés et les grands groupes qui partagent ce même intérêt pour les innovations bio-inspirées s'engagent dans des programmes de R&D et commercialisent les produits qui en sont issus.

Le CEEBIOS a identifié de nombreuses entreprises appliquant le biomimétisme, dont quelques exemples sont listés ci-dessous.

Tableau 3 : Entreprises françaises intégrant une démarche bio-inspirée

Nom	Activité
Grandes groupes	
Clarins	Biochimie
Eiffage	Dépollution des sols
L'Oréal	Biochimie
Renault	Motorisation hybride bio inspirée
Saint-Gobain	Superhydrophobie...
Suez Environnement	Zones humides de phyto-épuration, optimisation de la production biogaz
PMEs	
Active innovation management	Accompagnement biomimétisme
AMS Smart system	Pompes
Bloomoon	Accompagnement
Brain Vision System	Perception bio-inspirée
BubbleTree	Habitat
Cyberio	Perception bio-inspirée
EEL Energy	Énergie
Elbé Petro	Procédés anti-évaporation
Eurobios	Optimisation systèmes complexes
Ferme du Bec Hellouin	Agriculture
Ferme du Quartier	Agriculture
Gecko Biomedical	Chimie verte
Global Bioénergies	Chimie verte, chimie blanche
Glowee	Bioluminescence
Iddigo	Urbanisme architecture – études écosystémiques
Institut Inspire	accompagnement
Labo d'ID	Matériaux
Lirobia	Robotique
New wind	Énergie
Phytoresource	bioprocédés
Polypop	Matériaux et écologie industrielle
Stratoz	Chimie verte, chimie blanche
ToPotager	Agriculture
Transition 2030	Accompagnement, formation
Ubiant	Optimisation systèmes complexes
UpCycle	Agriculture
Wiithaa	Design
X'TU	Architecture et bioprocédés
Autres	
Biomimicry Europa	Sensibilisation
Innovation Citoyenne et Développement Durable	Sensibilisation
Labio	FabLab
La Paillasse	FabLab
La Paillassaone	FabLab
Le Biome	FabLab
Paris région entreprises	Accompagnement et sensibilisation

Source : CEEBIOS.

La certitude n'est jamais totale que les produits industriels dont des innovations biomimétiques sont à l'origine soient durables. D'une part les analyses de cycles de vie ne sont pas toujours faites ou disponibles quand elles le sont. D'autre part les biens peuvent avoir été produits dans les conditions industrielles habituelles. Pour autant, rares sont ceux qui ne présentent pas au moins une amélioration d'une étape du cycle de vie (peinture bio-inspirée par exemple), si ce n'est du cycle de vie complet ou d'un changement de mode de production (EnR bio-inspirées), voire d'une approche en boucle fermée (phyto-restauration des sols pollués).

On relèvera enfin que si le dynamisme des entreprises citées dans le tableau est réel, les moyens dont disposent beaucoup d'entre elles demeurent modestes. Leur marge de progression reste donc considérable par rapport à des pays comme l'Allemagne, que ce soit en termes quantitatifs ou de capacités financières.

Quelques exemples de TPE-PME françaises « biomimétiques »

□ *De la dépollution au recyclage*

- la PME Polypop pratique la dépollution des sols et la valorisation des déchets organiques en utilisant des champignons. Les sols sont ainsi requalifiés (destruction d'hydrocarbures, captation de métaux comme le plomb ou le cadmium...) sans avoir à recourir à des traitements biologiques ou thermiques, les premiers à l'efficacité incertaine et les seconds très onéreux ;
- Les champignons sont également employés pour valoriser des déchets organiques, réduits en briques élémentaires pour les rendre à nouveau disponibles. Le troisième usage consiste dans la restauration des écosystèmes, en réhabilitant les terres après des accidents ou des pratiques les ayant appauvries et en freinant l'érosion. La durabilité se manifeste ici par une restauration des sols qui évite les impacts environnementaux d'un chantier de dépollution, ou encore le retraitement de la matière ;
- des champignons, la PME UpCycle en produit de comestibles en recyclant le marc de café ! La société les commercialise auprès des particuliers et des restaurateurs et propose des kits de culture. Cette ferme urbaine, qui transforme des déchets en ressources, recycle ses propres déchets (une tonne par jour) : le marc de café enrichi de matière organique, dont le mycélium, a une exceptionnelle valeur agronomique. Cela permet à l'entreprise de le proposer à des maraîchers périurbains ou des agriculteurs urbains. Un déchet urbain est ainsi transformé en ressource alimentaire directe pour les citoyens mais aussi en ressource pour une série de cultivateurs qui contribuent à alimenter la ville.
- Le modèle écosystémique de l'organisation constitue la première dimension durable de l'activité. Le fait que l'entreprise ait recours pour sa production comme pour sa sous-traitance à des associations sociales et solidaires qui s'occupent de réinsertion de personnes en situation de handicap ou de grande précarité en constitue la seconde.

