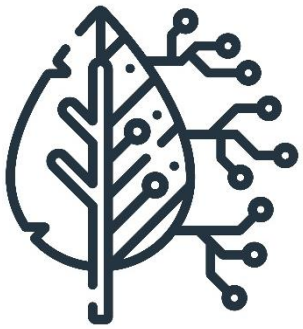
LES NOTES SCIENTIFIQUES DE L'OFFICE
OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Note n° 27

Décembre 2021

N° 4762 ASSEMBLÉE NATIONALE - N° 258 SÉNAT

Le biomimétisme



iStock
© @Line-Art_AdobeStock

Résumé

- *Depuis toujours, l'humanité s'est intuitivement appuyée sur la nature pour innover, s'inspirant notamment de la faune et de la flore. À quelque échelle que ce soit, y compris celle d'un écosystème, le vivant est une source d'inspiration inépuisable.*
- *Aéronautique, agriculture, ingénierie des matériaux, etc., tous les secteurs peuvent intégrer le biomimétisme à leur stratégie d'innovation. Après 3,8 milliards d'années d'évolution, les procédés de la nature sont durables, économes et résilients.*
- *La France possède un patrimoine de biodiversité exceptionnel, qui doit beaucoup à ses territoires ultra-marins ainsi qu'aux collections de ses différents musées d'histoire naturelle. En développant le biomimétisme, elle pourra valoriser ce capital unique au monde. Le biomimétisme est donc aussi une puissante incitation à la préservation de la biodiversité.*

Mme Huguette Tiegna, députée

Le terme « biomimétisme » est construit depuis le grec *bios*, la vie, et *mimetis*, l'imitation. Plus qu'une simple discipline, il s'agit d'une approche scientifique pluridisciplinaire qui s'inspire des propriétés et des stratégies de la nature et du vivant pour répondre à des besoins d'ingénierie et d'innovation.

Au cours de l'Histoire et probablement même depuis la Préhistoire, l'humanité s'est souvent inspirée de la nature et de son environnement pour innover. Parmi les exemples les plus connus, Leonard de Vinci, au XV^{e} siècle, s'inspire des oiseaux pour créer ses fameuses machines volantes[1].

Otto Schmitt, inventeur et ingénieur américain, fut le premier à parler de *biomimetics* (biomimétisme) en 1963. Il faut attendre 1997 pour que la biologiste américaine Janine Benyus reprenne le terme et le popularise, notamment avec son ouvrage : « *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* ». Elle est la première à faire du biomimétisme non une simple méthode d'ingénierie, mais une stratégie potentielle pour innover dans une optique durable et favorable à la nature[2].

Cette approche distingue trois niveaux de biomimétisme selon qu'on s'inspire :

1. Des formes et structures : on vise alors l'aéro ou l'hydrodynamisme, l'allégement, la rigidité du dispositif final, etc. ;
2. Des fonctions et procédés : des applications sont notamment attendues dans des domaines comme la synthèse chimique et la conception de matériaux innovants ;
3. De l'organisation : il s'agit alors de créer des systèmes techniques plus intégrés dont les interactions s'inspirent des écosystèmes.

On distingue aussi le biomimétisme qui s'inspire du vivant sans nécessairement intégrer des organismes dans le produit fini, de la démarche qui en utilise comme indicateurs ou comme partie intégrante du procédé[3].

Pendant 3,8 milliards d'années, la vie sur Terre s'est adaptée à un large spectre de conditions physico-chimiques (température, pH, luminosité, composition chimique…). Les procédés et les modes d'organisation trouvés aujourd'hui dans le vivant, sont résilients, économes et issus du compromis évolutif entre la prospérité des espèces et la pression des différentes contraintes environnementales.

On estime qu'il existe entre 8 et 12 millions d'espèces sur Terre[4], dont seulement 2 millions sont connues à ce jour. **La France, grâce à ses territoires ultra-marins et à sa zone économique exclusive (ZEE), la deuxième au plan mondial en termes de superficie, possède un capital naturel exceptionnel et abrite environ 10 % de la biodiversité[5] décrite dans le monde. À cet immense réservoir de ressources à ciel ouvert** s'ajoute le patrimoine des différents musées français d'histoire naturelle, dont la collection la plus importante est détenue par le Museum national d'histoire naturelle, riche de près de 67 millions de spécimens[6] et d'archives documentaires, sources d'un savoir à fort potentiel.

