

Études & documents

Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers

n° 72
Octobre
2012

Développement durable



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère
de l'Écologie,
du Développement
durable
et de l'Énergie

Collection « Études et documents » de la Délégation au développement durable (DDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)

Titre du document : **Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers**

Directeur de la publication : Catherine LARRIEU (CGDD/DDD)

Auteur(s) : Hermine Durand - *Sous la direction de : Catherine Larrieu, chef de la Délégation au Développement Durable (CGDD/DDD) et Claire Hubert, chef du Service de la Recherche (CGDD/DRI/SR)*

Date de publication : Octobre 2012

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement
Commissariat Général au Développement Durable

Etude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers



Etude réalisée par **Hermine Durand**

du 05/09/2011 au 26/01/2012

MEDDTL/CGDD/DDD

A la demande de :

Dominique Dron, Commissaire Générale au Développement Durable

Sous la direction de :

Catherine Larrieu, chef de la Délégation au Développement Durable (CGDD/DDD)

Claire Hubert, chef du Service de la Recherche (CGDD/DRI/SR)

AVANT PROPOS

Le terme de biomimétisme désigne l'imitation de propriétés remarquables du vivant dans les activités humaines. Il recouvre des champs variés : produits et technologies biomimétiques dans le monde industriel, nouvelles pratiques agricoles ou forestières tirées de l'observation des écosystèmes naturels, ou encore nouveaux schémas d'organisation inspirés de la nature. L'écomimétisme désigne plus particulièrement l'étude de fonctionnements écosystémiques intéressants, pour en reproduire les conditions et donc les avantages ; il peut être considéré comme un secteur du biomimétisme.

Depuis plus de 20 ans, de nombreux travaux de recherche et d'innovation sur le biomimétisme ont été réalisés à l'échelle mondiale mais n'ont eu que peu de résonance en France. Pourtant, savoir qu'il faudrait déjà plusieurs planètes pour héberger durablement une humanité avec nos standards de vie impose d'en tenir compte en termes d'innovation. La réflexion classique consiste en effet à partir des produits et procédés actuels et d'en améliorer les performances en termes de ressources consommées, de déchets, d'impacts sur les milieux ; une autre est de chercher à reproduire avec des procédés classiques, industriels ou agricoles, des matériaux naturels intéressants. **La voie du biomimétisme et de l'écomimétisme consisterait plutôt, à l'inverse, 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, et d'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.** Bien sûr les questions d'éthique ne devront pas être absentes de la démarche.

Les exigences auxquelles nos sociétés sont aujourd'hui confrontées du fait des limites physiques et biologiques de la planète nécessitent donc de revisiter les mécanismes du monde vivant, non seulement à l'échelle des espèces mais aussi à celle des écosystèmes, pour trouver des réponses innovantes s'inscrivant dans ces limites, en termes de produits, de procédés et d'organisations. Ainsi le biomimétisme est, selon un rapport du Sénat de 2007, « l'une des boîtes à outils de la quatrième révolution industrielle »¹.

Il ne s'agit pas d'affirmer a priori que toutes les activités humaines actuelles pourraient être réalisées de cette façon, mais de prendre au sérieux les limites planétaires et d'en tirer toute la créativité possible. C'est pourquoi le Commissariat général au développement durable a fait de ce sujet l'une des actions de ses 5 chantiers transversaux pour 2012-2013, dans la perspective d'une économie verte, résiliente et équitable.

Pour préparer cette action, l'objectif de la présente étude, réalisée par Hermine Durand de septembre 2011 à janvier 2012 en relation avec trois entités du CGDD (DDD, DRI, SEEIDD), est de faire un état des lieux de la recherche et de l'innovation françaises en matière de biomimétisme et d'en évaluer le potentiel dans la perspective d'une économie verte et résiliente. A partir de recherches bibliographiques et de rencontres avec de nombreux acteurs, elle brosse un portrait du biomimétisme en France et dans le monde :

- 1/ en identifiant les acteurs et les enjeux du biomimétisme dans le contexte de l'économie verte,
- 2/ en donnant des exemples d'applications industrielles du biomimétisme en fonction des filières vertes et en analysant leur caractère effectivement soutenable,
- 3/ en présentant et illustrant l'écomimétisme comme un outil participant à la construction d'une agriculture plus durable.

Dominique Dron
Commissaire générale et Déléguée interministérielle au développement durable

¹ Laffitte P., Saunier C., sénateurs (2007), *Les apports de la science et de la technologie au développement durable*, Tome II : [La biodiversité : l'autre choc ? l'autre chance ?](#), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Avertissement

Etant donné les contraintes de temps auxquelles elle a été soumise, cette étude, réalisée dans le cadre d'un stage au sein de la Délégation au Développement durable, ne se veut pas exhaustive dans la revue des produits, technologies et pratiques découlant du biomimétisme ou de l'écomimétisme. Elle peut présenter des biais ou des imprécisions, dus entre autres au manque de données sur certains sujets et à la faible disponibilité de certains acteurs. Ces possibles limites n'engagent que leur auteure.

SOMMAIRE

Avant propos
Sommaire
Liste des figures
Résumé

I. Biomimétisme et écomimétisme : un panorama des enjeux et des acteurs.....12

1. Contexte de l'étude et définition du biomimétisme

- a. Contexte : l'économie verte
- b. Définition et applications
- c. Biomimétisme et durabilité
- d. Périmètre de l'étude

2. Les acteurs du biomimétisme et de l'écomimétisme

- a. Acteurs internationaux
- b. Acteurs français

3. Les enjeux du biomimétisme dans le contexte de l'économie verte

- a. Enjeux économiques
- b. Une collaboration nécessaire entre acteurs
- c. Une vigilance quant à l'effective durabilité des innovations

II. Applications industrielles présentes et futures du biomimétisme.....40

1. Produits et technologies biomimétiques : une sélection d'exemples industriels

- a. Panorama des applications biomimétiques et inscription dans les filières industrielles vertes
- b. Durabilité des applications biomimétiques industrielles

2. Atouts et potentiel de la France en matière de biomimétisme industriel : quelques pistes

- a. Quelques projets de recherche prometteurs au regard de l'économie verte
- b. Quelques initiatives industrielles prometteuses au regard de l'économie verte

3. La normalisation internationale du biomimétisme dans l'industrie

- a. Contenu de la demande du DIN
- b. Enquête d'AFNOR en France
- c. Résultat de la consultation internationale et conséquences
- d. Perspectives et contacts

4. Conclusion

III. S'inspirer des écosystèmes naturels pour concevoir des agro-écosystèmes durables.....79

1. Introduction

- a. Contexte et enjeux
- b. Acteurs
- c. La démarche écomimétique et les nouvelles agricultures

2. Présentation académique de l'approche écomimétique en agriculture

- a. Fondements théoriques
- b. Les principes écomimétiques
- c. Proposition d'un cadre d'action

3. Des exemples pionniers en France

- a. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des cultures de plantes annuelles seules
- b. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des systèmes agroforestiers et arboricoles
- c. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des systèmes aquacoles

4. Limites de l'intégration de la démarche écomimétique en agriculture

- a. Limites scientifiques
- b. Limites techniques
- c. Limites financières et institutionnelles.
- d. Limites culturelles

5. Conclusion

IV. Conclusion.....112

Annexes.....113

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Les « Principes du Vivant », justifiant la durabilité de la démarche biomimétique
- Figure 2. Biomimétisme et durabilité : cadrage du sujet de l'étude
- Figure 3. Quelques grandes entreprises s'intéressant à la bio-inspiration à l'échelle mondiale
- Figure 4. Estimation des parts de marché impactées par le biomimétisme
- Figure 5. Evolution du Da Vinci Index entre 2000 et 2011
- Figure 6. Gradient de durabilité des applications industrielles du biomimétisme
- Figure 7. Impact des biotechnologies blanches sur l'empreinte écologique de certaines industries
- Figure 8. Différents niveaux d'organisation pour l'approche écomimétique des agrosystèmes
- Figure 9. Dynamique des écosystèmes naturels : les successions écologiques
- Figure 10. Un cadre d'action en trois temps pour concevoir des agrosystèmes écomimétiques

- Tableau 1. Equipes de recherches travaillant sur le biomimétisme en France
- Tableau 2. Répartition des orateurs en fonction des thèmes abordés lors de la International Bionic Engineering Conference 2011
- Tableau 3. Etudes de cas de l'OCDE visant à évaluer l'impact environnemental de biotechnologies blanches utilisées dans l'industrie
- Tableau 4. Résultats de la consultation internationale ISO sur la normalisation du biomimétisme
- Tableau 5. Comparaison des caractéristiques des écosystèmes naturels, des agrosystèmes traditionnels et des agrosystèmes modernes
- Tableau 6. La forêt tropicale : un écosystème modèle au sein de l'approche écomimétique des agrosystèmes

- Encadré 1. Biomimétisme et durabilité : des écueils à éviter
- Encadré 2. Définition de l'agro-écologie
- Encadré 3. Les principes écomimétiques de l'agriculture écologiquement intensive
- Encadré 4. Principes écomimétiques utilisés en agroforesterie
- Encadré 5. Situation de l'agroforesterie française en 2011

- Planche 1. Illustration des applications biomimétiques au sein des filières vertes

RESUME

I. Biomimétisme et écomimétisme : un panorama des enjeux et des acteurs

1. Contexte de l'étude et définition du biomimétisme

a. Contexte : l'économie verte

La France a besoin de trouver de nouvelles voies de production qui prennent mieux en compte les facteurs limitants de notre environnement. Le biomimétisme peut être un outil pour effectuer la transition vers une économie verte.

b. Définition et applications

Le biomimétisme consiste à imiter des propriétés remarquables du vivant (forme, procédés ou ensemble d'interactions, « écomimétisme » dans ce dernier cas), pour développer de nouvelles technologies, de nouvelles pratiques agricoles ou de nouveaux schémas d'organisation. Nous inclurons dans ce terme la bionique et la bioassistance.

c. Biomimétisme et durabilité

Le biomimétisme possède en théorie un fort potentiel d'innovation dans le contexte de l'économie verte puisque l'évolution a sélectionné des systèmes efficaces fonctionnant à partir d'énergies et matières premières renouvelables et abondantes, dont les déchets sont toujours les intrants d'autres systèmes, l'optimisation étant ainsi globale et non système par système.

En pratique, il existe encore peu d'applications biomimétiques parfaitement durables et il faut se méfier de l'utilisation du biomimétisme comme outil de communication.

d. Périmètre de l'étude

L'étude porte sur les produits et technologies biomimétiques développés dans la sphère industrielle et les nouvelles pratiques agricoles tirées de l'observation de la nature. L'écologie industrielle, l'architecture biomimétique et la médecine bio-inspirée ne sont pas abordées.

2. Les acteurs du biomimétisme et de l'écomimétisme

a. Acteurs internationaux

A l'étranger, de nombreux laboratoires travaillent sur des thématiques liées au biomimétisme, en particulier en Allemagne, au Royaume-Uni, aux Etats-Unis et au Japon.

BIOKON International, né en Allemagne, est le seul réseau international de recherche dédié au biomimétisme.

Un nombre croissant d'entreprises développe des produits et technologies biomimétiques dont l'impact environnemental est plus ou moins réduit selon le degré d'intégration de la démarche biomimétique.

Des associations et cabinets de conseil promeuvent le biomimétisme en tant que solution à la crise écologique et économique actuelle. Le Biomimicry Institute créé par Janine Benyus, auteur du best seller *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables* (1997) est en particulier très actif.

Les acteurs du monde agricole sont également concernés par le biomimétisme et plus particulièrement l'écomimétisme, dans la mesure où l'imitation des écosystèmes naturels peut permettre de réconcilier la productivité agricole avec la maintenance des régulations et ressources de la biosphère.

b. Acteurs français

En France, de nombreux laboratoires travaillent sur le biomimétisme, qu'ils adoptent consciemment cette démarche ou non. La France compte quelques PME pionnières en écomimétisme et certaines grandes entreprises commencent à s'intéresser à ces deux concepts. Au sein des pôles de compétitivité, seul le Pôle Fibres s'intéresse au biomimétisme, via un fonds de dotation qu'il est en train de créer. Les associations Biomimicry Europa et ICDD sont très impliquées dans la promotion du biomimétisme. L'AFNOR est également mobilisée dans le cadre de la

normalisation prochaine du biomimétisme à l'échelle internationale suite à la constitution d'un nouveau Comité technique ISO en décembre 2011.

3. Les enjeux du biomimétisme dans le contexte de l'économie verte

a. Enjeux économiques

Selon un rapport d'un institut économique américain, « alors que c'est pour l'instant un secteur émergent, le biomimétisme pourrait représenter un marché de 1000 milliards de dollars à l'échelle mondiale en 2025 », impactant « tous les domaines de notre économie : transports, industrie chimique, entreposage, gestion des déchets, architecture et ingénierie... ». Ces chiffres sont néanmoins peu fiables. De telles estimations n'existent pas en Europe.

b. Une collaboration nécessaire entre acteurs

Les projets liés au biomimétisme requièrent une étroite interaction entre différents acteurs : chercheurs, ingénieurs, industriels, agriculteurs, décideurs et citoyens. Pour franchir les barrières traditionnelles entre ces secteurs d'activité, il est nécessaire de mettre en place des structures d'échange et de discussion, à l'instar d'initiatives internationales comme la conférence Bionic Engineering de Boston (18-20/09/11).

c. Une vigilance quant à l'effective durabilité des innovations

Biomimétisme n'est pas synonyme de durabilité *a priori*. Le biomimétisme peut mener à des innovations ayant un impact environnemental élevé comme à des innovations de rupture en matière de durabilité. Les analyses de cycle de vie (ACV) de produits et technologies biomimétiques doivent être réalisées et diffusées dans un souci de transparence et d'objectivité.

II. Applications industrielles présentes et futures du biomimétisme

1. Produits et technologies biomimétiques : une sélection d'exemples industriels

a. Panorama des applications biomimétiques et inscription dans les filières industrielles vertes

Toutes les filières industrielles dites vertes sont potentiellement concernées par le biomimétisme : énergies renouvelables imitant la photosynthèse, chimie douce grâce à des biocatalyseurs, traitement des eaux usées par phytoépuration, valorisation naturelle des déchets végétaux ou alimentaires...

b. Durabilité des applications biomimétiques industrielles

Les innovations s'inscrivant dans une approche en boucle fermée du cycle de vie, à l'image du fonctionnement des écosystèmes, sont plus durables que les innovations imitant uniquement une forme ou un procédé du vivant

2. Atouts et potentiel de la France en matière de biomimétisme industriel : quelques pistes

a. Quelques projets de recherche prometteurs au regard de l'économie verte

Les atouts de la France en matière de recherche sont : les travaux sur la photosynthèse artificielle, la biominéralisation, les molécules naturelles de conservation des aliments et la biocatalyse.

b. Quelques initiatives industrielles prometteuses au regard de l'économie verte

Plusieurs PME innovantes s'intéressent au biomimétisme : recyclage du marc de café, production d'aliments pour l'aquaculture à partir de déchets végétaux, phyto-épuration et restauration.

3. La normalisation internationale du biomimétisme dans l'industrie

a. Contenu de la demande du DIN

L'Institut allemand de normalisation (DIN) a demandé en mai 2011 à l'Organisation internationale de normalisation (ISO) de constituer un nouveau comité technique sur le biomimétisme. L'ISO a donc lancé une consultation internationale.

b. Enquête d'AFNOR en France

L'AFNOR a relayé l'enquête de l'ISO auprès de 3000 personnes et organismes en France. A partir des 12 réponses reçues, elle a approuvé la demande du DIN et demandé à être membre observateur des travaux.

c. Résultat de la consultation internationale et conséquences

Cinq états membres de l'ISO ayant souhaité participer activement aux travaux, le Comité technique 266 Biomimetics a été créé.

d. Perspectives et contacts

L'AFNOR cherche à présent à mobiliser les acteurs français du biomimétisme, éventuellement au sein d'une commission miroir, pour suivre les travaux de l'ISO voire y participer activement. Le MEDDE a tout intérêt à suivre attentivement ces travaux, voire à y participer.

4. Conclusion

La France a des atouts à valoriser en matière de biomimétisme durable dans le domaine industriel, à la fois en amont grâce à de nombreux projets de recherche et de façon opérationnelle à travers la R&D de quelques entreprises pionnières. Toutes les filières vertes sont concernées. Pour accompagner l'émergence d'une industrie biomimétique durable et compétitive en France, il sera au préalable nécessaire d'organiser des rencontres entre les différents acteurs et de systématiser l'identification des secteurs porteurs. Le suivi des travaux de normalisation du biomimétisme à l'ISO sera également crucial

III. S'inspirer des écosystèmes naturels pour concevoir des agro-écosystèmes durables

1. Introduction

a. Contexte et enjeux

L'agriculture conventionnelle a de forts impacts environnementaux et les procédés développés depuis une cinquantaine d'années montrent leurs limites en termes agronomiques et de durabilité. Il faut transformer les voies de production agricole en stoppant l'artificialisation de la nature commencée au 19^e siècle et en recommençant à s'inspirer de la nature pour résoudre des défis techniques.

b. Acteurs

Agriculteurs, forestiers, aquaculteurs, chercheurs, ingénieurs agronomes, coopératives, Chambres d'agriculture, habitants des villes et des campagnes, décideurs sont concernés par la transformation de l'agriculture.

c. La démarche écomimétique et les nouvelles agricultures

La démarche écomimétique consiste à observer et imiter le fonctionnement des écosystèmes naturels, comme la prairie ou la forêt tropicale, pour concevoir des agro-écosystèmes durables. Ce n'est pas un type d'agriculture à part entière, mais une approche qui se retrouve dans différentes approches agronomiques, dont l'agriculture biologique et l'agriculture écologiquement intensive.

2. Présentation académique de l'approche écomimétique en agriculture

a. Fondements théoriques

L'approche écomimétique repose sur des résultats scientifiques concernant différentes notions : biodiversité, résilience, productivité, stabilité, auto-organisation.

b. Les principes écomimétiques

Le chercheur E. Malézieux (CIRAD) identifie 6 principes définissant la démarche écomimétique : 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience, 2. Maintenir la fertilité du sol grâce au couvert végétal, 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes, 4. Contenir les invasions de ravageurs grâce à des niveaux/réseaux trophiques complexes, 5. Utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques pour contrôler les ravageurs, 6. Reproduire les successions écologiques après une perturbation.

c. Proposition d'un cadre d'action

Pour mettre en place une démarche écomimétique en agriculture, il faut partir de l'observation de la nature, agréger les connaissances des chercheurs et des agriculteurs, mettre en place des parcelles expérimentales et économiques, puis diffuser les innovations ainsi élaborées.

3. Des exemples pionniers en France

a. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des cultures de plantes annuelles seules

Des agriculteurs pionniers développent de plus en plus des innovations diversifiées de ce type sur leurs exploitations, en ayant recours, consciemment ou non, à une démarche écomimétique. Des exemples de travaux de R&D de la coopérative Terrena sont donnés. D'autres réseaux moins médiatisés mais très intéressants existent.

b. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des systèmes agroforestiers et arboricoles

Les systèmes agro-forestiers, mutispécifiques et pluristratifiés, permettent une amélioration de la productivité totale de l'agro-écosystème. En France, un nombre croissant d'agriculteurs réintroduisent l'arbre et les ligneux bas dans les champs.

c. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des systèmes aquacoles

Des travaux de recherche sur une pisciculture écologique et productive repensent les élevages aquacoles comme des écosystèmes en mettant au point des « systèmes intégrés multitrophiques » comportant différents compartiments : poissons, crevettes, algues... permettant ainsi de limiter les déchets et la pollution de l'eau.

4. Limites de l'intégration de la démarche écomimétique en agriculture

a. Limites scientifiques

On manque encore de connaissances sur les écosystèmes naturels à imiter ainsi qu'en modélisation. Par définition, aucune agriculture ne peut être complètement écomimétique.

b. Limites techniques

Certaines pratiques comme l'agroforesterie ou le semis direct se heurtent à des problèmes de machinisme agricole : semoirs et moissonneuses classiques, non adaptés, doivent évoluer. L'agriculture écomimétique, fondée sur l'utilisation approfondie des conditions locales, leur est inféodée dans sa mise en œuvre.

c. Limites financières et institutionnelles

Les dispositifs de formation et de rémunération des agriculteurs, sans les ignorer, n'encouragent pas pour l'instant la préservation de l'environnement. Les mesures nationales d'aide au passage à l'agroforesterie ne sont pas souvent appliquées. La recherche en agro-écologie pourrait être soutenue davantage. Les professions sont toujours cloisonnées et de nouvelles voies de professionnalisation peinent à voir le jour. La crise économique est un obstacle à l'investissement.

d. Limites culturelles

Les agriculteurs ne sont pas tous prêts à mettre en place des pratiques bouleversant leurs pratiques traditionnelles ou l'aspect de leur exploitation, et demandant une haute technicité agronomique souvent disparue des formations. Ils sont soumis à des cadres économiques contraignants, ne prenant pas en compte les externalités induites (pollutions, érosion...) et au regard de leurs pairs il n'est pas aisé d'assumer des échecs dans la mise en place d'une agriculture durable, même si les exemples de succès à la fois agronomique et économique sont de plus en plus nombreux.

5. Conclusion

La démarche écomimétique peut contribuer à l'émergence d'une agriculture plus durable, mais elle est encore rarement utilisée en tant que telle. Elle considère les cultures comme des écosystèmes fonctionnant en boucle fermée, pouvant être connectés entre eux à l'échelle des territoires. Elle exige sans cesse davantage de connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes naturels et alimente la prise de conscience globale sur la nécessité de savoir développer des agricultures productives respectant leurs propres conditions d'existence (sol, eau, diversité cultivée, auxiliaires de cultures animaux et végétaux...) et plus largement les fonctionnements de la biosphère.

Conclusion

Le biomimétisme, qu'il soit ou non désigné comme tel, est une méthode d'innovation présentant un fort potentiel dans le contexte de l'économie verte. Les projets qui y font appel et qui participent à l'élaboration de modes de production en rupture avec les voies actuelles méritent d'être encouragés.

Annexes

I. Biomimétisme et écomimétisme : un panorama des enjeux et des acteurs

1. Contexte de l'étude et définition du biomimétisme

a. Contexte : l'économie verte

Pour effectuer sa transition vers une économie verte, c'est-à-dire vers une économie « *qui 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* »², la France a besoin de trouver de nouvelles voies de production qui prennent mieux en compte les facteurs limitants de notre environnement.

Un rapport³ du Sénat publié en 2007 fait le constat suivant : « *Pour l'essentiel, beaucoup de procédés industriels que nous mettons en oeuvre sont dispendieux en matières premières, coûteux en énergie et insuffisamment sélectifs. A l'opposé de ces procédés industriels physicochimiques, l'évolution a produit des **solutions biologiques**, beaucoup plus sophistiquées que les artefacts 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.* » L'une des boîtes à outils présentée dans la suite du rapport du Sénat est celle du **biomimétisme**, qui fait l'objet du présent rapport.

b. Définition et applications

Le terme « biomimétisme » désigne l'imitation par les humains dans leurs activités de certaines propriétés remarquables des systèmes biologiques. Il peut s'agir d'imiter une **forme** observée dans la nature à l'échelle macro, micro voire nanoscopique, un **procédé** biologique ou encore un **ensemble d'interactions** présentes au sein d'un écosystème. On parle dans ce dernier cas d'écomimétisme.

Les applications biomimétiques se retrouvent dans tous les secteurs économiques :

1) Dans le monde de l'industrie, sont développés des **produits et technologies biomimétiques** s'inspirant d'une forme ou d'un procédé remarquable observés chez un être vivant. On peut citer par exemple :

- les matériaux bio-inspirés : matériaux aéro- ou hydrodynamiques inspirés de la peau de requin, matériaux auto-nettoyants imitant la feuille de lotus, recherche sur la biominéralisation pour révolutionner les conditions de fabrication des matériaux résistants...
- la conception de structures plus aérodynamiques : au Japon le nez du TGV Shinkansen est inspiré du bec du martin pêcheur,
- les énergies renouvelables : éoliennes imitant les mouvements des ailes d'insectes ou la structure de la nageoire de baleine, énergies marines imitant la forme des algues, de la queue du thon ou du requin, prototypes de feuilles faisant de la photosynthèse artificielle...
- le recours à la biocatalyse pour effectuer des réactions dans des conditions douces,

² 2011, PNUE: « Vers une économie verte : Pour un développement durable et une éradication de la pauvreté – Synthèse à l'intention des décideurs ». www.unep.org/greeneconomy

³ Laffitte P., Saunier C., sénateurs (2007), *Les apports de la science et de la technologie au développement durable*, Tome II : [La biodiversité : l'autre choc ? l'autre chance ?](#), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

- le stockage de CO₂ sous forme de calcaire grâce à des organismes bioconvertisseurs (projet européen CO2solstock⁴)

2) Dans le monde agricole et aquacole, **de nouvelles théories et pratiques** tirées de l'observation des écosystèmes naturels voient le jour. Découlant de l'agro-écologie⁵, elles participent à l'élaboration d'agro-écosystèmes plus durables.

A titre d'exemple, on peut citer les pratiques écomimétiques suivantes :

- Cultiver plusieurs espèces ou variétés sur une même parcelle (cultures associées)
- Diversifier les cultures et y associer du bétail (polyculture-élevage)
- Associer arbres et cultures (agro-foresterie)
- Avoir un couvert végétal permanent sur les exploitations
- Ne pas labourer le sol
- Conserver les haies vives, qui abritent de nombreux insectes utiles et protègent les cultures
- Etc

Ces pratiques peuvent être également transposées en aquaculture : association de plusieurs espèces, reconstitution des réseaux trophiques, épuration de l'eau par les algues...

3) Enfin, apparaissent de **nouveaux schémas d'organisation des systèmes industriels et commerciaux** inspirés de la nature :

- éco-conception et approche « cradle-to-cradle » (du berceau au berceau)
- écologie industrielle
- économie circulaire
- économie de fonctionnalité

Etant donné les contraintes de temps auxquelles cette étude a été soumise, l'étendue du sujet et les consignes données par la Commissaire générale au développement durable, **le présent rapport se concentrera sur les deux premiers groupes d'applications et n'en présentera que les exemples les plus opérationnels dans le contexte de l'économie verte.**

Nous entendrons ici le biomimétisme dans un sens large, incluant la bionique, la bio-assistance et la bio-inspiration.

La **bionique** est la science qui étudie les systèmes biologiques afin de développer des systèmes non biologiques susceptibles d'avoir des applications technologiques. Elle s'intéresse en particulier aux propriétés mécaniques du vivant et tente de les transposer dans le domaine de l'ingénierie. La bionique concerne donc la robotique, le développement de capteurs bio-inspirés, la biomécanique...

La **bio-assistance** 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 agro-écologie ou dans les biotechnologies (ex : utilisation d'enzymes pour catalyser des réactions dans l'industrie chimique).

La **bio-inspiration** est un terme plus général désignant le fait de s'inspirer du monde vivant pour créer de nouveaux objets ou procédés qui n'y sont pas présents naturellement. On parle souvent de bio-inspiration en design, en architecture et en science des matériaux.

⁴ www.co2solstock.eu/

⁵ L'agro-écologie est à la fois :

- la science qui considère les systèmes de production agricole comme des agro-écosystèmes, en croisant les savoirs issus de l'agronomie et de l'écologie
- un ensemble de pratiques agricoles découlant de cette science
- un mouvement, s'opposant à l'agriculture conventionnelle et prônant une approche globale des agro-écosystèmes

Alors qu'en français la « biomimétique » et le « biomimétisme » sont des termes souvent confondus (quand ils ne sont pas méconnus), les Anglo-Saxons distinguent deux approches très différentes :

- « *Biomimetics* », l'approche scientifique consistant à étudier et reconstituer artificiellement des fonctions remarquables du vivant. Utilisée en recherche et innovation, elle est pratiquée par les chercheurs et les ingénieurs dans de nombreux domaines (biochimie, biophysique, science des matériaux...), que ce soit pour valider un modèle scientifique au sein d'un projet de recherche ou pour développer des technologies maîtrisées. Elle ne s'inscrit quasiment jamais dans une démarche de développement durable. Dans certains cas, les innovations biomimétiques peuvent même être très polluantes.
- « *Biomimicry* », la philosophie portée par Janine Benyus⁶ selon laquelle les êtres humains doivent s'inspirer des fonctions et de l'organisation du vivant, héritées au cours de l'évolution, pour réconcilier leurs activités avec la biosphère et ainsi construire une société plus durable. Les associations et les cabinets de conseil se font le relais de cette deuxième approche, qui rejoint en plusieurs points l'approche « *Biomimetics* », mais y ajoute une exigence de durabilité. En pratique, la promotion de l'approche Biomimicry auprès des entreprises industrielles et commerciales consiste plus, aujourd'hui, en pratique, en une sensibilisation au développement durable (sous la forme de sensibilisation aux « Principes du Vivant »⁷), qu'en une aide technique à la transformation des modes d'innovation et de production.

Ces deux approches se distinguent donc par la nature de leurs acteurs, les domaines qu'elles touchent et l'exigence de durabilité comme principe directeur ou non. De fait, les liens entre biomimétisme et durabilité sont loin d'être évidents. La section suivante tentera de faire le point sur cette articulation qui est véritablement critique dans le cadre de cette étude. Par la suite, ces pistes de réflexion seront enrichies par des exemples concrets tirés de la sphère industrielle ainsi que du monde agricole.

c. Biomimétisme et durabilité

La nature a toujours été l'une des premières sources d'inspiration des êtres humains. Cependant, depuis quelques années, le biomimétisme est remis au goût du jour par différents acteurs (en particulier les associations⁸) qui appellent, à l'heure de la crise écologique et économique, à se tourner de nouveau vers le vivant pour en tirer des leçons de durabilité et modifier nos modes de production en conséquence.

En théorie, le biomimétisme présente un fort potentiel d'innovation dans le contexte de l'économie verte. L'évolution a sélectionné au fil du temps les propriétés conférant une meilleure valeur sélective aux individus, *i.e.* une plus grande capacité à se reproduire en donnant une descendance viable et fertile, dans un contexte donné. Ainsi, les systèmes imités sont très efficaces, sobres en énergie et en ressources naturelles, fonctionnant sur un mode d'optimisation plutôt que de maximisation. Au sein de la diversité du vivant, les fonctions généralement retenues par les humains dans leurs applications biomimétiques s'observent chez des organismes très éloignés dans la classification phylogénétique : ce sont des convergences évolutives. En outre, contrairement aux humains dans leurs activités, les organismes vivants produisent des matériaux, des fonctions et des organisations dans des conditions généralement standard de température et de pression, à partir de substances et d'énergies communes et renouvelables. Les substances qu'ils rejettent sont

⁶ Scientifique américaine, consultante en innovation et auteur du livre fondateur du mouvement éponyme : *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, Sept. 1, 1997 (sorti en français en mai 2011)

⁷ Principes énoncés par Janine Benyus dans son livre *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Voir figure 1.

⁸ Voir section I.2.b.iv consacrée aux associations internationales et françaises de promotion du biomimétisme

toujours à terme recyclées et ne perturbent pas l'équilibre global de l'écosystème : elles circulent entre les différents réservoirs de matière. La notion de déchet n'a pas de sens dans la nature. Les « Principes du Vivant » à l'origine de la démarche biomimétique sont résumés dans la figure 1. De plus, tous les atomes ne sont pas exploités de la même façon par les organismes vivants : le tableau périodique figurant en annexe 3 servira de base à notre définition des éléments « compatibles ou non avec la biosphère ».

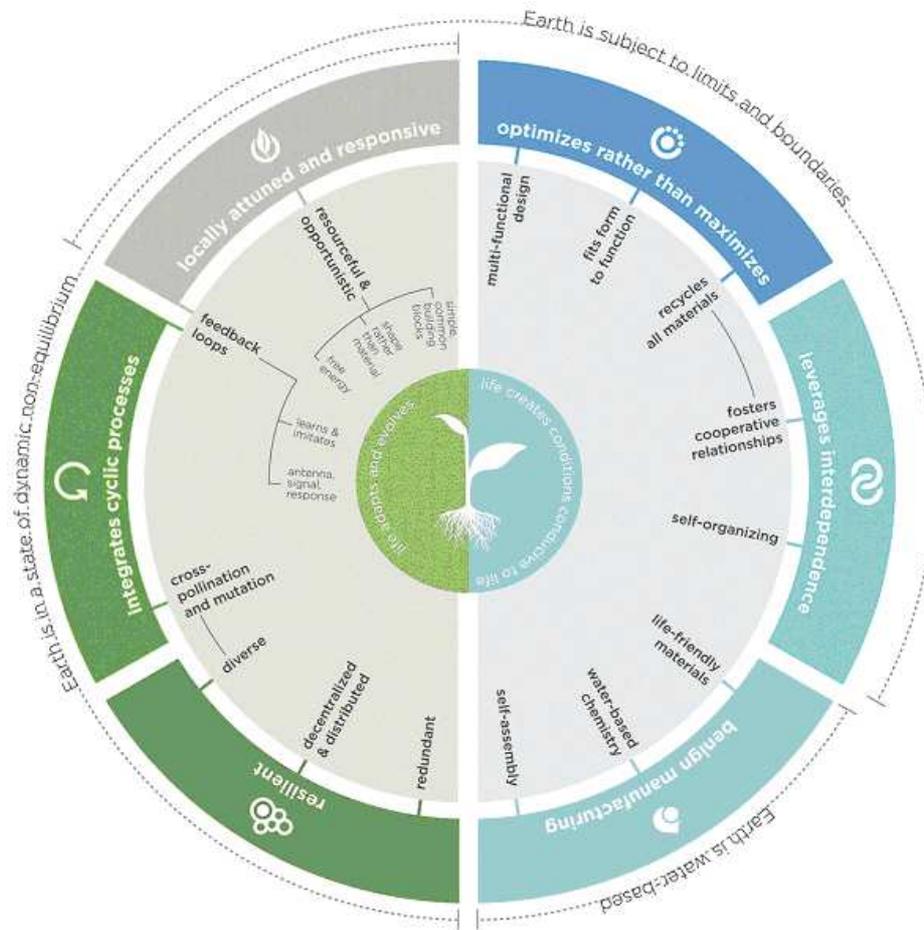


Figure 1. Les « Principes du Vivant », justifiant la durabilité de la démarche biomimétique⁹

En pratique, la relation entre biomimétisme et durabilité est loin d'être évidente, au moins dans le domaine technologique. Si le biomimétisme est aujourd'hui présenté par certaines entreprises et associations comme une méthode d'innovation de « rupture » dans le contexte de l'économie verte, nous verrons qu'il est nécessaire de ne le considérer que comme un outil parmi d'autres. En effet, à l'heure actuelle, il est encore très difficile de conclure quant aux bienfaits environnementaux du biomimétisme, à la fois par manque de données (peu d'analyses de cycle de vie de produits biomimétiques ont été réalisées) et par manque de transparence des entreprises commercialisant de tels produits. Quelques écueils sont à éviter lorsque l'on tente de concilier biomimétisme et durabilité.

« Biomimétisme est synonyme de durabilité » : NON

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 :

- produits biomimétiques toujours issus de dérivés du pétrole (ex : revêtements superhydrophobes inspirés du lotus),
- technologies biomimétiques faisant appel au génie génétique (ex : synthèse de fibres de soie d'araignée par des mammifères transgéniques),

⁹ Source : Biomimicry Guild 2009

- produits étant présentés comme « biomimétiques » à des fins commerciales (ex : moquettes imitant les motifs aléatoires du sol des forêts)
- innovations permettant des améliorations à la marge de l'impact environnemental de technologies existantes sans remettre en cause leur existence (ex : injecteurs d'essence plus efficaces dans le secteur automobile)...

« Les applications biomimétiques durables doivent toujours cette propriété au fait qu'elles appliquent les Principes du Vivant » : NON

Lorsqu'une application biomimétique présente des avantages environnementaux, elle ne les doit pas systématiquement aux « Principes du Vivant » énoncés par Janine Benyus. La fonction première du système imité peut avoir été détournée. Ainsi, les algues artificielles captant l'énergie des vagues produisent de l'électricité propre non pas car les algues en produisent naturellement, mais parce que les ingénieurs ont eu l'idée de s'inspirer de leur structure pour développer une nouvelle fonction. Il s'agit ici de bio-inspiration. L'éco-conception peut aussi être une manière d'améliorer l'impact environnemental d'un produit biomimétique, mais cette approche n'est pas toujours tirée d'une leçon du vivant.

« Le biomimétisme est un mode d'innovation de rupture » : OUI et NON

Certaines applications biomimétiques peuvent avoir vocation à réduire notre consommation d'énergie ou de ressources naturelles mais présenter néanmoins un cycle de vie peu ou pas amélioré. 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. Dans cet exemple, le biomimétisme est plus une méthode de *reengineering* qu'une rupture technologique.

Encadré 1. Biomimétisme et durabilité : des écueils à éviter

Isoler et imiter **une unique propriété** remarquable d'un être vivant peut s'avérer intéressant afin de réaliser une fonction nouvelle en matière technologique, mais ne permet pas toujours de s'affranchir des problèmes posés par sa reconstitution artificielle.

C'est en réalité **l'écomimétisme**, i.e. l'approche **intégrée** des systèmes de production agricoles et industriels, inspirée du fonctionnement des écosystèmes, qui semble *a priori* représenter les avantages environnementaux les plus prononcés.

La nature est donc une formidable source d'inspiration pour les ingénieurs, remise au goût du jour à l'heure actuelle. Le biomimétisme semble être une méthode de reengineering séduisante dans le contexte de l'économie verte, mais devant faire ses preuves. Dans la suite du rapport, des exemples concrets de produits et technologies biomimétiques nous permettront de juger des progrès environnementaux réalisés au niveau du cycle de vie ou constitués par la finalité même de ces applications.

d. Périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude est explicité dans la figure 2.

Comme nous l'avons montré précédemment, biomimétisme n'implique pas durabilité. C'est pourquoi nous nous intéresserons à l'intersection entre biomimétisme et durabilité, en ne retenant que deux champs d'applications qui y figurent, par souci de temps : l'agriculture et les filières industrielles vertes.

Les applications présentées répondront donc aux deux critères suivants :

- Le caractère biomimétique ou écomimétique

- Une durabilité significativement meilleure que les applications auxquelles elles se substituent

Nous nous efforcerons de mettre en avant les applications biomimétiques véritablement en rupture avec nos modes de production de biens et services actuels.

BIOMIMÉTISME

DURABILITÉ

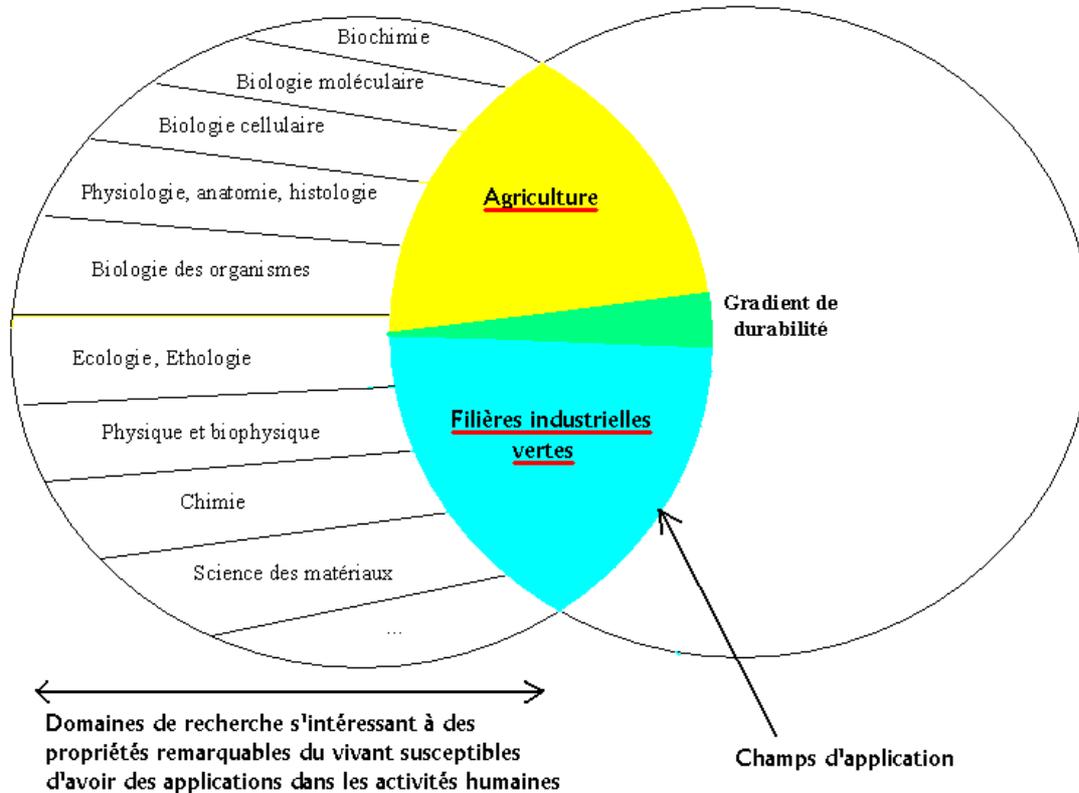


Figure 2. Biomimétisme et durabilité : cadrage du sujet de l'étude¹⁰

Pour délimiter plus précisément le périmètre de l'étude, au vu des contraintes de temps et des consignes données par la Commissaire Générale, nous retiendrons les points suivants :

Seront abordés :

- au sein de l'approche « *Biomimetics* » : les travaux de recherche et d'innovation susceptibles de conduire, directement ou indirectement, à une amélioration significative de l'impact environnemental des modes de production dans le contexte de l'économie verte
- au sein de l'approche « *Biomimicry* » : les exemples de produits, technologies et pratiques agricoles biomimétiques véritablement durables

Seront exclus :

- les applications présentées comme biomimétiques et durables mais ne l'étant pas (« *greenwashing* » inévitable à la lecture de certains rapports et articles grand public)
- les aspects philosophiques de l'approche Biomimicry (ex : réorganisation de la société en s'inspirant des écosystèmes, privilégiant la coopération plutôt que la compétition)

¹⁰ Schéma élaboré collectivement au cours de la première réunion de travail, faisant intervenir la DDD et la DRI.

- l'écomimétisme au sens large, que l'on retrouve dans l'écologie industrielle, l'économie circulaire, l'éco-conception...
- la médecine bio-inspirée
- l'architecture bioclimatique (les matériaux bio-inspirés pouvant néanmoins être abordés)

2. Les acteurs du biomimétisme et de l'écomimétisme

Nous présenterons dans un premier temps les acteurs du biomimétisme et de l'écomimétisme à l'échelle internationale, puis en détaillerons dans un second temps les acteurs français.

a. Acteurs internationaux

Selon des investisseurs suédois¹¹, la science biomimétique n'en est qu'à ses débuts, mais **elle est amenée à se développer** grâce en particulier à l'aide financière de l'industrie, en ce qui concerne son volet technologique. C'est, après le succès des biotechnologies, la nouvelle « **Mégatendance** » multidisciplinaire. Que l'on prenne en compte ou non le critère de durabilité, les acteurs de ce domaine émergent à l'échelle mondiale sont les suivants :

- Les **laboratoires de recherche publique** et les **réseaux de recherche**
- Les **entreprises**, parmi lesquelles :
 - Des **cabinets de conseil** promouvant le recours au biomimétisme pour l'innovation durable ou la gestion des conflits en entreprise
 - Des **start-ups et PME** développant de nouvelles technologies biomimétiques dans des secteurs particuliers (ex : énergies renouvelables, traitement des eaux usées...)
 - De **grands groupes** intéressés par la bio-inspiration, faisant parfois de la R&D dans ce domaine et/ou commercialisant des produits bio-inspirés.
- Le **milieu associatif**
- Les **universités et grandes écoles** par leur activité de **formation**

Ces acteurs seront détaillés dans les sections ci-dessous. Cependant, d'autres acteurs jouent un rôle également important :

- Les **agriculteurs, les pêcheurs et les forestiers**, dans le domaine de l'éco-mimétisme
- Des **experts en économie et finance** (ex : le Fermanian Economic and Business Institute de San Diego),
- Les **décideurs publics** et « institutionnels de l'innovation » : gouvernements et ministères, collectivités territoriales, agences et établissements publics... (ex : soutien du gouvernement allemand au réseau BLOKON),
- La **presse** scientifique et grand public.

i. Laboratoires et réseaux de recherche internationaux

Une liste non exhaustive des laboratoires de recherche étrangers travaillant sur des thématiques en lien avec le biomimétisme figure en annexe 4. Le critère de durabilité n'a ici pas été retenu, compte tenu de la diversité des projets de recherche de ces laboratoires et de leurs potentielles applications.