□ *De l'énergie au stockage*

- directement en lien avec le secteur de l'énergie peut être citée l'hydrolienne à membrane d'Eel Energy, structure parisienne de trois salariés créée en 2011.

Cette hydrolienne, conçue pour les courants marins océaniques ou fluviaux, imite l'ondulation des anguilles qui se déplacent afin de récupérer l'énergie des courants ;

- La membrane (un tapis de latex semi-rigide doté d'un squelette en fibre de carbone et de convertisseurs électromagnétiques) ondule sous la pression des fluides en mouvement. L'énergie cinétique est transformée en énergie électrique au moyen de ce procédé électromécanique. L'énergie est convertie tout au long de la membrane. Le déploiement industriel de cette hydrolienne est prévu fin 2016 ;
- la société Elbé Petro est devenue leader dans le domaine de l'évaporation des fluides stockés en cuve en s'inspirant de la symbiose des lentilles d'eau recouvrant les canaux et marais, évitant ainsi leur assèchement à la saison chaude. Le système d'écran composé de flotteurs indépendants qui se positionnent à la surface d'un réservoir en couche continue et en s'adaptant à toutes les irrégularités du milieu assure une couverture maximale. Ce dispositif breveté sous l'appellation « *Evaporation, Reduction Intelligent System* » (ERIS) a valu à l'entreprise le premier prix de l'innovation GEP AFTP des industries pétrolières distinguant l'apport d'une PME-PMI aux performances de l'industrie française de l'énergie.
- Le but du dispositif est de limiter les évaporations de liquides à forte valeur ajoutée stockés en cuves, en particulier dans le secteur pétrolier, chimique, cosmétique et agroalimentaire. Le caractère durable de l'innovation tient à la limitation des émissions de composés organiques volatiles (COV) et de tout produit engendrant des risques d'explosion, d'incendie ou de pollution environnementale autour des cuves.

□ Des applications dans les secteurs les plus divers

- la PME nanterroise Corso Magenta a quant à elle exploité la structure cutanée du requin pour concevoir une peinture destinée à l'aéronautique. Le développement de cette technologie, primée par l'industrie aéronautique, a fait l'objet d'un partenariat avec le programme européen CleanSky. La durabilité de cette peinture non lisse, qui reproduit l'effet « ribler » (limitation des turbulences grâce aux microrainures de la surface), réside dans l'amélioration de la pénétration dans l'air des avions, ce qui réduit la traînée de 5 % à 8 % et, par conséquent, les consommations de kérosène.
- les innovations biomimétiques concernent les domaines les plus variés. La start-up parisienne Gecko biomédical a développé des adhésifs biomimétiques à partir de polymères biocompatibles et biodégradables qui empruntent leurs propriétés aux sécrétions d'un ver marin (le « ver château de sable »). La colle non toxique qui en est inspirée est dotée de propriétés mécaniques qui la font résister notamment à l'humidité et à la pression sanguine. Elle a vocation à être utilisée en chirurgie en complément des sutures ou à les remplacer. Cette start-up a reçu le soutien financier de Bpifrance (1,3 million d'euros) pour dynamiser son développement. Elle prévoit de lancer une étude clinique en France à la fin de l'année 2015 dans le but d'obtenir le marquage CE en 2016. Des investissements devraient par ailleurs être consentis pour accélérer la phase d'industrialisation de la plateforme de films liquides.

Les sociétés et les grands groupes s'impliquent également à des degrés variables. Le groupe Total, par exemple, qui se montre particulièrement attentif aux travaux sur la photosynthèse artificielle, a instauré des partenariats académiques et s'efforce d'évaluer la viabilité scientifique et économique des approches développées.