Petit lexique du biomimétisme

Plusieurs termes existent pour désigner des notions connexes au biomimétisme. Toutes ont en commun le préfixe *bio-* mais varient selon le secteur d'application. Ces définitions sont régies par la norme ISO 18458:2015*. Voici les termes les plus courants et leurs définitions :

La **bio-inspiration** : approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques ;

La **biomimétique** : coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles ainsi que le transfert et l'application de ces modèles à la solution ;

La **bionique** : discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques ou mécaniques.

Solutions fondées sur la nature (souvent repris sous le terme anglais « ***Nature-based solutions*** ») : actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité.

* https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:fr

Le biomimétisme en France aujourd'hui

En France, le Centre d'études et d'expertises en biomimétisme, le Ceebios[7], occupe une place centrale. À l'interface entre les mondes industriel, académique et institutionnel, il ambitionne de promouvoir la démarche bio-inspirée, dans une optique de développement durable, tout en créant des outils méthodologiques et des plateformes de recherche et développement. Son but est de faire du biomimétisme un « *outil de la transition écologique* », à la rencontre de la biodiversité, de l'innovation et de l'économie[8].

Aujourd'hui, quand un industriel français porte un projet bio-inspiré, c'est le plus souvent avec ses propres équipes de R&D et le soutien scientifique d'acteurs privés, le plus souvent du Ceebios, ou de scientifiques sous partenariat, car contrairement à l'Allemagne, **il n'existe en France, quasiment pas d'ingénieurs spécialisés en biomimétisme**. Cependant, de grandes structures généralistes comme Capgemini Engineering et Akka Technologies proposent des solutions bio-inspirées, et de plus petites entreprises spécialisées existent : les acteurs de la Défense ou les « opérateurs d'importance vitale » (OIV) peuvent se tourner vers le cabinet Myceco[9] ; d'autres cabinets tels que Bioxegy[10] proposent eux aussi un appui scientifique et une méthodologie, voire la prise en charge des projets, avec l'accès à un réseau de chercheurs pluridisciplinaires, allant du biologiste à l'ingénieur et au designer.

Les offres de formation en biomimétisme se limitent à la formation dispensée par l'Université de Pau et des pays de l'Adour[11] et celle de l'école de design ENCSI Les Ateliers[12]. La première est un master en science des matériaux destiné à former de futurs chercheurs. La seconde, ouverte à partir du niveau bac+4, est un diplôme d'établissement concernant des profils en formation continue, venant de tous horizons (et de différents pays) et qui souhaitent se former à la bio-inspiration pour compléter leur profil professionnel et l'inscrire dans la perspective du développement durable.

Quelques écoles d'ingénieur proposent des initiations au biomimétisme sous forme d'un cours ou d'une courte série de cours ; c'est, par exemple, le cas d'un module de l'École polytechnique dans le cadre de son diplôme d'ingénieur[13]. Il en est de même pour l'École nationale supérieure d'architecture de La Villette.

Si une formation de longue durée – supérieure à un an – en biomimétisme n'est pas forcément nécessaire, une sensibilisation à grande échelle et une offre plus large peuvent répondre à une demande. Des ingénieurs sensibilisés à la démarche bio-inspirée seraient plus à même de développer des groupes de travail pluridisciplinaires et des partenariats entre la recherche fondamentale (biologie, écologie…) et les sections R&D des industries.

Quelques exemples d'innovation relevant du biomimétisme

L'essor du biomimétisme dans la société industrielle est pour une grande part lié à l'innovation militaire. Les techniques de camouflage apparaissent pendant la Première guerre mondiale et s'inspirent de

l'environnement et de la nature[14]. Pendant la Seconde guerre mondiale, l'*US Air force* organise la formation de vol des avions de chasse selon le modèle des oiseaux migrateurs (« modèle de vol en V ») : le premier oiseau se place en pointe et les autres situés dans son sillage bénéficient de courants aérodynamiques favorables et doivent ainsi exercer un effort moindre – les avions économisent du carburant.