On remarquera que l'Allemagne, le Royaume-Uni et les Etats-Unis sont très investis dans ce champ de recherche, ainsi que la Chine et le Japon.

¹¹ Conférence donnée par Lars-Uno Larsson, président de l'entreprise Swedish Biomimetic 3000, et Andrew Copestake, directeur général, lors de la *International Bionic Engineering Conference* en septembre 2011

Aux Etats-Unis, le Zoo de San Diego souhaite que la région devienne une plateforme mondiale du biomimétisme et a participé à la création d'un réseau local nommé BIOMIMICRY BRIDGE (Biomimicry Business, Research, Innovation, Design, Governance, and Education). Celui-ci se définit comme un « réseau de recherche et collaboration promouvant le biomimétisme comme un nouveau paradigme en matière de recherche, d'éducation, d'innovation et d'investissement, afin de créer un monde plus durable ». Il fait intervenir des chercheurs, des industriels, des économistes, des professeurs... Plus d'informations sont disponibles sur son site internet¹².

Outre les laboratoires mentionnés en annexe 4, l'Europe possède un réseau international de recherche consacré à la bionique, à la bio-inspiration et au biomimétisme¹³ : le réseau BIODON international (voir ci-dessous).

Nom du réseau	BIODON international – The Biomimetics Association
Date et lieu de création	Créé en 2009 en Allemagne
Site internet	www.biodon-international.com
Mission	<p>BIODON international regroupe des scientifiques et des institutions qui travaillent au développement du biomimétisme, de la bionique et de technologies bio-inspirées. Née en Europe, cette organisation à but non lucratif œuvre à la mise en place d'un réseau d'excellence en matière de biomimétisme. Le but du réseau est de coordonner les différents efforts européens et internationaux afin de promouvoir la recherche et l'innovation en biomimétisme, en favorisant le partage d'informations entre les acteurs. Il souhaite faire du biomimétisme une source d'inspiration opérationnelle pour l'innovation technologique, le monde des affaires et la société dans son ensemble.</p> <p>Les missions de BIODON international sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - mettre en commun les ressources et compétences dans le domaine du biomimétisme, de la bionique et des technologies bio-inspirées - renforcer les contacts interdisciplinaires et la coopération (R&D, éducation/formation, applications industrielles) - améliorer la visibilité du biomimétisme et trouver de nouvelles sources de financement - faire émerger le terme de « biomimétisme » dans les projets de R&D soutenus par l'Union européenne - mener des projets internationaux de recherche, développement ou mise en œuvre d'applications biomimétiques - favoriser le transfert de technologies et de connaissances - organiser des événements à destination de la communauté scientifique ou du grand public - favoriser l'éducation et la formation en biomimétisme - agir comme groupe de pression dans le monde scientifique, politique ou des affaires - renforcer la compétitivité du biomimétisme
Partenaires	BIODON international fait intervenir différents européens pré-existants :

¹² www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/biomimicry/biomimicry_bridge

¹³ Pour rappel : nous avons au début du rapport inclus bionique et bio-inspiration dans le terme biomimétisme, mais ici les termes employés par BIODON International sont distincts.

	<ul style="list-style-type: none"> - BIOKON (Allemagne, créé en 2001) - BIONIS (Royaume-Uni, créé en 2002 mais en perte de vitesse actuellement) - Bionik Austria (Autriche) - Réseau Bionique Français (France, animé grâce au soutien de l'ANR jusqu'à fin 2010) <p>De nouvelles coopérations sont en cours avec d'autres associations biomimétiques en Europe, mais aussi aux Etats-Unis ou en Chine. Des partenariats ont également été noués avec des organisations gouvernementales ou non gouvernementales et des bailleurs de fonds.</p>
Impact en France	Seul membre français du réseau : Jérôme Casas, chercheur à l'Institut de recherche sur la biologie de l'insecte, Université de Tours – CNRS. Selon lui, le réseau n'a pas d'impact en France.
Contact	contact@biokon-international.com

Autre atout en Europe : l'**Agence spatiale européenne** mène des travaux de recherche sur le biomimétisme et la bio-ingénierie au sein de l'équipe « Concepts avancés » (ACT) du Bureau des affaires institutionnelles et des études stratégiques. Les objets d'étude actuels en biomimétisme sont les suivants :

- mécanismes biochimiques de mise en place des racines dans les sols
- déplacement des fourmis et application à la robotique
- vision et stratégies d'atterrissage des insectes pour améliorer celui des engins spatiaux

L'ASE a travaillé par le passé sur les mécanismes d'adhésion « secs » inspirés du Velcro et des araignées, les joints biomimétiques, l'utilisation du design bio-inspiré dans l'aérospatiale, les muscles artificiels et les techniques de forage des insectes.

Par ailleurs, la presse scientifique compte depuis 2006 la revue *Bioinspiration&Biomimetics*, spécialisée dans la « publication de travaux de recherche qui appliquent les principes des systèmes naturels dans le domaine de l'ingénierie et de la technologie »¹⁴. Le directeur du journal est Robert Allen, de l'Université de Southampton (Royaume-Uni).

*Dans le domaine de la recherche, l'Europe a donc plusieurs atouts pour le développement de la bionique et du biomimétisme. L'Allemagne y fait figure de leader car il existe une convergence très forte entre les chercheurs du secteur public, les PME (proposant souvent des thèses), les associations et les formations universitaires (il existe des Masters de biomimétisme dans six universités)*¹⁵.

ii. Entreprises

Au sein du secteur privé, on distingue trois catégories d'entreprises liées au biomimétisme :

- Des **cabinets de conseil** promouvant le recours au biomimétisme pour l'innovation durable ou la gestion des conflits en entreprise
- Des **start-ups et PME** développant de nouvelles technologies biomimétiques dans des secteurs particuliers

¹⁴ Site officiel du journal : <http://iopscience.iop.org/1748-3190>

¹⁵ D'après un entretien avec Jérôme Casas, représentant français du réseau BIONIS International

- De **grands groupes** intéressés par la bio-inspiration, faisant parfois de la R&D dans ce domaine et/ou commercialisant des produits bio-inspirés.

Pour chacun de ces trois types, les entreprises les plus connues sont présentées dans les tableaux ci-dessous. Ce **panorama n'est pas exhaustif** mais se veut représentatif des différentes dynamiques engendrées par le biomimétisme aujourd'hui.

- **1^{er} type : Conseil en innovation biomimétique**

Nom	Biomimicry Guild
Pays	Etats-Unis
Site internet	www.biomimicryguild.com/indexguild.html
Activité	Cabinet de conseil en innovation fondé par Janine Benyus en 1998. Il s'appuie sur la « sagesse de la nature » pour favoriser la création de produits et processus durables, i.e. compatibles avec la biosphère. En pratique : conseil en durabilité, expertise, ateliers sur le biomimétisme, production de rapport de recherche, sorties sur le terrain.
Contact	habitat@biomimicryguild.com

Nom	BCI: Biomimicry for Creative Innovation
Pays	Royaume-Uni
Activité	Conseil en développement durable selon les « Principes du Vivant ». BCI est une antenne anglaise du Biomimicry Guild. Ce cabinet de conseil s'intéresse particulièrement à l'élaboration d'un nouveau <i>business model</i> inspiré de la nature, centré sur la durabilité et la résilience plutôt que sur la productivité et le profit.

Nom	Greenloop
Pays	Belgique
Site internet	www.greenloop.eu Projet CO2SolStock : www.co2solstock.eu/
Activité	Conseil en durabilité, R&D, conception biomimétique, conférences diverses. Un de leurs principaux projets de R&D est le stockage durable du CO ₂ sous forme de calcaire en exploitant le procédé de biominéralisation présenté par certaines bactéries : c'est le projet CO2SolStock.
Contact	Gauthier Chapelle, directeur scientifique et co-fondateur : gauthier.chapelle@greenloop.eu

- **2^e type : Développement de produits et technologies biomimétiques**

Nom	Swedish Biomimetics 3000
Pays	Siège : Suède Autres bureaux (virtuels parfois) : Australie, Royaume-Uni, Japon, Danemark, Etats-Unis
Site internet	www.swedishbiomimetics.com/index.htm
Activité	SB 3000 se définit comme une entreprise « accélératrice d'innovation » dont la mission est de financer et soutenir une recherche appliquée à partir des concepts du biomimétisme, afin de développer des applications ayant de réels débouchés sur le marché. Elle y parvient

	en apportant des financements au moment du développement des produits biomimétiques, pour combler le gap financier existant généralement entre les étapes de recherche fondamentale et de commercialisation des produits. SB3000 développe des plates-formes technologiques autour de procédés biomimétiques ayant un fort potentiel économique, comme le procédé μ Mist®, qui a des applications dans l'industrie automobile (injecteurs de carburant) ou pharmaceutique (sprays sans gaz à effet de serre).
--	---

*Par souci d'efficacité, on se concentrera par la suite sur des exemples d'entreprises développant des **énergies renouvelables biomimétiques**.*

Nom	BioPower Systems Pty Ltd
Pays	Australie
Site internet	www.biopowersystems.com
Activité	Systèmes innovants pour capter l'énergie des vagues et des courants de manière biomimétique : <ul style="list-style-type: none"> - bioWAVE™ transforme l'énergie des vagues en électricité par un système imitant les mouvements des grandes espèces d'algues sous-marines - bioSTREAM™ transforme l'énergie des courants marins en électricité par un système imitant les mouvements de la queue de requin et de thon

Nom	The Engineering Business Limited of Riding Mill
Pays	Royaume-Uni
Site internet	www.engb.com/index.php
Activité	Technologie de captage de l'énergie des courants qui imite les mouvements de la queue de baleine. Elle se présente sous la forme d'une double queue de baleine oscillant au gré des courants et posée sur un cylindre.
Contact	team@engb.com

Nom	Sun Catalytix
Pays	Etats-Unis
Activité	Développement et vente de catalyseurs dissociant l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un rayonnement lumineux, en imitant le principe de la photosynthèse. Cette technologie repose sur les récentes découvertes du chercheur Daniel Nocera du Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Nom	SolarBotanic
Pays	Lettonie
Site internet	www.solarbotanic.com/
Activité	Développement d'arbres artificiels composés de Nanofeuilles (un brevet a été déposé) utilisant l'énergie du soleil et du vent pour produire de l'électricité. L'entreprise est experte en technologie photovoltaïque, thermovoltaïque et piezovoltaïque. L'électricité ainsi produite peut être utilisée pour alimenter une habitation ou une voiture électrique.

Nom	Whale Power
Pays	Canada
Site internet	www.whalepower.com/drupal/

Activité	Développement de pales imitant la structure de la nageoire de baleine pour limiter la résistance lors de la pénétration dans un fluide. Applications : pales d'éoliennes et de ventilateurs plus efficaces.
-----------------	---

- **3^e type : Grandes entreprises intéressées par le biomimétisme, ayant parfois recours à la bio-inspiration**

De nombreuses grandes entreprises se disent intéressées par le biomimétisme comme méthode d'innovation durable. Il est cependant difficile de distinguer celles qui consultent simplement des cabinets de conseil en biomimétisme pour obtenir des informations générales, celles qui font appel à des produits ou technologies biomimétiques comme celles présentées précédemment, ou encore celles qui font elles-mêmes de la R&D en biomimétisme. En effet, la taille de ces entreprises, leur structure pyramidale et la confidentialité de leurs travaux rendent difficile l'acquisition de données précises sur la nature des projets faisant intervenir le biomimétisme.

En l'absence d'une liste internationale des entreprises s'intéressant au biomimétisme, la figure 3 présente un panorama non exhaustif d'acteurs privés selon leur secteur d'activité.

Alimentation :

- Pepsi (Etats Unis)

Chimie/Construction :

- AkzoNobel (Pays-Bas)
- Lafarge (France)
- Saint Gobain (France)

Santé, hygiène, cosmétiques, produits de beauté :

- Schwarzkopf (Allemagne)
- Johnson & Johnson (Etats-Unis)
- Bausch & Lomb (Etats-Unis)
- Procter & Gamble (Etats-Unis)
- L'Oréal (France)

Cabinets de conseil :

- Arup

- Atos

Textiles, Sport :

- Petzl (France)
- Nike (Etats-Unis)
- Levi's (Etats-Unis)

Transport :

- Constructeurs du Shinkansen (Japon)
- NASA (Etats-Unis)
- Airbus (France)
- Volkswagen (Allemagne)
- ESA (Union européenne)

Appareils électriques/Informatique :

- General Electrics (Etats-Unis)
- IBM (Etats-Unis)

Figure 3. Quelques grandes entreprises s'intéressant à la bio-inspiration à l'échelle mondiale¹⁶

Un ensemble plus large d'entreprises françaises intéressées par le biomimétisme sera repris dans la partie du rapport consacrée aux acteurs français.

¹⁶ Ces noms ont été recueillis au cours de conférences, d'entretiens ou de lectures sur le biomimétisme, et en particulier à Boston au cours de la *International Bionic Engineering Conference 2011*. Ces entreprises étaient citées dans le diaporama d'ouverture de la conférence. Il n'était pas précisé dans quel cadre ces entreprises s'intéressent au biomimétisme.

iii. Associations internationales de promotion du biomimétisme

La seule association de promotion du biomimétisme dont la portée est internationale à l'heure actuelle est le Biomimicry Institute, fondé par Janine Benyus en 2006. Cependant, il existe de nombreuses associations régionales ou nationales consacrées au biomimétisme dans différents pays.

Nom	Biomimicry Institute
Date et lieu de création	Créé en 2006 aux Etats-Unis par Janine Benyus
Mission	<p>Organisation à but non lucratif de promotion du biomimétisme, en particulier par l'éducation. Ses missions sont : développer des programmes éducatifs pour les étudiants, les professionnels et le grand public ; participer à l'élaboration de politiques publiques de développement durable s'appuyant sur le biomimétisme ; encourager les entreprises développant des produits et technologies biomimétiques à financer la protection de la biodiversité en retour. L'Institut ne mène pas de recherches lui-même.</p> <p>Depuis 2011, le Biomimicry Institute fait partie du réseau Biomimicry 3.8 qui regroupe les différentes organisations ayant vu le jour autour de la notion de « <i>Biomimicry</i> » :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le cabinet Biomimicry Guild - L'association Biomimicry Institute - La base de données AskNature, créée en 2008, recensant de nombreuses propriétés remarquables du vivant, réparties en plus de 150 « fonctions » dans une Taxinomie Biomimétique, et leur associant de potentielles applications technologiques. - La plateforme « Biomimicry Professional Pathways » copilotée par le Biomimicry Institute et le Biomimicry Guild.

Nom	Biomimicry Europa
Date et lieu de création	Créée en 2006 en Belgique par Gauthier Chapelle
Site internet	www.biomimicry.eu/
Mission	<p>Biomimicry Europa est le relais européen du Biomimicry Institute. Sa mission est de promouvoir le biomimétisme en Europe en :</p> <ul style="list-style-type: none"> - diffusant les connaissances sur le biomimétisme par les moyens appropriés (expositions, conférences...) - favorisant la rencontre entre les acteurs de différentes disciplines se reconnaissant dans l'approche biomimétique - agissant auprès de la Commission européenne pour construire un réseau européen du biomimétisme <p><i>« L'association rassemble des biologistes, physiciens, chimistes, ingénieurs, architectes, professionnels de l'entreprise et des collectivités territoriales qui partagent la conviction</i></p>

	<p><i>de la nécessité d'un profond changement de notre mode de développement. Ainsi face aux limites de notre développement actuel et à son impact sur l'environnement, le climat, l'énergie, l'alimentation et la biodiversité, Biomimicry Europa, propose, à travers la diffusion et l'expérimentation du biomimétisme, de :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Comprendre la durabilité pour mieux s'adapter aux changements</i> • <i>Inspirer les territoires, entreprises et individus grâce à 3,8 milliards d'années de recherche et développement du monde vivant</i> • <i>Innover vers une économie et des organisations durables, intégrant la complexité, et en harmonie avec leur environnement. »</i>
--	---

Date et lieu de création	Créé en 1994 au Japon par Gunter Pauli
Site internet	www.zeri.org
Mission	<p>La fondation ZERI est un réseau international d'acteurs cherchant des solutions innovantes et durables aux problèmes actuels, en utilisant en particulier les principes de la Nature comme source d'inspiration. S'appuyant sur des travaux scientifiques, ZERI tente d'identifier les industries qui seront les plus créatrices d'emploi dans la décennie à venir et les technologies qui transformeront les <i>business models</i> actuels.</p> <p>Son fondateur, Gunter Pauli, est le père de l'économie bleue : une économie circulaire, solidaire et respectueuse de l'environnement, reposant sur le bio- et l'écomimétisme. Il est l'auteur du livre <i>Les nouveaux entrepreneurs du développement durable : 50 brillants exemples de l'économie bleue</i>, éd. Caillade, 2011.</p>

Nom	Bioneers – The Collective Heritage Institute
Date et lieu de création	Créée en 1990 aux Etats-Unis
Site internet	www.bioneers.org/
Mission	<p>Bioneers est une association de promotion de solutions innovantes dans le contexte du développement durable, reposant sur le génie de la nature et la créativité humaine. Sa philosophie est de considérer la vie comme un ensemble d'individus interdépendants et de mettre ces principes en pratique dans différents domaines (par exemple en agriculture biologique). Son rôle est de connecter les innovateurs de toutes les disciplines : exploitants agricoles, professeurs, scientifiques ou encore acteurs de la justice sociale. Bioneers organise des ateliers dans les écoles et une conférence annuelle à San Rafael, Etats-Unis.</p>

Nom	Biomimicry Netherlands
Date et lieu de création	Créée en 2011 aux Pays-Bas par Bas Sanders
Site internet	www.biomimicrynl.org/en/
Mission	<p>Promotion du biomimétisme comme source d'innovation durable.</p> <p>En cours de partenariat avec le Biomimicry Institute and Biomimicry Guild.</p>

Les associations spécifiquement françaises de promotion du biomimétisme seront évoquées dans la section I.2.b.iv.

iv. Formations au biomimétisme

De nombreuses formations sur le biomimétisme, de différentes natures, sont dispensées dans le monde :

- formations à la bionique et l'ingénierie bio-inspirée, par des universités ou instituts technologiques
- formations à certains domaines spécifiques du biomimétisme comme la robotique, par des centres spécialisés
- formations générales à l'approche Biomimicry, par des acteurs comme le Biomimicry Institute

Une liste non exhaustive des formations au biomimétisme dans le monde entier peut être trouvée en annexe 5.

A l'échelle mondiale, de nombreux acteurs s'intéressent ou se ré-intéressent au biomimétisme, en particulier dans le secteur industriel. Aux Etats-Unis ou en Allemagne, des rapprochements entre la recherche, les entreprises et les programmes de formation universitaires permettent le développement d'un nombre grandissant d'applications biomimétiques. Cependant, si le biomimétisme présente un fort potentiel économique, l'industrie biomimétique en plein essor à l'heure actuelle n'a pas directement vocation à répondre aux enjeux du développement durable.

b. Acteurs français

Comme dans la partie précédente, nous présenterons d'abord les laboratoires de recherche travaillant sur le biomimétisme, puis les quelques entreprises françaises s'intéressant à cette thématique, et enfin les associations en faisant la promotion à l'échelle nationale.

i. Laboratoires de recherche

Si la France est globalement en retard dans le domaine du biomimétisme par rapport à ses voisins allemands, aux pays anglo-saxons, au Japon ou à la Chine, elle compte néanmoins de nombreuses équipes de recherche travaillant sur des thématiques liées au biomimétisme. L'ensemble de ces équipes est répertorié dans le tableau 1.

Remarque : Appliquer le critère de durabilité pour « filtrer » les équipes de recherche en biomimétisme n'est pas pertinent à ce stade, puisque d'une part les projets de recherche n'ont jamais directement vocation à résoudre des problèmes de développement durable, et d'autre part ce sont parfois des découvertes faites dans des champs de recherche inattendus qui conduisent aux applications les plus révolutionnaires. Les seuls critères retenus dans le choix de ces équipes sont donc **l'étude et l'imitation artificielle de propriétés remarquables de la nature**, qu'elles appartiennent à des organismes vivants ou à des écosystèmes entiers.

Domaine	Thématique en lien avec le biomimétisme	Equipe et projet
Biochimie, biologie cellulaire, physiologie	Biomimétisme en biologie moléculaire et cellulaire	<ul style="list-style-type: none"> • « Hélicases et ARN : mécanismes, ciblage et biomimétisme », CNRS Centre de biophysique moléculaire UPR 4301, Orléans • « Génie Enzymatique, Membranes Biomimétiques et Assemblages Supramoléculaires », Université Claude Bernard Lyon 1 – CNRS • « Auto-assemblages biomimétiques », Franck Artzner, Institut de physique de Rennes, (ex-Groupe de Matière condensée et matériaux), CNRS, Université de Rennes 1. • « Biomimétisme du mouvement cellulaire », Cécile Sykes, Institut Curie
	Biocatalyse, biomimétisme en chimie verte	<ul style="list-style-type: none"> • « Biocatalyse », Marc Fontecave, Vincent Artero, Unité Chimie et Biologie des Métaux (CBM), Institut de Recherches en Technologies et Sciences pour le Vivant (iRTSV), Direction des Sciences du Vivant, CEA • « Biocatalyse Supramoléculaire et Anisotrope », Génie Enzymatique et Cellulaire, Université de Picardie Jules Verne, UTC, CNRS, INSERM, INRA, ENSCP (Paris) • « Chimie exploratoire et appliquée des substances naturelles » Ali Al Mourabit, Institut de Chimie des Substances Naturelles, CNRS • « Chimie Inorganique Redox », Département de Chimie Moléculaire - CNRS, Université Joseph Fourier (Grenoble) • « Catalyseurs facilement recyclables », Ingénierie des matériaux fonctionnels, Chimie et Interdisciplinarité : Synthèse, Analyse, Modélisations (CEISAM), Université de Nantes, Faculté des Sciences et Techniques • « Biopiles et biocapteurs » (<i>Mise au point de biopiles générant un courant électrique à partir de glucose et oxygène</i>), Centre de Recherche Paul Pascal, Université de Bordeaux, CNRS

	<p>Photocatalyse, photosynthèse artificielle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • « Photoproduction d'hydrogène par voie biologique ou biomimétique », Laboratoire de photocatalyse et biohydrogène, Institut de biologie et de technologies de Saclay, Direction des Sciences du Vivant, CEA • « Bioénergétique moléculaire et photosynthèse » Alfred Rutherford, Institut de biologie et de technologies de Saclay, Direction des Sciences du Vivant, CEA • « Photocatalyse » Laboratoire des Matériaux, Surfaces et Procédés pour la Catalyse (LMSPC), Université de Strasbourg, CNRS • « Photosynthèse Artificielle », Laboratoire de chimie inorganique, Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay (CNRS, Université Paris 11 Sud) – laboratoire correspondant du CEA • « Photosynthèse Artificielle », Ingénierie des matériaux fonctionnels, Chimie et Interdisciplinarité : Synthèse, Analyse, Modélisations (CEISAM), Université de Nantes, Faculté des Sciences et Techniques • « Matériaux hybrides et nanomatériaux » Clément Sanchez, Laboratoire de chimie de la matière condensée de Paris, CNRS, Collège de France, UPMC, ENSCP, EPHE
	<p>Physiologie, écophysiologie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • « Ecophysiologie fonctionnelle » (<i>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</i>), Yvon Le Maho, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, CNRS, Université de Strasbourg • Nombreuses équipes de recherche travaillant à la mise au point de tissus, organes et membres humains artificiels (os, muscle, peau, main entière...)
	<p>Nano-technologies bio-inspirées</p>	<ul style="list-style-type: none"> • « Nanotechnologies bio-inspirées », Genopole d'Evry

<p>Physique, biophysique et science des matériaux</p>	<p>Matériaux bio-inspirés</p>	<ul style="list-style-type: none"> • « Matériaux et biologie » (<i>Imitation physico-chimique de la synthèse de fibres de verre par différents organismes vivants</i>), Thibaud Coradin, Laboratoire de chimie de la matière condensée de Paris, CNRS, Collège de France, UPMC, ENSCP, EPHE • Laboratoire de synthèse et fonctionnalisation des céramiques (<i>Imitation de la structure de la coquille de l'ormeau</i>), Sylvain Delville, CNRS-Institut de Chimie/Saint-Gobain • « Matériaux naturels et biomimétiques », Réseau BRESMAT (SBR, CEMCA, LIMATB, IPR, ENSCR, CEVA), animé par Anne Renault et Yves Grohens • « Chimie biomimétique des matériaux de transition », Dominique Mandon, Faculté de Chimie de Strasbourg, Université de Strasbourg • « Interface matériaux matières biologiques », Laboratoire des matériaux et du génie physique (CNRS, INP Grenoble, Minatec) • « Matériaux : Ingénierie et Science », Faculté des Sciences et Technologies, Université C. Bernard Lyon 1 • Laboratoire Science et ingénierie des matériaux et des procédés de Grenoble (SIMAP), Yves Bréchet, INPG Grenoble • « Phosphates de calcium biomimétiques », Christophe Drouet, Institut Carnot CIRIMAT • « Matériaux biomimétiques », Corinne Chevillard, Service de Chimie Moléculaire, Laboratoire Interdisciplinaire sur l'Organisation Nanométrique et Supra Moléculaire (LIONS), CEA
	<p>Fluides et surfaces biologiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • « Gouttes » (<i>Surfaces superhydrophobes inspirées du lotus</i>), Laboratoire Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, ESPCI, UPMC, Université Paris-Diderot - Paris 7, CNRS • « Hydrodynamique aux interfaces » (<i>Surfaces superhydrophobes inspirées du lotus</i>), Laboratoire LadHyX (Laboratoire d'Hydrodynamique de l'École polytechnique), École polytechnique

	Propriétés optiques du vivant	<ul style="list-style-type: none"> • « Structures photoniques naturelles » (<i>en particulier ailes du papillon Morpho</i>) <p>Serge Berthier, Laboratoire d'optique des solides, INSP, CNRS-Université Paris 6</p>
	Biomécanique	<ul style="list-style-type: none"> • « Biomécanique et biomimétisme de mouvements rapides de végétaux », <p>Laboratoire Physique de la matière condensée, CNRS, Université Nice Sophia Antipolis</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Biomécanique & biomimétique végétale », <p>Emmanuel de Langre, Pascal Hémon, Laboratoire d'hydrodynamique, Ecole polytechnique ParisTech</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Pôle biomécanique – Fibres et interfaces » (<i>en particulier mise au point de valves cardiaques artificielles</i>) <p>Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, ENSIA</p>
	Robotique, déplacement et intelligence artificielle	<ul style="list-style-type: none"> • « Integrated, Mobile and Autonomous System », <p>Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, UPMC, CNRS</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Locomotion et biomimétisme », <p>Laboratoire Matière et systèmes complexes, CNRS, Université Paris-Diderot</p> <ul style="list-style-type: none"> • Projet Remanta, « Drones à ailes battantes », <p>ONERA</p>
	Capteurs biomimétiques	<ul style="list-style-type: none"> • « Microcapteurs Microsystèmes Biomédicaux », <p>André Dittmar, Laboratoire de Physique de la Matière - UMR 5511 CNRS/INSA de Lyon</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Micro Electronical Mechanical Systems (MEMS) sensors », Bio-inspired Engineering <p>Jérôme Casas, Institut de recherche sur la biologie de l'insecte, Université de Tours – CNRS</p>
Agro-écologie	Couverts multispécifiques , semis direct sous couvert végétal permanent, successions écologiques	Nombreuses équipes à l'INRA, au CIRAD, à AgroParisTech...
	Agroforesterie	Nombreuses équipes à l'INRA, au CIRAD, à AgroParisTech, à l'IRD...

	Intensification écologique en aquaculture	<p>Nombreuses équipes à l'INRA, au CIRAD, à l'IRD, à l'Ifremer, dont en particulier :</p> <ul style="list-style-type: none"> • « Intensification Raisonnée et Ecologique pour une Pisciculture Durable » <p>Jean-Francois Barroiller, UMR INTREPID, CIRAD</p>
--	---	--

Tableau 1. Equipes de recherches travaillant sur le biomimétisme en France

Parmi ces projets de recherche, certains sont susceptibles de déboucher sur des applications particulièrement intéressantes dans le contexte de l'économie verte. Celles-ci seront détaillées dans les parties du rapport consacrées aux applications industrielles et agricoles du biomimétisme.

ii. Entreprises

Outre ses équipes de recherche universitaire travaillant sur le biomimétisme, la France compte également des ingénieurs et industriels s'intéressant à ce domaine, principalement dans quelques PME pionnières ou à travers les programmes de R&D de certaines grandes entreprises, dans des secteurs variés : Agroalimentaire, Chimie/Pétrochimie, Construction/Infrastructures, Environnement, Pharmaceutique, Cosmétiques/Produits de beauté, Sport, Transport...

Cependant la France ne connaît pas encore le foisonnement de PME spécialisées dans le développement de produits ou technologies biomimétiques comme ce peut être le cas à l'étranger. Par conséquent, quasiment aucun produit ou technologie à la fois biomimétique et durable n'est actuellement en vente sur le marché.

Le seul cabinet de conseil français identifié par cette étude comme s'intéressant au biomimétisme est le cabinet de conseil et ingénierie en développement durable Inddigo.

Nom	Inddigo
Lieu	Paris, Nantes, Toulouse, Montpellier, Marseille, Chambéry, Dijon et Nancy
Site internet	www.inddigo.com
Activité	<p>Conseil et ingénierie en développement durable.</p> <p>Activités en lien avec le biomimétisme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Projet sur l'approche biomimétique des éco-quartiers - Projet sur les bâtiments biomimétiques <p>→ DOCUMENT DÉTAILLÉ EN ANNEXE 6</p>

A titre informatif, selon des membres des pôles de compétitivité du réseau Ecotech¹⁷, les industries françaises sont très investies dans les secteurs de **l'éco-conception** et de **l'écologie industrielle**, secteurs qui peuvent relever de l'écomimétisme mais ne sont pas abordés dans cette étude.

D'autre part, la France est perçue par les personnes rencontrées à la *International Bionic Engineering Conference 2011* à Boston comme un pays **capable de changer la donne à l'échelle européenne** si elle encourageait le développement des technologies biomimétiques.

¹⁷ Présentation du programme Economie circulaire lors de la réunion du réseau Ecotech, le 18 octobre 2011

Pôles de compétitivité et biomimétisme

Aucun des pôles de compétitivité ne paraît s'intéresser directement au biomimétisme à l'heure actuelle dans ses activités¹⁸ excepté le Pôle Fibres. Néanmoins, depuis 2009 des membres du Pôle Fibres œuvrent à la création d'un fonds de dotation nommé « Biomimethic », destiné à financer de façon continue des projets portant sur les matériaux, l'écologie industrielle et l'éco-conception, s'inspirant de la nature.

Selon Karl Gedda, délégué général du Pôle Fibres, « *le biomimétisme nous amène à revoir nos modes de conception (éco-conception), nos systèmes de production (écologie industrielle) et nos matériaux en amont de l'éco-conception* ».

Les missions de ce fonds, « axées matériau », seraient :

- informer/sensibiliser le public au biomimétisme,
- dynamiser les acteurs, encourager l'excellence,
- mobiliser l'intelligence de la recherche (par exemple en finançant des chaires sur l'écologie industrielle),
- développer un espace d'échange pour les entreprises, dans une démarche de *think-tank* traitant de thématiques sociales et environnementales.

Le fonds Biomimethic devrait voir le jour en 2012. Une présentation plus détaillée de ce projet est disponible en annexe 7.

iii. AFNOR (Association Française de Normalisation)

Le 15 mai 2011, l'Institut allemand de normalisation (DIN) a soumis à l'ISO¹⁹ une proposition visant à créer un nouveau domaine de normalisation concernant « les méthodes et approches du biomimétisme, incluant les résultats les plus récents des projets de R&D »²⁰. A l'échelle nationale, AFNOR a donc lancé en juin 2011 une enquête²¹ sur le biomimétisme auprès de différents Comités stratégiques (CoS) et Commissions de normalisation (CN). **Quelques résultats de cette enquête et l'état d'avancement du projet à l'échelle internationale seront présentés dans la partie II.3.**

Le Comité stratégique référent proposé lors de l'instruction par AFNOR est le CoS « Ingénierie industrielle, biens d'équipement et matériaux ».

iv. Associations

Plusieurs associations françaises font la promotion du biomimétisme à l'échelle nationale.

Les deux premières associations figurant dans les tableaux ci-dessous (Biomimicry Europa et ICDD) ont montré un intérêt très vif pour les travaux du CGDD sur le biomimétisme, et souhaitent y être associées. Nous leur avons donc proposé de rédiger un petit document dans lequel :

- Elles se présentent de façon plus détaillée
- Elles disent de quelle façon elles abordent la thématique du biomimétisme dans leurs activités

¹⁸ D'après un travail préliminaire de Jean-Michel Kehr, MEDDTL/CGDD/DRI/SDI

¹⁹ Organisation internationale de normalisation

²⁰ AFNOR normalisation, Document N 339 (20/06/2011), *Biomimétisme – Création de nouveau domaine de normalisation*, CoS référent : "Ingénierie industrielle, Biens d'équipement et matériaux"

²¹ Ibid

- Elles donnent des contacts directs au sein de leur association
- Ces documents peuvent être trouvés en annexe.

Nom	Comité français de Biomimicry Europa
Date et lieu de création	Créé en 2010 en France
Site internet	www.biomimicry.eu/comite-francais
Mission	La mission est la même que Biomimicry Europa (voir section I.2.a.iii). Les membres du Comité français donnent de nombreuses conférences sur le biomimétisme auprès de publics variés et sont très présents dans les médias. Le Comité français a récemment organisé une exposition sur le biomimétisme pour le personnel de Renault. Il est partenaire de différents projets de recherche et événements scientifiques. Certains membres du Comité donnent des formations au biomimétisme à destination de professeurs et d'étudiants à l'université. → DOCUMENT DÉTAILLÉ EN ANNEXE 8
Contact	Tarik Chekchak, secrétaire général : tarik@biomimicry.eu

Nom	ICDD : Innovation Citoyenne et Développement Durable
Date et lieu de création	Créée en 2011 en France
Site internet	http://asso.icdd.over-blog.com/
Mission	« Cette association rassemble des personnes engagées dans les processus de changement des organisations et convaincues que les changements profonds, en ligne avec les vrais enjeux du développement durable, ne pourront se faire que par la promotion d'une implication citoyenne de l'ensemble des personnels concernés. Cette association est particulièrement à l'écoute des entreprises et collectivités pionnières en la matière. » Le biomimétisme est l'une des thématiques abordées aux Rencontres de l'Innovation Citoyenne organisées par ICDD les 22 et 23 novembre 2011. → DOCUMENT DÉTAILLÉ EN ANNEXE 9
Contact	Antoine Héron, président : a.heron.icdd@gmail.com

Nom	Institut INSPIRE
Date et lieu de création	Créé en 2008 en France
Site internet	www.inspire-institut.org/
Mission	L'Institut INSPIRE (Initiative pour la Promotion d'une Industrie Réconciliée avec l'Écologie et la société) se définit comme « un centre de réflexion, de mutualisation des connaissances et d'actions au service de la réconciliation de l'économie et de la biosphère ». Ses principes sont : <ul style="list-style-type: none"> - Le biomimétisme, pour innover durablement et accélérer la transition, - Une économie circulaire, inspirée par la nature, - Une économie privilégiant l'usage, le service et la fonctionnalité, - Le réinvestissement dans le capital naturel pour restaurer la fonctionnalité et le potentiel d'évolution des écosystèmes.

	<p>« <i>INSPIRE rassemble, enrichit et diffuse les connaissances (publications, conférences), informe et sensibilise les décideurs économiques ou politiques (ateliers de créativité, forums), et expérimente dans une démarche de recherche – action les modèles innovant qu'elle propose.</i> »</p> <p>→ DOCUMENT DÉTAILLÉ EN ANNEXE 10</p>
Contact	Emmanuel Delannoy, fondateur : e.delannoy@inspire-institut.org

v. Formations au biomimétisme

Il n'existe officiellement qu'une seule formation universitaire au biomimétisme en France. Proposée par l'université de Cergy Pontoise à ses étudiants, d'une durée de 20h, elle est organisée par Charlotte Vendrely, maître de conférences et chercheuse en biologie.

La France est donc forte de nombreux acteurs dans le domaine du biomimétisme, mais ceux-ci travaillent encore de façon isolée et le manque de collaboration structurée entre laboratoires de recherche et entreprises dans ce domaine limite la capacité de l'industrie française à utiliser le biomimétisme comme véritable outil d'innovation. En l'absence de cabinets de conseil en innovation biomimétique, ce sont surtout les associations qui tentent de promouvoir ce concept auprès des industriels. Elles exercent également une activité d'information auprès du grand public à travers différents médias.

Dans le domaine agricole, l'écomimétisme est un concept peu identifié en tant que tel mais qui se retrouve dans de nombreuses pratiques plus durables. La démarche écomimétique est portée par différents acteurs : agriculteurs, chercheurs et techniciens.

3. Les enjeux du biomimétisme dans le contexte de l'économie verte

a. Enjeux économiques

En 2010, le potentiel industriel du biomimétisme a fait l'objet d'un **rapport²² économique** du *Fermanian Business & Economic Institute* (FBEI) de l'université américaine *Point Loma Nazarene University*. Ce rapport était commandé par le Zoo de San Diego qui souhaite s'ériger en plateforme mondiale du biomimétisme en termes de recherche, d'innovation et d'éducation.

Suite à cette étude, le FBEI a mis au point en août 2011 un indicateur nommé Da Vinci Index, mesurant l'activité de recherche et d'innovation dans le domaine du biomimétisme et de la bio-inspiration.

i. **Présentation du rapport économique du FBEI : *Global biomimicry efforts, an economic game changer* (2010)**

Comme nous allons le voir, les conclusions du FBEI sont très optimistes mais la fiabilité du rapport est loin d'être garantie. Les citations ont été traduites en français par nos soins. Les exemples les plus pertinents parmi les études de cas seront abordés dans la partie du rapport consacrée aux applications industrielles du biomimétisme.

Structure du rapport du FBEI

- | | |
|------|--|
| I. | Le biomimétisme : un pont entre l'économie et l'environnement |
| II. | Structure du rapport et méthodologie |
| III. | Etudes de cas : applications du biomimétisme dans différentes industries et leurs effets économiques |
| IV. | Potentiel économique du biomimétisme en tant qu'industrie |
| V. | Impact économique potentiel sur l'économie américaine et mondiale |
| VI. | Implications en termes d'investissement |
| VII. | Faire de San Diego un hub du biomimétisme |

Principales conclusions

« Alors que c'est pour l'instant un secteur émergent, **en 2025 le biomimétisme pourrait représenter 300 milliards de dollars dans le PIB américain** (en considérant le cours du dollar en 2010). Il pourrait également **rapporter 50 milliards de \$ par la réduction de la consommation de ressources naturelles et des émissions de CO₂**. Il pourrait représenter **1,6 millions d'emplois** aux Etats-Unis d'ici 2025. **A l'échelle mondiale, le biomimétisme pourrait représenter un marché de 1000 milliards de dollars d'ici 15 ans.** »

« Les applications du biomimétisme à des fins commerciales pourraient transformer grandement certaines industries dans les années à venir et à terme **impacter tous les domaines de notre économie**. Les secteurs qui seront particulièrement touchés par ce changement de paradigme en innovation seront : les services publics (*utilities*), les transports, l'industrie chimique, l'entreposage, la gestion des déchets, l'architecture et l'ingénierie. »

²² *Global biomimicry efforts, an economic game changer*. Rapport commandé par le San Diego Zoo et élaboré par le Fermanian Business & Economic Institute en 2010.

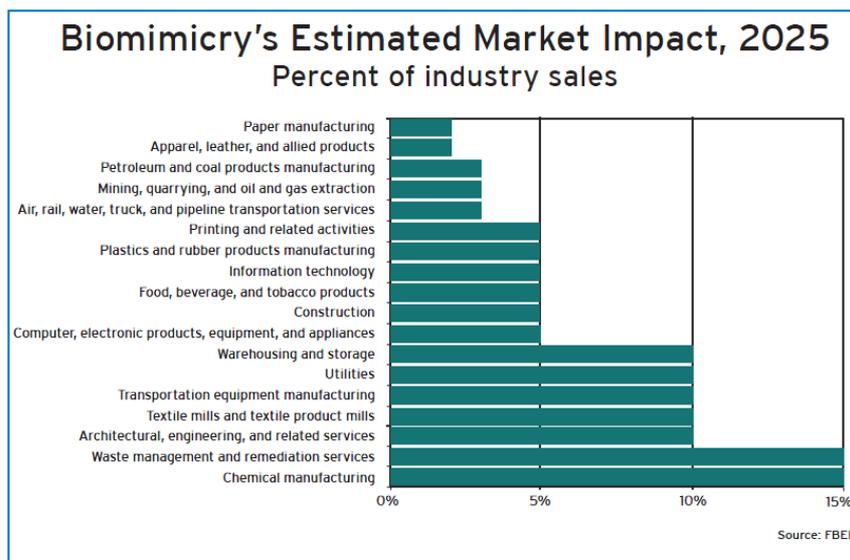


Figure 4. Estimation des parts de marché impactées par le biomimétisme

« Les entreprises vendant des produits inspirés du biomimétisme sur le marché ont souvent vu leurs **ventes doubler annuellement** depuis quelques années. Parmi ces produits, nombreux sont ceux qui sont **moins énergivores, génèrent moins de déchets et sont plus performants** tout en étant vendus à des prix égaux ou même inférieurs aux produits existants. »

« Les obstacles rencontrés par les entreprises tentant de commercialiser des produits biomimétiques sont principalement les difficultés à : **faire changer les mentalités** des consommateurs, trouver des sources de **financement** sauf lorsque l'on est soutenu par une grande entreprise, développer de **nouvelles chaînes de production** et passer à une production à grande échelle. »

« Les investisseurs devraient être attirés par le biomimétisme au vu des perspectives de **croissance rapide des ventes et des forts taux de retour sur investissement**. Le capital-risque pourrait se déverser dans le secteur du biomimétisme à un rythme au moins équivalent à celui observé dans les biotechnologies, estimé à 4,5 milliards de dollars pour 2010. »

Limites et fiabilité

Les principales critiques que l'on peut faire sur ce rapport sont les suivantes :

- Le rapport repose sur un nombre très limité de sources et d'entretiens.
- Les entretiens sont effectués avec des entreprises soigneusement sélectionnées, uniquement américaines, ayant tout intérêt à y figurer et à voir se créer un *hub* mondial du biomimétisme autour du Zoo de San Diego. Selon une personne rencontrée, le cabinet de conseil Biomimicry Guild de Janine Benyus a pu avoir une influence sur ce rapport en mettant en avant les collaborations faites avec certaines entreprises.
- Si certains exemples de technologies biomimétiques semblent très prometteurs dans le contexte de l'économie verte, d'autres sont très mauvais (exemple d'une moquette aux motifs aléatoires censée imiter le sol de la forêt, ou encore d'un baril de stockage aux joints modulables censés imiter le byssus de la moule).

- La méthode d'estimation des tailles de marché de l'industrie biomimétique à l'horizon 2025 n'est pas détaillée : ces tailles de marché semblent être uniquement déduites des déclarations des sociétés interrogées de façon sommaire.
- Pour certains secteurs industriels, le lien avec le biomimétisme n'est pas explicité alors que le FBEI fait des estimations du pourcentage de l'activité impacté, comme par exemple pour le secteur de l'industrie minière, du gaz et du pétrole.