Les constructeurs automobiles, confrontés aux problèmes environnementaux et sanitaires liés aux émissions de CO₂ et de gaz nocifs des hydrocarbures, à la raréfaction et au renchérissement prévisibles des carburants fossiles ainsi qu'aux orientations politiques européennes et nationales sur la réduction de la consommation des véhicules, considèrent que « *des ruptures technologiques [semblent] absolument nécessaires pour que l'automobile survive à terme* »⁷³. Philippe Doublet observe que les ingénieurs s'inspirent encore peu de l'exemple du vivant alors « *qu'il existe de nombreux modèles dans la nature qu'il serait pertinent d'étudier et éventuellement de transposer à l'automobile. Par exemple, les bancs de poissons changent de direction et de vitesse avec une grande facilité, sans jamais que les poissons ne se percutent au sein d'un banc (...). La reproduction de ces mécanismes permettrait de réduire, voire de supprimer, les embouteillages et les collisions (...). Les voitures pourraient alors rouler sur l'autoroute à quelques mètres de distance, en consommant moins tout en étant plus rapides.* » Un tel dispositif n'introduit pas de rupture dans le mode de déplacement mais vise à améliorer sa durabilité en régulant les flux, en réduisant la consommation de carburant et le nombre d'accidents. Le même spécialiste observe que « *la question plus fondamentale que nous nous posons a trait à l'organisation du travail entre ingénieurs et chercheurs du monde du vivant. Comment nous, ingénieurs, pouvons-nous mieux dialoguer avec les spécialistes du vivant ?* »

Dans le cadre du même colloque, Francis Carré, vice-président chimie et biotechnologie de Sanofi, après avoir rappelé qu'un grand nombre de principes actifs des médicaments de l'industrie pharmaceutique repose sur des molécules naturelles ou issues de molécules naturelles, précise : « *L'industrie pharmaceutique prend en compte les principes de chimie verte dans la totalité du processus, avec la préoccupation de trouver des alternatives aux ressources fossiles, en choisissant des matières d'origine végétale ou animale. Cette approche consiste à intervenir sur les procédés, avec des voies de synthèse innovantes et propres pour fournir aux patients des produits prenant en compte les contraintes environnementales et économiques.* » Des études comparatives apportent la preuve que dans certaines fabrications les technologies bio-inspirées (procédés enzymatiques) ont un impact environnemental bénéfique en améliorant par exemple « *l'efficacité massique (ou tonnes de matières premières engagées par tonne de principe actif fabriqué), [qui peut parfois passer] de cent litres de solvants dans la voie initiale à dix litres, et la performance économique (avec une baisse du coût d'un tiers, une diminution du temps de cycle de moitié et un retour sur investissement du travail de développement inférieur à un an).* »

Dans le domaine de la construction aussi le tournant s'amorce. Depuis 2012, le programme d'action d'Eiffage comporte un onglet intitulé : « *intégration à la R&D du biomimétisme constructif* ». Il s'agit pour le groupe « *d'intégrer le biomimétisme dans les pistes de recherche et de développement d'Eiffage Construction pour améliorer la conception architecturale et technique des bâtiments, en s'inspirant des formes et fonctionnalités de la nature, et afin d'augmenter leur qualité environnementale - comme par exemple la climatisation passive des termitières pour la ventilation et le refroidissement d'un bâtiment. S'agissant d'une action « pionnière » dans les métiers du bâtiment, il s'agit tout d'abord d'identifier un centre de recherche, un pôle ou une école pertinent(e) pour mener un sujet de recherche en faveur du biomimétisme architectural et constructif. L'objectif sera à terme de disposer de concepts, produits ou procédés bio-inspirés* ».

⁷³ Philippe Doublet (Directeur créativité & performance innovation chez Renault) ; *Recherches bio-inspirées, une opportunité pour la transition écologique ?* ; Actes du colloque CGDD, Références, juillet 2013.

D'autres entreprises ont déjà radicalement changé leurs produits et modes de production. Dans les années quatre-vingt-dix, le président directeur général d'Interface, fabricant américain de moquettes de bureau, dont une unité de production se situe en France, a décidé de trouver des solutions alternatives aux colles agressives, tapis non recyclables, gaspillage d'énergie... À l'issue d'une large consultation des meilleurs spécialistes américains de la « durabilité » il a été décidé de remplacer les colles nocives par du velcro, de réduire le gaspillage (moquettes multicolores à carreaux remplaçables), de produire des objets recyclables (loués et non plus vendus) et, en fin de vie, biodégradables... Le choix a donc été fait d'appliquer la stratégie du vivant à tous les échelons de l'activité. Cinq années auront été nécessaires pour convaincre les actionnaires et les cadres de l'intérêt d'un « biomimétisme intégral », mais en dix ans l'activité de l'entreprise a décuplé pour atteindre 1,3 milliard de dollars de chiffre d'affaires en 2008 et un département de conseil biomimétique a été ouvert.

Les innovations sont le plus souvent moins globales et plus ciblées. Elles sont concentrées sur un produit donné. Un exemple spectaculaire et récent est fourni par la production d'un cœur artificiel par la société française Carmat. L'inspiration à partir d'un cœur humain est double :

- *anatomique* : l'organe artificiel comporte deux cavités à la place des ventricules (même forme et même volume) ; imitation des contractions cycliques et l'élasticité du tissu cardiaque ;
- *fonctionnement physiologique* : la prothèse comporte deux pompes hydrauliques qui actionnent indépendamment les ventricules, à la manière des muscles qui compriment les cavités cardiaques gauche et droite.

Les défis d'un parfait biomimétisme sont multiples et extrêmement complexes : concevoir une prothèse minimisant les risques vasculaires, obtenir dans un volume et un poids compatible avec la majorité des patients un volume d'éjection suffisant tout en intégrant l'électronique de contrôle dans la prothèse, offrir au patient une autonomie telle qu'il puisse avoir un rythme de vie normal, optimiser la fiabilité et la durée de vie de la prothèse, développer les algorithmes permettant de rendre autonome le fonctionnement de la prothèse et de mimer au plus près le fonctionnement du cœur naturel.

La durabilité de l'approche tient non seulement à l'imitation de la forme et du fonctionnement du cœur mais aussi à son autonomie et sa durée de vie.

Il est à noter que la situation financière de toutes les sociétés évoquées ci-avant peut être très différente, de florissante à dégradée. Le biomimétisme ne saurait donc être considéré en lui-même comme un remède miracle pour les entreprises, mais comme une voie d'innovation pertinente pour peu qu'elle s'inscrive dans un marché.

La promotion du biomimétisme auprès des entreprises

Née en 2012, l'Agence publique d'innovation Paris Région Entreprises a lancé une mission « biomimétisme et innovation responsable » pour promouvoir ce sujet auprès des PME et des compétences académiques régionales. Cette mission a permis de répertorier un grand nombre d'initiative. Le mouvement progresse peu à peu. Dans son rapport pour le compte du CGDD⁷⁴, Hermine Durand indique que « Selon les membres des pôles de

74 Op. cit.

compétitivité du réseau Ecothech, les industries françaises sont très investies dans les secteurs de l'écoconception et de l'écologie industrielle, secteurs qui peuvent relever de l'écomimétisme ». Par ailleurs, à l'initiative des membres du Pôle Fibres a été créé Biomiméthic, à la fois un fonds de dotation et think-tank destiné à soutenir les efforts de recherche et sensibiliser les acteurs économiques en mobilisant le réseau des pôles de compétitivité pour accélérer le passage à l'écologie industrielle et l'éco-innovation. Il semble cependant que cette structure n'ait jamais pris une envergure suffisante pour impulser un mouvement de grande ampleur en faveur de ces objectifs.

On peut penser que l'impulsion décisive viendra de la structuration d'un réseau d'acteurs incluant les pôles de compétitivité et des structures telles que le CEEBIOS. L'association nouvellement créée entend en effet mettre en place dès 2015 des « groupes d'innovation stratégique » orientés vers des thématiques sur lesquelles des acteurs industriels sont en veille et en demande, et pour lesquels l'innovation bio-inspirée présente un potentiel déjà avéré. Ces groupes de travail devraient suivre une méthodologie comportant six étapes :

- le recensement des partenaires et des secteurs d'activités (groupes industriels - TPE/start-up - laboratoires/universités - acteurs publics - associations/fédérations) ;
- l'état de l'art sur les pistes d'innovations bio-inspirées potentielles ou déjà en cours de développement, la cartographie des acteurs et des compétences, les travaux de recherche en cours ;
- un cycle de réunions collégiales (échanges, brainstorming, études de cas, répartition des tâches et rôles de chacun), animées par des experts de la thématique ;
- la définition d'axes de recherche prioritaires présentant un intérêt commun, mais aussi de la feuille de route et des besoins en financement que cela peut engendrer ;
- des auditions d'experts, la participation à des colloques, des voyages d'études le cas échéant ;
- un appel à projet, modélisation et rédaction d'un rapport collégial, éventuellement assorti d'une exposition de maquettes ou prototypes.

Il appartiendra au collectif des parties prenantes, industrielles notamment, réuni autour de chaque groupe de travail de définir au fur et à mesure ses priorités et de prendre toutes dispositions d'organisation à même d'intensifier ses échanges. Le CEEBIOS devrait proposer les capacités d'accueil pour des expérimentations et des installations pérennes.

Quatre groupes de travail sont d'ores et déjà annoncés :

- habitat bio-inspiré ;
- matériaux composites innovants ;
- base de données du vivant ;
- alternatives agricoles.

Ces groupes ont vocation à accueillir des industriels, pôles de compétitivité, organismes de recherche, centres universitaires... français et étrangers.

Les initiatives du CEEBIOS devraient contribuer à répondre au besoin d'accompagnement des projets et des entreprises s'engageant dans la voie du biomimétisme. Celui-ci passe en effet avant tout par le rapprochement de disciplines et de partenaires qui n'ont pas l'habitude de travailler ensemble et n'en ont quelquefois jamais perçu l'intérêt.