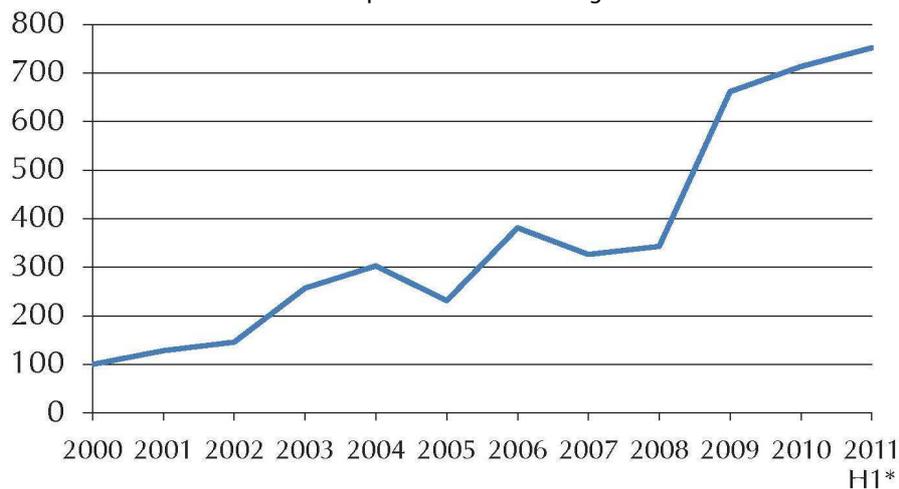
ii. Présentation du Da Vinci Index

Le FBEI a développé en août 2011 l'indicateur **Da Vinci Index**, qui a pour ambition de mesurer l'activité de recherche et d'innovation dans le domaine du biomimétisme et de la bio-inspiration. Les termes retenus pour désigner ce type d'activité sont : Biomimicry, Biomimics, Biomimic, Biomimetic, Bio-Inspired.

L'indicateur est construit de la façon suivante :

- 30% : nombre de publications
- 30% : nombre de brevets
- 15% : nombre de bourses de recherche attribuées
- 25% : montant des bourses de recherche attribuées

L'évolution de cet indicateur entre 2000 et 2011 est présentée dans la figure 6.



*Half-year annualized rates

*Figure 5. Evolution du Da Vinci Index entre 2000 et 2011
L'année 2000 est choisie comme référence et correspond à l'indice 100.
Source : FBEI 2011, tous droits réservés.*

L'activité liée au biomimétisme aurait donc été multipliée par 7 au cours de la dernière décennie selon le FBEI. Cependant, il est possible que cet indicateur ne reflète que le gain de popularité du terme « biomimétisme » et de ses dérivés, et non une réelle augmentation du nombre de projets de recherche et de brevets consacrés à l'application de propriétés remarquables du vivant dans de nouveaux produits ou technologies.

L'ensemble des documents relatifs à la méthodologie, aux résultats et à la diffusion de cet indicateur auprès du grand public et des économistes est disponible en ligne sur le site du FBEI²³.

²³ www.pointloma.edu/experience/academics/centers-institutes/fermanian-business-economic-institute/da-vinci-index-biomimicry

Si le biomimétisme semble bien être la nouvelle tendance en matière d'innovation, les chiffres présentés dans le rapport du FBI sont à considérer avec la plus grande prudence. Les exemples choisis et les calculs économiques manquent de transparence, de rigueur et d'objectivité.

b. Une collaboration nécessaire entre acteurs

Le biomimétisme est une approche de recherche et d'innovation par nature interdisciplinaire. Par conséquent, il est nécessaire de favoriser les rencontres entre chercheurs, ingénieurs et industriels pour accélérer l'innovation biomimétique durable ou la transition vers des pratiques agricoles respectueuses de la biosphère.

Outre les réseaux internationaux décrits précédemment, les conférences internationales sont des lieux privilégiés d'échange et de réseautage pour les acteurs du biomimétisme. Le succès de la *International Bionic Engineering Conference 2011*, qui s'est tenue à Boston du 18 au 20 septembre 2011, en est un exemple. La conférence a en effet accueilli plus d'une centaine de participants venant de nombreux pays différents. 42 exposés ont été donnés successivement par des chercheurs issus de diverses disciplines, des ingénieurs mettant au point de nouveaux produits et technologies biomimétiques et des industriels « accélérateurs d'innovation » développant des plateformes technologiques à partir de procédés biomimétiques. Le tableau ci-dessous montre la distribution des orateurs en fonction des thèmes retenus par les organisateurs de la conférence.

Thème inscrit dans le programme	Nombre d'orateurs
Agriculture	1
Architecture & Built Environment	4
Bio-inspired materials	9
Environmental aspects of Biomimetics	1
Fluid dynamics	5
Impact on engineering	1
Industry success stories	9
Robotics, motions systems and artificial intelligence	4
Sensors and signal processing	4
Sustainability and responsibility	1
Understanding of materials in biomimetics	4

Tableau 2. Répartition des orateurs en fonction des thèmes abordés à lors de la International Bionic Engineering Conference 2011

Tous ces acteurs avaient la sincère volonté de se rencontrer, de partager leurs travaux et découvrir de nouvelles perspectives. La conférence a donc amplement atteint son but, qui était de « *faire le lien entre la recherche académique et l'industrie, en permettant aux différents acteurs de présenter et d'échanger des idées afin de trouver des solutions bioniques aux défis majeurs de l'industrie du 21^e siècle* »²⁴.

²⁴ Présentation de la conférence sur son site officiel : www.bionicengineeringconference.com/index.html

Un des enjeux actuels pour la France est donc de mettre en relation les acteurs français du biomimétisme, quelque soit leur discipline de recherche ou leur secteur d'activité, afin de favoriser les innovations à la fois biomimétiques et durables et de les faire répondre à un réel besoin identifié sur le marché.

La multidisciplinarité dans le domaine du biomimétisme est également encouragée par la création de différents outils d'aide à l'innovation biomimétique, à la fois :

- par des chercheurs et ingénieurs : bases de données fournissant des caractéristiques très détaillées des matériaux et systèmes biologiques en compilant les résultats de la recherche scientifique, permettant à l'utilisateur de rechercher une solution biologique à son problème technique (ex : BioTRIZ, CES Selector et CES EduPack),
- par des associations : banques d'exemples donnant un aperçu grand public des fonctions remarquables du vivant et de leurs (possibles) applications dans le domaine technologique (ex : AskNature du Biomimicry Institute).

c. Une vigilance quant à l'effective durabilité des innovations

Comme nous l'avons vu précédemment, biomimétisme n'implique pas durabilité pour différentes raisons. Afin d'avoir une vision juste du potentiel de ce domaine, il est donc nécessaire de :

- distinguer les innovations biomimétiques réellement intéressantes dans le contexte de l'économie verte des innovations n'étant pas en rupture avec les modes de production actuels,
- avoir conscience que, pour être strictement biomimétique, une innovation doit reposer sur des matériaux et des énergies renouvelables et ne générer aucun déchet, dans une approche complètement intégrée de son cycle de vie,
- avoir conscience que toute propriété du vivant n'est pas forcément « bonne à prendre ». Les organismes vivants n'ont pas tous été soumis à de fortes pressions de sélection.
- reconnaître que certains avantages présentés par les innovations biomimétiques sont dus à l'éco-conception et non pas à l'imitation de propriétés remarquables du vivant,
- avoir conscience que l'approche philosophique du biomimétisme (« *Biomimicry* ») de Janine Benyus peut paraître idéaliste mais n'est pas en contradiction avec la recherche pratique de nouveaux modes de production. Ses partisans acceptent la nécessité d'une période de transition entre les modes de production actuels et des modes de production entièrement réconciliés avec la biosphère.

Si, à l'issue de cette première partie, le biomimétisme semble présenter un fort potentiel économique à l'échelle mondiale, il est nécessaire d'étudier sa contribution effective à la transition vers une économie verte en se penchant de plus près sur ses applications industrielles et agricoles. Les deux parties suivantes présenteront différents exemples pertinents et feront leur analyse en termes de durabilité, dans le but d'identifier les projets porteurs d'avenir en France.

II. Applications industrielles présentes et futures du biomimétisme

Comme nous l'avons vu précédemment, la démarche biomimétique consiste à étudier, comprendre et reproduire artificiellement certaines propriétés remarquables des êtres vivants, qu'il s'agisse d'une **forme** macro, micro ou nanoscopique, d'un **processus** physico-chimique ou d'un ensemble d'**interactions**. Dans le domaine technique, le biomimétisme comprend entre autres la bionique, la science des matériaux bio-inspirés, les biotechnologies blanches en chimie verte et l'imitation de mécanismes complexes comme la photosynthèse.

En recherche et développement, les ingénieurs s'intéressent généralement aux deux premiers niveaux de biomimétisme, *i.e.* aux **formes** et **processus** observés dans le monde vivant, afin de développer des applications susceptibles de répondre à un besoin sur le marché. Dans quelques rares cas, ils cherchent à reproduire les **interactions** présentes dans un écosystème, par exemple pour le traitement biologique des eaux usées. Leur préoccupation première n'est jamais la diminution de l'impact environnemental de la fabrication ou de l'utilisation du produit, mais plutôt la réduction des coûts de production. En pratique, il est difficile de savoir si les produits et technologies présentés comme biomimétiques sont significativement plus durables que ceux qu'ils remplacent car très peu d'analyses de cycle de vie (ACV) ont été réalisées, et celles-ci sont rarement communiquées. **Or, seules des innovations reposant sur des matériaux renouvelables, des processus économes en énergie et en intrants, et ne générant pas de déchets peuvent être qualifiées de « ruptures » en matière d'innovation durable.**

Dans cette partie, nous présenterons dans un premier temps une sélection d'applications biomimétiques en cours de développement ou déjà sur le marché à l'échelle internationale. Ces applications seront classées en fonction des filières vertes dans lesquelles elles peuvent s'inscrire et leur durabilité sera analysée de façon critique.

Dans un second temps, nous évoquerons quelques projets français susceptibles d'avoir un réel impact sur les modes de production industrielle dans le contexte de l'économie verte.

1. Produits et technologies biomimétiques : une sélection d'exemples industriels

Au sein des nombreuses applications du biomimétisme, déjà commercialisées ou encore en cours de développement à l'échelle internationale, nous avons retenu les exemples²⁵ les plus intéressants et les plus opérationnels dans le contexte de l'économie verte.

a. Panorama des applications biomimétiques et inscription dans les filières industrielles vertes

Les applications retenues sont classées dans les tableaux suivants en fonction du groupe de filières vertes dans lequel elles peuvent s'inscrire.

²⁵ Ces exemples sont issus principalement des sources suivantes :

- la conférence International Bionic Engineering Conference 2011, ayant eu lieu à Boston du 18 au 20 septembre 2011,
- le rapport *Global biomimicry efforts, an economic game changer* du Fermanian Business & Economic Institute (2010),
- la base de données AskNature du Biomimicry Institute
- les exemples de technologies biomimétiques données sur le site du Zoo de San Diego
- le diaporama « 50 exemples d'applications biomimétiques et durables » réalisé par Biomimicry Europa
- des conférences et lectures personnelles

Ces produits et technologies biomimétiques, qu'ils soient commercialisés ou en cours de développement, sont par conséquent classés en fonction de leurs performances environnementales. Celles-ci seront néanmoins nuancées dans la partie suivante, consacrée à l'analyse de la durabilité supposée de ces applications industrielles. Les groupes et les noms de filières vertes sont ceux qui ont été institués dans le rapport « Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte », publié par le CGDD en mars 2010.

Les données présentées dans les tableaux ci-dessous ne sont pas exhaustives et demandent à être complétées, notamment par des analyses de cycle de vie des produits et technologies présentés en ce qui concerne leurs « avantages environnementaux ». Ces données ne sont que déclaratives.

i. Groupe des filières dont le développement est nécessaire pour réduire les émissions de GES dans le domaine de l'énergie

Filière concernée	Produit, principe et source d'inspiration	Aspects environnementaux (Informations déclaratives)	Etat d'avancement et accès au marché	Entreprise ou projet, (pays) et site internet
Energies marines	<p>Hydrolienne bioWAVE inspirée de la forme des algues sous-marines.</p> <p>L'énergie cinétique des vagues met le système en mouvement. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à un alternateur intégré à l'hydrolienne. Des champs d'hydroliennes sont en phase de test.</p> <p>Puissance du prototype : 250 kW Puissance unitaire visée : 1 MW</p> <p>Inspiration : FORME</p>	<p>+ Energie renouvelable</p> <p>Invisibilité depuis la surface – pas de dégradation du paysage</p> <p>Minimisation des atteintes à la faune et la flore marines avec mouvements très lents</p> <p>Pas besoin de Terres rares</p> <p>- Faible puissance</p>	<p>Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT</p>	<p>BioPower Systems Pty Ltd (Australie)</p> <p>www.biopowersystems.com</p> <p>www.biopowersystems.com/contact-us.html</p>

	<p>Hydrolienne bioSTREAM imitant les mouvements de la queue du thon.</p> <p>Même principe que bioWAVE, mais c'est ici l'énergie des marées qui est captée, lorsque la vitesse du courant est supérieure ou égale à 2.5 m/s.</p> <p>Puissance du prototype : 250 kW</p> <p>Inspiration : FORME (voir Planche 1)</p>	Idem	Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT	
Eolien	<p>Pales dont le design imite la structure de la nageoire de baleine pour limiter la résistance lors de la pénétration dans un fluide.</p> <p>Applications : pales d'éoliennes et de ventilateurs plus efficaces.</p> <p>Inspiration : FORME (voir Planche 1)</p>	<p>+</p> <p>Amélioration de l'efficacité des éoliennes, à la fois par vent faible et en cas de turbulences</p> <p>Diminution du bruit</p>	Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT	<p>Whale Power (Canada)</p> <p>www.whalepower.com/drupal/</p>

Solaire	<p>Feuilles artificielles²⁶</p> <p>Cellules photovoltaïques de la taille de cartes à jouer imitant le principe de la photosynthèse : elles sont munies de catalyseurs dissociant l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un rayonnement lumineux. A posteriori, l'hydrogène peut être brûlé en présence d'oxygène ou utilisé dans une pile à combustible pour produire de l'électricité, en redonnant de l'eau. Le père de cette technologie est Daniel Nocera, chercheur au Massachusetts Institute of Technology (MIT).</p> <p>Rendement : 5% maximum de l'énergie solaire est transformée en hydrogène et stockée.</p> <p>Inspiration : PROCESSUS (Photosynthèse)</p>	<p>+ Energie renouvelable Catalyseurs constitués d'un alliage de métaux abondants Faible coût</p> <p>- Feuille artificielle à base de silicium comme les cellules photovoltaïques traditionnelles</p>	<p>Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT</p>	<p>Sun Catalytix (Etats-Unis)</p> <p>www.suncatalytix.com/</p>
----------------	---	---	--	---

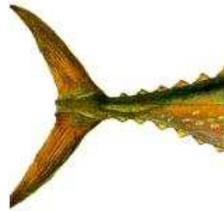
²⁶ D'après Service R. (2011), *Artificial Leaf Turns Sunlight Into a Cheap Energy Source*, Science Vol 332, 1er avril 2011, p. 25

	<p>Cellules Grätzel à pigment photosensible</p> <p>Cellules solaires inspirées de la photosynthèse végétale, constituées d'un pigment (colorant), piégé dans un matériau semiconducteur, et d'un électrolyte, qui échangent des électrons sous l'effet du rayonnement solaire. La différence de potentiel ainsi générée entre les parois de la cellule est à l'origine d'un courant électrique. Rendement du prototype en laboratoire : 11%</p> <p>Inspiration : PROCESSUS (voir Planche 1)</p>	<p>+ Energie renouvelable</p> <p>- Présence de métaux dont l'écotoxicité est encore inconnue (ruthénium...)</p>	<p>Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT</p>	<p>Laboratoire de Michaël Grätzel à l'EPFL, Suisse</p>
<p>Captage, stockage et valorisation du CO₂</p>	<p>Projet CO₂solstock</p> <p>Ce projet financé par l'Union européenne a pour but de développer de nouvelles techniques de stockage du carbone bio-inspirées et durables. L'étude a pour objet la biominéralisation du carbone par les bactéries produisant des roches calcaires à partir de calcium et de CO₂. Des débouchés industriels au calcaire produit sont aussi étudiés (pour la construction notamment). Au terme du projet en mars 2012, les chercheurs désigneront les systèmes bactériens à privilégier pour passer à une amplification pré-industrielle de ce phénomène naturel.</p> <p>Inspiration : PROCESSUS et INTERACTIONS</p>	<p>+ Stockage du carbone à long terme et respectueux de l'environnement</p>	<p>Etat d'avancement : RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT</p>	<p>Projet européen CO₂solstock</p> <p>www.co2solstock.eu/</p> 

i. Energies propres



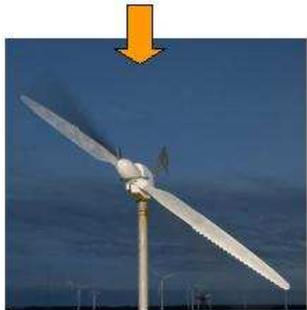
Nageoire de baleine



Queue du thon



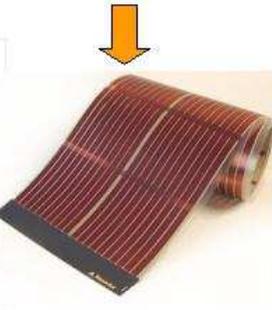
*Photosynthèse
(pigments chlorophylliens)*



Pales d'éolienne Whale Power



*Hydrolienne
bioSTREAM™*

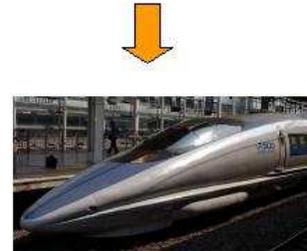


*Cellules Graëtzl à pigment
photosensible*

ii. Réduction de la consommation d'énergie



Martin-pêcheur



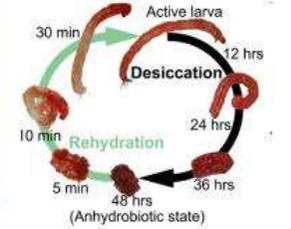
TGV Shinkansen



Papillon Morpho



Tablettes Qualcomm



Mécanisme d'anhydrobiose



Procédé Biomatrixa

iii. Réduction de la consommation d'énergie



*Gouttes d'eau sur une
feuille de lotus*



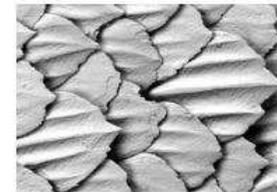
*Mur enduit d'un revêtement
superhydrophobe*



Humus



Tank d'épuration Biolytix®



Peau de requin



*Peinture antifouling imitant
la texture de la peau de
requin*

Planche 1. Illustration des applications biomimétiques au sein des filières vertes

ii. Groupe des filières qui participent à la lutte contre le changement climatique car elles réduisent notamment les besoins d'énergie ou améliorent sa gestion

Filière concernée	Produit, principe et source d'inspiration	Aspects environnementaux (Informations déclaratives)	Etat d'avancement et accès au marché	Entreprise ou projet, (pays) et site internet
Bâtiment à faible impact environmental	<p>Bâtiment à refroidissement passif s'inspirant des termitières.</p> <p>L'architecte Mike Pearce a construit en 1996 au Zimbabwe un bâtiment ventilé et refroidi de façon passive, n'ayant pas besoin de climatisation. Le bâtiment comporte de nombreuses cheminées permettant la circulation de l'air dans le bâtiment (telles les tunnels des termites), grâce à des ventilateurs situés à la base des tours. L'orientation des ouvertures est également crucial. L'air est entièrement recyclé pendant la nuit, lorsque la température baisse. Ce dispositif permet d'économiser 90% d'énergie par rapport à un immeuble de même taille.</p> <p>Inspiration : FORME et PROCESSUS</p>	<p>+ Réduction de 90% (chiffre à vérifier) de la consommation d'énergie liée à la climatisation.</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>Mike Pearce et le cabinet Arup (Royaume-Uni)</p> <p>http://www.arup.com/Services/Building_Design.aspx</p>

Autres exemples de réduction de la consommation d'énergie	<p>Méthode de conservation d'échantillons biologiques à température ambiante²⁷</p> <p>Méthode inspirée du mécanisme d'anhydrobiose par lequel certains organismes résistent à la dessiccation en arrêtant quasi totalement leur métabolisme, et sont réactivés quand ils sont réhydratés.</p> <p>Parmi les applications les plus intéressantes de ce processus figurent les vaccins secs, n'ayant pas besoin d'être maintenus au congélateur et étant ainsi plus accessibles, et la conservation d'échantillons biologiques dans les laboratoires de recherche.</p> <p>Inspiration : PROCESSUS (voir Planche 1)</p>	<p>+ Env. 90% d'économies d'énergie par rapport à la conservation par congélation</p> <p>- Utiliser Biomatrica à la place d'un congélateur n'est rentable qu'au bout de 6 mois à 2 ans</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>Biomatrica (Etats-Unis)</p> <p>www.biomatrica.com</p>
	<p>Pompes, turbines, hélices et propulseurs dont le design est inspiré de formes géométriques observées dans la nature (ex : spirale formée par des algues)²⁸.</p> <p>Leur forme particulière les rend plus efficaces.</p> <p>Inspiration : FORME</p>	<p>+ Meilleure efficacité</p> <p>Réduction des frottements</p> <p>La fabrication consomme moins de matières premières Coûts de production moins élevés</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>PAX Scientific (Etats-Unis)</p> <p>www.paxscientific.com</p>

²⁷ D'après *Global biomimicry efforts, an economic game changer*. Rapport commandé par le San Diego Zoo et élaboré par le Fermanian Business & Economic Institute en 2010.

²⁸ Ibid

	<p>Ecrans basse consommation reposant sur le principe de modulation interférométrique (procédé « Mirasol »)²⁹</p> <p>Cette technologie s'inspire de la formation des couleurs sur les ailes de papillon (leur microstructure ne réfléchissant que certaines longueurs d'onde)</p> <p>Inspiration : FORME (voir Planche 1)</p>	<p>+ Consommation de 3 fois moins d'énergie que les écrans traditionnels. L'écran fonctionne uniquement en pleine lumière grâce à son « encre électronique » qui ne fait que réfléchir la lumière de source externe. L'utilisateur ne consomme de l'énergie que quand il change de page.</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>QUALCOMM MEMS Technologies (Etats-Unis)</p> <p>www.qualcomm.fr/</p>
	<p>Procédé d'injection « microMist », inspiré du coléoptère bombardier</p> <p>L'entreprise Swedish Biomimetic 3000 a inventé une nouvelle technique de spray nommée microMist s'inspirant du coléoptère bombardier, petit insecte qui projette un liquide corrosif sur ses ennemis en générant une explosion particulièrement performante à basse pression. A partir de ce procédé, SB3000 développe entre autres des injecteurs de carburant et des inhalateurs pour le domaine médical, que l'entreprise estime « <i>environmentally friendly</i> ». Ce travail est le fruit d'une étroite collaboration entre chercheurs, ingénieurs et entrepreneurs depuis 1999.</p> <p>Inspiration : PROCESSUS</p>	<p>L'injection de carburant par la technique « microMist » est plus efficace que par des injecteurs traditionnels car la taille des gouttes est réduite et l'opération se fait à basse pression. Elle permet d'effectuer une meilleure combustion (avec moins d'émissions de gaz à effet de serre et de particules) et en définitive d'économiser de 5 à 10% de carburant par rapport aux moteurs traditionnels.</p> <p>Les inhalateurs biomimétiques</p>	<p>Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT</p>	<p>Source : exposé de Andy McIntosh Spécialiste des combustions et explosions, professeur à l'Université de Leeds (Royaume-Uni), Entreprise SB3000</p>

²⁹ D'après *Global biomimicry efforts, an economic game changer*. Rapport commandé par le San Diego Zoo et élaboré par le Fermanian Business & Economic Institute en 2010.

		fonctionnent avec de l'eau et non avec les gaz à effet de serre traditionnellement utilisés (propane...).		
--	--	---	--	--

	<p>Nez aérodynamique du TGV Shinkansen, inspiré du bec du martin pêcheur</p> <p>La forme du nez du TGV Shinkansen permet de diminuer la résistance à l'air du TGV lors du passage dans les tunnels. Elle lui évite de devoir ralentir pour diminuer le bruit au passage du tunnel puis accélérer de nouveau.</p> <p>Inspiration : FORME (voir Planche 1)</p>	<p>+</p> <p>Economie de 15% de carburant, l'accélération en sortie du tunnel n'étant plus nécessaire.</p> <p>Augmentation de 10% de la vitesse moyenne.</p> <p>Pas de bruit pour les riverains.</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>TGV Shinkansen de la West Japan Railway Company</p>
--	--	---	--	--

iii. Groupe des filières sans lien direct avec l'énergie ou très transversales mais qui sont des composantes efficaces de l'action pour réduire nos consommations de ressources naturelles et de matières premières

Filière concernée	Produit, principe et source d'inspiration	Aspects environnementaux (Informations déclaratives)	Etat d'avancement et accès au marché	Entreprise ou projet, (pays) et site internet
<p>Recyclage et valorisation des déchets</p>	<p>Recyclage du marc de café³⁰</p> <p>La société UpCycle recycle le marc de café en y faisant pousser des champignons. Ceux-ci enrichissent le marc, le transformant progressivement en compost. Le compost et les champignons une fois cueillis sont ensuite vendus dans des circuits courts (marchés, épiceries solidaires...).</p>	<p>+</p> <p>Recyclage du marc de café grâce à une approche en cycle fermé.</p> <p>Pas de recours aux produits chimiques.</p> <p>Participation à une économie</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>UpCycle, en collaboration avec Jacques Vabre (France)</p> <p>www.ufarm.fr</p>

³⁰ Cet exemple sera repris et approfondi dans la section consacrée aux initiatives françaises prometteuses dans le cadre de l'économie verte.

	Inspiration : INTERACTIONS/BIOASSISTANCE	sociale et solidaire.		
Eau et assainissement	<p>Centrale individuelle de traitement « vert » des eaux usées, inspiré du rôle de l'humus dans les sols.</p> <p>Tank contenant un écosystème composé de vers, d'insectes et de bactéries. Ces organismes dégradent les déchets solides contenus dans les eaux usées et les transforment en humus, qui sert ensuite de filtre pour l'eau. Une fois nettoyée, celle-ci sert à l'irrigation. (brevet 1994)</p> <p>Inspiration : INTERACTIONS (voir Planche 1)</p>	<p>+</p> <p>Pas besoin d'oxygénateurs, donc diminution de la consommation d'énergie totale du système de 90%.</p> <p>Coût d'installation divisé par 2 par rapport à une canalisation traditionnelle de raccord au réseau d'égouts.</p> <p>Maintenance annuelle, soit 3 à 4 fois moins souvent que d'autres systèmes.</p>	Etat d'avancement : COMMERCIALISATION	Biolytix Water (Australie, Nouvelle Zélande) www.biolytix.com
Eau et assainissement	<p>Phytoépuration</p> <p>La phytoépuration (ou plus largement phytorestauration) est l'ensemble des technologies qui utilisent les propriétés des plantes pour traiter des pollutions. Elle peut être appliquée au traitement de l'eau (eaux usées, rejets agricoles...), des sols (boues d'épuration, friches industrielles...) et de l'air (air vicié, air des décharges...).</p> <p>Plantes et microorganismes éliminent ensemble différents types de polluants présents dans le milieu.</p>	<p>+</p> <p>Approche intégrée, en cycle fermé, de la dépollution de l'air, de l'eau et des sols.</p> <p>Peu de déchets grâce à la valorisation de la biomasse végétale en fourrage ou des boues traitées en terreau.</p> <p>Il serait intéressant d'acquérir</p>	Etat d'avancement : COMMERCIALISATION	En France : Phytorestore www.phytorestore.com Epur Nature www.epurnature.fr/ fr

	Inspiration : INTERACTIONS/BIOASSISTANCE	des informations complémentaires sur le devenir des filtres chargés de métaux lourds.		Jean Voisin SA Sinbio www.sinbio.fr/
Chimie verte	<p>Biotechnologies blanches dans l'industrie³¹</p> <p>De plus en plus d'industries ont recours à des biocatalyseurs ou à des micro-organismes pour effectuer leurs réactions chimiques. Celles-ci peuvent alors se dérouler dans l'eau (sans solvants organiques), dans des conditions standard de température et de pression. Dans le vivant, la catalyse enzymatique est en effet un procédé extrêmement efficace et sélectif.</p> <p>Inspiration : PROCESSUS</p>	<p>+ Conditions T et P standard d'où de très grandes économies d'énergie</p> <p>Economies de réactifs grâce à la catalyse (contrairement à l'approche stoechiométrique)</p> <p>Réactions dans l'eau : pas de solvants organiques dégageant des émissions toxiques</p> <p>Réduction de la quantité de sous-produits et des besoins de recyclage</p>	Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT et COMMERCIALISATION	Nombreuses entreprises. Voir section 2.a.ii. pour des exemples.

³¹ Cet exemple sera repris et approfondi dans la section consacrée aux initiatives françaises prometteuses dans le cadre de l'économie verte.

<p>Autres exemples de réduction de la consommation de ressources naturelles (eau, matériaux...)</p>	<p>Revêtement auto-nettoyant Lotusan®, s’inspirant de la nanostructure de la feuille de lotus.</p> <p>La feuille de lotus, par sa rugosité nanométrique, repousse l’eau et les impuretés.</p> <p>Le revêtement Lotusan se présente sous la forme d’une peinture pour surfaces non-métalliques. Il empêche la fixation de champignons, mousses et algues à sa surface.</p> <p>Inspiration : FORME (voir Planche 1)</p>	<p>+ Autonettoyage des bâtiments dans les zones pluvieuses : pas besoin de biocides toxiques pour éliminer les parasites</p> <p>- Fabrication du revêtement par des procédés industriels traditionnels. Possible dégagement de nanoparticules toxiques par réaction photochimique (à confirmer).</p>	<p>Etat d’avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>STO Corp. (Etats-Unis)</p> <p>www.stocorp.com</p>
	<p>Plaquettes artificielles, permettant la réparation rapide de fuites sur des conduites d’eau ou de pétrole, avec assistance informatique.</p> <p>Cette technologie s’inspire du principe des plaquettes sanguines qui réparent les vaisseaux sanguins immédiatement après qu’ils ont été endommagés.</p> <p>Inspiration : FORME et PROCESSUS</p>	<p>+ Rapidité de la réparation, pas besoin d’intervenir physiquement ni d’interrompre le flux</p>	<p>Etat d’avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>Brinker Technology (Etats-Unis)</p> <p>www.brinker-technology.com</p>

	<p>Revêtements hydrodynamiques imitant la peau de requin</p> <p>Les chercheurs ont développé une peinture <i>antifouling</i> non toxique pour les écosystèmes marins qui s'inspire de la microstructure de la peau de requin. Afin de reproduire ses propriétés, ils ont utilisé du silicone et des microbilles de verre, ce qui rend la peinture rugueuse, élastique et résistante à la fois.</p> <p>D'autres modèles sont étudiés, en particulier la structure de la graine de palmier et de la noix de coco.</p> <p>Inspiration : FORME (voir Planche 1)</p>	<p>+ De façon générale, la lutte contre le <i>fouling</i> permet aux bateaux d'économiser 25% de carburant, soit à l'échelle mondiale 60 millions de dollars par an. Elle diminue donc de 25% les émissions de gaz à effet de serre du secteur maritime. Les peintures antifouling biomimétiques éviteraient le rejet annuel de 18 000 tonnes de toxines par les peintures traditionnelles.</p> <p>- Cependant, la fabrication de ces peintures non toxiques n'est pas plus « verte » que celle des peintures traditionnelles. De plus, lorsque la peinture s'écaille, il faut la refaire entièrement.</p>	<p>Etat d'avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>Source : exposé d'A. B. Kesel, chercheuse à l'Université de sciences appliquées de Bremen (Allemagne)</p>
--	---	--	---	--

	<p>Ecocradle®</p> <p>Matériau d’emballage fait à partir de déchets végétaux et de mycélium de champignons, pouvant se substituer au polystyrène.</p> <p>Inspiration : PROCESSUS et INTERACTIONS</p>	<p>+ Recyclage de déchets agricoles (pas d’utilisation de surfaces agricoles comme pour les bioplastiques). Consommation d’énergie diminuée de 98% par rapport à la fabrication des emballages traditionnels. ACV en cours de publication. Matériau biodégradable, compostable.</p>	<p>Etat d’avancement : COMMERCIALISATION</p>	<p>Ecovative Design – Mushroom packaging</p> <p>www.mushroompackaging.com/</p>
	<p>Revêtements imperméables capables de s’auto-assembler, s’inspirant de la feuille de lotus.</p> <p>Les chercheurs cherchent en particulier à développer des mono- ou multicouches qui s’autoassemblent telles les cellules d’un tissu vivant. Ils utilisent pour ce la technique du dépôt chimique en phase vapeur.</p> <p>Inspiration : FORME</p>	<p>+ Revêtement créé à partir de composés non toxiques et dans les conditions ambiantes de température et de pression, d’où des économies d’énergie. Le papier imperméable est entièrement recyclable.</p> <p>- Cependant, le revêtement est fabriqué à partir de molécules organiques dérivées du pétrole.</p>	<p>Etat d’avancement : DEVELOPPEMENT</p>	<p>Source : exposé d’Osamu Takai, Spécialiste des matériaux biomimétiques, Université de Nagoya, EcoTopia Science Institute (Japon)</p>

	<p>Papiers résistants au gras et à l'eau s'inspirant de la feuille de lotus, de la peau et de la vessie de poisson</p> <p>A la demande de l'entreprise PepsiCo, l'entreprise Swedish Biomimetic 3000 a mis au point un prototype d'emballage plus vert, résistant au gras et à l'eau.</p> <p>Inspiration : FORME</p>	<p>+</p> <p>De tels emballages seraient biodégradables, recyclables et issus de matériaux renouvelables. Cependant, il sera nécessaire d'évaluer leur cycle de vie une fois que la production à grande échelle aura commencé.</p>	<p>Etat d'avancement : DEVELOPPEMENT</p>	<p>Source : exposé d'Elliott Orlik, concepteur d'emballages bio-inspirés, PepsiCo Corporate Communications (Royaume-Uni)</p>
--	--	---	--	--

b. Durabilité des applications biomimétiques industrielles

Il est encore difficile de quantifier la réelle durabilité des applications biomimétiques présentées ci-dessus pour différentes raisons :

- Lorsque les produits ou technologies sont encore au stade de la R&D (ce sont au mieux des prototypes, développés généralement par des PME) :
 - leur développement industriel est encore incertain
 - il est difficile, et selon les ingénieurs pas toujours utile, de faire des analyses de cycle de vie (ACV) à ce stade
- Lorsque les produits et technologies sont commercialisés :
 - les ACV ne sont pas réalisées systématiquement par les entreprises
 - quand les ACV sont réalisées, elles ne sont pas facilement communiquées par les entreprises (manque de transparence)

Pour résumer, on distinguera trois groupes d'applications (voir figure 7) :

1. les applications présentant une amélioration d'une des étapes de leur cycle de vie, mais dont l'amélioration du cycle de vie complet reste encore à prouver,
2. les applications représentant des changements profonds des systèmes de production ou dont le cycle de vie complet est significativement meilleur que les technologies qu'elles remplacent,
3. les applications représentant un bouleversement des modes de production par leur approche circulaire, en boucle fermée.

On remarque que les trois niveaux de ce « gradient de durabilité » correspondent globalement aux trois types de biomimétisme définis précédemment : l'imitation d'une forme, d'un processus ou d'un ensemble d'interactions présentes dans un écosystème. La durabilité maximale correspond à une innovation dont la fabrication, l'usage et la fin de vie s'appuient sur des matériaux renouvelables, une faible consommation d'énergie et ne génèrent aucun déchet, dans une approche en boucle fermée.

A l'heure actuelle, la majorité des applications industrielles du biomimétisme disponibles sur le marché et présentées au grand public sont des innovations de produit, qui imitent une forme observée chez un être vivant. Or, ce sont les innovations de procédé, voire les innovations organisationnelles inspirées de la nature qui sont susceptibles de présenter les plus grands avantages environnementaux. En effet, on voit sur la figure 7 que les applications les plus durables sont celles qui reposent sur des approches intégrées, en boucle fermée.

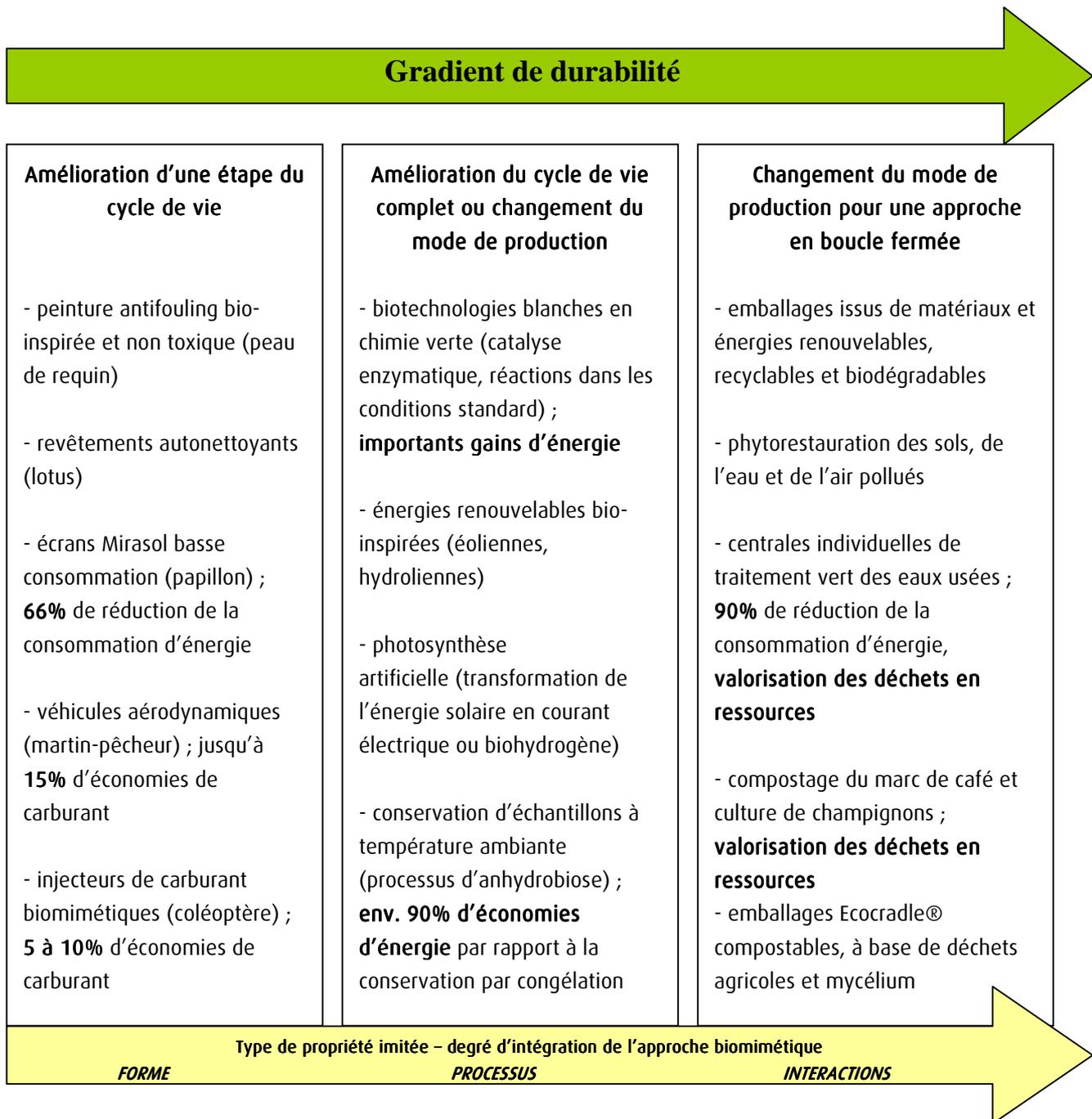


Figure 6. Gradient de durabilité des applications industrielles du biomimétisme

D'un point de vue industriel, de nombreuses innovations biomimétiques voient donc le jour à l'heure actuelle, en particulier aux Etats-Unis et en Allemagne, mais il est nécessaire d'être vigilant quant à leur effective durabilité. Certains produits et technologies peuvent par exemple présenter des avantages en termes de consommation d'énergie à l'utilisation mais être néanmoins produits industriellement dans les conditions habituelles. Inversement, certaines pistes encore discrètes méritent d'être creusées : elles feront l'objet de la partie suivante.

2. Atouts et potentiel de la France en matière de biomimétisme industriel : quelques pistes

Au fil de l'étude, différentes pistes d'innovations prometteuses pour l'avenir en matière industrielle se sont profilées. Si la France n'est pas véritablement à la pointe sur ces thématiques, elle possède néanmoins de forts atouts qui méritent d'être valorisés. Ceux-ci se situent actuellement surtout au niveau de la recherche.

a. Quelques projets de recherche prometteurs au regard de l'économie verte

Remarque préliminaire : nous distinguerons artificiellement « énergies renouvelables » et « chimie verte » pour faire écho aux filières industrielles vertes, mais la recherche dans le domaine de la photosynthèse appartient aux deux catégories.

i. **Energies renouvelables bio-inspirées**

La photosynthèse artificielle

Description

Depuis plusieurs décennies, les chercheurs tentent de décrypter et de reconstituer pas à pas le mécanisme de la photosynthèse, par lequel les végétaux et certaines bactéries fabriquent du sucre et du dioxygène à partir de dioxyde de carbone et d'eau grâce à l'énergie du soleil.

Les sucres n'étant pas directement utilisables par l'homme pour produire artificiellement de l'énergie, plusieurs voies sont étudiées :

- la **conversion directe de l'énergie solaire en électricité** grâce à des pigments artificiels intégrés dans des cellules photo-électrochimiques³², de tels panneaux solaires étant plus respectueux de l'environnement que les panneaux actuels
- la **production de biohydrogène** grâce à l'énergie solaire :
 - o soit grâce à des micro-organismes photosynthétiques génétiquement optimisés, possédant naturellement les enzymes permettant la synthèse d'hydrogène (en France, travaux du CEA)
 - o soit grâce à la mise au point de catalyseurs artificiels bio-inspirés permettant la décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène sous l'effet d'un rayonnement lumineux, l'hydrogène pouvant ensuite servir de combustible (en France, travaux du CEA)
- la **fixation photosynthétique du dioxyde de carbone atmosphérique en combustibles** comme le méthanol ou le méthane

Il ne faut pas confondre ces travaux avec la recherche sur les panneaux photovoltaïques de 3^e génération organiques ou en carbone (graphène), qui ne miment aucune étape du phénomène naturel de photosynthèse.

Intérêt dans le contexte de l'économie verte

Produire de nouvelles énergies propres est crucial pour « décarboner » la croissance. Or, l'énergie solaire est la seule source d'énergie véritablement illimitée dont nous disposons, et elle est encore très peu exploitée, faute de systèmes de transformation simples et efficaces.

Les nombreux travaux de recherche sur la photosynthèse artificielle pourraient permettre, à terme :

³² Travaux de M. Grätzel, EPFL, Suisse

- de produire des panneaux photovoltaïques moins polluants (par exemple sans Terres rares)
- de produire du dihydrogène facilement, à moindre coût et de façon respectueuse de l'environnement (il est actuellement produit industriellement par reformage d'hydrocarbures fossiles nécessitant de grandes quantités d'énergie.)
- de fabriquer des piles à combustible sans platine
- de produire du méthane ou des combustibles organiques à partir du CO₂ atmosphérique dans des conditions douces

Etat des connaissances et enjeux de la recherche

Les travaux sur la photosynthèse artificielle sont de plus en plus nombreux, et différents systèmes de transformation de l'énergie solaire voient le jour, suivant les différentes voies évoquées ci-dessus.

En Suisse, les cellules à pigment photosensible Grätzel, du nom de leur créateur, sont en cours de développement à l'EPFL. Une cellule est constituée d'un pigment (ruthénium) piégé dans un matériau semi-conducteur (oxyde de titane) et d'un électrolyte à base d'iode. Le pigment et l'électrolyte échangent des électrons sous l'effet du rayonnement solaire. La différence de potentiel entre les parois de la cellule génère alors un courant électrique. Le rendement actuel du prototype en laboratoire est de 11%. Les cellules Grätzel sont constituées de matériaux peu coûteux par rapport aux cellules photovoltaïques traditionnelles.