Le développement du biomimétisme suppose l'abandon du modèle traditionnel l'organisation des savoirs « en silo » au profit de la structuration d'un système complexe reposant sur un réseau relationnel entre l'ingénieur, l'industriel, l'académique et le biologiste. C'est sur cette base nouvelle que pourront émerger des projets de R&D et le développement de filières d'avenir.

Annexes

Annexe 1 : composition de la section de l'environnement

✓ **Présidente** : Anne-Marie DUCROUX

✓ **Vice-présidentes** : Catherine TISSOT-COLLE et Patricia RICARD

☐ **Agriculture**

✓ Marie-Thérèse BONNEAU

✓ Pascal FEREY

✓ Claude ROUSTAN

☐ **Artisanat**

✓ Alain GRISET

☐ **CFDT**

✓ Marc BLANC

☐ **CFE-CGC**

✓ Gabriel ARTERO

☐ **CFTC**

✓ Marie-Josèphe PARLE

☐ **CGT**

✓ Marie-Claire CAILLETAUD

✓ Pierrette CROSEMARIE

☐ **CGT-FO**

✓ Anne BALTAZAR

☐ **Coopération**

✓ Denis VERDIER

☐ **Entreprises**

✓ Marie-Christine COISNE-ROQUETTE

✓ Catherine TISSOT-COLLE

☐ **Environnement et nature**

✓ Jacques BEALL

✓ Antoine BONDUELLE

✓ Allain BOUGRAIN DUBOURG

✓ Anne-Marie DUCROUX

✓ Gaël VIRLOUVET

☐ **Mutualité**

✓ Pascale VION

☐ **Organisations étudiantes et mouvements de jeunesse**

✓ Antoine DULIN

☐ **Outre-mer**

✓ Patrick GALENON

☐ **Personnalités qualifiées**

✓ Bernard BAUDIN

✓ Catherine CHABAUD

✓ Maud FONTENOY

✓ Jean JOUZEL

✓ Dominique MEYER

✓ Patricia RICARD

☐ **Professions libérales**

✓ Dominique RIQUIER-SAUVAGE

☐ **UNAF**

✓ Alain FERETTI

☐ **Personnalités associées :**

✓ Daniel BOY ; Michel DEBOUT

✓ Agnès MICHELOT ; Sylviane VILLAUDIÈRE

Annexe 2 : liste des personnalités auditionnées et rencontrées

Pour son information, la section a entendu en audition les personnes suivantes :

- ✓ **M. Idriss Aberkane**
entrepreneur et scientifique, chercheur affilié au Kozmetsky Global Collaboratory de Stanford, ambassadeur de l'Unitwin (UNESCO) pour la section systèmes complexes, éditorialiste au magazine Le Point, professeur à Centrale-Supélec, chercheur à Polytechnique ;
- ✓ **M. Gauthier Chapelle**
ingénieur agronome, docteur en biologie, cofondateur de Biomimicry Europa et du bureau d'études Greenloop ;
- ✓ **M. Tarik Chekchak**
ingénieur écologue, directeur Science et environnement de la Fondation Cousteau, membre fondateur du CEEBIOS ;
- ✓ **M. Emmanuel Delannoy**
gérant de l'Institut INSPIRE ;
- ✓ **M. Charles Herve-Gruyer**
créateur de la Ferme biologique du Bec-Hellouin
- ✓ **M. Philippe Hubert**
directeur des risques chroniques à l'INERIS ;
- ✓ **M. Olivier Scheffer**
directeur de recherche et développement à l'Agence X-TU ;
- ✓ **Mme Kalina Raskin**
docteur en biologie, chargée de développement scientifique du Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis (CEEBIOS).

La section a également effectué un déplacement à Senlis, où elle a rencontré les membres composant du CEEBIOS et des personnalités, notamment les personnes dont les noms suivent :

- ✓ **Mme Françoise Balossier**
proviseure du lycée des métiers Amyot d'Inville de Senlis ;
- ✓ **M. Gabriel Bedoy**
La Ferme du Quartier (startup – écosystème urbain de production alimentaire) ;
- ✓ **M. Thierry Buvat**
expert ressources humaines et formation ouverte et/ou à distance (FOAD) à la Fondation UNIT, partenaire formation du CEEBIOS ;
- ✓ **Mme Sylvie Capron**
directrice du parc naturel régional Oise-Pays de France ;
- ✓ **M. Francis Cloris**
sous-préfet de Senlis ;
- ✓ **M. Jean-Claude Daverdin**
adjoint au directeur régional Picardie de la Caisse des dépôts ;

- ✓ **M. Éric Félice**
chef de travaux du lycée des métiers Amyot d'Inville de Senlis ;
- ✓ **M. Éric Firtion, directeur innovation**
Union des industries chimiques (UIC) ;
- ✓ **Mme Bénédicte Garcia**
responsable du développement du parc naturel régional Oise-Pays de France ;
- ✓ **Mme Sylvie Gauthier Morestain**
chef du projet CEEBIOS à la mairie de Senlis ;
- ✓ **M. Karl Gedda**
directeur général d'Opticsvalley, fondateur et membre du bureau de Biomimethic (Fonds de dotation) ;
- ✓ **M. Dominique Ghiglione**
responsable R&D matériaux et procédés au Centre technique des industries mécaniques (CETIM), ;
- ✓ **M. Christophe Goupil**
professeur des universités, laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED), Paris Diderot-Paris VII ;
- ✓ **M. Daniel Gronier**
administrateur de sociétés de chimie, membre d'honneur du conseil d'administration de l'Association Chimie Du Végétal (ACDV) ;
- ✓ **M. Philippe Hubert**
directeur des risques chroniques à l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) ;
- ✓ **Mme Ingrid Jouve**
directrice du développement durable chez EIFFAGE Construction ;
- ✓ **Mme Catherine Laureau**
responsable de la commission communication de l'association Senlis Entreprises ;
- ✓ **Jean-François Marquestaut**
trésorier de la CCI de l'Oise ;
- ✓ **M. Didier Mauuary**
cofondateur de Cyberio (startup, spécialisée dans la bioacoustique) ;
- ✓ **M. Thibault Prévost, MEDDE**
direction de la recherche et de l'innovation au Commissariat général au développement durable ;
- ✓ **M. Francis Pruche**
adjoint au maire de Senlis en charge du développement économique, chercheur ;
- ✓ **Mme Kalina Raskin**
conseillère scientifique du CEEBIOS ;
- ✓ **M. Alain Renaudin**
conseiller développement et communication du CEEBIOS ;

✓ **M. Olivier Varlet**

directeur général MATIKEM, pôle de compétitivité national dédié aux matériaux, à la chimie et à la chimie verte ;

✓ **M. Samuel Veillerette**

président du directoire UTeam, filiale de valorisation de l'Université de technologie de Compiègne (UTC)

Annexe n° 3 : définition normalisée du biomimétisme

Seit den 1950er Jahren hat sich die Bionik konsequent weiterentwickelt. Weitere Meilensteine waren 1960 in Amerika ein Symposium, auf dem der Begriff 'bionics' erstmals auftaucht und im Jahre 1993 schließlich ein Symposium des VDI Deutschland, auf dem die führenden 'Bioniker' der Bundesrepublik festlegten, was Bionik ist, nämlich 'eine wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme befasst.

Soit en français :

Depuis les années 1950 la bionique n'a cessé de se développer. Des points d'étape méritent d'être mentionnés : un colloque aux États-Unis en 1960, où le terme « bionique » a émergé, et un colloque de l'Association des ingénieurs allemands (VDI) en 1993, lors duquel les experts en bionique du premier plan de la République fédérale ont défini la bionique comme « discipline scientifique qui traite de la mise en œuvre technique et de l'application des principes de construction, de fonctionnement et d'évolution des systèmes biologiques. »

Annexe n° 4 : liste des références bibliographiques

Janine M Benyus

Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables

Les éditions Rue de l'échiquier, traduction de Céline Sefraoui, 2011

CNAM

L'avion III de Clément Ader

Les carnets du musée des arts et métiers

Gilles Boeuf

Actes du colloque «Recherches bio-inspirées»

CGDD, décembre 2012, Références, juillet 2013

Julian FV Vincent, Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer, Anja-Karina Pahl
Interface

Journal of the Royal Society, August 2006, Volume 3, issue 9

Hermine Durand, MEDDTL/CGDD/DDD

Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers

Études et documents du CGDD, n° 72, octobre 2012

Pierre Laffitte, Claude Saunier, OPECST

Les apports de la science et de la technologie au développement durable

Rapport de Sénat, « La biodiversité : l'autre choc ? L'autre chance ? », Tome II, 12 décembre 2007

SNTEDD 2015-2020, Axe 6

Orienter la production de connaissances, la recherche, l'innovation, vers la transition écologique

Priorité 2 « faciliter les démarches d'innovation avec tous les acteurs »

Yves Legrain

Transitions vers une industrie économe en matières premières

Rapport et avis du Conseil économique, social et environnement, Les Éditions des journaux officiels, janvier 2014

Olivier Allard

Biomimétisme, comment les entreprises peuvent-elles intégrer le biomimétisme dans leur stratégie d'innovation ?