Dans le domaine de la production d'hydrogène, d'importants résultats ont été publiés en 2011 par le chercheur américain Daniel Nocera du MIT, qui a mis au point des « feuilles artificielles ». Celles-ci se présentent sous la forme d'une cellule photovoltaïque en silicium, sur les faces de laquelle sont fixées des catalyseurs peu coûteux, abondants et propres (métaux, borate, cobalt). L'hydrogène et l'oxygène produits par électrolyse de l'eau en présence de lumière sont stockés de chaque côté de la cellule, dans des compartiments séparés. Le rendement maximum de ce prototype est de 5%. Par ailleurs, Nocera a fondé la société Sun Catalytix qui développe et vend les catalyseurs de ce dispositif. Il espère industrialiser puis commercialiser les feuilles artificielles complètes d'ici 2013 ou 2014, et Sun Catalytix a noué un partenariat avec le conglomérat indien Tata pour développer de petites centrales solaires à bas coût.

Les rendements de ces différents types de cellules, bien qu'encore faibles, sont sans cesse améliorés. Il existe encore des limites techniques au développement de telles technologies à grande échelle, liées en particulier à la stabilité et à la disponibilité des constituants des cellules, au stockage de l'hydrogène produit et à son utilisation dans le cas des feuilles artificielles du MIT. Tant que la production industrielle n'a pas débuté, il est impossible d'avoir du recul quant au cycle de vie complet de ces nouvelles cellules solaires ; cependant l'objectif à terme est de s'affranchir totalement des éléments polluants ou peu abondants.

Atouts de la France et recommandations

En France, plusieurs équipes travaillent sur la biocatalyse et la photosynthèse artificielle (voir tableau 1 pour rappel), à la fois au CEA et au CNRS. De grandes avancées ont été faites dans le domaine de la photoproduction d'hydrogène (à la fois artificiellement ou en utilisant des micro-organismes), même s'il est trop tôt pour songer à une production à grande échelle. Une des principales limites est la mise au point d'électrodes performantes ne reposant pas sur des métaux nobles donc peu abondants (or, platine).

Le CNRS et le CEA ont participé, avec 9 autres organismes de recherche européens, au projet SOLARH2 « *European solar-fuel initiative - renewable hydrogen from sun and water ; science linking molecular biomimetics and genetics* » subventionné par l'Union européenne à l'occasion du 7^e programme-cadre. Ce projet concerne la période du 1^{er} mars

2008 au 31 janvier 2012 et son montant s'élève à 3,93 millions d'euros³³. Il s'intéresse à la fois à la production biomimétique d'hydrogène et à l'optimisation de sa biosynthèse par les micro-organismes.

Certains industriels français commencent à s'intéresser à la photosynthèse artificielle, motivés par le nombre grandissant de publications sur le sujet dans les revues *Nature* et *Science*.

Même s'il est peu probable que des applications industrielles de la photosynthèse artificielle voient le jour dans les 10 prochaines années, il est nécessaire de continuer à soutenir la recherche dans ce domaine. Des progrès remarquables ont été réalisés depuis que les agences de recherche et les programmes gouvernementaux ont commencé à s'intéresser sérieusement à ce sujet, pressés par la nécessité de trouver des solutions au réchauffement climatique.

La collaboration internationale est de plus en plus indispensable et a déjà porté ses fruits. Néanmoins, la recherche « amont » manque encore de moyens humains et financiers, et certains chercheurs français déplorent la frilosité de l'industrie à investir dans la recherche fondamentale.

Conclusion

À l'heure actuelle, les différents dispositifs biomimétiques élaborés par les chercheurs pour imiter la photosynthèse ne sont pas encore commercialisables, mais la création de start-ups à l'étranger pour accélérer leur développement devrait motiver la France et l'Europe à continuer à soutenir la recherche et à encourager des partenariats avec le secteur privé.

ii. Chimie verte

Les matériaux biomimétiques³⁴

Description

Le biomimétisme est une voie prometteuse de synthèse des matériaux : en reproduisant la structure des matériaux du vivant ou les mécanismes de leur élaboration, on peut obtenir des matériaux aux propriétés voisines utiles dans de nombreux domaines (emballages, produits médicaux...).

Les matériaux du vivant sont souvent des matériaux composites, alliant une phase organique et une phase minérale. Ces matériaux, parmi lesquels on trouve l'os, le verre et la nacre, présentent des propriétés mécaniques inégalées en laboratoire à l'heure actuelle. Ainsi, la nacre résiste mieux à la fracture que les meilleures céramiques que l'on sait fabriquer actuellement. La biominéralisation désigne le phénomène par lequel les matériaux du vivant sont synthétisés.

Intérêt dans le contexte de l'économie verte

Reproduire en laboratoire la structure de ces matériaux ou, mieux, les conditions de la minéralisation est un vrai défi pour les physiciens et les chimistes. Cela pourrait permettre de trouver de nouvelles voies de production des matériaux plus respectueuses de l'environnement.

Les matériaux du vivant suscitent un réel intérêt dans le monde de la recherche pour différentes raisons :

- ils présentent un haut degré d'organisation

³³ Site du programme : http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&RCN=85749

³⁴ D'après l'excellent article de synthèse *Les matériaux biomimétiques*, Corinne Chevillard et Patrick Guenoun, Bulletin de la SFP (155), juillet-août 2006

- ils sont adaptés à des contraintes extérieures variées
- alors qu'ils présentent de hautes propriétés, ils sont fabriqués à partir d'ingrédients aux propriétés médiocres mais durables
- **ils sont obtenus dans des conditions environnementales modérées (de température, pression, pH), sans solvants toxiques et ne génèrent pas de déchets non valorisés** : leur synthèse permettrait donc de réduire les coûts engendrés traditionnellement par les conditions extrêmes nécessaires aux réactions

Etat des connaissances et enjeux de la recherche

L'organisation structurale des matériaux du vivant fait intervenir des processus d'auto-assemblage de « briques élémentaires » de taille nanométrique : leur construction est « bottom-up », contrairement à l'approche « top-down » généralement utilisée en science des matériaux. La compréhension de ces phénomènes et du couplage entre les différentes échelles est cruciale pour parvenir à fabriquer des matériaux biomimétiques.

Les matériaux biocomposites sont composés d'une phase organique (protéines) et d'une phase minérale (généralement carbonate ou phosphate de calcium, silice ou oxyde de fer). Le contrôle de la biominéralisation est un processus complexe faisant intervenir de nombreuses rétroactions. Il est de mieux en mieux compris par les chercheurs.

Les principaux enjeux rencontrés lorsque l'on passe de l'étude des différentes étapes de la biominéralisation à la synthèse d'un matériau biomimétique entier sont :

- le passage d'une surface de minéralisation unique à une multitude d'interfaces organiques-inorganiques
- le passage d'une approche séquentielle de la mise en place des phases organiques et inorganiques à une approche couplée

En 2011, des chercheurs d'une université canadienne³⁵ ont réussi à synthétiser de la nacre artificielle, avec quelques limites. Cependant, on dispose encore dans l'ensemble de très peu de voies de synthèse biomimétique complètes.

Parvenir à élaborer des matériaux biomimétiques par une stratégie de construction ascendante pourrait permettre de répondre à des défis technologiques et industriels importants. En particulier, savoir élaborer des matériaux à l'échelle nanométrique est crucial pour répondre aux besoins de miniaturisation en l'électronique et aux besoins du domaine chirurgical.

Atouts de la France et recommandations

En France, différentes équipes travaillent sur les matériaux et surfaces bio-inspirés (voir tableau 1 pour rappel).

Une collaboration entre physiciens, physico-chimistes et biologistes est nécessaire pour mieux appréhender les matériaux naturels et savoir les reproduire.

Conclusion

La recherche sur les matériaux du vivant pourrait donner lieu à des applications déterminantes dans le contexte de l'économie verte si elle permettait de mettre au point des voies industrielles de synthèse de matériaux biomimétiques dans des conditions douces, telles les conditions naturelles de biominéralisation.

³⁵ Université Mc Gill, The Biomimetic Materials Laboratory dirigé par François Barthelat, rencontré à la conférence *International Bionic Engineering* de Boston en septembre 2011

Les biotechnologies blanches

Description

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* »³⁶.

On distingue souvent trois catégories de biotechnologies :

- Les biotechnologies vertes, d'intérêt agricole
- Les biotechnologies rouges, d'intérêt médical
- Les biotechnologies blanches, d'intérêt industriel (hors industrie pharmaceutique)

Au sein des biotechnologies, nous nous intéresserons uniquement aux biotechnologies blanches, i.e. aux biotechnologies utilisées dans l'industrie, en excluant l'exploitation de la biomasse végétale et la production de biocarburants.

Les principales voies utilisées en biotechnologie sont les suivantes :

- Utilisation de micro-organismes (génétiquement modifiés ou non) et de leur appareil enzymatique pour produire des molécules d'intérêt, en réacteur fermé
- Utilisation d'enzymes ou autres biocatalyseurs extraits de micro-organismes (génétiquement modifiés ou non) pour catalyser des réactions chimiques in vitro
- Production et utilisation de catalyseurs artificiels bio-inspirés pour effectuer des réactions choisies (ex : les photozymes, catalyseurs de synthèse activés par la lumière).

Les biotechnologies blanches sont utilisées dans différents secteurs :

- **production d'aliments, matériaux et produits chimiques** : détergents et tensioactifs, alimentation humaine (pâtisserie, panification, vins, jus de fruits, alcools, arômes et colorants alimentaires de synthèse...), alimentation animale, cosmétiques, pâtes et papiers, plastiques, chimie fine, herbicides, extraction de métaux et minéraux ;
- **traitements divers** : tannage du cuir, désencollage/désamidonnage de textiles, traitement des graisses, traitement et reconversion des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire ;
- **énergie** : production de méthane (digestion de biomasse), photolyse de l'eau en hydrogène par certains micro-organismes ;
- **environnement – bioremédiation** : biocapteurs mesurant le niveau de pollution, traitement des eaux usées, dépollution ou détoxification des sols, recyclage innovant.

Différents exemples seront détaillés par la suite dans le tableau 3.

Intérêt dans le contexte de l'économie verte

L'OCDE souligne régulièrement la contribution des biotechnologies à la lutte contre le changement climatique et à la préservation de l'environnement. « *La biotechnologie permet de développer des procédés éco-efficients et des produits non seulement plus rentables mais aussi plus respectueux de l'environnement...bien au delà de ce qu'aurait permis l'usage de technologies chimiques classiques* »³⁷.

³⁶ OCDE, 2001, *Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle*

³⁷ OCDE, 2001, *Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle*

En effet, utiliser un biocatalyseur pour effectuer une réaction chimique permet en théorie de se trouver dans des conditions standard de température et de pression, sans avoir recours à des solvants organiques toxiques, et de réduire les sous-produits ou « déchets » de la réaction. Les biocatalyseurs comme les enzymes permettent d'augmenter le rendement d'une réaction d'une façon très efficace ; ils sont généralement spécifiques d'une réaction donnée. Le recours généralisé à des biocatalyseurs dans le secteur industriel pourrait ainsi permettre d'énormes économies d'énergie, de produits chimiques et de déchets à traiter. Dans certains secteurs de l'industrie chimique, ces progrès ont parfois été estimés (voir figure 8). De plus, l'efficacité et la spécificité des biocatalyseurs sont sans cesse améliorées grâce aux outils de la biotechnologie.

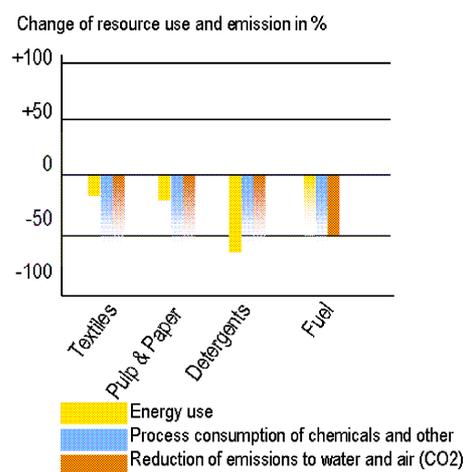


Figure 7. Impact des biotechnologies blanches sur l'empreinte écologique de certaines industries³⁸

De son côté, un Groupe d'étude de l'OCDE a réalisé plusieurs études de cas, qui figurent dans le rapport *Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle* (2001). Leurs principaux résultats figurent dans le tableau 3. Bien que ces données ne soient pas très récentes, elles permettent néanmoins de donner un ordre de grandeur des progrès environnementaux réalisés grâce aux biotechnologies blanches.

³⁸ Source : Joint Research Centre (2008) — *Consequences, Opportunities and Challenges of Modern Biotechnology for Europe – The Analysis Report – Contributions of modern biotechnology to European policy objectives.*

Secteur	Entreprise (pays)	Procédé	Avantages économiques	Avantages environnementaux
Chimie fine	Biochemie (Allemagne)	Catalyse enzymatique pour la fabrication de la céphalosporine (antibiotique)	Diminution des coûts de production	100 fois moins de solvants résiduels destinés à être incinérés
	Hoffmann La-Roche (Allemagne)	Production de vitamine B2 par des microorganismes au métabolisme modifié, en 1 étape au lieu de 6	Diminution des coûts de production (-50%)	Matières non renouvelables : -75% Emissions de composés organiques volatils : -50%
	DSM (Pays Bas)	Fabrication de céphalexine par des microorganismes	Diminution des coûts de production	Réduction des déchets d'un facteur 3 à 7
Produits chimiques intermédiaires	Avecia (Royaume-Uni)	Obtention de l'acide S-chloropropionique grâce à des bactéries qui dégradent sélectivement les isomères R.	Amélioration de la productivité d'un facteur 20 par rapport aux procédés chimiques. Diminution des coûts de production	Réduction des sous-produits résiduels à traiter et éliminer.
Polymères	Baxenden Chemicals (Royaume-Uni)	Catalyse enzymatique pour la polymérisation du polyester	Polymères ayant une plus grande valeur comme adhésif fusible à chaud	Pas de solvants organiques et d'acides inorganiques Economie de 2000MW par an à l'échelle industrielle
	Cargill Dow LLC (Etats-Unis)	Fabrication de polylactide : biopolymère produit par des bioprocédés à partir de maïs	Diminution des coûts de production (moindres besoins en énergie et matières premières)	Bioplastique issu de ressources renouvelables, biodégradable, recyclable, compostable. Peut remplacer le nylon, le PET, le polyester et le polystyrène. Réduction de la consommation d'énergie fossile de 20 à 50%. Travail sur la production de PLA à partir de cellulose (déchets végétaux).
Agro-alimentaire	Cereol (Allemagne)	Catalyse enzymatique pour la démulcination des huiles végétales	Réduction globale des coûts de 43%	Réduction de 92% de la quantité d'eau utilisée, de 88% des boues résiduelles

Traitement des fibres	Windel (Pays-Bas)	Procédé enzymatique pour le blanchiment des textiles avant la teinture.	Réduction globale des coûts de 9%	Economies d'eau (17%), d'énergie (9 à 14%)
Extraction minière et affinage des métaux	Billiton (Afrique du Sud)	Extraction du cuivre de minerai sulfuré par des bactéries (« biolixiviation »).	Equipements 25% moins chers que les fours de fusion.	Procédé ayant lieu in situ, moindre transport. Pas de fours de fusion rejetant de grandes quantités de polluants dans l'atmosphère
	Budel Zinc (Pays-Bas)	Traitement des effluents acides des raffineries de zinc par des bactéries. Le sulfure métallique engendré est réintroduit dans le cycle de production.		Réduction de la concentration en métaux lourds dans les effluents d'un facteur 10 à 40, pas de gypse résiduaire contaminé.

Tableau 3. Etudes de cas de l'OCDE, visant à évaluer l'impact environnemental de biotechnologies blanches utilisées dans l'industrie³⁹

En résumé, selon l'OCDE, les biotechnologies blanches « ont des retombées économiques et environnementales positives grâce à l'adoption de procédés moins coûteux et plus respectueux de l'environnement que les procédés classiques auxquels ils se substituent »⁴⁰.

Néanmoins, il est nécessaire de considérer l'ensemble du cycle de vie de ces biotechnologies blanches avant de conclure quant à leurs bienfaits environnementaux. La production d'enzymes et la culture de micro-organismes ont eux-mêmes des impacts dont il faut tenir compte. Or, les ACV complètes sont encore rares. Selon Thibaud Coradin, chercheur au Collège de France : « à large échelle, le gain en termes de consommation d'énergie est difficile à évaluer même si les propriétés de biocatalyse sont encourageantes ». De nombreuses entreprises disent pratiquer ou s'intéresser à la chimie verte, mais il est nécessaire de s'assurer que les gains environnementaux sont bien au rendez-vous et qu'il ne s'agit pas (une fois de plus) de « greenwashing ».

Pour conclure, il faut garder à l'idée que :

- d'une part, « les principaux moteurs de l'adoption de bioprocédés et bioproduits plus efficaces sont les économies qu'elle permet de réaliser et l'amélioration de la qualité ou des performances des produits ; les considérations d'environnement n'arrivent qu'après »⁴¹
- d'autre part, il existe encore certaines zones d'ombre sur le cycle de vie complet des biotechnologies blanches, en particulier sur leur production,
- enfin, la balance économique n'est peut-être pas aussi évidente à établir que le suggère l'OCDE, car « l'utilisation de catalyseurs biologiques à large échelle a un coût certain par rapport à des catalyseurs chimiques »⁴²

³⁹ OCDE, 2001, *Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle*

⁴⁰ Ibid

⁴¹ Ibid

⁴² Selon Thibaud Coradin, chercheur au Collège de France

Etat des connaissances et enjeux industriels

D'un point de vue économique et industriel, le domaine de la biotechnologie est, dans l'ensemble, encore en plein essor. Selon un rapport⁴³ de l'OCDE publié en 2009, « *dans la zone de l'OCDE, les biotechnologies pourraient assurer 2.7 % du PIB en 2030 [contre moins de 1% en 2009], leur apport économique se manifestant surtout dans l'industrie et la production primaire* ». L'Union européenne a d'ailleurs investi 1,9 milliard d'euros sur le thème « Alimentation, agriculture et pêche, et biotechnologie » à l'occasion du septième programme-cadre.

Les biotechnologies blanches occupent une place de plus en plus importante dans l'industrie. Selon l'OCDE, « *la part des produits biochimiques (autres que pharmaceutiques) dans l'ensemble de la production chimique pourrait passer de 1.8 % en 2005 à 12-20 % en 2015* ». L'OCDE estime d'ailleurs que les enzymes sont des applications biotechnologiques « *relativement matures* ». A l'horizon 2030-2040, le professeur Marc Fontecave⁴⁴ estime que le taux d'utilisation de procédés biocatalytiques pour effectuer des réactions chimiques pourrait atteindre 33%, en liaison avec le recours toujours plus grand aux biotechnologies.

Au niveau académique, de nombreuses équipes travaillent au niveau de la chimie fine (chimie organique dans l'eau, biocatalyse, nouveaux catalyseurs hétérogènes, valorisation des ressources naturelles...).

Cependant, au niveau industriel, des obstacles restent à éliminer : « *les défis technologiques, les questions de régulation, le manque d'investissement, les questions d'acceptabilité sociale et les structures de marché* ». En effet, l'OCDE fait le constat suivant : « *Parmi les petites entreprises spécialisées en biotechnologie, rares sont celles qui se sont intéressées aux biotechnologies industrielles, dans la mesure où la rentabilité de ces activités dépend de la capacité de montée en puissance de la production, capacité qui suppose des connaissances techniques spécialisées et de lourds investissements* ».

Atouts de la France et recommandations

La France a de nombreux atouts à valoriser dans le domaine des biotechnologies blanches, en particulier les dernières avancées de sa recherche publique et de ses entreprises. Ainsi, à l'Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, l'équipe d'Yvon Le Maho a découvert dans l'estomac des manchots une molécule permettant de conserver des aliments à 37°C pendant des semaines entières. Cette molécule s'est avérée être une défensine, peptide avec pont disulfure ayant la capacité de neutraliser les bactéries environnantes de façon extrêmement efficace en milieu salin. L'équipe a déposé un brevet et s'intéresse à présent à la synthèse de cette molécule et à son mécanisme d'action dans l'estomac du manchot. Les potentielles applications biotechnologiques de cette découverte promettent des progrès considérables dans le domaine très énergivore de la conservation des aliments.

A partir de ce panorama sur les biotechnologies blanches, il semblerait souhaitable, afin d'effectuer la transition vers une économie verte :

- d'encourager les industries à utiliser des biocatalyseurs, dans le domaine de la chimie verte, ou, pour reprendre les termes de l'OCDE, « *poursuivre le développement des biotechnologies et technologies connexes, et mettre en place les politiques d'accompagnement nécessaires* »⁴⁵,
- de développer des outils efficaces d'évaluation des performances économiques et environnementales des biotechnologies blanches au stade du développement,
- d'encourager voire exiger la réalisation des analyses de cycle de vie des bioprocédés, ainsi que leur communication,
- d'encourager la collaboration entre laboratoires de recherche publics, privés et entreprises,

⁴³ OCDE, 2009, *La Bioéconomie à l'horizon 2030 : quel programme d'action ?*

⁴⁴ Professeur au Collège de France, titulaire de la chaire « Chimie des processus biologiques » et chercheur au CEA

⁴⁵ OCDE, 2001, *Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle*

- de s'assurer de l'acceptabilité sociale des biotechnologies blanches et de prévenir d'éventuelles dérives pouvant mener à des conflits d'ordre éthique ou social

Conclusion

Au sein des biotechnologies, certains procédés faisant intervenir des enzymes, des micro-organismes entiers ou des catalyseurs bio-inspirés participent à l'élaboration d'une chimie douce, c'est-à-dire réalisée dans des conditions de soutenabilité forte. Ces procédés doivent continuer à être identifiés et encouragés.

b. Quelques initiatives industrielles prometteuses au regard de l'économie verte

En France, de plus en plus d'initiatives visant à « fermer » les cycles de production voient le jour, généralement portées par des PME. Les tableaux ci-dessous présentent trois de ces initiatives, à l'interface entre le monde agricole et le monde industriel. C'est pour cette raison que nous les avons retenues, bien qu'elles puissent être considérées comme des exemples d'écologie industrielle et par conséquent hors du périmètre de l'étude. Deux de ces exemples ont déjà été cités précédemment, dans la partie consacrée aux applications industrielles du biomimétisme à l'échelle mondiale. Ils sont ici approfondis et mis en valeur en tant qu'exemples pionniers en France.

Nom de l'entreprise	Phytostore, Epur Nature, Jean Voisin SA, SinBio...
Type d'activité	Phytoépuration, phytorestauration ⁴⁶
Description de l'activité et lien avec le biomimétisme	<p>Ces quatre entreprises proposent des installations permettant la dépollution de l'eau, de l'air et des sols grâce à des végétaux, dans une approche en boucle fermée.</p> <p><i>Entretien avec le président de Phytostore :</i></p> <p>Côté recherche, Phytostore a travaillé plusieurs années sur le phytolavage des sols en partenariat avec le CNRS. Elle travaille actuellement sur les signaux chimiques échangés par les plantes dans les sols.</p> <p>Côté pratique, le principe de dépollution des sols est le suivant. Différentes plantes « guérisseuses » sont choisies en fonction de différents critères (résistance au stress, variété locale...) et introduites sur le site à traiter. Les polluants biodégradables présents dans le sol sont dégradés par les micro-organismes, dont l'activité est stimulée par la racine. Pour éliminer les polluants non-biodégradables, la terre est passée sur un filtre qui piège les métaux lourds, mais pas les composés organo-chlorés, qui sont les plus difficiles à traiter. Ces composés sont alors piégés en un volume très réduit. La partie aérienne des végétaux est ensuite coupée, valorisée en fourrage pour bétail. Un sol pollué est remis en état en 2 ans en moyenne.</p> <p>La dépollution de l'eau s'opère sur le même principe, les jardins filtrants prenant alors la forme de zones humides artificielles. Les eaux usées circulent dans ces jardins et les végétaux dégradent ou fixent les différentes substances qu'elles contiennent : matière organique, azote, phosphore, germes etc. Il est possible également de traiter des boues : les résidus sont transformés en terreau épandu dans les espaces verts ou les champs</p>

⁴⁶ La phytoépuration (ou plus largement phytorestauration) est l'ensemble des technologies qui utilisent les propriétés des plantes pour traiter des pollutions. Elle peut être appliquée au traitement de l'eau (eaux usées, rejets agricoles...), des sols (boues d'épuration, friches industrielles...) et de l'air (air vicié, air des décharges...). D'après www.phytostore.com

	Enfin, les jardins filtrants permettent aussi la dépollution de l'air sous la forme de filtres végétalisés traitant les gaz viciés, éliminant les mauvaises odeurs, désinfectant l'air etc. Inspiration : INTERACTIONS/BIOASSISTANCE
Avantages environnementaux (Informations déclaratives)	Approche intégrée, en boucle fermée, de la dépollution de l'air, de l'eau et des sols. Peu de déchets grâce à la valorisation de la biomasse végétale en fourrage ou terreau. Il serait intéressant d'acquérir des informations complémentaires sur le devenir des filtres chargés de métaux lourds.
Aspects économiques	Etat d'avancement : R&D et COMMERCIALISATION
Site internet	Phytostore : www.phytostore.com Epur Nature : www.epurnature.fr/fr Sinbio : www.sinbio.fr/
Contact	Phytostore : Thierry Jacquet, président, info@phytostore.com Jean Voisin: Joelle Paing, j.voisin.sa@wanadoo.fr

Nom de l'entreprise	Zoe Biotech
Type d'activité	Production de protéines animales à partir de larves de mouche
Description de l'activité et lien avec le biomimétisme	La start-up Zoe Biotech travaille en partenariat avec l'IRD sur la production de protéines à partir de larves de mouche. Cela pourrait permettre de trouver une alternative à la farine de poisson (dont la production nécessite 4 kg de poisson pour 1 kg de farine) pour nourrir les élevages aquacoles. A terme, l'objectif est de proposer un nouveau schéma de pisciculture intégrée et de le promouvoir en France. Trois projets sont en cours de réalisation : <ol style="list-style-type: none"> 1. Faire grandir des larves de mouche sur un substrat de déchets d'élevage (déjections porcines, fumier bovin...), à l'échelle industrielle. 2. Transformer ces larves en farine, pour remplacer la farine de poisson en aquaculture 3. Transformer le digestat de larve en amendement organique de haute qualité en le faisant lombricomposter. Zoe Biotech possède une unité pilote près de Marseille. Elle utilise un brevet de l'IRD. Inspiration : INTERACTIONS/BIOASSISTANCE
Avantages environnementaux (Informations déclaratives)	+ Recyclage des déchets d'élevage : réduction de la charge en nitrate du fumier de 60% grâce aux larves. Alternative à la production de farine de poisson, dans un contexte d'épuisement des ressources halieutiques - Consommation d'énergie pour : chauffer les serres de développement des larves (chauffage au fioul), les pasteuriser, les sécher et les extruder à froid.
Aspects économiques	Etat d'avancement : R&D
Site internet	http://zoebiotech.com/
Contact	Rémi Burdairon, fondateur : rburdairon@zoebiotech.com

	Axel Tarrisse, en charge du volet technique : atarrisse@zoebiotech.com
Nom de l'entreprise	UpCycle
Type d'activité	Recyclage du marc de café et production de champignons dans des micro-fermes urbaines
Description de l'activité et lien avec le biomimétisme	<p>La société UpCycle a imaginé le dispositif suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - collecte du marc de café issu des distributeurs automatiques par leur gestionnaire - livraison du marc de café utilisé à la micro-ferme urbaine, installée dans un ancien container maritime - ensemencement avec des spores de champignons (pleurotes) : ceux-ci enrichissent le marc, le transformant progressivement en compost - vente des champignons dans des circuits courts (marchés, épiceries solidaires...) - épandage du compost (enrichi par les racines des champignons) dans des jardins partagés locaux <p>Elle travaille également sur un projet d'aquaponie urbaine, encore en phase amont. Ce projet s'inspire de travaux chinois sur la pisciculture durable, et cherche à reproduire le schéma suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - digestion de déchets agricoles ou aquacoles par des microorganismes et production de méthane - combustion du méthane pour faire de l'énergie thermique ou électrique - épandage des boues générées par les microorganismes sur des cultures d'algues - utilisation d'algues pour nourrir les poissons - production de déchets aquacoles, et retour à la 1^{ère} étape <p>Inspiration : INTERACTIONS/BIOASSISTANCE</p>
Avantages environnementaux (Informations déclaratives)	<p>+ Recyclage du marc de café grâce à une approche en boucle fermée. Pas de déchets. Pas de recours aux produits chimiques. Réutilisation d'anciens containers maritimes. Participation à une économie sociale et solidaire.</p> <p>- Consommation d'énergie pour refroidir les serres. L'ACV va être réalisée prochainement par la Ville de Paris.</p>
Aspects économiques	Etat d'avancement : R&D et COMMERCIALISATION
Site internet	www.ufarm.fr
Contact	Cédric Péchard, directeur : cpechard@upcycle.org

Conclusions et recommandations

A partir de ces trois exemples d'activités françaises pionnières en matière d'écomimétisme, nous pouvons faire les constats suivants :

1) L'interdisciplinarité est au cœur de l'approche biomimétique. Si certains acteurs parviennent à monter des équipes pluridisciplinaires en s'entourant des profils désirés, d'autres n'y parviennent pas, faute de moyens financiers ou d'un appui institutionnel suffisant. Il serait par conséquent souhaitable que la recherche française reconnaisse les limites de l'approche sectorielle et s'ouvre davantage à des programmes interdisciplinaires.

2) Les PME sont les structures desquelles jailliront les innovations biomimétiques dans les années à venir. Selon les fondateurs des PME interrogées, les grands groupes ne s'intéressent que très peu aux innovations représentant des changements de paradigme, comme les innovations biomimétiques. Le cas échéant ils attendent plutôt que la R&D soit réalisée par des PME, qu'ils rachètent une fois le produit et le procédé finalisés.

3) La France dispose de quelques entreprises pionnières en matière de biomimétisme. Celles-ci s'intéressent à des approches intégrées du traitement des pollutions ou de la production (qui relèvent dans ce dernier cas de l'écologie industrielle). Il est nécessaire d'une part, de valoriser ces démarches, d'autre part, d'encourager la création de PME autour d'autres thématiques cruciales en biomimétisme : énergies renouvelables, matériaux bio-inspirés...

La France possède des atouts à la fois dans le domaine de la recherche et au niveau industriel à travers les travaux R&D de quelques entreprises pionnières. Cependant, il n'existe encore quasiment pas de produits à la fois biomimétiques et durables sur les marchés français. Si des mesures peuvent être prises à l'échelle nationale pour encourager l'émergence de ce secteur, la normalisation prochaine du biomimétisme à l'échelle internationale devrait (en théorie) permettre de mieux définir le concept en tant que méthode d'innovation et d'améliorer la communication entre ses différents acteurs. C'est ce que nous verrons dans la partie suivante.

3. La normalisation internationale du biomimétisme dans l'industrie

Comme nous l'avons dit précédemment, AFNOR est un acteur à ne pas oublier lorsque l'on s'intéresse au biomimétisme, depuis que le 15 mai 2011 l'Institut allemand de normalisation (DIN) a soumis à l'ISO une proposition visant à créer un nouveau domaine de normalisation concernant « les méthodes et approches du biomimétisme, incluant les résultats les plus récents des projets de R&D »⁴⁷.

A l'échelle nationale, AFNOR a donc lancé en juin 2011 une enquête⁴⁸ afin d'élaborer la position de la France sur la création d'un nouveau comité technique ISO dédié au biomimétisme. Pour rappel, le Comité stratégique référent proposé est le CoS « Ingénierie industrielle, biens d'équipement et matériaux ». La chronologie des événements est résumée ci-dessous.

15 mai 2011	Envoi de la proposition du DIN allemand à l'ISO.
	L'ISO lance alors une consultation auprès de tous les pays membres.
20 juin 2011	Consultation nationale : envoi d'une enquête par AFNOR à différents Comités stratégiques (CoS) et Commissions de normalisation existantes (CN), ainsi qu'à une liste très large de contacts (plus de 3000 personnes ont reçu l'enquête, hors CoS et CN) – document N 339
20 juillet 2011	Réception des résultats par AFNOR (seulement 12) Puis rédaction de la position française
20 septembre 2011	Consultation internationale : publication des résultats, diffusion en France par AFNOR – document N 359
2 décembre 2011	Annonce par l'ISO de la création officielle d'un nouveau comité technique : ISO/TC 266 – Biomimetics
2012	AFNOR va organiser une réunion de toutes les parties prenantes potentiellement intéressées pour participer à ces travaux, de façon à organiser le suivi français des travaux à l'ISO

a. Contenu de la demande du DIN

Remarque : dans cette section, nous reprenons la proposition allemande telle qu'elle a été formulée par le DIN. Les formulations ne sont donc pas neutres.

Un nouveau comité technique ISO doit prendre en charge la normalisation internationale du biomimétisme. Le biomimétisme est défini comme « la démarche de transfert de solutions et propriétés d'un ou plusieurs systèmes biologiques dans des applications techniques ». Le biomimétisme est ici synonyme de bionique ou de biomimétique. Tous les secteurs d'application sont concernés. « Tout le processus biomimétique, du développement des idées à la création des produits, est à décrire et à normaliser ».

⁴⁷ AFNOR normalisation, Document N 339 (20/06/2011), *Biomimétisme – Création de nouveau domaine de normalisation*, CoS référent : "Ingénierie industrielle, Biens d'équipement et matériaux"

⁴⁸ Ibid

Objectifs

- permettre « la dissémination des principes bioniques pour l'efficacité énergétique, le développement technique durable et la préservation des ressources »
- « rendre le travail interdisciplinaire possible ». En effet, « si la connaissance du vivant a largement progressé, la combinaison de ces connaissances biologiques avec les techniques nouvelles de simulation et production de matériaux est encore exceptionnelle surtout en raison d'un manque de communication entre les scientifiques de différentes spécialités ».
- « permettre une traduction efficace des résultats de recherche en produits techniques tout au long de la chaîne de valeur à travers une collaboration étroite des biologistes, ingénieurs, et experts d'autres disciplines ».

Pourquoi la normalisation ?

Les normes peuvent jouer un grand rôle pour répondre à ces objectifs. Il s'agirait de créer un langage commun à l'échelle mondiale en standardisant les termes, les méthodes, et les définitions. Cela simplifierait grandement la coopération internationale autour de projets biomimétiques.

Organisation

Le DIN demande la création d'un comité technique ISO dédié au biomimétisme, même si de nombreux comités techniques peuvent déjà abriter de nouveaux travaux sur le biomimétisme, du fait de son interdisciplinarité.

L'ISO/TS/P22 propose la création de trois groupes de travail :

1. *Concept et stratégie : élaboration d'une norme générale différenciant les procédés conventionnels et les procédés biomimétiques*
2. *Structures et matériaux : élaboration de normes de surfaces, outils, structures et matériaux bioniques*
3. *Optimisation bionique et traitement de l'information : élaboration de normes relatives à ces deux thèmes*

Analyse de la proposition du DIN⁴⁹

Par cette proposition de création d'un comité technique ISO de normalisation sur le biomimétisme, les Allemands anticipent la création d'un marché important de technologies biomimétiques et souhaitent valoriser leurs avancées dans le domaine. Les exemples de normes donnés pour illustrer le domaine couvert par les trois groupes de travail proposés sont extrêmement précis (voir les documents d'AFNOR à la fin des annexes). Les Allemands ont donc des technologies déjà prêtes qu'ils souhaitent standardiser.

b. Enquête d'AFNOR en France

Présentation

Suite à la demande du DIN, une consultation ISO internationale a été lancée. En France, AFNOR a mené l'instruction et a été chargé de l'enquête auprès des parties intéressées. L'enquête a été lancée le 20 juin 2011 auprès de 9 CoS, une vingtaine de CN, rattachées ou non à AFNOR, et de nombreux contacts indépendants d'AFNOR (plus de 3000 personnes hors CoS et CN).

Chaque structure sollicitée devait émettre un avis sur l'ouverture de ces travaux de normalisation (avis favorable/avis défavorable/pas d'avis), dire si elle souhaitait être informée sur ces travaux et/ou y être associée, et formuler d'éventuels commentaires.

⁴⁹ D'après une discussion avec Viviane Apied, responsable ministérielle aux normes pour le MEDDTL

Position de la France

Malgré un nombre de réponses assez faible à l'enquête, la France donne un avis favorable à l'ouverture de ces travaux et demande (pour l'instant) à être membre O, c'est-à-dire membre Observateur.

c. Résultats de la consultation internationale et conséquences

La consultation internationale pour la création d'un nouveau comité technique ISO sur la normalisation du biomimétisme a abouti à un résultat positif (voir tableau 4), distribué le 20/09/2011 par AFNOR aux structures sollicitées lors de l'enquête.

Détail des résultats

Sur 27 pays sollicités, 15 sont d'accord avec la proposition du DIN allemand, 14 avec le champ couvert par le nouveau comité technique ISO, 12 avec le programme de travail. Cinq pays souhaitent participer activement à ces travaux : Chine, Corée, Japon, Pays-Bas, République Tchèque. Le secrétariat est assuré par l'Allemagne. La majorité des 2/3 est atteinte dans la mesure où les pays s'abstenant ne sont pas pris en compte dans le calcul.

Title/Titre **ISO/TS/P 222 Biomimetics**

Member Body	Date of reply	Agreement with proposal			Agreement With scope		Agreement With WP		Participation				Comments
		Yes	No	Abs	Yes	No	Yes	No	S	P	O	N	
Argentina	2011-08-18	X			X						X		
Armenia	2011-08-03			X								X	
Australia	2011-08-23			X								X	
Belgique	2011-08-17	X			X		X				X		
Canada	2011-08-15			X								X	
China	2011-08-19	X				X	X			X			X
Czech Rep.	2011-08-16	X			X		X			X			
Denmark	2011-08-19	X			X		X				X		
Finland	2011-08-16	X			X						X		
France	2011-07-28	X				X		X			X		X
Germany	2011-08-17	X			X		X		X				
India	2011-08-20			X									
Iran	2011-08-03				X		X				X		
Italy	2011-07-21			X									
Japan (JISC)	2011-07-27	X			X		X			X			
Kazakhstan	2011-08-03				X		X				X		
Korea	2011-07-20				X		X			X			
Malaysia	2011-08-04	X			X						X		
Netherlands	2011-08-19	X			X		X			X			
New zealand	2011-08-23			X								X	
Serbia	2011-07-18	X			X						X		
Spain	2011-08-04			X								X	
Sweden	2011-08-18	X									X		X
Switzerland	2011-08-19	X					X				X		
Thailand	2011-08-17	X			X		X				X		
United Kingdom	2011-07-22		X					X				X	X
USA	2011-08-19			X							X		X
Total 27 replies		15	1	8	14	2	12	2	1	5	13	6	5

GF/2011-08-25

Tableau 4. Résultats de la consultation internationale ISO sur la normalisation du biomimétisme⁵⁰

Légende :

⁵⁰ Source : Document N 359 d'AFNOR normalisation, *Biomimétisme – création de nouveau domaine international de normalisation – Résultat*, Comité Stratégique "Ingénierie industrielle, Biens d'équipement et matériaux", 20/09/2011

- colonne « *Agreement with WP* » : WP = *work programme (programme de travail)*
- colonne « *Participation* » : S = *secrétariat*, P = *participation active*, O = *observateur*, N = *No*

Analyse

On remarque la forte présence des pays asiatiques dans les membres souhaitant participer activement aux travaux (membres P) : Chine, Corée, Japon. Il est intéressant de noter que :

- la Chine a souhaité exclure des travaux le domaine des robots,
- les Etats-Unis se sont abstenus car le domaine serait trop vaste et les technologies pas encore au stade d'être normalisées - toutefois ils seront observateurs,
- le Royaume Unis a émis un avis négatif sur le motif que rien n'empêche les produits concernés d'accéder aux marchés et qu'ils sont de toutes façons couverts par des Commissions de normalisation existantes.

Conséquences

Le 2 décembre 2011, l'ISO a annoncé aux pays membres la création d'un nouveau comité technique ISO : ISO/TC 266 – Biomimetics.

Ce comité a 18 mois pour proposer son plan d'action. Il aura à « réfléchir sur son nom, l'étendue de ses attributions, établir un programme de travail préliminaire et élaborer un premier *Business plan* »⁵¹. Il se réunira probablement pour la 1^{ère} fois en 2012.

A présent, les pays membres doivent donc à l'échelle nationale réfléchir rapidement à la façon dont ils souhaitent suivre ces travaux.

d. Perspectives et contacts

Perspectives à court terme

Maintenant que le groupe de travail à l'ISO a été officiellement créé, AFNOR va organiser une réunion des parties intéressées en France courant 2012. Il s'agira de voir s'il y a suffisamment d'intérêt en France pour ces travaux de normalisation, et si oui, de réfléchir à un éventuel passage de « membre O » (observateur) à « membre P » (participant) ainsi qu'à la création d'une commission miroir. Une participation implique de se positionner sur le plan d'action, les projets de normes par les votes et l'envoi d'experts à l'ISO qui participeront aux réunions du comité technique et de ses groupes de travail, et donc d'être en mesure d'en assurer le financement.

Même si la France a rendu un avis favorable dans la consultation ISO, des réticences ont été exprimées par certains acteurs. Le MEDDE, s'il participe à ces travaux, peut y assurer un rôle de catalyseur dans le domaine de l'innovation biomimétique.

Depuis juin 2011, la normalisation du biomimétisme est donc en train de se mettre en place à l'échelle internationale. Étant donné le marché important que représenteront les technologies biomimétiques d'ici 2020 et le poids des normes ISO, il apparait essentiel que la France participe à ces travaux de normalisation, ou au moins les suive avec intérêt.

⁵¹ Lettre du secrétariat général de l'ISO aux Etats membres, annonçant officiellement la création du Comité technique 266-Biomimetics, datée du 2 décembre 2011, voir fin des annexes

Conclusion

A l'issue de cette partie consacrée aux applications industrielles du biomimétisme, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Conclusions générales

- **Le vivant a toujours été une source d'inspiration et d'innovation** illimitée pour les humains, mais pas spécialement dans un but de durabilité. La notion de biomimétisme, qui aujourd'hui « chapeaute » artificiellement de nombreux domaines, est une méthode de *re-engineering* cherchant des solutions aux défis techniques parmi les propriétés remarquables du vivant.
- Un **nombre croissant d'entreprises** s'intéresse au biomimétisme comme outil d'innovation durable, notamment aux Etats-Unis, en Allemagne et en Asie.
- L'innovation biomimétique donnant lieu à un produit commercialisable est pour l'instant rare, et sa préoccupation première est bien plus la réduction des coûts de production que le développement durable. **Le biomimétisme est encore principalement au stade de la recherche et développement**, quelque soit le secteur considéré : énergies renouvelables, matériaux bio-inspirés, procédés biocatalytiques, revêtements superhydrophobes, nouvelles interfaces...
- **Les produits biomimétiques en vente sur le marché représentent rarement de véritables ruptures technologiques.** Les innovations s'inspirant d'une forme ou d'un processus naturels sont moins durables que les applications écomimétiques, dont le cycle de vie complet a été pensé en « boucle fermée ». De façon générale, on manque de données sur les cycles de vie des applications bio- et écomimétiques.
- Selon le domaine considéré, **le manque de connaissances sur les systèmes naturels est une limite plus ou moins forte à l'innovation.** Si la recherche fondamentale se heurte à d'importantes lacunes, par exemple en science des matériaux biologiques, la majorité des industriels s'intéressant au biomimétisme aujourd'hui s'inspirent de propriétés du vivant bien connues et ne cherchent pas à les imiter fidèlement. Leur principale difficulté est l'industrialisation des matériaux et procédés ainsi développés.
- Le biomimétisme est un **marché amené à se développer** fortement dans les prochaines années (voir I.3.a), mais il faut veiller à ce que le critère de durabilité soit bien respecté dans ces nouveaux produits et technologies, afin d'éviter toute publicité mensongère.
- Le biomimétisme, bien que concept extrêmement vaste, est amené à être normalisé dans le cadre d'un **nouveau comité technique à l'ISO** : le suivi de ces travaux est indispensable pour accompagner l'émergence d'une industrie biomimétique, quel que soit le pays concerné.