ITMP, ESIEE, chambre de commerce et d'industrie de Paris, 2012

Fabienne Monfort-Windels

La nature, une formidable source d'inspiration

Le Journal des Ingénieurs n°s 110 et 111, mars et avril 2008

Rodolfo Dirzo, Hillary S. Young, Mauro Galetti, Gerardo Ceballos, Nick J. B. Isaac, Ben Collen
Defaunation in the Anthropocene

Magazine Science n°6195, 25 juillet 2014

Bill Mollison, David Holmgren

Permaculture 1, une agriculture pérenne pour l'autosuffisance et les exploitations de toutes tailles

Éditions Debard, 1986

URBEO

Le biomimétisme, une source pour l'architecture durable

Recherche et prospective, URBEO

Béatrice Levaux, Bruno Genty

L'emploi dans la transition écologique

Avis du Conseil économique, social et environnemental, Les éditions des Journaux officiels, mai 2015

The Fermanian Business& Economic Insitute

Bioinspiration : an economic progress report

Research and produced, Point Loma Nazarene University, november 2013

Commission européenne

Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities

Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities' (full version)

Directorate-General for Research and Innovation, Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials EN, 2015

Commission européenne

Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe

Communication de la Commission

COM (2012) 60 final, 13 février 2012

Commission européenne

Innovation for a sustainable Future - The Eco-innovation Action Plan (Eco-AP)

Communication de la Commission

COM (2011) 899 final, 15 décembre 2011

Eurobaromètre

Attitudes des entrepreneurs européens à l'égard de l'éco-innovation,

Eurobaromètre flash n° 315, mars 2011

PLNU forward

The Da Vinci Index and biomimicry

Site internet de l'université

Philippe Doublet (Directeur créativité & performance innovation chez Renault)

Recherches bio-inspirées, une opportunité pour la transition écologique ?

Actes du colloque CGDD, Références, juillet 2013

Annexe n° 5 : table des sigles

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFB	Agence française pour la biodiversité
AFNOR	Association française de normalisation
AFTP	Association des techniciens et professionnels du pétrole
ANR	Agence nationale de la recherche
APA	Accès aux ressources génétiques et partage des avantages issus de leur utilisation
CA	Chiffre d'affaires
C2C	<i>Cradle to cradle</i> (du berceau au berceau)
CDB	Convention sur la diversité biologique
CEEBIOS	Centre européen d'excellence en biomimétisme de Senlis
CESE	Conseil économique, social et environnemental
CGDD	Commissariat général au développement durable
COV	Composé organique volatil
DARPA	<i>Defense Advanced Research Programs Administration</i>
DBU	<i>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</i> (Fondation allemande de l'environnement)
EIO	Observatoire de l'éco-innovation
ERIS	<i>Evaporation, Reduction Intelligent System</i>
FBEI	<i>Fermanian Business And Economic Institute</i>
GEP	Groupement des entreprises parapétrolières et paragazières
GES	Gaz à effet de serre
HMI	<i>Hanover messe innovations</i>
IDEFI	Initiatives d'excellence en formations innovantes
IFREMER	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRA	Institut national de la recherche agronomique
ISO	Organisation internationale de normalisation
KIT	<i>Karlsruhe Institute of Technology</i>
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MNHN	Muséum national d'histoire naturelle
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
PAEI	Plan d'action en faveur de l'éco-innovation
PIB	Produit intérieur brut
PME	Petites et moyennes entreprises
PMI	Petites et moyennes industries
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
QSAR	<i>quantitative structure - activity relationship</i>
SNTEDD	Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable
TPE	Très petite entreprise
UE	Union européenne
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UNIT	Université numérique ingénierie et technologie

Annexe n° 6 : liste des illustrations

■ Schéma

<i>Schéma 1 : les limites planétaires</i>	65
---	----

■ Encadrés

<i>Encadré 1 : l'exemple emblématique de la ferme biologique du Bec-Hellouin</i>	80
<i>Encadré 2 : une ferme verticale d'algoculture marine en synthèse avec le bâtiment</i>	84
<i>Encadré 3 : éco-activités et filières vertes</i>	87

■ Graphiques

<i>Graphique 1 : date d'épuisement au rythme actuel d'exploitation</i>	64
<i>Graphique 2 : les vagues d'innovation</i>	97
<i>Graphique 3 : obstacles à l'intégration et au développement rapides de l'éco innovation pour les entreprises</i>	99
<i>Graphique 4 : facteurs susceptibles d'accélérer l'intégration et le développement de l'éco-innovation</i>	100
<i>Graphique 5 : les entreprises françaises</i>	111