Conclusions spécifiques à la France

- La France compte de **nombreuses équipes de recherche** travaillant sur des thématiques liées au biomimétisme, mais quasiment aucune entreprise développant ou commercialisant des produits identifiés comme « biomimétiques » et durables.
- Certains projets de recherche liés au biomimétisme sont très prometteurs dans le contexte de l'économie verte : **la photosynthèse artificielle, la biominéralisation, la biocatalyse...** Ces projets ne sont pas tous opérationnels mais la mise au point d'applications peut être accélérée par une augmentation des financements de ces projets et une plus grande interaction entre chercheurs et industriels.
- Certaines **entreprises pionnières** cherchent à « boucler » les cycles de vie de leurs produits, leur démarche relevant alors de **l'écomimétisme**. Ces PME doivent faire face à des difficultés de natures variées : manque de

reconnaissance pour cause d'activité « hybride » entre des secteurs d'habitude indépendants, pression des grands groupes, manque de visibilité auprès des chercheurs du domaine public...

- Le biomimétisme commence à devenir populaire en France mais ses différents acteurs ne disposent pour l'instant d'aucun espace commun d'échange et de réflexion, comme ce peut être le cas dans d'autres pays (Réseau Biomimicry aux Etats-Unis ou BIODON en Allemagne).
- **Tous les acteurs français rencontrés ont exprimé leur enthousiasme quant à la tenue d'un colloque sur le biomimétisme**, qui permettrait enfin aux chercheurs, ingénieurs, agriculteurs, décideurs, experts etc. de se rencontrer, et d'envisager peut-être la construction de projets communs.

Recommandations générales

Plusieurs pistes sont à explorer afin de valoriser au maximum le potentiel du biomimétisme comme outil d'innovation dans le cadre de la transition de l'économie française vers une économie verte, parmi lesquelles :

- **Encourager la recherche multidisciplinaire** autour des différentes thématiques porteuses identifiées : matériaux, énergie, chimie douce...
- **Ne pas négliger l'importance de la recherche fondamentale** et des découvertes dues au hasard, en particulier lorsqu'il s'agit de déceler des propriétés remarquables chez les êtres vivants
- **Améliorer la coopération entre la recherche publique et l'industrie**, qui est cruciale pour l'essor d'une industrie biomimétique et durable ; vaincre la frilosité de certains acteurs
- **Ne pas se contenter de progrès marginaux en termes de durabilité** au moment de développer des produits biomimétiques, pour éviter le *greenwashing*
- Pour cela, **promouvoir le recours systématique à l'analyse de cycle de vie** pour quantifier les progrès réalisés, et exiger la publication de ses résultats
- Continuer à recenser et valoriser les projets de laboratoires ou entreprises françaises utilisant le biomimétisme comme un outil de durabilité
- **Suivre de très près les travaux de normalisation** du biomimétisme à l'ISO, voire y participer activement en y jouant un rôle de catalyseur.

III. S'inspirer des écosystèmes naturels pour concevoir des agro-écosystèmes durables⁵²

1. Introduction

a. Contexte et enjeux

A l'échelle mondiale, l'accroissement de la population exige une production alimentaire toujours plus importante : nous serons probablement 9 milliards d'êtres humains en 2050. Les quantités produites par l'agriculture aujourd'hui pourraient permettre de nourrir 12 milliards d'êtres humains si elles étaient réparties équitablement⁵³ et mieux utilisées, mais à l'heure actuelle plus d'un milliard de personnes souffrent de sous-nutrition⁵⁴, soit une personne sur sept.

Or l'agriculture moderne, dite « conventionnelle », est aujourd'hui dans une impasse. Cette agriculture intensive, qui repose depuis 50 ans sur le modèle « progrès génétique + engrais + traitements phytosanitaires », a pour priorité la maximisation des rendements et des profits à court terme. Ses impacts environnementaux sont nombreux⁵⁵ :

- érosion et réduction de la qualité des sols
- perte de biodiversité (espèces et variétés cultivées, animaux d'élevage, haies, oiseaux nicheurs en milieu agricole...)
- propagation des maladies
- résistance aux nuisibles
- déforestation
- baisse de la qualité de l'eau (eaux de surface et eaux souterraines)
- grande dépendance aux énergies fossiles, d'où de fortes émissions de gaz à effet de serre (GES)
- atteintes à la santé des humains et des animaux (exposition directe des agriculteurs aux produits chimiques d'où une augmentation du risque de cancer, résidus de pesticides dans l'alimentation...)

La majorité de ces impacts environnementaux se retrouvent également en **aquaculture intensive**⁵⁶ : pollution de l'eau (déchets, antibiotiques), déforestation (notamment mangrove dans les zones tropicales), érosion des stocks halieutiques (en particulier pour la production de farine et huile de poisson destinés à l'alimentation des élevages aquacoles), propagation des maladies...

D'un point de vue économique, les agriculteurs doivent faire face à de nombreuses contraintes :

- crise financière,
- augmentation du prix du pétrole et des intrants chimiques,
- dépendance sans cesse accrue aux firmes multinationales pour l'achat d'intrants chimiques, aux semenciers, aux grandes entreprises agroalimentaires...
- incertitudes quant au contenu de la future PAC...

De plus, ils doivent s'adapter à des modifications du contexte réglementaire (ex : Plan Ecophyto 2018, issu du Grenelle de l'Environnement, de réduction des pesticides phytosanitaires⁵⁷ de 50% d'ici 2018).

⁵² « Durables » est entendu ici comme synonyme de « respectueux de l'environnement, rentables économiquement et acceptables socialement »

⁵³ Source : FAO

⁵⁴ Forme grave de la malnutrition

⁵⁵ D'après Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

⁵⁶ Nous incluons tout à fait l'aquaculture dans notre étude, mais par souci de lisibilité, nous entendons par la suite « agriculture » au sens de « agriculture et aquaculture ».

⁵⁷ Le terme « pesticides phytosanitaires » désigne l'ensemble des produits chimiques utilisés pour soigner ou protéger les cultures : il englobe donc les herbicides, les insecticides, les répulsifs...

Il est donc nécessaire de repenser les modes de production agricoles et aquacoles afin de les rendre plus durables, c'est-à-dire respectueux de l'environnement, mais également rentables économiquement et acceptables socialement. Les objectifs⁵⁸ déclarés de la nouvelle Politique Agricole Commune semblent refléter cette nécessité de compromis entre les performances environnementales, économiques et sociales de l'agriculture :

- construire une agriculture performante et durable,
- optimiser la production à la surface tout en préservant les ressources naturelles,
- assurer la viabilité des exploitations.

A l'heure actuelle, différents types d'agriculture tentent de relever le défi du développement durable dans des contextes variés. Les appellations multiples font référence à des pratiques ou approches correspondant à **différents niveaux allant de la simple amélioration du modèle conventionnel jusqu'à la rupture avec ce dernier** : agriculture écologiquement intensive, intégrée, éco-agriculture, agriculture biologique, de conservation... Les débats terminologiques sont par ailleurs loin d'être clos, ces vocables étant parfois utilisés dans des sens différents.

Ces agricultures appartiennent à différents **réseaux de solutions** pour rendre la production agricole plus durable. En effet, la **diversité** - et non l'homogénéisation - des pratiques agricoles et aquacoles en fonction de chaque contexte local est certainement une clé de succès pour effectuer la transition vers une économie verte dans ce domaine.

Ces types d'agricultures nous intéressent ici dans la mesure où, s'inspirant plus ou moins fortement des propriétés des écosystèmes naturels, ils font appel à des degrés divers à la démarche écomimétique.

⁵⁸ Source : Communication de la Commission européenne, novembre 2011

b. Acteurs

Différents acteurs participent conjointement à l'élaboration de ces nouvelles agricultures.

- Dans le domaine académique, alors que la nature et l'agriculture ont longtemps été deux paradigmes séparés, faisant l'objet de théories et modèles distincts⁵⁹, les **chercheurs** essayent aujourd'hui de réconcilier l'agronomie et la science écologique afin de répondre aux défis agricoles du 21^e siècle. L'objet né de cette volonté de réconciliation est **l'agro-écologie** :

« **L'agro-écologie** est simultanément une science, une pratique agricole et un mouvement.

En tant que **science**, l'agro-écologie vise à marier écologie et agronomie, ainsi que les sciences économiques et sociales, pour l'étude des milieux cultivés.

En tant que **pratique**, l'agro-écologie met l'accent sur le respect de l'environnement et des ressources naturelles et tire profit des services rendus par la nature.

En tant que **mouvement**, l'agro-écologie s'oppose à l'agriculture industrielle conventionnelle, consommatrice de facteurs de production extérieurs à l'exploitation agricole ; ses partisans se défendent d'une approche uniquement technique de l'agriculture, et prônent une approche globale basée sur la reconnaissance des savoirs et savoir-faire traditionnels.

Dans les trois cas, les définitions ne sont pas encore stabilisées. »

Encadré 2. Définition de l'agro-écologie⁶⁰

Les chercheurs en agro-écologie proviennent de différentes disciplines : écologie, agronomie, zootechnie, modélisation mathématique, économie... La recherche en agro-écologie peut contribuer à la mise en place d'agricultures plus respectueuses de l'environnement, intégrant à la fois le savoir écologique tiré de l'observation d'écosystèmes naturels et les savoirs et savoir-faire traditionnels des agriculteurs.

- Sur le terrain, ce sont cependant les **agriculteurs**, les **forestiers** et les **aquaculteurs** qui opéreront ce changement de paradigme, et qui sont les porteurs d'innovation. Certains agriculteurs pionniers sont déjà très actifs dans la mise en place de nouvelles agricultures : ils expérimentent des pratiques agro-écologiques à grande échelle sur leurs exploitations, diffusent les innovations mises au point à travers leurs réseaux (coopératives, associations...), siègent dans différents comités au niveau local...
- Les **agronomes** et **techniciens** qui conseillent les agriculteurs sont également très présents,
- Enfin, les **décideurs publics** ont évidemment un rôle central à jouer dans la reconnaissance, le soutien et la professionnalisation de ces nouveaux modes de production agricole et aquacole, par l'encadrement réglementaire.

⁵⁹ D'après Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

⁶⁰ Définition donnée par Marion Guillou, PDG de l'INRA, et Gérard Matheron, président du CIRAD, dans leur ouvrage commun : *9 milliards d'hommes à nourrir, un défi pour demain*, éd. François Bourin, sept 2011

c. La démarche écomimétique et les nouvelles agricultures

Au sein du réseau de solutions pour aller vers une agriculture durable, nous nous intéresserons à l'**approche dite « écomimétique » de l'agriculture**. Cette approche repose sur l'imitation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes naturels. Loin d'être l'unique solution pour rendre l'agriculture compatible avec les limites de la biosphère, elle peut néanmoins aider à concevoir des agro-écosystèmes durables à la fois en climat tropical et tempéré⁶¹.

L'**approche écomimétique de l'agriculture ne constitue pas un nouveau « type » d'agriculture** mais doit être plutôt perçue comme une **boîte à outils** mise à disposition des acteurs de la transformation de l'agriculture dans un contexte de développement durable. C'est une **démarche**, plus ou moins utilisée par les nouvelles agricultures citées ci-dessus.

Nous ne présenterons pas ces différentes agricultures en tant que telles, mais essaierons d'identifier les principes écomimétiques auxquels elles font parfois appel, puis de repérer leur mise en œuvre sur le terrain. **Volontairement, nous ne centrerons pas notre étude sur un type d'agriculture spécifique.**

Nous considérerons simplement que l'approche écomimétique de l'agriculture relève du domaine de l'**agro-écologie**, à la fois du point de vue académique et du point de vue des pratiques agricoles à différentes échelles (parcelle, exploitation, territoire). Certains types d'agriculture (comme l'agriculture écologiquement intensive) pourront néanmoins être évoqués, en comparant leurs principes à ceux de la démarche écomimétique.

La question qui guidera notre réflexion est la suivante :

« L'écomimétisme : une hypothèse réaliste pour concevoir des systèmes de culture innovants et durables ? »⁶²

Dans un premier temps, nous définirons et caractériserons l'approche écomimétique d'un point de vue théorique. Puis nous donnerons des exemples concrets de l'application des principes écomimétiques par certains agriculteurs français ou dans des projets de recherche en aquaculture écologiquement intensive. Enfin, nous tenterons de formuler quelques recommandations afin de promouvoir cette approche.

⁶¹ D'après Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

⁶² Ibid

2. [Présentation académique de l'approche écomimétique en agriculture](#)

Remarque préliminaire : Cette section reprend très largement le travail d'Eric Malézieux, chercheur au CIRAD, et en particulier sa revue *Designing cropping systems from nature*, publiée dans le journal *Agronomy for Sustainable Development* en juin 2011.

Après avoir défini l'approche écomimétique en agriculture et en avoir donné les fondements théoriques, nous énoncerons les six « principes » de cette approche identifiés par E. Malézieux, puis proposerons un cadre d'action pour leur mise en œuvre.

a. Fondements théoriques

i. Définition et enjeux de l'approche écomimétique

L'approche écomimétique de l'agriculture repose sur l'idée que la structure et/ou le fonctionnement des écosystèmes naturels peuvent être des modèles à imiter pour concevoir les systèmes agricoles (ou aquacoles). Cette approche part de l'hypothèse qu'il est possible de construire des agro-écosystèmes durables en imitant les communautés naturelles (à la fois végétales, animales, microbiennes...), qui sont durables et adaptées aux contraintes locales.

Les propriétés des écosystèmes naturels que l'on cherche à imiter par l'approche écomimétique en agriculture sont :

- La productivité totale
- La stabilité
- La résilience⁶³
- L'efficacité énergétique
- La durabilité, à la fois dans le temps et d'un point de vue environnemental (« compatibilité avec la biosphère »)

Le tableau 5 présente une comparaison des caractéristiques des écosystèmes naturels, des agrosystèmes traditionnels et des agrosystèmes modernes.

L'approche écomimétique consiste à tirer l'agriculture moderne de la 3^e colonne vers la 1^{ère}, en s'inspirant des caractéristiques des écosystèmes naturels. Les agricultures traditionnelles sont également une source importante d'idées pour la conception d'agro-écosystèmes. On pense notamment aux pratiques d'abattis-brûlis, ou à l'agroforesterie.

⁶³ Capacité d'un écosystème à se réorganiser pour restaurer sa structure et ses fonctions initiales après une perturbation

Table 1 Characteristics of natural ecosystems, traditional, and modern agriculture

	Natural ecosystems	Traditional agriculture	Modern agriculture
Species richness	High	Medium	Low
On a plot scale	One ha of tropical forest contains more than 100 tree species	Most cropping systems include several plant species	Most cropping systems have a sole crop
On a global scale		Traditional agriculture is based on many species and cultivars including native species	World industrial agriculture is based on fewer than 70 species
Structure	Complex—variable	Complex	Simple—often monocanopy
Dispersion of seeds	Natural	—	Controlled Mechanical seed-bed preparation
Plant evolution and selection	Natural	Selection	Breeding, biotechnology
Soil cover	Permanent	Variable	Non-permanent
Simultaneous presence of perennials and non-perennials	Frequent	Frequent	Rare
Life form richness	High	Variable	Low
Productivity	Variable	Variable	High
Use of external chemicals	—	Low	High
Population control of plants and animals	Natural	Use of natural processes	Use of pesticides
Use of fossil energy	—	Low	High
Exports (C, minerals)	Low	Low	High
Nutrient sources	Recycling	Recycling, organic	Chemicals
Nutrient loss	Low	Low	High
Resilience	High	Medium	Low

Tableau 5. Comparaison des caractéristiques des écosystèmes naturels, des agrosystèmes traditionnels et des agrosystèmes modernes⁶⁴

L'un des écosystèmes naturels servant de modèle dans l'approche écomimétique de l'agriculture est la forêt tropicale (tableau 6).

Type d'écosystème naturel	Forêt tropicale
Caractéristiques naturelles	<ul style="list-style-type: none"> • Grande diversité spécifique et fonctionnelle → fonctionnement reposant sur les interactions entre espèces • Structure en strates multiples • Couvert végétal permanent • Production de nombreux produits et services environnementaux
Transposition dans des agro-écosystèmes	Systèmes d'agroforesterie : <ul style="list-style-type: none"> • Grande diversité de plantes cultivées : annuelles et pérennes, herbacées et ligneuses • Systèmes complexes en termes de nombre d'espèces, d'interactions biologiques et de pratiques → Biodiversité parfois comparable à la celle des forêts naturelles adjacentes
Intérêt de cette approche	<ul style="list-style-type: none"> • Services environnementaux : maintien de la diversité biologique, régulation des flux biogéochimiques, rétention d'eau... • Services socio-économiques : subsistance pour les populations locales...
Limites du modèle	<ul style="list-style-type: none"> • En milieu tropical, chaleur et eau ne sont pas limitants • Il n'y a pas de saisons

Tableau 6. La forêt tropicale : un écosystème modèle au sein de l'approche écomimétique des agrosystèmes

⁶⁴ Source : Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

Ce modèle n'est pas directement applicable en région tempérée mais peut contribuer à mettre en évidence des fonctions et organisations utiles pour la conception d'agro-écosystèmes plus durables.

Forts de ces premiers éléments de définition, nous allons à présent donner les fondements scientifiques de l'approche écomimétique en agriculture.

ii. Les concepts scientifiques sous-tendant l'approche écomimétique

Dans sa revue, E. Malézieux énonce les principales notions de la science écologique sous-tendant l'approche écomimétique en agriculture. Ces notions concernent différentes caractéristiques des écosystèmes naturels : productivité, résilience, stabilité, auto-organisation, et explicitent leur lien avec la richesse spécifique de ces écosystèmes. Elles reflètent les toutes dernières avancées de la recherche dans la compréhension de la structure et du fonctionnement des écosystèmes naturels. Certaines de ces notions sont encore sujettes à débat.

Remarque : La biodiversité peut être définie non pas comme un ensemble d'entités remarquables, mais comme un tissu fonctionnel d'êtres vivants, en évolution permanente dans l'espace et dans le temps, devant être appréhendé globalement sur l'ensemble du territoire⁶⁵.

Productivité/Production primaire

- Pour un écosystème naturel, productivité est synonyme de production primaire, puisqu'il s'agit d'un système duquel l'homme ne prélève rien. Pour un agrosystème, la productivité est usuellement entendue au sens de rendement, soit la quantité de produit récoltée par hectare de surface cultivée. L'indicateur « production primaire » de l'agrosystème n'intéresse généralement pas les agronomes.
- Plus un écosystème contient de biodiversité, plus sa production primaire, sa rétention de nutriments et sa résilience augmentent.
- Cependant, la relation entre la production primaire d'un écosystème et sa diversité spécifique est asymptotique, ce qui signifie qu'à partir d'un certain nombre d'espèces présentes, pour chaque espèce ajoutée on n'augmente que très peu la production primaire de l'écosystème. **On peut donc trouver un nombre d'espèces relativement petit conférant une productivité optimale à un agro-écosystème⁶⁶.**
- Un écosystème naturel est caractérisé par un *trade-off* (« compromis ») entre le carbone dédié à la reproduction (gros fruits, grosses graines...) et le carbone destiné à la structure, à la durabilité de l'organisme (maintien des fonctions écologiques). Ainsi, les plantes annuelles ont une productivité bien plus grande que les pérennes au niveau de leurs organes reproducteurs ou de réserve, c'est-à-dire au niveau des parties prélevées, exportées et vendues par l'agriculteur.
- Il est difficile d'évaluer la productivité d'agro-écosystèmes comportant plusieurs espèces : il faut tenir compte à la fois du rendement de chaque espèce cultivée et de la production primaire de certains composants de l'agro-écosystème qui produisent des services écosystémiques (ex : stockage du carbone par les arbres d'une agroforesterie).

⁶⁵ Définition donnée par Bernard Chevassus-au-Louis dans l'ouvrage de Terrena : *Sentinelles de la Terre, mettre en pratiques une agriculture écologiquement intensive*, 2010, p. 162-163

⁶⁶ Vitousek and Hooper (1993), cités dans Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

Résilience

- La résilience est la **capacité d'un écosystème à se réorganiser pour restaurer sa structure et ses fonctions initiales après une perturbation**. C'est une propriété très importante pour caractériser les systèmes naturels.
- La résilience d'un écosystème naturel est très complexe à évaluer : de nombreux indicateurs sont étudiés par les chercheurs, et peuvent être appliqués aux agrosystèmes.
- Parmi ces indicateurs, on peut retenir **l'inertie** (capacité d'un écosystème à résister au changement dans sa structure et sa fonction après une perturbation), **l'adaptabilité** et **la transformabilité** (création d'un nouveau système quand les conditions deviennent insupportables).
- La stabilité et la résilience des écosystèmes naturels dépendent plus de la diversité de leurs fonctions que du nombre d'espèces présentes, plusieurs espèces pouvant assurer des fonctions redondantes. **C'est donc la diversité des fonctions qu'il faut chercher à conserver en premier lieu**, et non celle des espèces⁶⁷.

Stabilité

- La stabilité est un attribut des écosystèmes naturels encore très controversé. L'hypothèse de l'existence d'un « climax », état d'équilibre optimal aux propriétés d'homéostasie, est largement remise en question à l'heure actuelle. Si le concept de climax n'est plus valable, il faut considérer que la structure des écosystèmes naturels évolue en réponse aux perturbations naturelles plus ou moins fréquentes et de plus ou moins grande amplitude (feux, inondations, changements climatiques...).
- Alors qu'une perturbation régulière est un facteur de stabilité pour la végétation (en sélectionnant les espèces adaptées à la perturbation), l'absence de perturbation donne lieu à des changements dans la structure de la végétation (d'autres espèces venant coloniser l'écosystème).
- La majorité des écosystèmes naturels sont dans un état d'équilibre dynamique.

Auto-organisation

- Comme pour les écosystèmes naturels, l'évolution d'un agrosystème est contrôlée par des facteurs internes (composantes biotiques et abiotiques du système) et externes (ensoleillement, intervention humaine...).
- L'auto-organisation est la capacité des écosystèmes à se réorganiser dans un environnement intrinsèquement instable et non-homogène⁶⁸. Imiter cette capacité d'auto-organisation permet d'améliorer la résilience des agro-écosystèmes, comme on le voit par exemple dans les systèmes agroforestiers. Bien entendu, il est par définition impossible d'imposer totalement une auto-organisation à un agro-écosystème.

La démarche écomimétique repose donc sur des concepts et résultats scientifiques nombreux sur le fonctionnement des écosystèmes naturels. Ces résultats sont sans cesse complétés, vérifiés et approfondis par les chercheurs en agro-écologie. On peut dégager de ces éléments six principes définissant la démarche écomimétique.

⁶⁷ Silver *et al.* (1996), Hooper *et al.* (2005), Gunderson and Holling (2002), cités dans Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

⁶⁸ Mitsch et Jorgensen 2003, cités dans Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

b. Les principes de la démarche écomimétique

Dans sa revue, E. Malézieux propose « *six principes pour des systèmes cultivés écomimétiques* », en faisant la synthèse des publications de ces 20 dernières années sur le sujet.

Après avoir énoncé ces principes, nous tenterons de voir comment ils peuvent se décliner théoriquement en agriculture écologiquement intensive.

Remarque : Si ces principes sont ici formulés pour les systèmes agricoles, ils peuvent également être transposés en aquaculture.

i. Énoncé des principes écomimétiques

Les principes écomimétiques énoncés par E. Malézieux dans sa revue peuvent concerner différentes échelles et niveaux d'organisation, comme on le voit sur la figure 9.

A l'échelle moléculaire et cellulaire, imiter les processus naturels relève du domaine de l'écologie chimique⁶⁹. En agro-écologie, il s'agit de comprendre les interactions entre organismes, par exemple dans les sols.

A l'échelle de la parcelle, l'écomimétisme consiste à rétablir la diversité spécifique et fonctionnelle des populations biologiques, qu'elles soient végétales, animales, microbiennes...

A l'échelle du paysage, l'écomimétisme considère l'ensemble des exploitations comme parties intégrantes d'un même agro-écosystème, les réintègre dans le paysage naturel et les attache à un territoire.

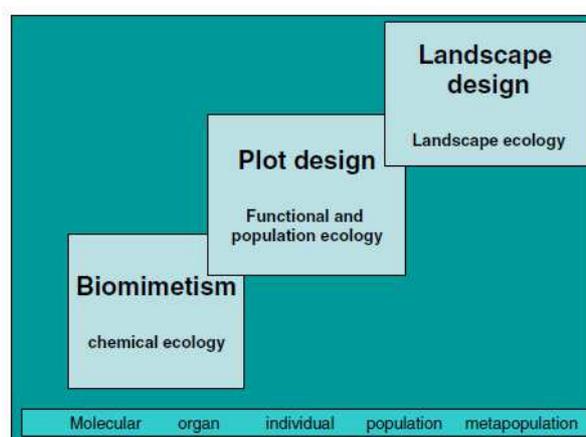


Figure 8. Différents niveaux d'organisation pour l'approche écomimétique des agrosystèmes⁷⁰

Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience

Comme nous l'avons vu, les écosystèmes sont majoritairement contrôlés par la diversité des formes de vie, ou « traits fonctionnels », et non celle des espèces. Pour élaborer un agro-écosystème productif et résilient, il est donc nécessaire :

- d'identifier les fonctions souhaitées (et à améliorer),
- d'identifier les espèces qui remplissent ces fonctions,

⁶⁹ L'écologie chimique est la science qui s'intéresse aux interactions de nature chimique entre les organismes vivants, au sein d'un écosystème.

⁷⁰ Source : Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

- de choisir un mélange d'espèces à cultiver de sorte que les fonctions présentées soient le plus possible complémentaires

→ Pratiques pouvant être qualifiées d'écomimétiques, quand leur adoption découle de l'observation de systèmes naturels :

- rotation des cultures
- cultures associées : il peut s'agir de cultiver sur une même parcelle
 - o différentes variétés d'une même espèce,
 - o différentes espèces, par exemples céréales et légumineuses : on parle alors de couverts multispécifiques,
 - o des associations de plantes herbacées et de plantes ligneuses (arbres, haies...): on parle alors d'agroforesterie.

Remarque : Les plantes de service, i.e. cultivées uniquement pour les services qu'elles rendent à l'ensemble de la culture (lutte contre les ravageurs, fertilisation...) se présentent souvent sous formes de cultures intercalaires : les lignes de plantes cultivées alternent avec des lignes de plantes de service.

Principe 2. Maintenir la fertilité du sol grâce au couvert végétal

Le labour est une pratique qui bouleverse les équilibres entre la faune et la flore du sol, aux échelles micro, méso et macro, en détruisant les réseaux de racines, champignons et micro-organismes du sol. A l'inverse, le 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 biotiques et abiotiques qui lui confèrent sa fertilité. Aujourd'hui, ces techniques s'accompagnent parfois encore de recours à des pesticides, mais les techniques culturales simplifiées (TCS) - anciennement techniques de conservation des sols - progressent et permettent petit à petit de s'en affranchir⁷¹. Pour résumer,

« Le couvert végétal permanent, c'est exploiter au maximum la biodiversité fonctionnelle en remplaçant le gasoil par la photosynthèse, l'acier par les racines, l'urée par les légumineuses »⁷²

→ Pratiques pouvant être qualifiées d'écomimétiques, quand leur adoption découle de l'observation de systèmes naturels :

- non-labour
- couvert végétal permanent
- semis direct sous couvert
- recyclage des déchets végétaux (compostage) ou non retrait des parcelles, épandage de mulch...

Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes

Sur une même parcelle agricole, d'astucieuses associations ou successions d'espèces de plantes peuvent permettre une meilleure distribution des nutriments en exploitant tous les horizons du sol. Les associations les plus connues sont celles de plantes légumineuses fixatrices d'azote avec d'autres plantes cultivées (ex : céréales). Les légumineuses transforment l'azote atmosphérique (N₂) en ammonium (NH₄⁺), grâce à une symbiose avec les bactéries *Rhizobium*. Elles fertilisent ainsi le sol, rendant disponible pour les autres organismes de grandes quantités d'azote via leurs racines ou nodules morts.

⁷¹ Voir exemple dans la section III.3.a. et entretien avec Frédéric Thomas, agriculteur

⁷² D'après un entretien avec Frédéric Thomas

→ Pratiques pouvant être qualifiées d'écomimétiques, quand leur adoption découle de l'observation de systèmes naturels :

- cultures associées, avec introduction de légumineuses dans les cultures
- rotation des cultures

Principe 4. Contenir les invasions de ravageurs grâce à des niveaux/réseaux trophiques complexes

Pour contenir les invasions de ravageurs de façon écomimétique, il faut reconstruire des réseaux trophiques complexes en utilisant la biodiversité des communautés végétales. Il s'agit de passer d'une vision « curative et focalisée » à une vision « préventive et systémique ». En effet, plus la diversité des plantes est élevée, plus les ravageurs des cultures et leurs prédateurs sont divers, et moins ils ont la capacité de devenir « surnuméraires ».

Pour reconstruire ces réseaux trophiques, il faut avant tout **fournir des habitats** aux espèces que l'on souhaite voir présentes, en repensant le champ et le paysage (structure, composition végétale...). Des bandes enherbées peuvent par exemple favoriser le développement d'espèces auxiliaires, en augmentant la disponibilité du nectar et du pollen.

Au niveau de la plante cultivée, différentes techniques existent pour repousser naturellement les ravageurs. Il est possible d'utiliser ainsi un ensemble de stimuli (visuels, chimiques ou alimentaires) émis par une ou plusieurs plantes en association, afin de modifier le comportement des insectes (voir partie 3.1.).

→ Pratiques pouvant être qualifiées d'écomimétiques, quand leur adoption découle de l'observation de systèmes naturels :

- réimplantation de haies, bandes enherbées, arbres
- cultures associées (dont cultures intercalaires de plantes de service, et utilisation de « plantes pièges »)

Principe 5. Utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques pour contrôler les ravageurs

Le 5^e principe proposé par E. Malézieux est l'utilisation de microorganismes, champignons ou extraits de plantes comme biopesticides naturels. Certains de ces organismes et substances sont déjà fabriqués industriellement et commercialisés à l'heure actuelle. La recherche en écologie chimique contribue à leur développement⁷³.

Plus généralement, la protection des cultures avec des agents biologiques est nommée « bio-contrôle »⁷⁴. Ces produits de bio-contrôle comprennent :

- les macro-organismes (insectes auxiliaires, plantes répulsives ou attirantes pour repousser ou attirer les ravageurs)
- les micro-organismes (bactéries et champignons)
- les médiateurs chimiques (principalement phéromones sexuelles)
- les produits d'origine naturelle (incluant les activateurs physiologiques)

→ Pratiques pouvant être qualifiées d'écomimétiques, quand leur adoption découle de l'observation de systèmes naturels :

- utilisation d'organismes ou de produits de bio-contrôle

⁷³ L'écologie chimique est la science qui s'intéresse aux interactions de nature chimique entre les organismes vivants, au sein d'un écosystème.

⁷⁴ Source : Groupe Terrena, *Sentinelles de la Terre, mettre en pratiques une agriculture écologiquement intensive*, 2010, p. 68

Principe 6. Reproduire les successions écologiques après une perturbation

Afin d'identifier et de caractériser les différentes successions écologiques ayant lieu dans un écosystème naturel après une perturbation, un chercheur⁷⁵ cité par E. Malézieux propose le schéma suivant.

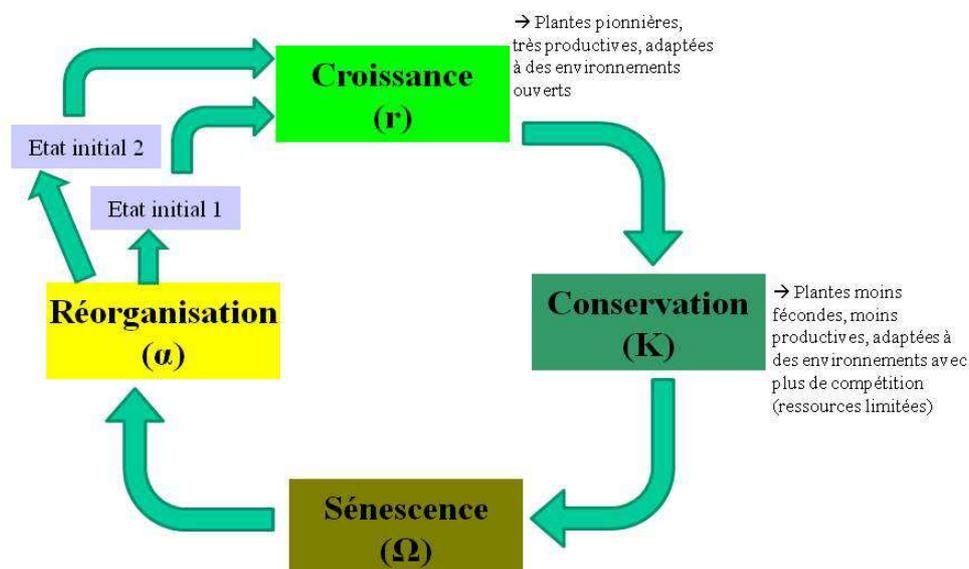


Figure 9. Dynamique des écosystèmes naturels : les successions écologiques⁷⁶

Appliquer ce raisonnement aux agrosystèmes peut permettre d'améliorer la compréhension de leur dynamique et de leur durabilité. De nombreux aménagements de ce cycle sont possibles, étant donné la diversité des écosystèmes et des perturbations pouvant survenir. Dans certains cas, des étapes sont « sautées », voire les écosystèmes présentent une dynamique allant « à l'envers » du cycle.

Certaines agricultures traditionnelles comme la culture sur brûlis reproduisent ces successions écologiques naturelles : après la destruction par le feu, l'agriculteur alterne jachères et cultures successives de différentes espèces de plantes qui restaurent l'écosystème. La restauration complète dure 15 à 20 ans.

→ Pratiques correspondantes :

- rotation des cultures
- cultures associées

ii. Exemples de déclinaison théorique des principes écomimétiques

Pour montrer de quelle façon les principes écomimétiques peuvent être plus ou moins utilisés, théoriquement, par les nouvelles agricultures, nous prendrons l'exemple de **l'agriculture écologiquement intensive**. Dans un premier temps, nous recouperons ses principes avec les principes écomimétiques, puis nous nous concentrerons sur l'agroforesterie.

⁷⁵ Walker (2004) cité dans Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

⁷⁶ Ibid

L'agriculture écologiquement intensive AEI

Remarque préliminaire : la définition et les principes de l'agriculture écologiquement intensive que nous retiendrons sont ceux énoncés dans le Manifeste de l'Association internationale pour une agriculture écologiquement intensive, créée en 2009 par Michel Griffon. Il existe d'autres réseaux et praticiens développant des démarches plus étroitement calées sur des principes écomimétiques.

- Définition

L'agriculture écologiquement intensive se fonde sur l'utilisation des fonctionnalités écologiques des agrosystèmes, mais ne refuse pas les techniques conventionnelles pour une utilisation subsidiaire et en cas de nécessité.

Son objectif est de « produire plus et mieux, avec moins ». Elle souhaite établir un nouveau contrat social entre les agriculteurs et la société afin de coupler les fonctions productives de l'agriculture et la production de services écologiques, pour améliorer l'état de l'environnement et de la biosphère.

Selon la coopérative agricole Terrena (voir annexe 11), 4 objectifs définissent l'AEI :

- 1) maintenir les rendements de chaque variété recherchée.
 - 2) diminuer très fortement les intrants non renouvelables (pesticides, gasoil, herbicides, antibiotiques...)
 - 3) diminuer plus généralement l'impact de l'agriculture sur l'environnement
 - 4) avoir une vision systémique de l'agriculture, être véritablement en rupture (l'AEI est également un courant de pensée)
- L'agriculture écologiquement intensive fait appel à une démarche écomimétique

Parmi les principes et pratiques de l'agriculture écologiquement intensive, nous avons retenu ceux pouvant être qualifiés d'écomimétiques, en reprenant les six principes d'E. Malézieux.

« Utilisation de la biodiversité comme source de résistance des systèmes productifs aux fluctuations de l'environnement »

→ **Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience**

« Utilisation amplifiée et intégrée des fonctionnalités naturelles des écosystèmes antérieurement peu utilisées, par exemple : utilisation systématique des relations proies-prédateurs pour contrôler les pullulations de ravageurs »

→ **Principe 4. Contenir les invasions de ravageurs grâce à des niveaux/réseaux trophiques complexes**

« En matière de fertilité des sols, recyclage intensif des débris végétaux, apports de matière organique de cultures interstitielles de service, rotations faisant intervenir des légumineuses, plus grande efficacité des microorganismes du sol etc. »

→ **Principe 2. Maintenir la fertilité du sol grâce au couvert végétal**

→ **Principe 3. Encourager la coopération plutôt que la compétition entre les plantes**

« Bio-inspiration : imitation de molécules naturelles insecticides pour une production industrielle »

→ **Principe 5. Utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques pour contrôler les**

Encadré 3. Les principes écomimétiques de l'agriculture écologiquement intensive⁷⁷

⁷⁷ Principes extraits du *Manifeste de l'Association internationale pour une agriculture écologiquement intensive*

En revanche, certains principes tels l'utilisation d'organismes (animaux ou végétaux) génétiquement modifiés ou le recours occasionnel à des techniques conventionnelles ne relèvent pas d'une démarche écomimétique.

Cas concret : Zoom sur l'agroforesterie

Remarque préliminaire : cette section repose sur les exposés donnés au cours de la Première Rencontre européenne d'agroforesterie organisée par l'Association Française d'Agroforesterie (AFAF) le vendredi 16 décembre 2011 en partenariat avec le MAAPRAT, le MEDDTL et l'APCA⁷⁸.

- **Définition**

L'agroforesterie est l'association diversifiée d'arbres et de cultures (avec ou sans animaux) sur une même parcelle. Plusieurs organisations sont possibles : alignements d'arbres, haies, arbres isolés, pré-vergers... Par conséquent, il n'existe pas une seule mais de nombreuses formes d'agroforesterie.

En redonnant une place centrale aux arbres dans les cultures sur le modèle des écosystèmes naturels, l'agroforesterie peut contribuer significativement à la mise en place d'agro-écosystèmes innovants et durables. La R&D en agroforesterie est nécessairement participative : « *elle se fait avec et chez les agriculteurs* »⁷⁹.

- **L'agroforesterie fait appel à une démarche écomimétique**

Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience

Principe 2. Maintenir la fertilité du sol grâce au couvert végétal

Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes

Encadré 4. Principes écomimétiques utilisés en agroforesterie⁸⁰

En effet, en associant sur une même parcelle des plantes herbacées (céréales, légumineuses...) et des plantes ligneuses (arbres, buissons, haies...), l'agroforesterie reproduit des interactions présentes dans les écosystèmes naturels et améliore de nombreuses caractéristiques de l'agro-écosystème.

Par leur multifonctionnalité, les arbres présents dans les cultures leur apportent de nombreux bénéfices⁸¹ :

- meilleure rétention et redistribution des nutriments, grâce aux racines profondes des arbres sous les cultures
- protection et stockage de l'eau
- augmentation de la biodiversité
- protection des cultures et du sol
- régulation du climat : stockage de « capital carbone » grâce à la photosynthèse

Les conséquences écologiques et économiques de ces propriétés sont les suivantes :

- fréquente amélioration de la production des cultures sous-jacentes en qualité et quantité
- capital bois : production de bois d'œuvre et énergie
- production d'autres ressources : fruits, graines, substances pharmaceutiques et autres produits

⁷⁸ Association permanente des chambres d'agriculture

⁷⁹ Christian Dupraz, ingénieur de recherche, INRA Montpellier

⁸⁰ D'après Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

⁸¹ D'après le dossier de presse distribué à la première Rencontre européenne d'agroforesterie, le 16/12/11

- réduction des intrants
- reconstruction d'une trame écologique
- résilience face au changement climatique⁸²

Concernant la productivité, il a en effet été montré scientifiquement que les systèmes agroforestiers ont un rendement en moyenne 1,36 fois supérieur à des cultures et forêts exploitées séparément⁸³. En d'autres termes, 100 ha d'agroforesterie produisent autant en volume que 136 ha de cultures et de forêts séparées : le tout est donc « supérieur à la somme des parties » d'un facteur 1,36. Une centaine d'indicateurs ont été développés pour évaluer le rendement des mélanges de cultures (ce sont des coefficients de rendement relatif, en anglais LER: Land Equivalent Ratio).

Les bienfaits environnementaux des arbres dans les agro-écosystèmes ont également été mis en évidence grâce à plus de 20 ans de recherche menée par l'INRA et le CEMAGREF⁸⁴.

- Limites de la démarche écomimétique

Au-delà de l'écomimétisme que représente la présence d'arbres dans les systèmes agroforestiers, l'agroforesterie peut parfois avoir recours à des pratiques non écomimétiques et non durables, comme par exemple l'utilisation de produits phytosanitaires sur les cultures. Tout système agroforestier n'est pas intrinsèquement durable, mais des progrès sont constamment réalisés pour associer à l'agroforesterie d'autres pratiques : couvert végétal permanent, non-labour, rotations, couverts multispécifiques...

L'écomimétisme est donc avant tout une démarche se déclinant en différents principes tirés de l'observation des écosystèmes naturels. Certains types d'agriculture se voulant plus respectueux de l'environnement font appel à un ou plusieurs principes écomimétiques selon leurs objectifs, mais, par définition, il ne peut pas exister d'agriculture strictement écomimétique. Nous verrons dans la section suivante les grandes étapes de la mise en place d'une démarche écomimétique, quelque soit le contexte local et le type d'agriculture porteur de l'initiative.

⁸² Il a été montré que les rendements des systèmes agroforestiers varient moins que dans les agrosystèmes face aux changements climatiques

⁸³ Le coefficient peut varier de 1,2 à 1,6 selon les systèmes agroforestiers.

Pour plus de détails, voir la thèse : Talbot, G. (2011), *L'intégration spatiale et temporelle des compétitions pour l'eau et la lumière dans un système agroforestiers noyers-céréales permet-elle d'en comprendre la productivité?*, Université de Montpellier 2, 281 pp.

⁸⁴ Source : conférence donnée à la première Rencontre européenne d'agroforesterie, le 16/12/11

c. Proposition d'un cadre d'action

E. Malézieux identifie trois étapes pour mettre en œuvre une démarche écomimétique en agriculture, synthétisant les propositions émises par les chercheurs depuis 20 ans. L'ensemble de la démarche est schématisé dans la figure 11. Cette démarche est également applicable aux systèmes de production aquacoles.

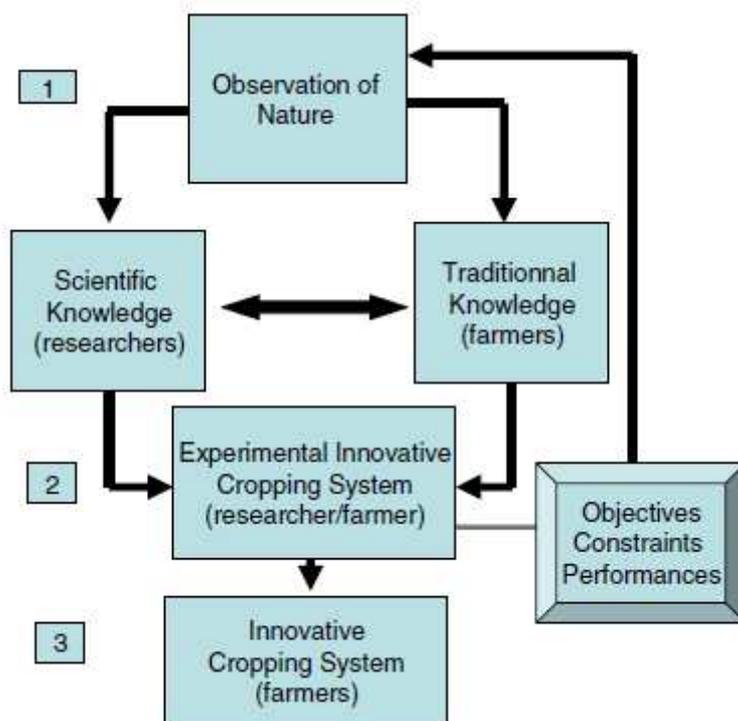


Figure 10. Un cadre d'action en trois temps pour concevoir des agrosystèmes écomimétiques

Etape 1. Observer la nature et agréger les connaissances

La première étape consiste à observer les écosystèmes naturels **présents dans la région où l'on souhaite créer un agro-écosystème** et **synthétiser les connaissances utiles** à la démarche écomimétique. Ces informations sont apportées :

- d'une part, par les agriculteurs qui ont une excellente connaissance de leurs exploitations et de leur environnement. Leurs savoirs et savoir-faire traditionnels doivent être pris en compte et valorisés, étant donné l'importance du contexte local dans la démarche écomimétique.
- d'autre part, par les chercheurs, qui identifient les espèces mais surtout les traits fonctionnels de la végétation à imiter, ainsi que les interactions biologiques principales existant entre les plantes et les animaux de ces écosystèmes naturels. Au vu de la complexité de cette tâche, il est nécessaire de faire appel à une approche holistique et multidisciplinaire combinant des expertises tirées de différentes disciplines : agronomie systémique, écophysiologie, botanique, écologie...