■ Tableaux

<i>Tableau 1 : laboratoires de recherche travaillant sur des thématiques liées au biomimétisme</i>	104
<i>Tableau 2 : projets financés par l'ANR dont le sujet concerne en partie le biomimétisme</i>	106
<i>Tableau 3 : entreprises françaises intégrant une démarche bio-inspirée</i>	113

Dernières publications de la section de l'environnement

- *Vingt ans de lutte contre le réchauffement climatique en France : bilans et perspectives des politiques publiques*
- *Inégalités environnementales et sociales : identifier les urgences, créer des dynamiques*
- *Projet de loi de programmation pour un nouveau modèle énergétique français*
- *L'adaptation de la France au changement climatique mondial*
- *L'éducation à l'environnement et au développement durable tout au long de la vie, pour la transition écologique*
- *Agir pour la biodiversité*

LES DERNIÈRES PUBLICATIONS DU CONSEIL ÉCONOMIQUE, SOCIAL ET ENVIRONNEMENTAL (CESE)

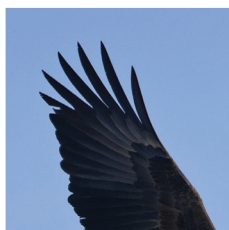
- *Encourager l'investissement public des collectivités territoriales*
- *Les addictions*
- *Résolution sur un tableau de bord d'indicateurs complémentaires au Produit intérieur brut (PIB) élaboré en partenariat avec France Stratégie*
- *Perspectives pour la révision de la stratégie Europe 2020*
- *Avant-projet de loi relatif à la liberté de la création, à l'architecture et au patrimoine*
- *Le stockage de l'énergie électrique, une dimension incontournable de la transition énergétique*
- *L'emploi dans la transition écologique*

**Retrouvez l'intégralité
de nos travaux sur
www.lecese.fr**

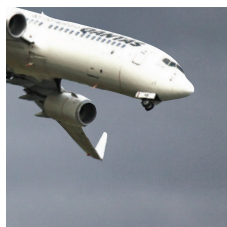
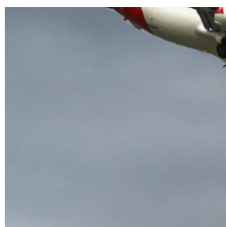
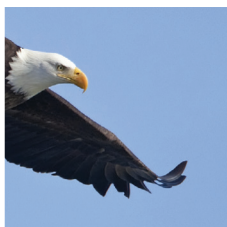
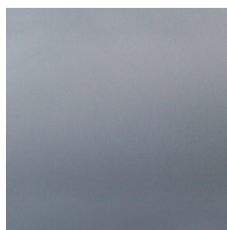
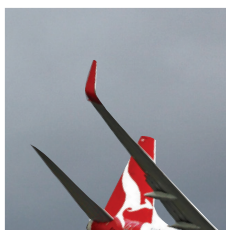
Imprimé par la direction de l'information légale et administrative, 26, rue Desaix, Paris (15^e)
d'après les documents fournis par le Conseil économique, social et environnemental

N° de série : 411150023-000915 – Dépôt légal : septembre 2015

Crédit photo : istock/WP Retrofit



LES **AVIS**
DU CONSEIL
ÉCONOMIQUE
SOCIAL ET
ENVIRONNEMENTAL

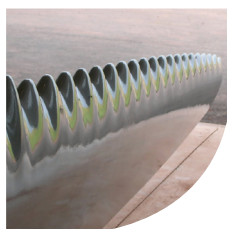


Le vivant a fait la preuve, en 3,8 milliards d'années, de son efficacité et de son adaptabilité. L'homme a toujours cherché à imiter ses formes, ses matériaux ou ses procédés.

Aujourd'hui, grâce au développement des sciences et au moment de s'engager dans les transitions écologiques et énergétiques, cette ambition se transforme. La précision de nos outils d'observation, l'ouverture de nouveaux champs d'exploration, nous amènent à réaliser dans la nature des découvertes inattendues, à la fois efficaces et durables.

Le biomimétisme est le mot qui résume le mieux cette démarche nouvelle, qui propose de s'inspirer de la nature pour innover de façon durable.

Le Conseil en dévoile les principaux axes et le potentiel en s'appuyant sur des exemples concrets en France et dans le monde. Il analyse le cadre de son développement et propose des solutions pour assurer la mise en réseau et la diffusion du biomimétisme.



CONSEIL ÉCONOMIQUE, SOCIAL
ET ENVIRONNEMENTAL
9, place d'Iéna
75775 Paris Cedex 16
Tél. : 01 44 43 60 00
www.lecese.fr

N° 41115-0023 prix : 19,80 €
ISSN 0767-4538 ISBN 978-2-11-138674-7



9 782111 386747