Etape 2. Mettre en place des agro-écosystèmes expérimentaux

A partir des connaissances obtenues au cours de la 1^{ère} étape, il s'agit dans un second temps de mettre en place des agro-écosystèmes expérimentaux. Ceux-ci doivent permettre de remplir des objectifs, définis en tenant compte des contraintes des systèmes cultivés.

Il faut commencer par répondre aux questions suivantes :

- Quels niveaux de performance et de services les agrosystèmes actuels ne parviennent-ils pas à atteindre ?
- Quels niveaux de performance et de services les nouveaux agro-écosystèmes devraient-ils atteindre ?
- Quelles formes de vie (ou traits fonctionnels) sont nécessaires dans ces agro-écosystèmes ?
- Quelles espèces sont nécessaires ?
- Quels arrangements d'espèces peuvent être proposés, à la fois dans l'espace et dans le temps, considérant les niveaux de performance visés ?

Tout comme la 1^{ère} étape, cette 2^e étape dépend strictement du contexte agricole considéré : les agro-écosystèmes expérimentaux sont conçus en fonction de la parcelle concernée et des objectifs fixés.

Cette 2^e étape fait intervenir une combinaison variable de pratiques, tirées des six principes écomimétiques énoncés plus haut, que nous rappelons ici :

- Diversité intra-parcellaire d'espèces, de variétés ou de cultivars
- Rotation des cultures
- Cultures intercalaires (lignes de plantes différentes)
- Agroforesterie
- Couvert végétal permanent
- Plantes de service (ex : bandes enherbées)
- Non-labour
- Compostage...

Elle est portée à la fois par des chercheurs et des agriculteurs.

Etape 3. Faire du modèle des agro-écosystèmes une innovation portée par les agriculteurs

Pour aller au-delà de la conception expérimentale des agro-écosystèmes, il est nécessaire que les agriculteurs pionniers, en association avec les techniciens et les chercheurs, diffusent à grande échelle ces pratiques innovantes. Celles-ci doivent permettre aux agriculteurs de remplir des objectifs écologiques, économiques et sociaux à l'échelle de l'exploitation. Tant que la rentabilité économique de ces pratiques ne sera pas affirmée, l'approche écomimétique ne dépassera pas le stade expérimental.

Certaines pratiques ont néanmoins déjà fait leurs preuves. Aux Etats-Unis, au Canada, en Australie et au Brésil, le non-labour et le semis direct sous couvert végétal permanent sont des pratiques très répandues, permettant entre autres la réduction de l'érosion du sol et l'intensification de l'activité biologique des sols, qui entraînent ainsi la stabilisation ou l'augmentation des rendements, l'amélioration des services écosystémiques rendus comme par exemple la séquestration du carbone, etc. Cependant, ces pratiques ne sont pas encore largement répandues en Europe ou dans les petites exploitations tropicales, pour des raisons biophysiques, technologiques, organisationnelles et institutionnelles⁸⁵.

Une autre pratique de plus en plus répandue depuis 20 ans est l'agroforesterie, à la fois dans les zones tempérées et tropicales. Si l'introduction d'arbres dans les parcelles agricoles peut à court terme constituer un investissement et demander par la suite des adaptations techniques et comportementales (obstacles au passage des machines agricoles etc.), elle peut devenir rentable à long terme, grâce aux nombreux services écosystémiques rendus par les arbres, compensant les fluctuations de prix des matières premières agricoles (ex : café en zone tropicale) ou la réduction des aides publiques (zones tempérées).

⁸⁵ Holland (2004), Erenstein (2003), Giller (2009), cités dans Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, Agronomy for Sustainable Development

L'écomimétisme en agriculture est une démarche innovante, permettant la conception d'agro-écosystèmes à partir des savoirs traditionnels des agriculteurs et de l'observation locale d'écosystèmes naturels. Elle relève de l'agro-écologie, à la fois science, ensemble de pratiques et mouvement combinant les enseignements de l'écologie et de l'agronomie. Ses principes inspirés de la nature (biodiversité, non-labour, couvert végétal permanent, successions écologiques...) en font l'une des voies vers une agriculture durable.

Actuellement mise en œuvre par un petit nombre d'agriculteurs pionniers de façon plus ou moins consciente, la démarche écomimétique présente de réels avantages environnementaux, économiques et sociaux. Afin d'illustrer cette approche, que nous avons jusqu'ici présentée d'un point de vue théorique, nous ferons dans la partie suivante un tour d'horizon français des projets et pratiques agricoles durables et inspirés de la nature à des degrés divers.

3. Des exemples pionniers en France

Différentes personnes, aux fonctions variées, ont été interrogées sur la mise en œuvre pratique des principes écomimétiques dans les exploitations agricoles.

Si quasiment aucune des personnes interrogées n'applique consciemment la démarche écomimétique telle que nous l'avons définie théoriquement, ces exemples d'initiatives agro-écologiques imitent de fait des propriétés des systèmes naturels et vont dans le sens d'une réconciliation de l'agriculture avec la biosphère. Ils ne relèvent pas nécessairement d'une agriculture biologique.

C'est dans cette optique que nous les présenterons ici, en trois temps :

- Initiatives écomimétiques dans des cultures de plantes annuelles seules
- Initiatives écomimétiques dans des systèmes agroforestiers et arboricoles
- Initiatives écomimétiques dans des systèmes aquacoles

a. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des cultures de plantes annuelles seules

Les exemples ci-dessous sont tirés de différents entretiens et de l'ouvrage *Sentinelles de la Terre, mettre en pratiques une agriculture écologiquement intensive*, publié en 2010 par la coopérative Terrena (voir annexe 11).

Région	Pays de la Loire (départements 44 et 49)
Principes écomimétiques suivis	Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes
Description	Associations intraparcellaires d'espèces : colza et plantes compagnes Une filiale de la coopérative Terrena a sélectionné 2 plantes légumineuses à pousse rapide qu'elle sème en plus du colza. Les légumineuses étouffent les adventices des mauvaises herbes, remplaçant les herbicides traditionnellement utilisés. Elles ne sont pas en concurrence avec le colza. Puis elles sont éliminées l'hiver par le gel, quand le colza

	<p>devient capable d'étouffer les mauvaises herbes. Si le gel ne les détruit pas, des herbicides sont utilisés, ou les légumineuses sont récoltées avec le colza. La couverture protège le sol de la levée des mauvaises herbes et des actions négatives de la pluie (battance, ruissellement). Cette technique nécessite des équipements spécifiques de semis direct, dans une approche orientée vers le travail du sol simplifié. Elle permet de faire des économies d'intrants chimiques.</p> <p>Plus d'informations sont disponibles en ligne⁸⁶.</p>
Bilan et perspectives	<p>Cette innovation est venue du terrain en 2006. Elle a été lancée en 2010 par Terrena auprès des Sentinelles de la Terre. La coopérative espérait que cette innovation concernerait 2500 ha de colza (soit 10% de la production sur son territoire), mais elle n'a finalement concerné que 1000 ha.</p> <p>Cette initiative s'est heurtée à différents obstacles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Des obstacles techniques et économiques : les semoirs traditionnels ne peuvent semer qu'un seul type de graines, acheter un nouveau semoir représente un investissement - Des obstacles culturels : il y a eu de grosses réticences de la part des agriculteurs, mais la coopérative est confiante, « <i>d'ici 2 à 4 ans, ça va progresser</i> ». <p>Suite à cette expérimentation, Gilles Sauzet, technicien, a montré qu'en termes de désherbage, l'utilisation de plantes compagnes associées à des TCS était un meilleur itinéraire que le labour avec traitement phytosanitaire.</p> <p>Si les plantes compagnes du colza sont connues désormais, celles pouvant être cultivées en même temps que le maïs ou le tournesol restent à découvrir.</p>

Région	Pays de la Loire (départements 44 et 49)
Principes écomimétiques suivis	<p>Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience</p> <p>Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes</p>
Description	<p>Associations intraparcellaires d'espèces : le blé et le lupin</p> <p>Certains agriculteurs sèment du blé en plus du lupin, pour assurer une meilleure couverture du sol et lutter contre les mauvaises herbes.</p> <p>La récolte blé+lupin est destinée à l'alimentation animale. Les parcelles ne sont pas bien maîtrisées : l'agriculteur ne peut prévoir à l'avance s'il obtiendra plus de blé ou de lupin.</p>
Bilan et perspectives	On obtient généralement 30 quintaux par hectare de lupin, plus 30 q/ha de blé.

Région	Pays de la Loire (départements 44 et 49)
Principes écomimétiques suivis	Principe 2. Maintenir la fertilité du sol grâce au couvert végétal
Description	<p>Couvert végétal permanent et non-labour</p> <p>Le couvert végétal permanent (CVP) et le non-labour font partie des « techniques</p>

⁸⁶ http://www.agriculture-de-conservation.com/COLZA-TOUR-D-HORIZON-TECHNIQUE.html?id_mot=12

	<p>culturelles simplifiées » (TCS) développées depuis une vingtaine d’années à l’origine pour des raisons économiques (réduction des dépenses liées à la mécanisation). Si ces techniques font l’objet de nombreux travaux de R&D (en particulier sur la manière de semer à l’inter-rang), certains agriculteurs les mettent déjà en œuvre sur leurs exploitations.</p> <p>C’est le cas d’une parcelle près d’Angers, qui a produit 5 tonnes par hectare de matière végétale entre juillet et novembre 2010 grâce au couvert végétal permanent. Le tracteur est passé sur ces végétaux en les écrasant mécaniquement : ils ont été broyés et enfouis dans le sol afin d’augmenter la quantité de matière organique. L’agriculteur effectue donc le semis sous un couvert végétal : le sol n’est ni labouré ni hersé.</p> <p>Le couvert végétal permanent est une innovation bouleversant la vision des agriculteurs de leur exploitation. Alors que le sol est généralement nu, « propre » et bien travaillé au moment du semis, le CVP donne un aspect chaotique à l’exploitation, qui peut déconcerter au premier abord.</p>
<p>Bilan et perspectives</p>	<p>En 2010, cette parcelle agricole a accueilli 10 000 visiteurs venus découvrir ses pratiques. Les agriculteurs sont nombreux à demander aux coopératives des groupes de travail sur ce type d’innovations.</p> <p>Bertrand Pinel estime qu’en France, au maximum 30 à 40% des exploitations céréalières ont recours au non-labour. Cela reste encore extrêmement marginal pour les cultures de colza.</p> <p>Les techniques culturelles simplifiées ne sont pas encore abouties (il y a toujours une utilisation résiduelle de phytosanitaires), mais elles progressent considérablement, en particulier en France et en Suisse pour l’Europe.</p> <p>La revue TCS compte aujourd’hui 4000 lecteurs, ce qui fait dire à son fondateur Frédéric Thomas que ces pratiques sont de plus en plus répandues, à des degrés divers. L’association BASE dont il est président compte également 450 agriculteurs pionniers.</p>

<p>Région</p>	<p>NA</p>
<p>Principes écomimétiques suivis</p>	<p>Pas de principe particulier</p>
<p>Description</p>	<p>Fonctionnement du sol : apport des mycorhizes et bactéries</p> <p>Les mycorrhizes, symbioses entre les champignons du sol et les racines des végétaux, permettent aux plantes une meilleure absorption de l’eau et des éléments minéraux du sol, et pourraient également stimuler la défense contre certains pathogènes.</p> <p>Les travaux de recherche commencent à déboucher sur des applications. Le pralinage⁸⁷ des pieds de vigne avec le produit « Endorize » commence à être pratiqué dans certains vignobles de la région du Val de Loire. Il permet une meilleure reprise des pieds plantés en remplacement de pieds morts. Une autre voie est à l’étude : enrichir les amendements ou les terreaux en mycorhizes, sur vignes ou plantes ornementales.</p>

⁸⁷ Technique consistant à enduire les racines de la vigne d’un mélange aidant à la reprise lors de la plantation, ici, des filaments mycéliens

	<p>L'utilisation de plantes capables d'enrichir durablement le sol en mycorhizes est également testée, notamment sur des couverts végétaux interrangs dans la vigne.</p> <p>D'autre part, certaines bactéries peuvent améliorer la capacité des plantes à valoriser le potentiel du sol. Par exemple, un <i>Azospirillum</i>, qui favorise la nitrification et stimule la production d'hormones d'enracinement, peut permettre un meilleur démarrage des cultures, comme le maïs. Certains <i>Pseudomonas</i> sont connus pour leur propriété de solubilisation du phosphore, d'absorption des éléments N et P ;</p>
Bilan et perspectives	<p>Mycorhizes : Les travaux sont encore en cours et méritent d'être encouragés.</p> <p>Bactéries : Pour aller plus loin, il reste à résoudre des questions de formulation, de stabilité des produits et d'intérêt économique, pour envisager l'utilisation de ces solutions à grande échelle.</p>

Région	NA
Principes écomimétiques suivis	<p>Principe 4. Contenir les invasions de ravageurs grâce à des niveaux/réseaux trophiques complexes</p> <p>Principe 5. Utiliser les propriétés des plantes et des alternatives biologiques pour contrôler les ravageurs</p>
Description	<p>Lutter contre les insectes parasites en utilisant les solutions naturelles</p> <p>Il est possible de dévier les nuisibles de leur cible en les attirant sur d'autres plantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour protéger un colza, la mise en place en bordure de parcelle d'une bande de navette à floraison plus précoce peut retarder l'attaque des méligèthes sur le colza après son stade sensible. - Plus intéressant encore, un colza plus précoce semé en mélange (5 à 10%) avec la variété cultivée permet de mobiliser les méligèthes sur ses fleurs et de réduire très sensiblement les dégâts sur les boutons floraux de la variété principale. Le colza est récolté avec la variété cultivée au lieu d'être détruit. - Les plantes pièges sont également utilisées en cultures florales contre les acariens et les pucerons. - Le maïs, le Pois d'Angole et le gombo attirent l'insecte <i>Helicoverpa armigera</i>, qui ravage les plants de tomate et de coton. Aux Etats Unis et en Australie, l'utilisation de ces espèces « pièges » est de plus en plus courante. On cultive souvent la luzerne ou le sorgho en plus du coton.
Bilan et perspectives	<p>Ces essais qui demandent à être répétés dans un maximum de conditions sont déjà très prometteurs. Les réussites doivent être mises en valeur et diffusées auprès du plus grand nombre d'agriculteurs.</p>

b. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des systèmes agroforestiers et arboricoles

Agroforesterie

La situation de l'agroforesterie en France est exposée de manière synthétique dans l'encadré suivant, issu des documents distribués à la première Rencontre européenne d'agroforesterie le 16 décembre 2011.

L'agroforesterie française en 2011

Systèmes agroforestiers traditionnels en France

Aujourd'hui, sur l'ensemble du territoire français, on recense plusieurs types de systèmes agroforestiers traditionnels : les pré-vergers, les cultures intercalaires dans les fruitiers (comme les noyeraies du Périgord et du Dauphiné), les cultures intercalaires dans les peupleraies, et les systèmes bocagers (parfois associés à l'élevage).

Le recensement effectué en 2001 et 2002 lors du programme européen SAFE a estimé les surfaces agroforestières sur terres agricoles à environ **160 000 ha en France**. D'autres systèmes, agroforestiers également, sont souvent associés au sylvopastoralisme (pré-bois dans le Jura, châtaigneraies pâturées de Corse et des Cévennes ou encore pâturage en sous-bois méditerranéen).

Mis à part le peuplier et les arbres bocagers, l'arbre agroforestier traditionnel est essentiellement fruitier. **Les déclinaisons régionales sont nombreuses** : on peut citer les associations de pêchers et maraîchage dans le Roussillon, de noisetiers avec grande culture dans le Sud-Ouest, d'oliviers avec vigne en méditerranée ou encore de chênes truffiers associés avec la lavande en Drôme provençale. Les arbres fourragers comme le chêne ou le frêne, dont les fruits ont nourri pendant des siècles les animaux d'élevage, constituaient autrefois une part importante des systèmes agroforestiers. Ils ont largement régressé en France. La pratique de l'émondage⁸⁸ des arbres en haie reste cependant encore relativement courante en zone de bocage (Massif Central, Pyrénées, Bretagne, Normandie,...). Dans le Sud-Ouest, les plantades de chênes pédonculés ou de chênes liège plantés à larges espacements occupaient des espaces publics aux abords des villages. Les éleveurs venaient y mener le bétail, qui consommait les glands tombés à terre. Ces plantades ont quasiment disparu aujourd'hui.

Nouvelles pratiques françaises en agroforesterie

Depuis une trentaine d'années, de **nouvelles pratiques** voient le jour, associant arbres forestiers et agriculture. Issus de l'expérience des pratiques traditionnelles, du travail de la recherche, mais également de l'initiative d'agriculteurs précurseurs, ces systèmes modernes tentent de dépasser les contraintes liées aux systèmes traditionnels. **En 2008, on comptait plus de 300 projets agroforestiers, expérimentaux ou non, répartis sur toute la France**. A la fin des années 80, le Cemagref a mis en place des parcelles expérimentales dans le Parc du Boulonnais (62) ainsi qu'en Auvergne, tandis que l'INRA de Montpellier en collaboration avec le CRPF du Languedoc Roussillon a installé une dizaine de parcelles agroforestières sur prairie en 1988. En 1995, l'INRA crée sur plus de 50 hectares la première expérience de Recherche & Développement associant arbres, grandes cultures et vigne sur le domaine de Restinclières, au nord de Montpellier. Grâce à l'implication de nombreux partenaires (APCA, INRA, associations d'agroforesterie, bureaux d'étude, chambres d'agriculture...) **une quarantaine de parcelles de démonstrations ont été installées dans 6 régions**, dans le cadre du programme Agroforesterie 2006/08 financé par la mission DAR du Ministère de l'Agriculture.

Les motivations des agriculteurs sont variées : maintien de la biodiversité, protection des sols, diversification patrimoniale, création paysagère, développement des ressources cynégétiques... L'agroforesterie est envisageable sur tous les types d'exploitation, tant sur la nature des productions que sur l'importance de la SAU⁸⁹ et le niveau de technicité. Grâce à ces pratiques, les porteurs de projets peuvent maintenir leur capital agronomique (sol, biodiversité) par l'introduction des arbres, sans réduire leur revenu agricole (capital bois). Depuis 2009 et l'activation de la première mesure nationale de soutien à la plantation dans les parcelles agricoles (mesure 222 du PDRH⁹⁰), des centaines

⁸⁸ L'émondage désigne une forme de taille des arbres consistant à supprimer les branches latérales et parfois la cime d'un arbre pour favoriser la croissance de rejets ou du feuillage. Les bois taillés sont ensuite exploités à des fins économiques.

⁸⁹ Surface agricole utile

⁹⁰ Programme de Développement Rural Hexagonal

d'agriculteurs se lancent dans des projets : plusieurs milliers d'hectares d'agroforesterie ont été mis en place depuis ou sont en cours d'aménagement.

Bilan

L'agroforesterie se développe sur le territoire français : un réseau de parcelles, des agriculteurs, opérateurs existent et les projets se multiplient. Pourtant, aucun référencement n'est actuellement disponible, ce qui ne laisse qu'une faible visibilité de l'état de développement de ces pratiques. Aussi, l'AFAF porte la construction d'un véritable réseau national agroforestier et recense tous les projets en place, en cours ou à venir, afin de pouvoir informer et conseiller toute personne intéressée.

Encadré 3. Situation de l'agroforesterie française en 2011

Source : Dossier de presse de la Première rencontre européenne d'agroforesterie

L'agroforesterie est, selon Alain Canet, président de l'AFAF, « *l'un des instruments permettant de réconcilier productivité et environnement, qu'il faut utiliser conjointement à d'autres outils* », comme par exemple le semis direct sous couvert végétal permanent.

Arboriculture

Région	Sud de la France, Méditerranée
Principes écomimétiques suivis	<p>Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience</p> <p>Principe 2. Maintenir la fertilité du sol grâce au couvert végétal</p> <p>Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes</p>
Description	<p>Vergers durables (recherche)</p> <p>Concevoir des vergers durables suppose de considérer les vergers comme des agro-écosystèmes et fait appel à la démarche écomimétique. Les vergers durables présentent en particulier une hétérogénéité intraparcellaire, un couvert végétal permanent et des systèmes de conduite⁹¹ nouveaux, permettant une maîtrise « douce » de la fructification. Différents projets sont en cours autour de ce thème :</p> <p>1) Le Groupe de Recherche en Agriculture Biologique a mis en place sur une parcelle un système agroforestier associant horticulture et arboriculture :</p> <ul style="list-style-type: none"> - sur les lignes : arbres fruitiers et ligneux bas, avec une diversité d'espèces et de variétés - entre les lignes : maraîchage et élevage - en bordure : haies et ligneux hauts <p>L'espacement entre les lignes est calculé de sorte que les racines des arbres puissent se connecter entre elles d'une ligne à l'autre.</p> <p>2) Le groupe Vergers Durables va plus loin :</p> <ul style="list-style-type: none"> - aux composantes des agro-écosystèmes du GRAB, il souhaite ajouter l'élevage, en tant que facteur de maîtrise de la parcelle, d'enrichissement et de valorisation de productions non consommables par les humains,

⁹¹ Terme désignant la forme donnée aux arbres par l'intervention humaine

	<ul style="list-style-type: none"> - il teste des systèmes composites où les arbres ne sont pas en ligne mais intercalaires, voire où certaines structures sont volontairement temporaires, ce qui peut permettre de lutter plus efficacement contre les ravageurs. - il travaille sur l'intégration de ligneux hauts et bas dans les systèmes de plantes pérennes comme la vigne, afin d'améliorer la productivité de cette dernière : il s'agit bien d'insérer les arbres au milieu de la vigne, et pas uniquement en périphérie
Bilan et perspectives	Ces travaux sont encore à l'état de recherche, mais les résultats obtenus sont de plus en plus opérationnels. De nombreuses publications sont disponibles sur le sujet.

c. Exemples d'initiatives écomimétiques dans des systèmes aquacoles

L'écomimétisme se retrouve également en aquaculture, à travers des projets de recherche sur l'intensification écologique de la pisciculture afin de la rendre plus durable. Il s'agit donc ici d'exemples plus en amont, et par conséquent un peu moins opérationnels, que les exemples en agriculture, mais néanmoins très intéressants et prometteurs.

L'UMR INTREPID (CIRAD/Ifremer) dirigée par Jean-Francois Baroiller travaille depuis plusieurs années sur l'intensification raisonnée et écologique de l'aquaculture à travers différents projets de recherche.

Dans cette section, nous présenterons tout d'abord la démarche de l'UMR INTREPID, afin d'explicitier le lien entre aquaculture durable et écomimétisme. Puis nous détaillerons certains de ces projets de recherche dans des tableaux similaires à ceux utilisés dans la partie consacrée à l'agriculture. Certains exemples sont internationaux mais seront néanmoins inclus, étant donné leurs possibles applications en climat tempéré et la nationalité française de l'UMR. Enfin, nous donnerons quelques conclusions propres à l'aquaculture écomimétique.

Remarque : d'autres laboratoires travaillent également sur l'intensification écologique de l'aquaculture, en particulier l'IRD et l'INRA, mais par souci de temps nous ne présenterons que les projets de l'UMR INTREPID.

i. Présentation de la démarche de l'UMR INTREPID

L'intensification écologique consiste à utiliser la connaissance du fonctionnement des écosystèmes pour produire plus et mieux. En aquaculture, les chercheurs travaillent sur la conception de systèmes intégrés multitrophiques (SIM) : il s'agit de reconstituer le fonctionnement en boucle fermée des écosystèmes aquatiques dans un but de durabilité.

Les différentes composantes de ces écosystèmes artificiels sont séparés en différentes « boîtes » entre lesquelles l'eau circule, chaque compartiment fournissant les intrants du suivant.

- 1^{er} compartiment : poissons ou crevettes d'élevage
- 2^e compartiment : mollusques qui récupèrent la matière organique des effluents d'élevage mais n'épurent pas l'eau
- 3^e compartiment : algues qui captent la partie minérale des effluents et épurent l'eau
- 4^e compartiment : poissons herbivores nourris avec la production d'algues du 3^e compartiment

Leurs avantages, liés à l'approche en boucle fermée, sont nombreux. Ces systèmes intégrés multitrophiques permettent de :

- Réduire les intrants : **farine et huile de poisson** pour nourrir les élevages aquacoles, d'où une réduction de la pression exercée sur les stocks halieutiques sachant qu'il faut en aquaculture conventionnelle, 4 kg de poisson fourrage pour produire 1 kg de farine et huile de poisson, **antibiotiques**...
- Limiter les pertes d'azote et de phosphore des systèmes aquacoles en recyclant ces deux éléments au sein de l'écosystème
- Limiter ainsi la pollution de l'eau
- Réduire le risque de maladies dans les fermes aquacoles grâce aux associations d'espèces
- Minimiser les risques économiques pour le pisciculteur en diversifiant sa production, même si les rendements peuvent être un peu moindres qu'en aquaculture intensive

Transposition/Applications de ce système

Il est indispensable d'adapter chaque SIM au contexte local : Atlantique, Méditerranée, Philippines...

Un SIM peut être mis en place à l'échelle d'une entreprise (ferme aquacole), mais le plus intéressant est de l'envisager à **l'échelle d'un territoire**.

Il s'agit de connecter entre elles différentes productions fonctionnant jusqu'à présent de façon indépendante, et gérées par des personnes ne se connaissant pas : pisciculteurs, producteurs d'algues...

En amont, on doit donc penser à disposer les différentes productions de façon intelligente sur un même territoire, afin de limiter les déchets de l'ensemble. Dans ce cas, chaque exploitation est dépendante des autres : les différents acteurs ont donc une responsabilité les uns envers les autres, et sont ainsi incités à ne pas polluer leur environnement.

L'approche écomimétique des systèmes aquacoles nécessite donc aussi une évolution de leur **gouvernance** à l'échelle des territoires, pour pouvoir permettre une amélioration significative de leur **durabilité**.

ii. Les projets de recherche de l'UMR INTREPID

Région	Philippines
Principes écomimétiques suivis	<p>Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience</p> <p>Principe 3. Encourager la coopération entre des [organismes] aux fonctions différentes</p> <p>Principe 4. Contenir les invasions [de pathogènes] grâce à des niveaux/réseaux trophiques complexes</p> <p>Principe 5. Utiliser des alternatives biologiques pour contrôler les [pathogènes]</p>

Description	<p>Systèmes multitrophiques intégrés pour améliorer l'impact environnemental de la production de crevettes</p> <p>Contexte : Le projet se situe dans une baie et des étangs salés très pollués par la production intensive de poissons et crevettes. Les éleveurs de crevettes ont notamment utilisé des doses massives d'antibiotiques pour protéger leurs élevages très sensibles aux maladies. Ils ont ainsi stérilisé toute une région côtière, en particulier là où se développe la mangrove.</p> <p>Réalisation : Des SIM a été mis en place à l'échelle du territoire, avec une coopération entre différents producteurs. Les élevages se font dans des étangs, connectés par des canaux à la mer, qui se remplissent et se vident partiellement pendant les marées. La marée contribue à l'oxygénation des étangs et apporte de la biomasse. Différents pisciculteurs partagent un même étang. Leurs productions sont séparées par des filets ou des cloisons en bambou, souvent colonisés par des huîtres et des moules. Pour l'instant il s'agit surtout de productions de crevettes associées à des productions de poissons Tilapia ou Milk fish. Ces deux espèces de poisson remplacent les antibiotiques traditionnellement utilisés pour protéger les crevettes, en remuant le sol de l'étang ce qui perturbe le développement des bactéries et autres pathogènes. D'autre part, ils rendent disponibles des particules en les mettant en suspension dans l'eau. Les chercheurs essayent à présent d'ajouter à ce système des cultures d'algues. Ils travaillent également avec le Sénat local pour expliquer l'intérêt d'une aquaculture écologiquement intensive dans la région.</p>
Bilan et perspectives	<p>Le projet est de plus en plus transféré aux aquaculteurs philippins même si la recherche n'est pas tout à fait aboutie (il reste des mécanismes incompris, par exemple le mode d'action du mucus bactéricide du Tilapia). Chaque SIM dépend strictement du contexte local : il est donc nécessaire d'acquérir toujours plus de connaissances sur les écosystèmes naturels présents autour des différentes zones piscicoles d'intérêt.</p> <p>Penser les élevages aquacoles comme des écosystèmes permet donc une évolution à la fois des pratiques aquacoles et de la gouvernance de ces productions.</p>

Région	Thaïlande
Principes écomimétiques suivis	<p>Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience</p> <p>Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes</p>
Description	<p>Systèmes multitrophiques intégrés associant aquaculture et hydroponie</p> <p>Un autre projet de l'UMR INTREPID est d'associer production aquacole et culture de plantes horticoles. En Thaïlande, le SIM est le suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Élevage de poissons Tilapia - Culture de salades/condiments/fleurs qui utilisent les déchets organiques de l'élevage de Tilapia et épurent l'eau. L'eau retourne ensuite au bac d'élevage - (en cours de développement) : 3^e compartiment contenant des petites crevettes d'eau douce (zooplancton), élevées et utilisées au stade larvaire pour nourrir les poissons.
Bilan et perspectives	<p>Le projet est bien avancé en Thaïlande mais a été interrompu par les inondations en 2011. En France, un projet mené avec l'INRA et un lycée aquacole étudie la possibilité d'associer</p>

	ce système Aquaculture/Hydroponie à des AMAP.
Sources	Entretien avec Jean-Francois Baroiller, directeur de l'UMR INTREPID (CIRAD/Ifremer)

Région	Variées
Principes écomimétiques suivis	Principe 1. Utiliser la complémentarité de traits fonctionnels pour assurer la productivité et la résilience Principe 3. Encourager la coopération entre des plantes aux fonctions différentes
Description	Polyculture en étang D'autres travaux de recherche s'intéressent à la polyculture en étang, même si cela reste encore très marginal en France comparé aux zones tropicales. A la différence des systèmes intégrés multitrophiques, la polyculture consiste à élever dans un même compartiment (l'étang) différentes espèces correspondant à différentes niches trophiques. Elle utilise ainsi la spécialisation des différentes espèces en présence pour accomplir un ensemble de fonctions complémentaires.
Bilan et perspectives	La poly-aquaculture est énormément pratiquée en Asie et en Afrique : on multiplie à l'infini le nombre d'espèces tant qu'il reste des fonctions à exploiter. Cependant, comme en agriculture, la relation entre la complexité d'un système et sa productivité est encore largement discutée.

L'écomimétisme est donc une démarche de plus en plus étudiée et utilisée dans le monde agricole et aquacole en France. Elle est principalement portée par les chercheurs en agro-écologie, des techniciens et des agriculteurs pionniers développant des pratiques innovantes sur leurs exploitations. Si elle présente de nombreux avantages environnementaux, économiques et sociaux, elle est encore peu diffusée et se heurte à différents obstacles que nous présenterons dans la section suivante.

4. Limites et questions pour l'intégration de la démarche écomimétique en agriculture

De nombreuses limites ou questions quant à la mise en œuvre de l'approche écomimétique ont été formulées au cours des différents entretiens effectués. Si certaines sont propres à l'écomimétisme (par exemple la difficulté technique à semer et récolter plusieurs espèces à la fois, demandant des adaptations de matériel), la majorité des limites relèvent de la difficulté intrinsèque à un changement de paradigme en matière agricole.

En synthèse issue de ces entretiens, nous présenterons les limites mentionnées au cours des entretiens réalisés de la façon suivante :

- limites scientifiques,
- limites techniques,
- limites financières et institutionnelles,
- limites culturelles.

a. Limites scientifiques

Acteur interrogé	Opinion
Coopérative agricole	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de résultats probants et opérationnels du côté de la recherche pour l'instant. Par exemple, les travaux sur l'intensification microbienne des sols n'aboutiront que d'ici 10 ans. - Il y a parfois des publications un peu trop « militantes » sur les bas intrants, qui ne tiennent pas compte des problèmes économiques pouvant être induits
Chercheurs	<ul style="list-style-type: none"> - L'écomimétisme ne dispose que rarement d'une nature vierge comme objet d'étude ! - Cependant, les limites scientifiques sont sans commune mesure avec les limites liées au mode de rémunération des agriculteurs
	<ul style="list-style-type: none"> - La modélisation des systèmes agroforestiers est extrêmement difficile
	<ul style="list-style-type: none"> - L'écomimétisme en agriculture a forcément des limites : s'il n'y avait plus aucune intervention humaine (semis, entretien, prélèvement...) on ne parlerait plus d'agriculture ! - Ne pas confondre « agriculture écologiquement intensive », qui désigne un mouvement sans normes ni objectifs chiffrés, et « intensification écologique » qui désigne la volonté scientifique d'intensifier des processus naturels, donc d'avoir réellement une démarche écomimétique.
	<ul style="list-style-type: none"> - Les projets d'aquaculture écologiquement intensive sont encore confrontés à un manque de connaissances, à la fois sur la caractérisation des écosystèmes aquatiques à imiter et sur les mécanismes mis en jeu (dans les systèmes intégrés multitrophiques et en aquaponie).

b. Limites techniques

Acteur interrogé	Opinion
Coopérative agricole	<ul style="list-style-type: none"> - Le machinisme doit s'adapter aux innovations agronomiques, ce qui engendre des coûts supplémentaires à court terme
Chercheurs	<ul style="list-style-type: none"> - Selon les régions, il n'est pas toujours possible de « produire plus avec moins ». Les succès expérimentaux de Terrena dans les Pays de Loire ne sont pas transposables aux modèles économiques de toutes les régions, par exemple à la Beauce. Il y a une forte dépendance au contexte local pour mettre en place de nouvelles agricultures.
	<ul style="list-style-type: none"> - Les principes écomimétiques sont bien loin d'être appliqués de façon généralisée, car on a encore besoin de résultats prouvant leur efficacité en terme d'échelle. De plus, par définition il est impossible de construire un agro-écosystème entièrement écomimétique. - L'agro-écologie n'est pas dans une logique industrielle : elle n'aboutit pas directement à des « choses qui marchent » à grande échelle. Cela est néanmoins possible dans le domaine de l'écologie chimique.

c. Limites financières et institutionnelles

Acteur interrogé	Opinion
Coopérative agricole	<ul style="list-style-type: none"> - La crise financière est un obstacle de plus à l'innovation agronomique - <i>« Une grosse partie du développement agricole se fait par les coopératives, bien plus que par les chambres d'agriculture, mais nous gardons une image de vendeurs de pesticides et ne bénéficions que d'un faible appui institutionnel ».</i> Certains organismes commencent néanmoins à s'intéresser aux coopératives agricoles, comme les Agences de l'eau.

<p style="text-align: center;">Chercheurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les politiques publiques actuelles visent plus à restaurer les zones polluées qu'à conserver des systèmes vertueux comme les prairies. Or l'abandon de ces systèmes peut poser de sérieux problèmes écologiques et économiques. - Lourdeur des processus d'innovation : il existe de nombreux outils pour mettre en contact chercheurs, agronomes et agriculteurs, mais chaque type d'acteur reste cantonné à son propre modèle d'innovation : innovation issue de la recherche scientifique VS mise au point d'itinéraires techniques par les agriculteurs - Le mode de rémunération des agriculteurs est l'une des principales limites au passage à une agriculture plus durable : tant que l'amélioration de la performance écologique des exploitations ne sera pas encouragée financièrement, celle-ci sera restreinte à un très petit nombre d'exploitations. Il faut impérativement redéfinir le cadre des subventions dans la future PAC. - Les coopératives agricoles peuvent freiner le passage à une agriculture plus durable, qui limiterait leurs ventes d'intrants aux agriculteurs et diminuerait peut-être leur collecte de produits.
	<ul style="list-style-type: none"> - L'agro-écologie est de plus en plus reconnue, mais les financements sont insuffisants malgré l'affichage politique de l'INRA par exemple. Il suffit de regarder le montant des fonds distribués par l'ANR ou d'autres structures pour les projets d'agro-écologie.
	<ul style="list-style-type: none"> - L'aquaculture écologiquement intensive se heurte au cloisonnement et à la représentation des professions dans le domaine aquacole. Si les pisciculteurs sont relativement bien fédérés en syndicats, ce n'est pas le cas des ostréiculteurs ou producteurs d'algues.
<p>Association française d'agroforesterie</p>	<p>Les freins majeurs au développement de l'agroforesterie sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le manque de reconnaissance de l'agroforesterie comme un secteur à part entière : les financements vont généralement soit à l'agriculture, soit à la forêt (même si la situation est en train de s'améliorer en France, voir annexe 12) - la disparité et l'inadaptation des aides : même si la mesure 222 a été activée à l'échelle nationale, très peu de régions l'appliquent et la financent (voir annexe 12) - la complexité des démarches pour obtenir des subventions lors du passage à l'agroforesterie, - le manque d'accompagnement et d'information des agriculteurs, - la lenteur de la construction de nouvelles voies professionnelles (agroforestier n'est pas encore reconnu comme un métier en tant que tel)
<p>MEDDE/CGDD/SEEIDD</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Malgré des évolutions positives, le système de formation des agriculteurs reste aujourd'hui inadapté à la nécessaire transition vers une agriculture durable, ne leur conférant pas suffisamment de connaissances agronomiques

d. Limites culturelles

Acteur interrogé	Opinion
Coopérative agricole	<ul style="list-style-type: none"> - Il faut absolument tenir compte de l'aptitude au changement des agriculteurs, de leur peur du risque.
Chercheurs	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance au changement des agriculteurs, mais qui peut s'expliquer par des arguments économiques dans le cadre actuel.
	<ul style="list-style-type: none"> - Les résistances culturelles par rapport à la démarche écomimétique étaient jusqu'à récemment plus présentes dans la tête des chercheurs en agronomie que dans celle des agriculteurs, habitués à observer la nature !
	<ul style="list-style-type: none"> - L'aquaculture écologiquement intensive, fonctionnant en boucle fermée à l'échelle de l'exploitation ou du territoire, rend les différents producteurs interdépendants d'un point de vue économique et environnemental, ce qui bouleverse les schémas d'organisation traditionnels dans ce domaine.
Agriculteur	<ul style="list-style-type: none"> - Les agriculteurs essayant de changer leurs pratiques doivent faire face à l'attitude des vendeurs d'intrants ou de tracteurs et des agriculteurs voisins, qui se délectent des échecs des autres... - Les agriculteurs doivent devenir autonomes dans la manière dont ils s'informent, et aller chercher l'information eux-mêmes sans attendre l'avis des techniciens - Les agriculteurs AEI doivent assumer d'éventuelles défaites sur leurs exploitations. En agriculture conventionnelle, il y a aussi des échecs, mais qui sont imputés à des facteurs extérieurs comme la sécheresse. Or ce sont bien les agriculteurs conventionnels qui sont responsables de la forte évaporation de l'eau sur leurs parcelles, contrairement à ceux travaillant en AEI !

Ces limites d'ordre scientifique, technique, culturel, financier et institutionnel évoquées par les personnes interrogées sont à prendre en compte si l'on souhaite accompagner l'émergence de pratiques agricoles écomimétiques.

5. Biomimétisme et agro-systèmes durables : Conclusion

Conclusions générales

En agriculture comme en aquaculture, l'écomimétisme est une démarche participant à la mise en place de schémas de production plus durables en :

- **appréhendant les systèmes de production comme des écosystèmes fonctionnant en boucle fermée**, grâce à des combinaisons d'organismes aux spécialités différentes et à une réflexion sur leur intégration dans l'environnement. L'écomimétisme met ainsi en avant la nécessité de diversifier les cultures, de maintenir un couvert végétal permanent ou encore d'avoir recours au bio-contrôle. Dans ces agro-écosystèmes, les intrants et les déchets sont minimisés, et les bénéfices environnementaux peuvent conduire à une augmentation de la quantité et de la qualité des productions, d'où des bénéfices d'ordre économique.
- **exigeant sans cesse une meilleure compréhension** du fonctionnement des écosystèmes naturels, et donc augmentant les chances de systématiser certaines pratiques vertueuses inspirées de leur imitation. Quelle que soit l'échelle considérée (parcelle, exploitation, territoire), la mise en application des principes écomimétiques dépend étroitement du contexte agro-environnemental local.
- **réfléchissant à l'intégration de différentes productions à l'échelle des territoires**, en (re)connectant différentes productions - aujourd'hui indépendantes - entre elles, ce qui induit des bénéfices sociaux grâce à une amélioration de la gouvernance de ces productions. Ceci nécessite des efforts organisationnels mais également l'acceptation du bouleversement des schémas traditionnels. Les producteurs, devenus interdépendants, sont incités à réduire leurs impacts sur l'environnement, dans une logique de coopération et non plus de compétition, la gouvernance ne se faisant donc plus avec des règles contraignantes de type « top-down » mais grâce à une certaine auto-régulation. L'écomimétisme peut donc permettre de repenser de façon globale les flux et les stocks agricoles.
- **alimentant la prise de conscience générale** sur la nécessité de rendre notre agriculture compatible avec les limites de la biosphère, en rappelant les propriétés « oubliées » des écosystèmes naturels et les dommages causés par l'artificialisation à outrance de la nature.

Cependant, certaines pratiques dites écomimétiques peuvent avoir été élaborées par la recherche agronomique classique sans avoir recours à l'observation de la nature, dans le but premier de réduire la charge de travail de l'agriculteur.

Conclusions spécifiques à la France

La France possède des atouts en agro-écologie :

- **diversité des programmes de recherche** lui étant consacrés (même si ceux-ci pourraient encore être amplifiés),
- **diversité de ses territoires** et caractère « préservé » de nombre d'entre eux,
- **agriculteurs et agroforestiers pionniers**, mettant en pratique les principes de l'agro-écologie (dont certains principes écomimétiques) sur leurs exploitations,
- **évolution de la réglementation** recherchant une réduction de l'impact environnemental de l'agriculture,
- **diffusion d'un schéma de pensée « global »** dépassant l'échelle de l'exploitation pour réfléchir à l'échelle des territoires...

Cependant, différentes limites sont à reconnaître et dépasser :

- cloisonnement « traditionnel » des professions et retard des formations professionnelles,

- difficulté à prendre des risques à court terme dans un contexte de crise économique,
- incertitudes quant à la future PAC,
- absence de rémunération des services écologiques que l'agriculteur rend à la société...

En effet, il est nécessaire de reconnaître qu'outre les nécessaires progrès environnementaux que doit réaliser l'agriculture, il est primordial que soient préservés l'emploi et le revenu des agriculteurs. L'agriculture durable reposera avant tout sur les innovations expérimentées **à grande échelle** par les chercheurs et les agriculteurs, grâce aux progrès de la recherche et à la valorisation d'innovations « *aujourd'hui éparpillées chez les uns et les autres* »⁹² et souvent tardivement reconnues.

Quelques recommandations générales

Au sujet de la mise en œuvre à grande échelle des principes de l'agro-écologie

- **Inform**er l'ensemble des acteurs de la transformation de l'agriculture sur les pratiques issues de la recherche en agro-écologie
- **Former** les agriculteurs aux principes de l'agro-écologie et les accompagner dans leur mise en œuvre
- **Mobiliser les Chambres d'agriculture** autour des principes et pratiques de l'agro-écologie
- Faire en sorte que les enjeux de l'agro-écologie soient **au cœur des futures politiques publiques nationales et européennes** en communiquant davantage sur les pratiques agricoles durables et écomimétiques à destination des décideurs français et européens, afin de :
 - o Influencer sur l'élaboration de la nouvelle PAC, pour que celle-ci tienne vraiment compte de l'urgence à trouver un compromis entre les performances environnementales, économiques et sociales de l'agriculture
 - o Faire évoluer les cadres réglementaires existants à l'échelle nationale et européenne, afin que les considérations de développement durable soient au cœur de la transformation de l'agriculture moderne
- **Développer de nouvelles voies professionnelles** autour de l'agro-écologie : agroforestiers, ingénieurs conseil spécialisés en agro-écologie, en agroforesterie...
- **Communiquer** davantage :
 - o à destination du grand public, afin que l'agro-écologie ne soit plus considérée comme une approche « utopique » mais bien opérationnelle, exemples à l'appui
 - o à destination des agriculteurs et associations d'agriculteurs, afin de les informer sur les réglementations existantes et les démarches à accomplir, par exemple lors du passage à l'agroforesterie

Au sujet de l'aquaculture durable

- **Améliorer la communication entre les différentes professions** ou activités liées à l'eau : aquaculteurs, collectivités territoriales, associations de plaisanciers, touristes, propriétaires côtiers, agences de l'eau...
- **Encourager la mise en place de systèmes de production intégrés à l'échelle des territoires**, connectant différentes productions entre elles pour diminuer les déchets et améliorer la qualité de l'environnement

⁹² Bernard Chevassus-au-Louis, inspecteur général de l'Agriculture

IV. Conclusion

Le biomimétisme et l'écomimétisme sont des notions séduisantes : en s'inspirant du vivant (que ce soit d'une forme, d'un procédé ou d'un ensemble d'interactions au sein d'un écosystème), les êtres humains pourraient réconcilier leurs activités avec la biosphère, réussissant ainsi la transition de nos sociétés modernes vers une économie verte.

Cependant, à l'heure actuelle très peu d'innovations donnent lieu à des produits ou technologies commercialisables à la fois inspirées du vivant ET significativement plus durables que ceux auxquels ils se substituent.

Si la nature a toujours été une des premières sources d'inspiration de la créativité humaine, l'histoire est parfois réécrite : certaines technologies dites biomimétiques ont été mises au point avant que le phénomène soit découvert dans le vivant, et certaines pratiques agricoles (comme le semis direct) ne sont pas toujours issues d'une volonté d'imiter la nature, mais plutôt de diminuer la charge de travail de l'agriculteur. Il est donc nécessaire d'être vigilant quant au « *biomimicry-washing* ».

Néanmoins, de nombreux projets de recherche et développement – qu'on les qualifie on non de biomimétiques – sont prometteurs dans le contexte de l'économie verte :

- matériaux bio-inspirés aux propriétés remarquables et dont la fabrication se fait dans des conditions douces,
- décryptage des étapes de la photosynthèse et mise au point de photocatalyseurs efficaces et respectueux de l'environnement, pouvant servir à produire du biohydrogène,
- catalyse de réactions chimiques à température et pression ambiantes sans solvants toxiques, ou neutralisation bactérienne, grâce aux biotechnologies blanches,
- mise au point de schémas de production en boucle fermée, comme le font quelques entreprises françaises dans le domaine agroalimentaire ou des biotechnologies,
- démarche écomimétique en agro-écologie et aquaculture durable.

Le succès de ces projets - qui sont à des stades d'avancement divers - dépend de la capacité à faire interagir les acteurs de différents domaines d'activité, ainsi que de la capacité à surmonter les barrières scientifiques, techniques, financières, institutionnelles et culturelles qui existent actuellement, notamment avec l'aide de la puissance publique.

Le biomimétisme, qu'il soit ou non désigné comme tel, est une méthode d'innovation présentant un fort potentiel dans le contexte de l'économie verte. Les projets qui y font appel et qui participent à l'élaboration de modes de production en rupture avec les voies actuelles méritent d'être encouragés.

ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexes relatives aux sources utilisées dans l'étude

ANNEXE 1. LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES

ANNEXE 2. BIBLIOGRAPHIE

Annexes apportant des informations complémentaires

ANNEXE 3 : TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS UTILISES PAR LE VIVANT

ANNEXE 4 : LABORATOIRES INTERNATIONAUX DE RECHERCHE PUBLIQUE EN LIEN AVEC LE BIOMIMETISME

ANNEXE 5 : EDUCATION ET FORMATIONS UNIVERSITAIRES AU BIOMIMETISME

ANNEXE 6 : PRESENTATION DETAILLEE DU CABINET DE CONSEIL INDDIGO

ANNEXE 7 : PRESENTATION DU FONDS DE DOTATION BIOMIMETHIC DU POLE FIBRES

ANNEXE 8 : PRESENTATION DETAILLEE DE L'ASSOCIATION BIOMIMICRY EUROPA

ANNEXE 9 : PRESENTATION DETAILLEE DE L'ASSOCIATION ICDD

ANNEXE 10 : PRESENTATION DETAILLEE DE L'INSTITUT INSPIRE

ANNEXE 11 : PRESENTATION DU GROUPE TERRENA ET DE L'AGRICULTURE ECOLOGIQUEMENT INTENSIVE

ANNEXE 12 : COMPLEMENT SUR L'AGROFORESTERIE

Documents communiqués par l'AFNOR

Annexe 13 : BIOMIMETISME – CREATION DE NOUVEAU DOMAINE DE NORMALISATION

Annexe 14 : RESULTAT DE L'INSTRUCTION

Annexe 15 : PROPOSAL FOR A NEW FIELD OF TECHNICAL ACTIVITY

*Annexes relatives aux sources utilisées dans l'étude***ANNEXE 1.****LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES****MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT*****(*L'étoile indique que les personnes étaient membres du comité de pilotage de l'étude)*****COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE**

- Dominique Dron, Commissaire générale et Déléguée interministérielle au développement durable
- Viviane Apied, Responsable Ministérielle aux Normes

Délégation au développement durable

- *Catherine Larrieu, chef de la Délégation au développement durable
- *Manuel Flam, chargé de mission prospective « Economie verte »

Direction de la recherche et de l'innovation***Service de la recherche***

- *Claire Hubert, chef du Service de la Recherche
- *Murièle Millot, Mission Biodiversité et gestion durable des milieux
- Thibault Prévost, Mission génie civil et construction

Sous-direction à l'innovation

- Alain Griot, sous-directeur à l'innovation
- Jean-Michel Kehr, Chef de bureau des éco-technologies et compétitivité
- Claude Legris, Mission chimie verte

Sous-direction à l'animation scientifique et technique

- Vincent Letrouit, chargé de mission, animation scientifique et technique

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

- Martin Bortzmeyer, Bureau de l'agriculture, de l'industrie et des infrastructures énergétiques

DIRECTION GÉNÉRALE DE L'AMÉNAGEMENT, DU LOGEMENT ET DE LA NATURE**Direction de l'eau et de la biodiversité**

- Emilie Babut

POLES DE COMPÉTITIVITÉ

- Karl Gedda, délégué général, pôle Fibres
- Thibaud Segur, chargé de mission, pôle Advancity

AFNOR

- Fabienne Ramirez, chargée de mission Biomimétisme, Comité stratégique « Ingénierie industrielle, Biens d'équipement et Matériaux »
- Elise Marcandella, experte au sein de la Commission de normalisation « Management de l'Innovation », sous-groupe de travail « intégration des enjeux du développement durable dans le management de l'innovation »

ASSOCIATIONS**Comité français de l'association Biomimicry Europa**

- Gauthier Chapelle, cofondateur de Biomimicry Europa et du bureau d'études Greenloop
- Tarik Chekchak, secrétaire général
- Kalina Raskin, chargée de projet
- Nicolas Bel, formateur et consultant en biomimétisme et écoconception
- Jean Valayer, cofondateur de Biomimicry Europa

Institut Inspire

- Emmanuel Delannoy, fondateur

Innovation Citoyenne et Développement Durable (ICDD)

- Antoine Héron, président
- Angelo Beati, responsable édition et documentation

Cohérence

- Stephen Johnston

ENTREPRISES

- **Phytoystore** - Thierry Jacquet, président
- **Zoé Biotech** - Axel Tarrisse, co-gérant de la société
- **Up-Cycle** - Cédric Péchard, président

...et quelques grands groupes français.

RECHERCHE**Biomimétisme et technologies - France**

- Hervé Arribart, spécialiste des matériaux biomimétiques, ex-directeur scientifique de St Gobain, ESPCI
- Jérôme Casas, professeur et chercheur à l'Institut de recherche sur la biologie de l'insecte, membre du réseau BIONKON international
- Thibaud Coradin, spécialiste de la synthèse du verre par les éponges, équipe « Matériaux et biologie », LCMCP, Collège de France
- Marc Fontecave, directeur du laboratoire de Biocatalyse, IRTSV, CEA, professeur au Collège de France titulaire de la chaire « Chimie des processus biologiques »
- Yvon Le Maho, directeur de recherche au CNRS, écophysiologiste, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- Charlotte Vendrely, chercheuse en biologie et maître de conférences à l'université de Cergy-Pontoise

Biomimétisme et technologies - Étranger

→ Ensemble des personnes présentes à la *International Bionic Engineering Conference 2011* du 18 au 20 septembre 2011 à Boston, et en particulier :

- Julian Vincent, chercheur à l'Université de Bath (UK), spécialiste du biomimétisme appliqué à l'ingénierie, organisateur de la conférence *Bionics Engineering*
- François Barthelat, chercheur à l'Université Mc Gill (Canada), spécialiste des matériaux biomimétiques

Agro-écologie

- Jean-Francois Barroiller, directeur de l'UMR INTREPID (INTensification Raisonnée et Ecologique pour une Pisciculture Durable), CIRAD
- Stéphane Bellon, ingénieur de recherche, INRA PACA
- Bernard Chevassus-au-Louis, inspecteur général de l'Agriculture
- Thierry Doré, enseignant-chercheur INRA/AgroParisTech, président de l'association française d'agronomie
- Eric Malézieux, directeur de l'UR HortSys : Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles, CIRAD
- Jean-Francois Soussanna, directeur scientifique Environnement de l'INRA

Autres chercheurs rencontrés

- Luc Abbadie, directeur du laboratoire BIOEMCO, spécialiste de l'ingénierie écologique, CNRS
- Vincent Devictor, chercheur à l'Institut des Sciences de l'Évolution, CNRS

INGENIEURS AGRONOMES ET AGRICULTEURS

- Benoît Biteau, agriculteur et vice-président du Conseil Régional de Poitou-Charentes
- Alain Canet, agroforestier, président de l'Association française d'agroforesterie
- Bertrand Pinel, ingénieur agronome, direction scientifique et R&D de la coopérative Terrena
- Frédéric Thomas, agriculteur, président de l'association BASE (Bretagne Agriculture Sol Environnement), fondateur d'un portail sur l'agriculture de conservation et de la revue TCS

EXPERTS ÉCONOMIQUES**Fermanian Economic and Business Institute**

- Lynn Reaser, économiste en chef

ANNEXE 2. BIBLIOGRAPHIE

Rapports et documents administratifs

- AFNOR normalisation, Document N 339 (20/06/2011), *Biomimétisme – Création de nouveau domaine de normalisation*, CoS référent : “Ingénierie industrielle, Biens d’équipement et matériaux”
- AFNOR normalisation, Document N 359 (20/09/2011), *Biomimétisme – Création de nouveau domaine international de normalisation – Résultat*, CoS référent : “Ingénierie industrielle, Biens d’équipement et matériaux”
- Laffitte P., Saunier C., sénateurs (2007), *Les apports de la science et de la technologie au développement durable*, Tome II : [La biodiversité : l'autre choc ? l'autre chance ?](#), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
- MEEDDM/CGDD (2010), *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, Références
- OCDE, 2001, *Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle*, www.oecd.org/dataoecd/43/5/33814422.pdf
- OCDE, 2009, *La Bioéconomie à l'horizon 2030 : quel programme d'action ?*, www.oecd.org/prospective/bioeconomie/2030
- PNUE (2011), « *Vers une économie verte : Pour un développement durable et une éradication de la pauvreté – Synthèse à l'intention des décideurs* », www.unep.org/greeneconomy

Articles et revues scientifiques

- Artero V., Fontecave M. (2011), *Light-driven bioinspired water splitting: Recent developments in photoelectrode materials*, *Comptes Rendus Chimie* 14, 799-810
- Chevallard C., Guenoun P. (2006), *Les matériaux biomimétiques*, *Bulletin de la SFP* (155)
- Kalyanasundaram K., Graetzel M. (2010), *Artificial photosynthesis: biomimetic approaches to solar energy conversion and storage*, *Current Opinion in Biotechnology*, 21:298-310
- Malézieux (2011), *Designing cropping systems from nature*, *Agronomy for Sustainable Development*
- Reece *et al.* (2011), *Wireless Solar Water Splitting Using Silicon-Based Semiconductors and Earth-Abundant Catalysts*, Published Online September 29 2011, *Science* 4 November 2011, Vol. 334 no. 6056 pp. 645-648
- Service R. (2011), *Artificial Leaf Turns Sunlight Into a Cheap Energy Source*, *Science* Vol 332, 1er avril 2011, p. 25

- Wackett *et al.*, (2004), *Microbial Genomics and the Periodic Table*, Appl. Environ. Microbiol. February 2004 vol. 70 no.2 647-655

Études économiques

- *Global biomimicry efforts, an economic game changer*. Rapport commandé par le San Diego Zoo et élaboré par le Fermanian Business & Economic Institute en 2010.
www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/biomimicry/the_economic_impact_of_biomimicry
- Documentation relative au Da Vinci Index, développé par le Fermanian Business & Economic Institute en 2011 :
<http://www.pointloma.edu/experience/academics/centers-institutes/fermanian-business-economic-institute/da-vinci-index-biomimicry>
- Joint Research Centre (2008) — *Consequences, Opportunities and Challenges of Modern Biotechnology for Europe – The Analysis Report – Contributions of modern biotechnology to European policy objectives*.

Ouvrages

- Benyus J.M. (1997), *Biomimétisme : quand la nature inspire des innovations durables*, sorti en français en mai 2011 aux éditions Rue de l'Echiquier
- Flam M. (2010), *L'Économie verte*, Presses universitaires de France, collection Major
- Guillou, M., Matheron G.. (2011), *9 milliards d'hommes à nourrir, un défi pour demain*, éd. François Bourin
- Groupe Terrena, *Sentinelles de la Terre, mettre en pratiques une agriculture écologiquement intensive*, 2010

Autres documents

- Association internationale pour une agriculture écologiquement intensive (2009), *Manifeste*
- Diaporama « 50 exemples d'applications biomimétiques et durables » réalisé par Biomimicry Europa
- Documents distribués au cours des différentes conférences ou événements : *International Bionic Engineering Conference 2011* à Boston, Première Rencontre Européenne d'Agroforesterie au MAAPRAT...
- Pour La Science (octobre-décembre 2011), « Quand les chimistes imitent la nature », dossier n°73, *Les océans et la chimie durable*, pp. 80-84
- Clefs CEA n°50/51 (hiver 2004-2005), « De l'hydrogène à partir du soleil et de l'eau ! »
- CNRS – Le journal n°177 (octobre 2004), « Biomimétisme : plagier pour innover »
- Dossier de l'INRA sur les biotechnologies blanches :
https://www.inra.fr/la_sciences_et_vous/apprendre_experimenter/questions_d_actu/biotechnologies/biotechnologies_blanches

Sites Internet

- Base de données AskNature du Biomimicry Institute : www.asknature.org
- Journal Bioinspiration&Biomimetics : <http://iopscience.iop.org/1748-3190>
- Zoo de San Diego : www.sandiegozoo.org/conservation/biomimicry/
- Portail sur l'agriculture de conservation : www.agriculture-de-conservation.com

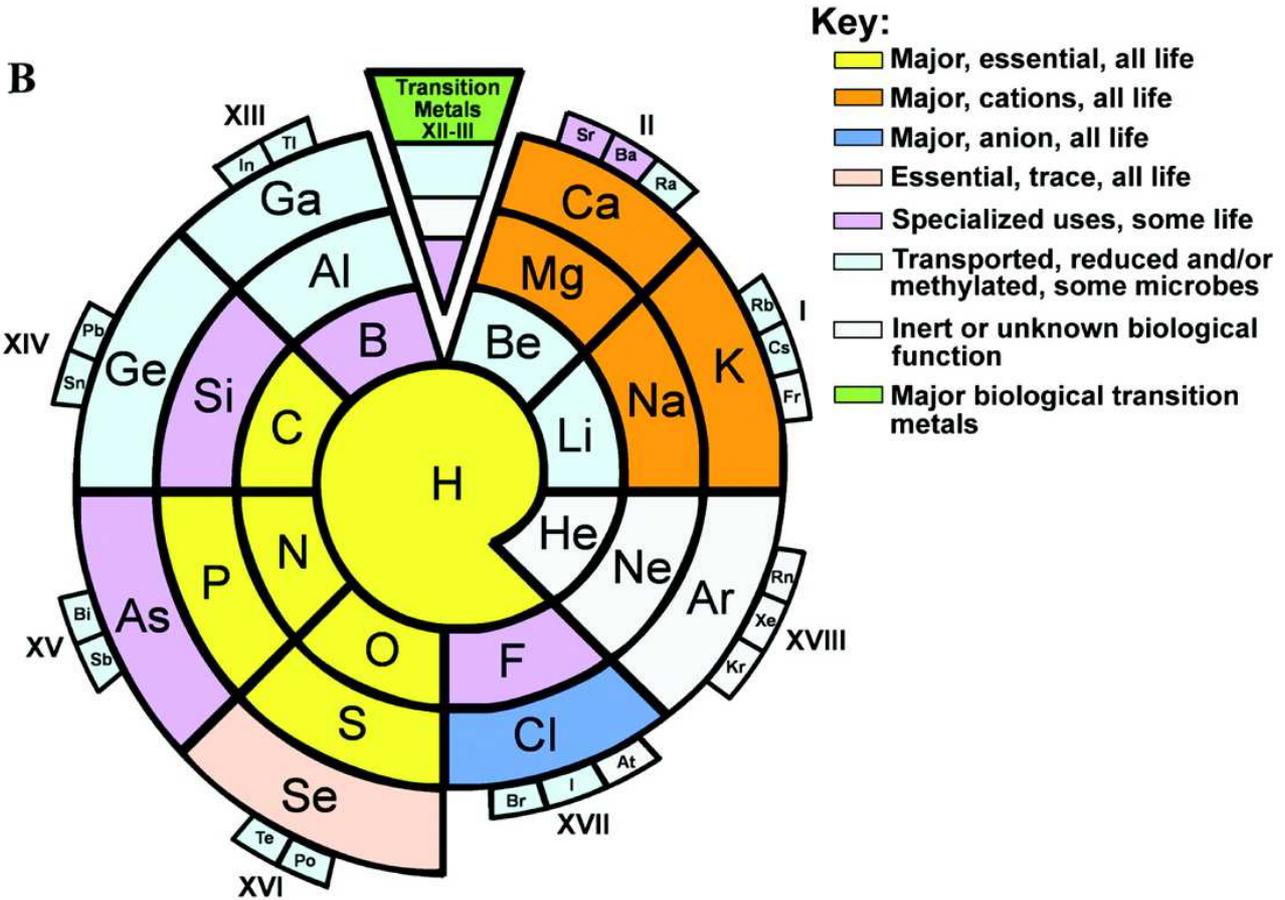
Annexes apportant des informations complémentaires

ANNEXE 3.

TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS UTILISES PAR LE VIVANT

Source : Wackett et al., (2004), Microbial Genomics and the Periodic Table, Appl. Environ. Microbiol. vol. 70 no.2 647-655

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	H																	He
Period 2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Period 3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
Period 4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Period 5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Period 6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn



ANNEXE 4.

LABORATOIRES INTERNATIONAUX DE RECHERCHE PUBLIQUE EN LIEN AVEC LE BIOMIMÉTISME

Sources :

- Recherche documentaire du CRDD : symbole °
- Universités représentées à la conférence « International Bionic Engineering Conference 2011 » à Boston (18-20 sept 2011) : symbole *
- Comité français de Biomimicry Europa, Biomimicry Institute : symbole +

Remarque :

Le grand nombre d'universités américaines répertoriées ci-dessous peut être dû au fait que le Biomimicry Institute est l'une des sources de cette liste, qui est non exhaustive par ailleurs.

Algeria

*Ammar Telidji University

Australia

*University of Sydney

+The Biomimetics Laboratory at the University of Auckland

Austria

*Vienna University of Technology

*TU-Bionik Center of Excellence

*Austrian Institute of Technology

+Bionik/Biomimetics in Energy Systems – Masters Degree Program at Carintha University of Applied Sciences

Canada

*Mc Gill University – The Biomimetic Materials Laboratory

China

*South China University of Technology

*Jilin University

Colombia

°The Smart Design Group Inspired by Nature at the Universidad de Los Andes, Colombia

Czech Republic

*Institute of Chemical Technology

Denmark

°Lenau's Group. Technical University of Denmark

Germany

- °School of Bionics. Bremen University of Applied Sciences
- °Plant Biomechanics Group. University of Freiburg
- °Institute of Bionics and Evolutionary Technology. Technical University of Berlin
- °Institute of Botany. Technical University of Dresden
- °Evolutionary Biomaterials Group. Max-Planck-Institute for Metals Research, Stuttgart
- °Leonardo da Vinci Center for Bionics. Technical University of Munich
- *Universität Tuebingen
- +Biomimetics at the University of Stuttgart

Greece

- °Computational Vision and Robotics Laboratory. FORTH

Italy

- °Center for Applied Research in Micro and Nano Engineering . Scuola Superiore Sant'Anna
- *Italian Institute of Technology
- *University of Brescia
- *University of Udine

Japan

- *Nagoya University
- *Tokyo Medical and Dental University
- *Kwansei Gakuin University
- *Akita Prefectural University
- +KAIST Biomimetics Lab

Mexico

- *Instituto Politécnico Nacional

the Netherlands

- °The Delfly Project. Delft Technical University
- °ACT Biomimetics. European Space Agency

Portugal

- +3B's Research Group (Biomaterials, Biodegradable, and Biomimetics) at the University of Minho

South Korea

- *Hanyang University

- *Chungju National University

*Konkuk University

Sweden

°Swedish Center of Biomimetic Fiber Engineering (Biomime™)

Switzerland

°Biologically Inspired Robotics Group at EPFL

United Kingdom

°Centre for Biomimetics and Natural Technology. University of Bath

°Centre for Biomimetics. University of Reading

°Intelligent Autonomous Systems Laboratory. The University of the West of England

*University of Salford

°Biomimetics and Bioinspiration at the School of Mechanical Engineering at the University of Leeds

United States

°Biomimetic Robotics. Stanford University

°Biomimetic Underwater Robot Program. Northeastern University

°The Biologically Inspired Robotics Lab. Case Western Reserve University

°Center for biologically inspired design. Georgia Institute of Technology

°Autumn's Lab. Lewis and Clark College

°The Sarakiya Research Group. University of Washington.

+University of California, Berkeley - Berkeley's Center for interdisciplinary Biological-inspiration in +Education and Research (CiBER)

+Harvard University - Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering

+Massachusetts Institute of Technology - Department of Biological Engineering

+University of Illinois at Urbana-Champaign - School of Integrative Biology - Biology and Tech Innovation

+The University of Akron - Integrated Bioscience Program

+University of Massachusetts Boston – Environmental, Earth and Ocean Sciences Department course “Why Biomimicry”

+Tufts University – Tufts Biomimetic Devices Laboratory

*University of Dayton

*Parson, The New School for Design

*Lawrence Berkeley National Laboratory

*University of Colorado at Boulder

- *University of Alabama
- *University of South Florida
- *Mote Marine Laboratory
- *University of Nevada
- *Drexel University

ANNEXE 5. EDUCATION ET FORMATIONS UNIVERSITAIRES AU BIOMIMÉTISME

Sources :

- *Comité français de [Biomimicry Europa](#), adapté du [Biomimicry Institute](#)*
- *Recherches bibliographiques du CRDD : « Institutions with Biomimicry Programs »*

Europe

[Université de Cergy-Pontoise, module de 20h de Biomimétisme](#), donné par Charlotte Vendrely (France)

[Central European University, Environmental Sciences & Policy Dept.](#) (Hongrie)

[Eötvös Roland University, Chair of Biological Physics](#) (Hongrie)

[Imperial College London: Institute of Biomedical Engineering](#) (Royaume-Uni)

[University of Bath: The Centre for Biomimetic and Natural Technologies](#) (Royaume Uni)

[University of Reading, Centre for Biomimetics](#) (Royaume-Uni) (site non mis à jour depuis 2007)

[University of Bath - Biomimetics Group - Department of Mechanical Engineering](#) (Royaume-Uni)

[Biomimetics and Bioinspiration at the School of Mechanical Engineering at the University of Leeds](#) (Royaume-Uni)

[University of Applied Sciences, Bremen](#) (Allemagne)

[Biomimetics at the University of Stuttgart](#) (Allemagne)

KTH - Royal Institute of Technology, [Swedish Center of Biomimetic Fiber Engineering \(Biomime\)](#) Suède)

Presov University at Presov, [The Ecomimicry Project](#) (Slovaquie)

[Vienna University of Technology, Department for Design and Building Construction](#) (Autriche)

[Bionik/Biomimetics in Energy Systems – Masters Degree Program at Carintha University of Applied Sciences](#) (Autriche)

[University of Medicine and Pharmaci "Gr.T.Popa" of Iasi](#), Biomaterials Science (Roumanie)

Continent américain

Etats-Unis

[Biomimicry Institute](#)

[California State University - Northridge , Biology](#)

Georgia Institute of Technology, [Center for Biologically Inspired Design](#) (CBID)

Harvard University, School of Engineering and Applied Sciences, [laboratoire Aizenberg Biomineralization and Biomimetics](#)

[Milwaukee Institute of Arts & Design](#)

[Onondaga Community College](#)

[Southern California Institute of Architecture - Design Studio](#)

[Stanford University, Bio-X](#)

[State University of NY, College of Environmental Science and Forestry](#)

[University of California at Berkeley, Bioengineering](#)

[University of California at Berkeley, Center for Integrative Biomechanics in Education and Research](#)

[University of California, Berkeley - Berkeley's Center for interdisciplinary Biological-inspiration in Education and Research \(CiBER\)](#)

[University of Maryland](#), Mechanical Engineering Department

[University of Minnesota, College of Design](#)

[University of New Mexico, School of Architecture](#)

[University of Illinois, Chicago](#), School of Architecture, College of Architecture and the Arts

[Harvard University - Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering](#)

[Massachusetts Institute of Technology - Department of Biological Engineering](#)

[The University of Akron - Integrated Bioscience Program](#)

[University of Illinois at Urbana-Champaign - School of Integrative Biology - Biology and Tech Innovation](#)

[University of Massachusetts Boston – Environmental, Earth and Ocean Sciences Department course “Why Biomimicry”](#)

[Tufts University – Tufts Biomimetic Devices Laboratory](#)

Informal Education

[Discovery World at Pier Wisconsin – Biomimicry Lab Programs](#)

[Marine Science Institute \(San Francisco\) - Biomimicry School Program](#)

Canada

[Ontario College of Arts & Design](#)
[Queens University, Civil Engineering, Kingston](#)

[Dalhousie University, School for Resource and Environmental Studies and Eco-Efficiency Centre](#)

[University of Calgary, Schulich School of Engineering](#)

[University of Toronto, Biomimetics for Innovation and Design Laboratory](#)

Amérique du Sud

[Tecnológico de Monterrey](#) (Mexique)

[Tecnológico de Monterrey, Campus Aguascalientes](#) (Mexique)

[Universidad Iberoamericana](#) (Mexique)

Océanie

Curtin University of Technology, [The Ecomimicry Project](#) (Australie)

[University of Wollongong](#) (Australie)

<http://www.arch.nus.edu.sg/Victoria> [University of Wellington, Faculty of Architecture and Design](#) (Nouvelle- Zélande)
[The Biomimetics Laboratory at the University of Aukland](#)

Asie

[National University of Singapore, Department of Architecture](#) (Singapour)

[Shandong University](#) (Chine)

[University of Jilin](#) (Chine)

[KAIST Biomimetics Lab](#) (Japon)

ANNEXE 6. PRESENTATION DETAILLEE DU CABINET DE CONSEIL INDDIGO

Qui sommes-nous ?

Créée il y a 25 ans, Inddigo est une société de conseil et d'ingénierie en développement durable qui accompagne les collectivités et les entreprises sur l'ensemble de leurs enjeux stratégiques : énergies & climat, Transports & déplacements, Déchets & écologie industrielle, bâtiment durable, biodiversité. Déployée à Paris, Nantes, Toulouse, Montpellier, Marseille, Chambéry, Dijon et Nancy, l'entreprise appartient à ses salariés, et réunit actuellement 230 collaborateurs.

(voir aussi plaquette en 6 pages : www.inddigo.com/docs/site/presse/plaq-inddigo2010-versiona4.pdf)

Comment Inddigo aborde la thématique du biomimétisme dans ses activités

Après avoir fait éditer en 2010 la traduction du livre Biomimétisme de Janine Benyus en partenariat avec les Editions Rue de l'Échiquier, les projets sur lesquels Inddigo commence à intégrer le Biomimétisme de façon opérationnelle sont :

- **Approche biomimétique des Eco-quartiers.**

Partant du principe que les typologies d'habitants peuvent être considérées comme autant d'espèces et les installations comme des éléments du biotope, l'éco-quartier est modélisé en tant qu'écosystème. Les analyses de la topographie et des relations interspécifiques ainsi que l'étude des règles d'un fonctionnement bio-efficient permettent alors d'identifier les points critiques du projet et par exemple d'établir une charte de l'habitant. (voir éco-quartier « Darwin » à Bordeaux : www.darwin-ecosysteme.fr/approche-biomimetique/)

- **Bâtiments biomimétiques.**

Réflexion sur le Biomimétisme appliqué aux bâtiments, en mobilisant ce qui existe déjà comme solutions disponibles en matériaux durables et en solutions « biomimétiques » en France (ex: moquette Gecko sans colle, peinture effet lotus, etc.) et au niveau des compétences internes de l'entreprise (ventilation naturelle, bâtiment passif voire à énergie positive, etc).

Contacts

Daniel RODARY

Chargé de mission Pilotage R&D

Ligne directe : 04 79 69 94 05

Mobile : 06 30 75 44 94

d.rodary@inddigo.com

Direction :

Bruno LHOSTE, Directeur Général.

Paul BOULANGER, Directeur dépt. Gouvernance

Responsable. P.boulangier@inddigo.com

Equipe Innovation et R&D

Corine LAC

Responsable Pilotage R&D

Ligne directe : 04 79 69 94 05

ANNEXE 7.

PRESENTATION DU FONDS DE DOTATION BIOMIMETHIC DU POLE FIBRES

Pourquoi soutenir Biomimethic ?

Soutenir financièrement Biomimethic c'est :

- Valoriser l'image de votre entreprise
- Investir dans l'avenir
- Intégrer des réseaux innovants
- Mobiliser la recherche autour d'une industrie durable
- Participer à la création de la société durable et décarbonnée
- Bénéficier d'avantages fiscaux sur vos impôts



**Pourquoi un fonds de dotation ?
Définition d'un fonds de dotation ?**

L'expression d'un engagement à pouvoir agir ensemble pour l'avenir.

Le fonds de dotation est une personne morale de droit privé à but non lucratif qui peut recevoir et gérer en les capitalisant, des biens et droits de toute nature qui lui sont apportés à titre gratuit et irrévocable. Il est créé en vue de la réalisation d'une œuvre ou d'une mission d'intérêt général. Il peut redistribuer ses fonds pour assister une personne morale à but non lucratif dans l'accomplissement de ses œuvres et de ses missions d'intérêt général.

(cf. article 140 de la loi n°2008-776 du 4 août 2008 de modernisation de l'économie, JO du 5 août 2008)

Biomimethic s'inscrit dans la pensée de l'ère du durable en prenant en compte la nature afin qu'elle nous inspire dans nos modes de conception en résolvant les problématiques à la source.

Le projet de fonds s'inscrit dans les actions de :

- Protection de l'environnement
- Mobilisation de la recherche
- Protection de la santé



Enjeux futurs

Agir dès maintenant pour répondre aux enjeux environnementaux auxquels nous sommes confrontés...

- Changement climatique réchauffement de la planète
- Épuisement des ressources naturelles
- Production et accumulation de déchets
- Emission de substances toxiques
- ...

« On n'hérite pas la Terre de nos ancêtres, mais on l'emprunte à nos enfants »
St EXUPERY

... pour nous remettre en question et modifier l'impact que nous laissons sur l'environnement.

Chaque produit fabriqué consomme et émet pendant sa fabrication, son transport, son utilisation et même pendant sa fin de vie.



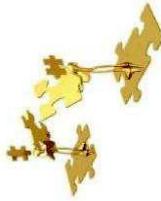
La nature comme inspiration.
L'éthique comme exigence.



Nos actions

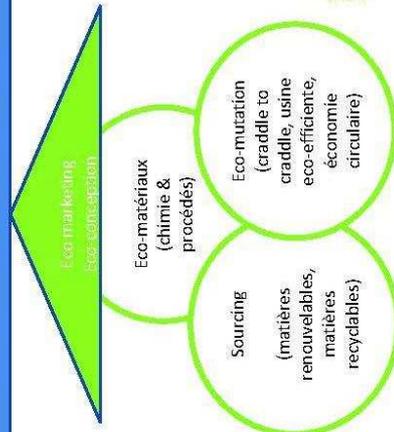
Les différents moyens pour atteindre nos missions :

- Informer et sensibiliser par :
 - expositions destinées grand public
 - concours des écoles supérieures
 - réseaux d'influence
- Dynamiser les acteurs par :
 - groupes de brainstorming au niveau national et régional
 - organisation et suivi de concours
- Mobiliser l'intelligence de la recherche autour :
 - groupes de travail pour la recherche et la modélisation
 - projets de chaire et d'instituts d'excellence en énergies décarbonées (IEED)



Le Pôle de compétitivité Fibres

Répondre aux ou Susciter les opportunités du Développement Durable sur les Marchés Bâtiment, Mobilité (Santé...)



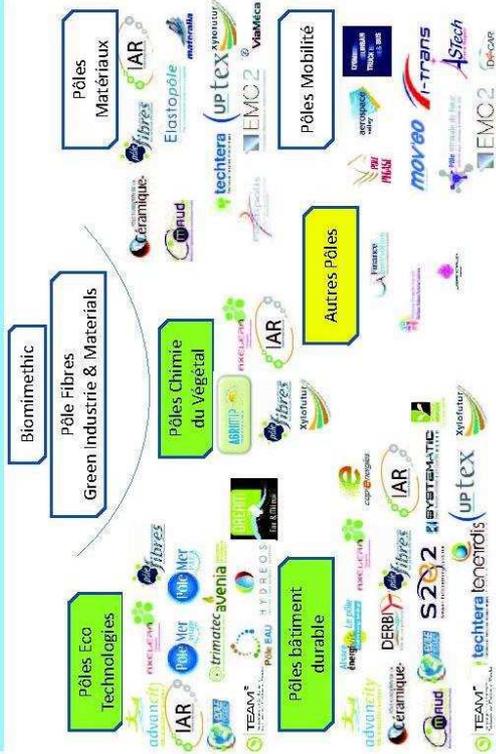
Biomimethic est porté par le Pôle de compétitivité Fibres

Au cœur des produits éco-conçus de demain,

- des matériaux innovants, multifonctionnels, recyclables et respectueux de l'environnement et de la santé de l'homme
- réalisés avec des procédés et sites de production durable,
- à partir de matières renouvelables ou recyclés.



Biomimethic s'appuie sur le méta-réseau



Biomimethic s'appuie sur le réseau des Pôles de compétitivité

Mission \ Public	Grand public	Elus	Industriels	Recherche - laboratoires
Informer et sensibiliser	Biomimethic	Biomimethic	Biomimethic+ Pôles	Biomimethic+ Pôles
Dynamiser les acteurs et encourager l'excellence			Biomimethic+ Pôles	Biomimethic+ Pôles
Mobiliser l'intelligence de la recherche			Pôles	Pôles



Structuration du Fonds



- Comité de parrainage
- Comité de campagne
- Comité donateurs
- Conseil d'administration



Comité de parrainage

Actions :

- Soutien et identification des parraineurs
- Contribuer à la promotion et à la notoriété du Fonds de Fondation, ainsi qu'aux actions de levée de fonds et de mise en réseaux
- Conseiller et appuyer le Comité de Campagne dans la recherche de parraineurs et dans la mobilisation des ressources financières



Comité de campagne

Actions :

- Recruter les donateurs du Fonds
- Rechercher des donateurs potentiels, et en établir la liste et les caractéristiques
- Solliciter les donateurs potentiels et collecter les dons
- Relancer et fidéliser les donateurs
- Définir les objectifs de levée de fonds au travers des actions du Fonds et des actions de sensibilisation auprès des grands donateurs potentiels



Comité des Donateurs

Actions :

- Composé d'une douzaine de membres il mène une réflexion constructive, critique et au niveau des missions, de la communication et sur les fonds collectés
- Permet de donner son avis consultatif au Conseil d'Administration



Conseil d'Administration

Actions :

- Représenter le Fonds
- Affecter les fonds collectés sur avis consultatif du Comité Scientifique et du Comité Donateur



Vous êtes donateurs

- **Engagement annuel sur 3 ou 5 ans :**
 - Premium – 80 000 € (soit 32 000)
 - Gold – 50 000 € (soit 20 000)
 - Silver – 15 000 € (soit 6 000)
 - Support PME – 5 000 € (soit 2 000)
 - Citoyen : Un engagement en tant qu'individu
- **Retour :**
 - Image et communication
 - Réseau
 - Engagement social et sociétal pour bouger l'industrie et le pays
- **Nous cherchons :**
 - à minima 500 000 €
 - 1 à 2 m€ / an



Annexes

Martin-pêcheur Shinkansen

Le martin-pêcheur plonge pour attraper sa proie dans l'eau, dans un autre milieu, à densité différente, donc une résistance entre le passage de l'air à l'eau.

- Le «Shinkansen», train japonais à grande vitesse, possède la même caractéristique quand il passe à 300km.h-1 dans un tunnel: l'imitation de la structure du bec et de la tête du martin-pêcheur améliore la pénétration dans l'air du train dans les tunnels.

Objectifs :

- Réduire la consommation électrique de 15%
- Augmenter la vitesse de 10%
- Diminuer l'impact sonore par la formation des ondes de chocs



Common Kingfisher



Wikipedia Commons



La fibre de banane et d'ananas

- Les fibres issues de l'ananas et de la banane paraissent fragiles, mais au niveau nano-cellulaire elles sont très résistantes – autant que le Kevlar, matériau utilisé dans la fabrication de gilets pare-balles.

Les caractéristiques de ces fibres :

- Légers et très résistants et fort
- Procédés entièrement renouvelables

→ **Utilisation possible pour ces découvertes dans le domaine automobile et aéronautique**



SPORS



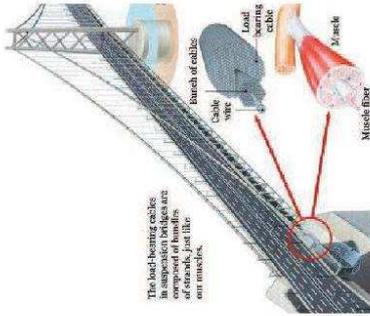
Les tendons valve cardiaque en tissu

- Les tendons sont les tissus qui relient les muscles aux os, ils sont constitués des fibres de collagènes qui rendent leur structure dure et flexible.

- Les câbles de suspension des ponts sont structurés à l'image des tendons de l'avant-bras.

- Chaque cordon est composé d'un ensemble vrillé de cordons fins. Chaque cordon est composé d'un agencement complexe de molécules constituées d'un groupement complexe d'atomes.

- Les câbles d'acier utilisés dans les suspensions de ponts s'inspirent de la structure des tendons du corps humain.



Valve cardiaque en polyester souple

Textiles "high-tech" :

- Concevoir des valves cardiaques artificielles souples et robustes
- Fibre avec un taux de déformation en allongement 50 % face : laine (20 %), coton (6 à 12 %.)

Laboratoire de physique et mécanique textiles, à l'Ensa de Mulhouse



9.1. Chemnitz-Physique



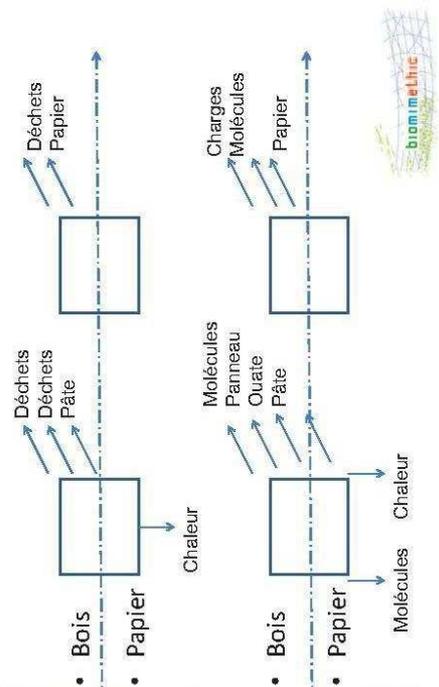
La Nature a ses lois

1. **Utiliser les déchets comme ressource** : la nature réutilise chaque déchet produit par un organisme pour alimenter un autre organisme
2. **Diversifier et créer des réseaux de coopération** : Développer les synergies et rapprocher les acteurs de l'innovation
3. **Récolter et économiser l'énergie** : La Nature cherche les solutions propres et durables (biomasse, éolien, biocarburants)
4. **Optimiser plutôt que maximiser** : Tendre vers la qualité et moins vers la quantité, pour une longévité de la durée de vie des produits et services
5. **Autonomiser ses ressources** : Faire le plus avec le moins

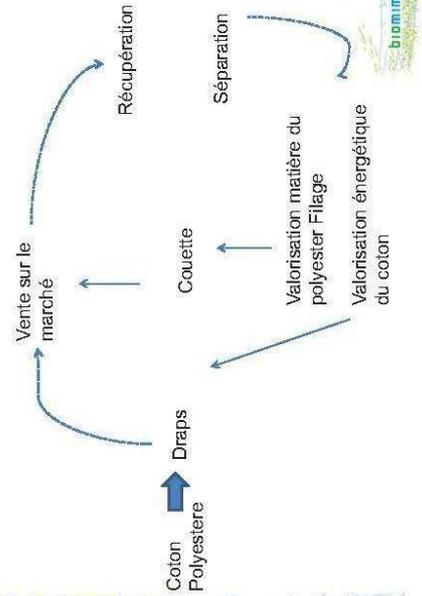
Produire en circulaire plutôt qu'en linéaire

- Les déchets d'un lieu de production deviennent les ressources d'autres productions.
 - L'exemple de la symbiose industrielle de **Kalundborg au Danemark**
 Une raffinerie travaille aux côtés d'une usine qui fabrique des panneaux de plâtre:
 - ✓ les rejets de fumées de la raffinerie sont utilisés par le sous-produit appelé le gypse, pour composer le plâtre: l'on valorise les déchets en matière première pour la seconde entreprise qui réduit alors son importation habituelle de matière
 - ✓ les eaux chaudes rejetées sont récupérées pour le chauffage d'autres modules,
- **Gain de 15 millions EUR par an**
 → **Une réduction de la consommation de pétrole de 20 000T par an**

Application d'une écologie industrielle sur un site de production – Pâte & Papier



Ecologie industrielle circulaire

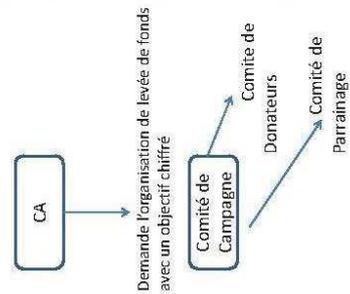


Annexes

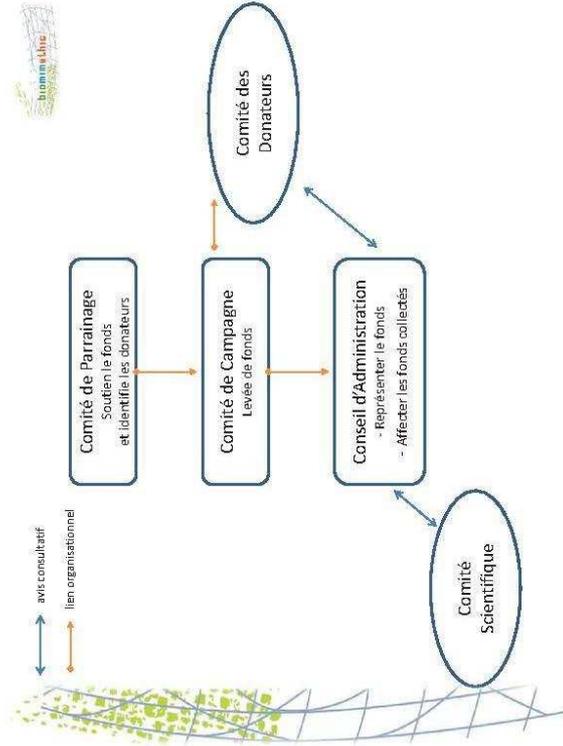
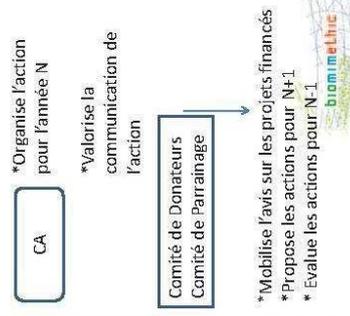
Site	Caractéristiques
Rotterdam Harbour Industrial Ecology Project, Pays-Bas	Projet qui explore l'opportunité de créer des échanges de sous-produits parmi 60 entreprises .
Parc Moerdijk, Pays-Bas	Re-développement d'un site industriel existant – décontamination d'un sol pollué
Réseau de recyclage Styria, Autriche	Réseau de recyclage très avancé, incluant des centrales, des industries du bâtiment, de production de plastique et de papier et autres
Parc éco-industriel Karlsruhe, Allemagne	Parc éco-industriel de 40 à 50 entreprises ; réseau d'échanges de sous-produits organiques et minéraux, réseau d'information et de communication.
Verwertungssystem Ruhrgebiet, Allemagne	Réseau de recyclage très avancé avec usine d'acier, une centrale, des industries du bâtiment échangeant des sous-produits : vapeur et énergie.
Bioenergie und Rohstoffzentrum Dormagen, Allemagne	Echanges de sous-produits et cascades d'énergie, entités de recherche et d'information ; collaboration entreprises, universités et des organismes publics
Gewerbegebiet Henstedt-Ulzburg/ Kaltenkirchen, Allemagne	Echanges inter-firmes de matières et d'énergie ; approches communes du traitement de l'eau, partenariat public/privé

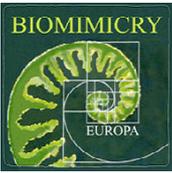
Fonds en campagne/Fonds en action

En campagne :



En action :





ANNEXE 8.

PRESENTATION DETAILLEE DE L'ASSOCIATION BIOMIMICRY EUROPA

Qui sommes-nous ?

Biomimicry Europa est une « association internationale sans but lucratif » née en 2006 à Bruxelles, et co-fondée notamment par Janine Benyus, Gauthier Chapelle & Luc Schuiten. Le comité français de Biomimicry Europa (association loi 1901) a été créé en 2010 à Paris en vue de promouvoir le biomimétisme en France.

Biomimicry Europa rassemble des biologistes, physiciens, chimistes, ingénieurs, architectes, professionnels de l'entreprise et des collectivités territoriales **qui partagent la conviction qu'un profond changement de notre mode de développement est nécessaire.**

Ainsi, face aux limites de notre développement actuel et à son impact sur l'environnement, le climat, l'énergie, l'alimentation et la biodiversité, Biomimicry Europa, propose, à travers la diffusion et l'expérimentation du biomimétisme, de :

- Comprendre, en analysant les systèmes naturels, ce que la notion de durabilité intègre en fonction des échelles de temps et d'espace considérées
- Inspirer les territoires, entreprises et individus grâce à 3,8 milliards d'années de recherche et développement du monde vivant
- Innover vers une économie et des organisations durables, intégrant la complexité, et en harmonie avec leur environnement.

Biomimicry Europa déploie son écosystème en collaboration avec :

- Le bureau d'études Greenloop (www.greenloop.eu), basé à Bruxelles, partenaire privilégié de l'association
- De nombreuses associations françaises et étrangères, dont l'Institut Inspire (www.inspire-institut.org)
- Le corps enseignant et la recherche au travers des Universités et Grandes Ecoles,
- Les collectivités territoriales
- Les entreprises
- Les particuliers

Comment Biomimicry Europa aborde la thématique du biomimétisme dans ses activités

A l'instar de Janine Benyus, nous détaillons trois niveaux d'inspiration d'exigence croissante en termes de durabilité :

- Formes : les formes adoptées par les êtres vivants
- Procédés : les matériaux et les processus de « fabrication » opérant chez les êtres vivants
- Systèmes : les interactions que les espèces développent entre elles et le fonctionnement global des écosystèmes naturels.

Nos membres actifs et adhérents ayant un parcours professionnel et des compétences très diversifiés, nous nous évertuons à promouvoir le biomimétisme durable dans une multiplicité de champs d'applications (stratégie d'entreprise, économie, résilience, chimie, architecture, design, agriculture, enseignement, urbanisme...) auprès de publics variés (collectivités, entreprises).

Depuis 2010, nous avons ainsi :

- monté un programme de reforestation et d'agroforesterie prenant en compte une approche socio-écologique. Ce projet est une application directe des découvertes sur les arbres oxalogènes réalisées par le Pr. Eric Verrecchia (Université de Lausanne), dont l'équipe scientifique participe au programme Européen de recherche Co2SolStock (www.co2solstock.eu) développé par Greenloop sur la séquestration de carbone bio-assistée. Biomimicry Europa coordonne un consortium de partenaires travaillant dans les pays tropicaux. La Fondation Yves Rocher, l'Institut de France et la société agroalimentaire Jean Hervé SCS nous ont permis d'initier un vaste programme de plantation d' « arbres sauveurs » en Haïti. Ces arbres présentent la remarquable caractéristique de fixer le carbone dans le sol sous forme minérale. Un projet pilote similaire est aussi en démarrage en Inde en partenariat avec le bureau d'étude Inddigo (www.inddigo.com).
- initié le montage d'un projet de thèse CIFRE en partenariat avec Inddigo
- monté des expositions sur le biomimétisme pour des public variés : grand public (pour l'exposition « Cités Végétales » de Luc Schuiten à Lyon, en partenariat avec Greenloop), public scolaire du primaire (Marie de Saint Leu-la-Forêt), ingénieurs et techniciens (« innovation room » du Technocentre de Renault),
- donné près de 40 conférences,
- effectué des interventions dans plusieurs modules de formations universitaires,
- donné plus de 20 interviews dans les médias (presse écrite, radio, télévision : en particulier Libé des solutions, Radio France International, E=M6, entretien avec Dominique Martin Ferrari...),
- avons été partenaires du premier colloque européen des Bioneers USA (pionniers de la biologie appliquée) en Hollande,
- participé à la publication et à la traduction du livre fondateur « Biomimétisme » de Janine Benyus en partenariat avec Inddigo,
- initié avec Greenloop un réseau de scientifiques européens avec la construction d'un dossier pour le programme COST qui sera renouvelé en 2012.

A venir : contribution pour la conférence de Rio+20 : le biomimétisme pour la durabilité

Contacts

info@biomimicry.eu,

www.biomimicry.eu/comite-francais

Karim LAPP

Secrétaire Général de Biomimicry Europa

mail : karim.lapp@biomimicry.eu

tél : + 33 6 48 38 92 34

Tarik CHEKCHAK

Secrétaire du Bureau Français de Biomimicry Europa

Tél : + 33 6 87 68 70 58



ANNEXE 9.

PRESENTATION DETAILLEE DE L'ASSOCIATION ICDD « Innovation Citoyenne et Développement Durable »

Qui sommes-nous ?

L'Association ICDD a été créée en janvier 2011 par une équipe de responsables « Innovation » et « Développement Durable » de différentes entreprises. **Notre objectif est stimuler les capacités d'initiative et de créativité des citoyens, d'en révéler la puissance, et de faire connaître les actions les plus remarquables déjà à l'œuvre et qui mériteraient d'être davantage connues et reproduites.**

Nous avons organisé en novembre 2011 « **Les Rencontres de l'Innovation Citoyenne** » avec le soutien de l'Université de Paris-Est Créteil et le concours de hautes personnalités comme M. Louis Schweitzer, Président d'honneur de Renault, et M. Xavier Fontanet, Président d'Essilor International.

Nous travaillons en collaboration avec :

- le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable,
- le Centre des Hautes Etudes de l'Environnement et du Développement Durable,
- le CNAM, des Universités, de Grandes Ecoles,
- des spécialistes en promotion de l'innovation,
- des spécialistes des questions de responsabilité sociétale des organisations,
- des entreprises « classiques » engagées, et des organisations de l'économie sociale et solidaire,
- et nous exerçons une veille particulière sur « l'innovation citoyenne » simple, puissante, efficace, surgissant le plus souvent à l'improviste et au hasard de nos observations...

Durant l'année 2011 :

- une **newsletter bimestrielle** rendant compte de nos activités au fil des mois a été lancée et rendue accessible sur le site www.acco.icdd.over-blog.com
- un site collaboratif dédié à notre association a été mis en place afin de promouvoir les échanges entre les adhérents : <http://icdd.mytinkuy.com>,
- deux livres de Gunter Pauli (Fondation ZERI) ont été édités en français (l'un, une traduction de l'anglais, l'autre, une création originale), afin de faire connaître aussi en France **L'Economie Bleue**, modèle économique qui s'inspire des principes des écosystèmes naturels.

De quelle façon nous abordons la thématique du biomimétisme dans nos activités

L'Economie Bleue est un modèle économique qui montre comment faire plus avec ce qui est localement disponible, pour offrir des produits et services bénéfiques pour la santé et l'environnement moins chers que les standards du marché, et qui vise à stimuler l'esprit d'entrepreneuriat pour créer des emplois tout respectant la Nature. Déjà connue en Allemagne, dans les pays nordiques, dans le monde anglo-saxon et en Asie, **L'Economie Bleue** :

- se différencie profondément de **L'Économie Rouge**, ce que nous connaissons et qui a conduit à la *faillite mondiale* actuelle. C'est une économie qui emprunte à tous et à tout, à la nature, à l'humanité, sans penser à rembourser un jour. Les fameuses *économies d'échelles* visent une baisse du coût unitaire de chaque article manufacturé en ignorant totalement les conséquences induites aux niveaux planétaire et humanitaire. La crise financière démarrée en 2008 a tiré son origine de banquiers et de dirigeants concentrés uniquement sur les fusions et

acquisitions, effets de leviers et création de dettes sur la base de l'hypothèse d'une croissance indéfinie, impossible dans la pratique,

- va au-delà de **L'Économie Verte**, invoquée par les parties écologistes verts, qui exige des entreprises de nouveaux investissements, attend des consommateurs qu'ils paient plus cher pour des résultats et des produits équivalents, voire moins bons, mais soucieux de l'environnement. Or, ce qui était déjà difficile en période de richesse, est devenu en ces temps de crise une véritable gageure. L'Économie Verte, en dépit de ses objectifs louables et de ses efforts, n'a pas démontré comment faire pour être véritablement durable, soutenable.

L'Économie Bleue s'attache à la *régénération*, au delà donc de la préservation et de la conservation ; elle ne recycle pas, elle régénère. D'une certaine façon, L'Économie Bleue consiste à s'assurer qu'un écosystème maintient ses règles évolutives afin que tous puissent bénéficier du flux infini de la Nature en matière de créativité, d'adaptabilité et d'abondance.

Dans ce sens L'Economie Bleue va au-delà du **Biomimétisme** : on ne se limite pas à copier les solutions de la Nature ou à s'en inspirer, on ajoute une dimension économique de création de valeur et d'emploi par **l'entrepreneuriat**.

Un exemple ? Le recyclage du marc de café permet de cultiver des champignons de haute gastronomie (250 €/kg), de nourrir du bétail et de produire du biogaz. En France, cette approche a conduit M. Cédric Pecharde à lancer un projet en partenariat avec Kraft et Jaques Vabre, qui s'est concrétisé dans une entreprise et des franchises ! (vidéos disponibles sur YouTube)

Par ailleurs, Gunter Pauli a longtemps coopéré avec Janine M. Benyus, l'auteur du livre « Biomimétisme - Quand la nature inspire des innovations durables ».

Contacts

Antoine HERON

Président

e-mail : a.heron.icdd@gmail.com

mobile : 06 60 17 92 59

Angelo Beati

Edition et documentation

e-mail perso : angelo.beati@aliceadsl.fr

e-mail pro : angelo.beati@areva.com

mobile : 06 19 36 53 33



ANNEXE 10. PRESENTATION DETAILLEE DE L'INSTITUT INSPIRE

*« Préparer la prochaine révolution industrielle
sur la base d'une nouvelle alliance
avec le vivant »*

Nous vivons un contexte sans précédent, celui de l'inversion des raretés :

- des ressources naturelles, vivantes ou fossiles, de plus en plus rares et ne répondant plus à l'augmentation de la demande,
- des savoirs et compétences, de l'information, une capacité de travail ayant atteint des niveaux sans précédents, mobilisables pour une nouvelle révolution industrielle.

Cette nouvelle révolution industrielle sera fondée sur **une nouvelle alliance avec la nature**, parce que nous aurons compris qu'il y a plus d'opportunités que de contraintes à **comprendre le vivant pour nous en inspirer**, et à en respecter les règles pour mieux nous y épanouir.

Résynchroniser l'économie et la biosphère

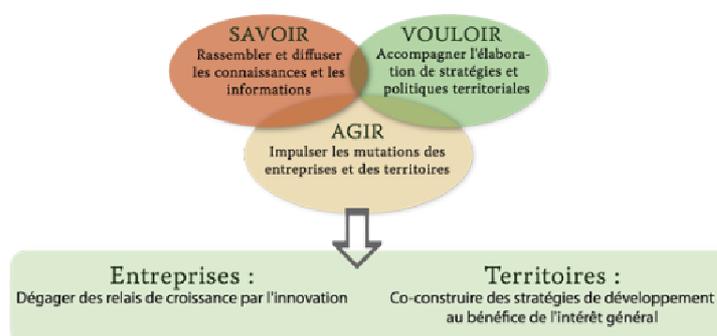
Dans ce contexte, l'Institut INSPIRE agit comme un facilitateur de transition vers un modèle de développement économique créateur d'emplois, de richesses et de bien-être tout en consommant moins de ressources naturelles.

Les principes fondateurs de cette réflexion sont :

- Un accroissement radical de la **productivité des ressources** naturelles,
- Le **biomimétisme** comme accélérateur d'innovation durable
- Une **économie circulaire**, inspirée par la nature,
- une économie privilégiant l'usage, le service et la **fonctionnalité**,
- le **réinvestissement dans le capital naturel** pour restaurer la pleine fonctionnalité et le potentiel d'évolution des écosystèmes.

Au service de ces objectifs, l'action de l'Institut INSPIRE vise à rassembler et diffuser les connaissances utiles, à tisser des réseaux de partenariats pluridisciplinaires, à sensibiliser les décideurs et à accompagner les acteurs du changement, ainsi qu'à accroître la somme de connaissances utiles par une contribution à la recherche, à l'expérimentation et au retour d'expérience.

Les activités de l'Institut INSPIRE s'appuient sur le triptyque suivant :



Activités

- **veille internationale**, détection et **diffusion** des meilleures technologies disponibles et des meilleures pratiques via l'organisation de conférences, colloques et séminaires,
- **initiation et coordination** de projets de recherche en partenariat,
- **sensibilisation et formation** des décideurs, des personnels d'entreprises, et des futurs ingénieurs et managers,
- **accompagnement du changement** et mise en œuvre de projets pilotes, dans le cadre d'actions individuelles ou collectives,
- **retour d'expérience**, mise en commun et capitalisation des savoirs acquis.

Un conseil scientifique valide les orientations et participe à l'élaboration des programmes d'actions. Il est constitué d'économistes, de philosophes, de biologistes, d'écologues, afin de garantir une pluralité de regards et d'analyses.

Contact

Pour plus d'informations : www.inspire-institut.org

Emmanuel Delannoy, Directeur : 06 45 45 88 77 - e.delannoy@inspire-institut.org

ANNEXE 11

PRESENTATION DU GROUPE TERRENA ET DE L'AGRICULTURE ECOLOGIQUEMENT INTENSIVE

Source : entretien effectué avec Bertrand Pinel⁹³ le 9 décembre 2011 et livre édité par Terrena

La coopérative

Le groupe Terrena est présent dans les départements 44 et 49. L'une de ses missions est de **promouvoir l'agriculture écologiquement intensive (AEI)**, à la fois en menant des travaux de R&D et en faisant des expérimentations à grande échelle sur certaines exploitations. Ces expérimentations sont de plus en plus nombreuses depuis 2008.

En effet, Terrena considère que les solutions apportées par la recherche ne seront opérationnelles que dans 10 ans, et que d'ici là les innovations viendront principalement des agriculteurs. Elle nomme « Sentinelles de la Terre » les agriculteurs volontaires pour mettre en œuvre dès maintenant l'AEI sur une partie de leurs exploitations. Ces innovations agricoles sont par ailleurs consultables en ligne sur le site internet⁹⁴ de Terrena. A noter : la coopérative se définit comme « spectatrice » et non « actrice » de l'agroforesterie.

Terrena a été créée conjointement à l'Association internationale pour une agriculture écologiquement intensive de Michel Griffon. Elle regroupe 22 000 agriculteurs adhérents, qui peuvent être « classés » comme suit :

- 25% pratiquent des solutions AEI,
- 50% hésitent à pratiquer ces solutions,
- 25% ne changent pas leurs habitudes et ne souhaitent pas le faire.

Bertrand Pinel note une réelle dynamique au niveau des « agriculteurs leaders ».

Intérêt dans le cadre de l'étude du CGDD

Comme nous l'avons vu dans le corps du rapport, l'AEI fait appel à plusieurs principes écomimétiques : associations d'espèces, couvert végétal permanent et non labour, préservation des habitats pour la faune locale... Les exemples d'innovations AEI écomimétiques cités dans le rapport sont issus d'un livre édité par Terrena, présenté ci-dessous. **De plus, Bertrand Pinel est très désireux de rencontrer les personnes de la future mission Biomimétisme du CGDD.** Il a récemment fait une conférence au CESE pour présenter les résultats AEI concrets des ingénieurs de Terrena. La conférence a été « très appréciée ».

Un rapport d'étape : le livre *Sentinelles de la Terre, mettre en pratiques une agriculture écologiquement intensive, 2010*

Ce petit livre propose des « exemples de solutions déjà existantes au champ, ou pistes d'innovation actuellement explorées par la recherche » afin d'aller vers une agriculture écologiquement intensive.

Ces solutions ou pistes d'innovation ont été testées de 2008 à 2010 par des agriculteurs pionniers du Groupe Terrena appelés « Sentinelles de la Terre », dans leurs exploitations. Elles ont été recensées par une équipe de 6 ingénieurs à plein temps et organisées en 8 directions :

- Préservation du sol
- Gestion de l'eau
- Nutrition et protection des plantes
- Outils et machines agricoles
- Santé et nutrition animales
- Bâtiments d'élevage
- Valorisation de la biomasse

⁹³ Ingénieur agronome, membre de la Direction scientifique et R&D du groupe Terrena

⁹⁴ www.terrena.fr

- Biodiversité

Ce livre se définit comme un rapport d'étape. Le Groupe Terrena souhaite continuer la recherche et développement en AEI par et pour les agriculteurs.

ANNEXE 12. COMPLEMENT SUR L'AGROFORESTERIE

Présentation de la Première Rencontre Européenne d'Agroforesterie

L'association Française d'Agroforesterie (AFAF) et les partenaires européens travaillent au développement de l'agroforesterie depuis plus de trente ans. Sur la base de pratiques ancestrales, la recherche et le développement, les expérimentations et l'implication des agriculteurs ont abouti à l'optimisation de systèmes agroforestiers durables et performants.

Dans un contexte où il faudra optimiser la production à la parcelle, tout en préservant l'environnement et en assurant la viabilité des exploitations, l'arbre, par ses fonctions agro-écologiques, redevient un des éléments clé des systèmes agricoles innovants permettant de répondre aux défis de la nouvelle PAC.

Aujourd'hui, les performances agronomiques, environnementales et économiques des systèmes agroforestiers ne sont plus à démontrer et il existe une réelle demande de la part des agriculteurs, comme des collectivités.

Le projet de recherche européen SAFE⁹⁵ et les récentes évolutions des réglementations européennes ont permis de réelles avancées, sans toutefois aboutir aux résultats escomptés. Les freins majeurs au développement de l'agroforesterie sont la complexité des démarches, la disparité et l'inadaptation des aides, le manque d'accompagnement et d'information des agriculteurs.

Devant la prochaine échéance de la PAC post 2013, et dans le cadre de l'année internationale des forêts, l'ensemble des partenaires européens a décidé de se réunir et d'engager un dialogue à l'échelle européenne, pour proposer des pistes de prise en compte de l'arbre dans les prochaines réglementations, et créer la première structure européenne d'agroforesterie.

Source : Dossier de presse de la Première rencontre européenne d'agroforesterie

Règlementation en vigueur

Au niveau européen, le Règlement de Développement Rural (RDR) pour 2007- 2013 intègre une mesure spéciale Agroforesterie (article 44) dont le cofinancement communautaire peut monter à 80%.

Au niveau national, cette mesure a été activée en mai 2009 et fait désormais partie des mesures du Programme de Développement Rural pour l'Hexagone (PDRH) pour 2007- 2013. Cette mesure 222 « Première installation de systèmes agroforestiers sur des terres agricoles » a fait l'objet, en avril 2010, d'une circulaire du Ministère de l'Agriculture (circulaire DGPAAT/SDBE/SDFB/C2010-3035) expliquant les différentes conditions pour en bénéficier. La mesure est cofinancée par le FEADER (fond européen) et les collectivités territoriales souhaitant financer cette mesure (pas de cofinancement de l'Etat). Cette mesure permet de financer uniquement les coûts d'installation des arbres, ainsi que l'entretien de la plantation les premières années. Le taux de subvention est plafonné à 70% voire 80% dans les zones défavorisées. Le cahier des charges précis de la mesure est défini au niveau régional.

Il existe également une possibilité de subvention à la plantation d'arbres sur parcelles agricoles dans le cadre du Plan Végétal Environnement (PVE) faisant partie du PDRH. Ce PVE prévoit une ligne budgétaire pour la plantation d'arbres sous forme de haies ou d'arbres isolés.

Source : GUIDE - L'agroforesterie dans les réglementations agricoles, Etat des lieux en juin 2010, édité par les Chambres d'agriculture

⁹⁵ Silvoarable Agroforestry in Europe, projet de recherche initié en 2001

Ces subventions ont effectivement commencé à être distribuées en 2010 au Royaume-Uni, en France et dans le Nord Ouest de l'Italie⁹⁶. Cependant, en France encore très peu de régions et départements appliquent et financent cette mesure. Une des régions les plus actives est la région Midi-Pyrénées.

De plus, au moment de l'élaboration de la mesure, il n'a pas été possible d'inclure les arbres fruitiers greffés et les haies : les agroforestiers espèrent donc de futures évolutions de la mesure dans ce sens.

Département Orientation et Développement Comité Stratégique « Ingénierie Industrielle, Biens d'équipement et matériaux »

Date : **20-06-2011**

Document: **N 339**

⁹⁶ Source : Première Rencontre Européenne d'Agroforesterie

ANNEXE 13

Biomimétisme – Création de nouveau domaine de normalisation

COMMENTAIRES Le document joint présente l’instruction de la demande pour la création d’un nouveau domaine de normalisation sur le Biomimétisme.

SUITE A DONNER Les membres du CoS sont invités à émettre un avis via le bulletin word joint ou par mail à Fabienne Ramirez

fabienne.ramirez@afnor.org avant **le 20 juillet 2011**. Merci de nous informer si vous connaissez d’autres personnes qui sont concernés par le sujet de biomimétisme.

DESTINATAIRES CoS « Ingénierie Industrielle, Biens d’équipement et matériaux » (CoS référent)

Autres CoS et structures sollicités :

- CoS « Management et services »
- CoS « Santé et action sociale »
- CoS « Environnement »
- CoS « Construction »
- CoS « Transport et logistique »
- CoS « Information et communication »
- CoS « Sport, loisirs, Biens de consommation et services »
- CoS « Santé et sécurité au travail »
- CoS « Utilisation rationnelle de l’énergie »

Liste non limitative des commissions concernées

- CN CGTI – Commission générale des technologies de l’information – AFNOR
- CN X03A – Terminologie principes et coordination- AFNOR
- CN 42 – Outils coupants et attachements – UNM
- CN 906 – Presses – UNM
- CN 908 – Machines-outils par enlèvement de métal
UNM
- CN P06E – Coordination Eurocodes structuraux – AFNOR
- CN A91A – Revêtements métalliques et inorganiques – AFNOR
- CN CP IDMI – Ingénierie des données et des modèles pour l’industrie – AFNOR
- CN X457 – Nanotechnologies – AFNOR
- CN X13A – Services de conseil en ingénierie – AFNOR
- CN X21A – Analyse des surfaces et analyse par microfaisceaux – AFNOR
- CN T30A – Peintures et vernis – AFNOR
- CN D21A – Ustensiles de cuisine – AFNOR
- CN SECU – Sécurité et protection du citoyen – AFNOR
- CN INNOV – Management de l’innovation – AFNOR
- CN PIN – Produits industriels en béton – BNIB
- CN T50A – Plastiques – BNPP

- CN AF 035 – Durabilité et Environnement pour le bois – BNBA
- CN AF 043 – Ameublement général – BNBA
- CN AF 002 – Structures en bois – BNBA

SOURCE AFNOR

Annexe 14

FORSYS_17B – Résultats de l'instruction

FORSYS 17A - DEMANDE DE CREATION D'UN DOMAINE D'ACTIVITES DE NORMALISATION

BIOMIMÉTISME

INSTRUCTION DE LA DEMANDE

Nature de la demande :

Création d'un nouveau domaine

Extension d'un domaine existant

N° de l'instruction (cadre à remplir par AFNOR) :

CoS 26 N 339/2011

Responsable de l'évaluation d'opportunité

AFNOR ou BN Sectoriel : AFNOR Orientation et coordination

Interlocuteur : Fabienne RAMIREZ

Date de la demande : 14 juin 2011

Titre du domaine d'activité de normalisation proposé : Biomimétisme

1. EVALUATION DE L'OPPORTUNITE – à remplir par le bureau de normalisation¹

1.1 Origine de la demande

: Internationale

Réf du doc ISO/TS/P 222 – Proposition du DIN allemand.

1.2 Domaine d'activités de normalisation

ISO/TS/P 222

Normalisation dans le domaine du biomimétisme. Le comité technique ISO sera en charge de la normalisation internationale des méthodes et approches du biomimétisme, incluant les résultats les plus récents des projets de R&D

¹ En l'absence de Bureau de Normalisation compétent ou lorsque plusieurs Bureaux de Normalisation sont compétents, AFNOR procède à l'instruction de la demande ² Pour les projets d'origine européenne et internationale, joindre le ou les formulaires de demande Le biomimétisme (aussi appelé bionique ou biomimétique) doit être défini et ordonné, et une terminologie doit être développée. Les limites et potentiels du biomimétisme comme système d'innovation ou stratégie de durabilité sont à explorer.

Tout le processus biomimétique du développement des idées à la création des produits est à décrire et à normaliser.

Domaine d'application proposé

Activité : Biomimétisme : Démarche de transfert de solutions et propriétés d'un ou plusieurs systèmes biologiques dans des applications techniques

Secteur d'application : Tous secteurs

Aspects couverts : Tout le processus biomimétique du développement des idées à la création des produits est à décrire et à normaliser.

Information complémentaire : Proposition de comité technique ISO.

1.3 Objectifs, justifications et contexte

Ce nouveau comité technique international est proposé par le DIN (Allemagne)

Justification :

L'expérience de l'évolution du vivant sur 3,8 milliards d'année et l'existence de plus de 2,5 millions d'espèces distinctes représente un gisement d'idées gigantesques d'idées pour appliquer le biomimétisme dans de nouvelles solutions technologiques.

L'identification de principes biologiques et leur mise en oeuvre dans des applications techniques bioniques constitue potentiellement une contribution majeure dans le développement de matériaux, structures et composants capables de s'adapter et ayant une efficacité matière accrue. Ceci tout en étant sûr pour les hommes et l'environnement. La normalisation dans ce domaine joue un rôle important par la dissémination des principes bioniques pour l'efficacité énergétique, le développement technique durable et la préservation des ressources.

Les matériaux et conceptions inspirés par la nature soulèvent l'intérêt de nombreux domaines d'application. Cependant si la connaissance du vivant a largement progressé, la combinaison de ces connaissances biologiques avec les techniques nouvelles de simulation et production de matériaux est encore exceptionnelle surtout en raison d'un manque de communication entre les scientifiques des différentes spécialités.

Cette nouvelle normalisation a pour objet de rendre de travail interdisciplinaire possible.

L'objectif est de permettre une traduction efficace des résultats de recherche en produits techniques tout au long de la chaîne de valeur à travers une collaboration étroite des biologistes, ingénieurs, experts d'autres disciplines. Son impact se fera dans plusieurs domaines dont l'environnement, l'économie et la prise en compte des besoins des consommateurs. Il n'existe pas de normalisation internationale sur le sujet du biomimétisme, ni à l'ISO ni au CEN. Ceci est dû grandement à son interdisciplinarité. Le nombre de TC possibles pouvant abriter des travaux sur le biomimétisme est grand mais dans chaque cas, seule une partie serait couverte. C'est pour cela qu'un nouveau comité technique lui étant dédié est proposé.

1.4 Identification des parties intéressées ainsi que de leur implication réelle escomptée

Demande de l'Allemagne – DIN

Recherche des acteurs français du biomimétisme.

1.5 Recensement des documents pertinents

Le DIN développe actuellement un programme de recherche sur la quantification des caractéristiques d'autonettoyage et prépare la normalisation des normes de mesurage correspondantes (<http://www.ins.din.de/>). L'association des ingénieurs allemands développe actuellement plusieurs guides VDI sur différents champs du biomimétisme. Deux sont déjà publiés et les autres (sauf le VDI 6226) seront publiés en 2011.

VDI 6220 (2011-06 draft)

Biomimetics – Conception and strategy - Differences between bionic and conventional methods and products VDI 6221 (2011-07 draft)

Biomimetics – Functional bionic surfaces VDI 6222 in development

Biomimetics – Bionic robots VDI 6223 in development

Biomimetics – Bionic materials, structures and components VDI 6224 Blatt 1 (2011-06 draft)

Biomimetic optimization – Application of evolutionary algorithms VDI 6224 Blatt 2 November 2010

Bionic optimization - Application of biological growth laws to the structure-mechanical optimization of technical components VDI 6225 November 2010

Biomimetics – Bionic information processing VDI 6226 in development

Biomimetics – Architecture, construction engineering, industrial design

1.6 Nature et calendrier du programme de travail

L'ISO/TS/P 222 propose la création de trois groupes de travail :

GT 1 : Concept et stratégie

Avec une norme générale de différenciation entre les procédés conventionnels et ceux issus du biomimétisme.

GT 2 : Structures et matériaux

Avec le développement de normes de surfaces, outils, structures et matériaux bioniques Exemples de normes :

Spécifications pour le développement de structures de surfaces permettant de réduire la résistance au frottement, surfaces autonettoyantes

Méthodes pour développer des outils coupants s'aiguissant tout seul et d'autres aspects bioniques sur les outils

Structures légères et autres structures

GT 3 : Optimisation bionique et traitement de l'information

Exemples de normes : Méthodes de conception mettant les connaissances en biomimétisme disponibles pour des constructions légères

Systèmes d'information bioniques incluant un modem basé sur la technologie S2C pour les systèmes d'alerte des Tsunamis

Traitement de l'information incluant la modélisation des capteurs tactiles actifs à partir des insectes

1.7 CoS3 et structures sollicités

Si besoin, indiquer le CoS coordinateur chargé de la synthèse des avis : CoS Ingénierie industrielle, Biens d'équipements et matériaux

Autres CoS et structures sollicités :

CoS Management et services

CoS Santé et action sociale

CoS Environnement

CoS Construction

CoS Transport et logistique

CoS Information et communication

CoS Sport, loisirs, Biens de consommation et services

CoS Santé et sécurité au travail

CoS Utilisation rationnelle de l'énergie

Liste non limitative des commissions concernées

CN CGTI - Commission générale des technologies de l'information - AFNOR

CN X03A - Terminologie principes et coordination- AFNOR

CN 42 - Outils coupants et attachements - UNM

CN 906 - Presses - UNM

CN 908 - Machines-outils par enlèvement de métal - UNM

CN P06E - Coordination Eurocodes structuraux - AFNOR

CN A91A - Revêtements métalliques et inorganiques - AFNOR

CN CP IDMI - Ingénierie des données et des modèles pour l'industrie - AFNOR

3 CoS : Comité stratégique

4 Structures sollicités : groupes de coordination ou commissions de normalisation pouvant être directement impactés

CN X457 - Nanotechnologies - AFNOR

CN X13A - Services de conseil en ingénierie - AFNOR

CN X21A - Analyse des surfaces et analyse par microfaisceaux - AFNOR

CN T30A - Peintures et vernis - AFNOR

CN D21A - Ustensiles de cuisine - AFNOR

CN SECU - Sécurité et protection du citoyen - AFNOR

CN INNOV - Management de l'innovation - AFNOR

CN PIN - Produits industriels en béton - BNIB

CN T50A - Plastiques - BNPP

CN AF 035 - Durabilité et Environnement pour le bois - BNBA

CN AF 043 - Ameublement général - BNBA

CN AF 002 - Structures en bois - BNBA

ANNEXE 15

PROPOSAL FOR A NEW FIELD OF TECHNICAL ACTIVITY

Date of proposal 2011-05-16

Reference number (to be given by Central Secretariat) **ISO/TS/P 222**

Proposer : DIN-Germany

A proposal for a new field of technical activity shall be submitted to the Central Secretariat, which will assign it a reference number and process the proposal in accordance with the ISO/IEC Directives (part 1, subclause 1.5). The proposer may be a member body of ISO, a technical committee or subcommittee, the Technical Management Board or a General Assembly committee, the Secretary-General, a body responsible for managing a certification system operating under the auspices of ISO, or another international organization with national body membership. Guidelines for proposing and justifying a new field of technical activity are given in the ISO/IEC Directives (part 1, annex Q).

The proposal (to be completed by the proposer)**Subject** (the subject shall be described unambiguously and as concisely as possible)**Biomimetics**

Scope (the scope shall define precisely the limits of the proposed new field of activity and shall begin with "Standardization of ..." or "Standardization in the field of ...")

Standardization in the field of biomimetics. The proposed ISO/TC will be responsible for the international standardization of biomimetic methods and approaches, incorporating the most recent results of R&D projects.

"Biomimetics" (also "bionics", "biomimicry") is to be classified and defined, and a terminology developed. The limits and potentials of biomimetics as an innovation system or a sustainability strategy are to be explored.

The entire biomimetic process ranging from the development of ideas to the creation of bionic products is to be described and standardized.

Purpose and justification (the justification shall endeavour to assess the economic and social advantages which would result from the adoption of International Standards in the proposed new field)

Bio-inspired materials and design are becoming of increasing interest in many fields of practical applications. In contrast to man-made materials, natural materials such as wood, bone and shells are composed of only a limited number of basic components. They gain their diversity in mechanical properties by hierarchical structuring which allows them to fulfill a variety of functions e.g. self-healing, mechanical stability, high toughness.

As a result of quickly advancing physical characterization techniques, knowledge about hierarchical structures has increased significantly in recent years and form-function relationships are being unveiled. But combining the knowledge of natural materials with modern techniques of simulation and fabrication is still the exception, also due to the lack of communication between bio- and material scientists.

The proposed standardization activities will make interdisciplinary work possible. The aim is the efficient translation of research results into technical products along the entire value chain through the close cooperation of biologists, engineers and experts from other disciplines. The realization of bionic ideas relies on the successful abstraction of biological principles and the transfer into technology. The successful transfer of knowledge about the structures, processes and characteristics of living beings to technical systems requires clear communication, correspondence and transparency between disciplines

. Standards can make a major contribution to laying these foundations. By standardizing terms and definitions on a global level a common language will be established. International cooperation common in biomimetic projects will therefore be greatly simplified.

So far Biomimetics has not been standardized on International level (ISO) and/or on European level (CEN). This is partly due to the fact that Biomimetics are interdisciplinary.

Purpose and justification (continued)

Because of this versatility it is barely possible to focus Standardization activities only on one already existing ISO/TC of numerous possible ISO/TC's. And even if Biomimetics would be standardized in one of the existing ISO/TC's the scope of this certain ISO/TC would only cover a part of it.

This exposes the intension of the proposer to establish a new ISO/TC "Biomimetics". The main motivation for transferring biological solutions to technical applications lies in the fact that optimized biological structures which have evolved over a period of 3,8 billion years can also be significant for technological developments. Today over 2,5 million distinct species have been identified, a gigantic pool of ideas for applying bionics to technical solutions. There are various examples of ideas that can be used as basic approach for standardization efforts. A method for developing surface structures for reducing frictional resistance in connection with methods for developing self-cleaning surface structures, e.g. for the hulls of ships and aircraft, could be covered. There are over 200 patents dealing with the "Lotus-Effect®" and numerous practical applications include self-cleaning exterior paints, plasters, and roof tiles. In plastics moulding processes the effect is used for injection moulding parts with self-cleaning surfaces.

Another example are biomimetic methods considering cutting tools. To ensure that conventional cutting tools remain constantly sharp, material wear must be minimized. However, teeth of rodents remain sharp through a constant selfsharpening process by wearing of two different materials which results in a sharp edge. This principle was used to develop self-sharpening cutting tools.

Biological models for lightweight construction and other structures include winter horsetail (*Equisetum hyemale*) and the giant reed (*Arundo donax*). A recently developed material combines the various principles of the winter horsetail and giant reed: This "technical blade of grass", a bionic fibre-based composite material, is characterized by a high level of bending stiffness, and an extremely high dynamic load capacity and damping behaviour. This new type of material can be used for many applications, including aerospace technology, vehicle construction, building and civil engineering, machinery and equipment construction, medical technology (prosthetics) and sports equipment.

Design approaches which make bionic knowledge available for lightweight construction have great potential. Computer simulations such as the CAO (computer aided optimization) and SKO (soft kill option) methods are already being used during the design process to optimize parts depending on the loading to which they will be subjected, which results in considerable material savings, as well as unconventional designs. Other methods of optimization, such as evolutionary algorithms, can also be dealt with.

Another area of bionic information processing includes active tactile sensors abstracted from insects. Contactless distance measurement quickly reaches its limits in the field, because infrared sensors are affected by the sun, reflective and transparent surfaces cause camera systems to misread, echoes and thin structures throw off ultrasound measurements. Mechanical measurement systems, on the other hand, are much more precise, reading the physical information a robot truly needs for the next step.

In terms of practical application, it is increasingly important that the description, specification and standardization of bionic approaches are used to establish a proposal for "best practice".

Purpose and justification (continued)

The standards are important for various fields where benefits are to be gained.

The environment:

Biomimetic products can be potentially more sustainable and more environmentally compatible than conventional ones. However, this depends on transfer and used material, therefore biomimetic products are not "per se" more environmentally friendly than conventional ones.

Businesses:

Standardization will give businesses tools for developing bionic strategies for new products, resulting in an expanded product development portfolio and new products for the market. Standards as language of technology are understood and accepted in countless branches of industry. The procedures described can be used as objective benchmark and its reproducibility is demonstrated. Outlining results in standards strengthens confidence in the quality of the research, therefore making it easier to close the gap between research and commercialization efforts. The development of biomimetic ISO-standards makes it easier to establish references between basic design standards in certain fields and suitable biomimetic processes. Standards also play an important role for the efficient fulfilment of due diligence requirements businesses have to exercise.

Customers:

Through standardization customers can be sure that products advertised as bionic are indeed such. In legal proceedings, it will be possible to establish when a product or parts thereof can be deemed "bionic" and when not.

Summary:

The identification of suitable biological principles and implementing them in bionic technical applications would be a major contribution towards developing functional adaptive, resource-efficient materials, structures and components that are safe for humans and the environment. Standardization in this area plays an important part towards disseminating bionic principles for energy-efficient, sustainable technical development while conserving resources.

Programme of work (list of principal questions which the proposer wishes to be included within the limits given in the proposed scope, indicating what aspects of the subject should be dealt with, e.g. terminology, test methods, dimensions and tolerances, performance requirements, technical specifications, etc.) It is also possible to attach a detailed programme of work showing proposed work item titles.

List of standards required	Priority	Working
		Group No
1 Definition biomimetics – Differentiation between bionic and conventional methods / products	1	WG 1
2 Functional bionic surfaces – Surface structures for self-cleaning and reducing fouling	1	WG 2
3 Bionic tools	3	WG 2
4 Bionic materials, structures and components	1	WG 2
5 Bionic optimization – Evolutionary algorithms	2	WG 3
6 Bionic optimization – Application of biological growth laws for the optimization of technical structures	2	WG 3
7 Bionic information processing	1	WG 3
NOTE This list should be reviewed and supplemented as needed in due course. To ensure efficient work we recommend to set up three WGs.		

WG 1: Concept and strategy

This WG should primarily deal with the differentiation between bionic and conventional processes. The standard developed should be general in nature.

A definition has already been drawn up at German national level; this can serve as the basis for an international standard on the general concept and strategy of biomimetics, laying down terminology, including definitions. Such a general standard would thus contribute considerably to the quality assurance of bionic products.

WG2: Structures and materials

This WG should develop standards on functional bionic surfaces, tools, structures and materials.

One standard could specify the method for developing surface structures for reducing frictional resistance and methods for developing self cleaning surface structures. Another standard deals with methods for developing self-sharpening cutting tools and bionic aspects of further tools. Yet another standard covers lightweight construction and other structures.

Programme of work (continued)

WG3: Bionic optimization and information processing

This WG will develop standards on bionic optimization, evolutionary algorithms and bionic information processing.

One standard could deal with design approaches which make bionic knowledge available for lightweight construction.

Another standard will deal with on bionic information systems, including a modem based on S2C technology for use in a Tsunami warning system.

Yet another area to be covered in a standard is information processing including active tactile sensors modeled on insects.

Survey of similar work undertaken in other bodies (relevant documents to be considered: national standards or other normative documents)

Germany:

The German Institute for Standardization (DIN) is currently carrying out a research project on quantifying self-cleaning characteristics and preparing suitable measurement methods for standardization (<http://www.ins.din.de/>).

The Association of German Engineers is currently developing a number of different VDI Guidelines for different bionic fields. Two of them are already published, the rest of them (except VDI 6226) will be published in 2011.

VDI 6220 (2011-06 draft) Biomimetics – Conception and strategy – Differences between bionic and conventional methods and products

6221 (2011-07 draft) - Biomimetics – Functional bionic surfaces

VDI 6222 in development - Biomimetics – Bionic robots

VDI 6223 in development - Biomimetics – Bionic materials, structures and components

VDI 6224 Blatt 1 (2011-06 draft) - Biomimetic optimization – Application of evolutionary algorithms

VDI 6224 Blatt 2 November 2010 - Bionic optimization - Application of biological growth laws to the structure-mechanical optimisation of technical components

VDI 6225 November 2010 - Biomimetics – Bionic information processing VDI 6226 in development

VDI 6226 in development - Biomimetics – Architecture, construction engineering, industrial design

Liaison organizations (list of organizations or external or internal bodies with which cooperation and liaison should be established)

A strong liaison should be established with Biokon international- The biomimetics association. BIKON international provides a forum for information, discussion and collaboration for its members and the scientific community, acting together in European and global projects of international frameworks, organizations and institutions.

As biomimetics can be used in many fields of practical applications, a cooperation should be established with numerous already established ISO/TCs. Regarding the described programme of work, the following ISO/TCs should be considered.

ISO/JTC 1 "Information technology"

ISO/TC 37 "Terminology and other language and content resources"

ISO/TC 39 "Machine tools"

ISO/TC 98 "Bases for design of structures"

ISO/TC 107 "Metallic and other inorganic coatings"

ISO/TC 184 "Industrial automation systems and integration"

Other comments (if any)

The German National Standards Institution (DIN) is prepared to undertake the secretariat duties of the proposed committee.

Signature of the proposer

Dr.-Ing. Ulrike Bohnsack

Director Standardization

Comments of the Secretary-General (to be completed by the Central Secretariat)

Signature **Michael A. Smith**

Secretary of the TMB

Commissariat général au développement durable

Délégation au développement durable

3 Place de Fontenoy

75007 Paris

Tél : 01.40.81.21.22

Retrouver cette publication sur le site :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable/>



Dépôt légal : Octobre 2012
ISSN : 2102-4723