Récemment, Airbus a initié un projet baptisé « *fello'fly* », qui cherche à appliquer ce principe à des avions de ligne[15], qui voleraient en duo. Ceci pourrait réduire la consommation de kérosène de 5 à 10 % avec un gain équivalent pour les émissions de gaz à effet de serre[16]. Airbus mène d'autres projets inspirés de la nature avec comme objectif principal une amélioration de l'efficacité énergétique pendant la phase de vol : amélioration de la structure des ailes ou encore choix du matériau de revêtement de la carlingue.

La bionique (*cf.* encadré « Petit lexique du biomimétisme ») représente une part non négligeable des applications bio-inspirées et reflète aussi cet héritage des premiers travaux à visée militaires. En France, les équipes de l'Institut des sciences du mouvement (ISM) de Marseille, sous la direction de Stéphane Viollet, observent les mouvements humains et animaux pour créer des capteurs optiques innovants. Ils s'inspirent notamment de la fourmi du désert[17] qui retrouve son chemin en mettant à profit la polarisation de la lumière provenant de la voûte céleste. Ces travaux trouvent un fort écho dans le domaine de la navigation, où l'on cherche à s'affranchir de la dépendance au pôle Nord magnétique ou d'un signal GPS parfois de mauvais qualité. Les systèmes actuels vont devenir obsolètes dans les prochaines années car le pôle Nord magnétique connait des changements brutaux liés à l'activité interne de la Terre et devient de plus en plus instable[18].

Le champ d'application du biomimétisme est large et peut apporter des solutions dans des domaines variés, par exemple les cosmétiques. Sur le sujet, L'Oréal cherche à s'inspirer de la nature pour répondre à des problématiques spécifiques (protection de la peau contre les radiations UV) ou à ses objectifs internes de développement durable, comme l'optimisation de la ressource en eau.

Le secteur agricole explore le bio-contrôle végétal par phéromones pour éviter l'utilisation de pesticides. Le groupe français M2i reproduit en laboratoire des phéromones afin de créer de la « confusion sexuelle » qui perturbe la communication entre les mâles et les femelles des espèces invasives et empêche leur reproduction sans action biocide. Ces phéromones peuvent aussi servir à attirer les espèces indésirables vers un point de piégeage, loin des zones à protéger.

Les procédés à l'œuvre dans des méthaniseurs visent à reproduire le principe de la digestion, mis en œuvre par une majorité d'espèces animales. Les termites et les vaches montrant le meilleur « rendement » en termes de digestion, les équipes de l'INRAE/LBE étudient leurs microbiotes intestinaux respectifs pour améliorer le rendement des méthaniseurs.

À la frontière entre biomimétisme et bioutilisation, la nature peut offrir des indicateurs biologiques non-invasifs. Le gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE cherche à suivre l'impact des câbles sous-marins reliés aux plateformes offshore sur l'écosystème marin. Le projet OASICE (*cOquilles Saint-jAcques outil de Surveillance de l'Impact des Câbles Electriques*)[19] consiste à observer l'aspect des coquilles Saint-Jacques vivant à proximité des câbles : l'aspect du réseau de stries sur leurs coquilles révèle si elles se trouvent en situation de stress – potentiellement causé par la présence de l'installation.

L'Allemagne, leader européen du biomimétisme

Malgré les progrès récents, la France est considérée comme étant en retard par à d'autres pays en matière de biomimétisme.

En Europe, l'Allemagne se place en tête grâce à son réseau Biokon, qui rassemble les experts du biomimétisme à travers tout le pays. Ce réseau favorise l'émergence de projets pluridisciplinaires et renforce les liens entre recherches fondamentale et appliquée. Le soutien du gouvernement fédéral, notamment du BMBF (Ministère de la Recherche) permet d'élaborer des stratégies et d'assurer des financements à moyen terme, notamment dans le domaine des matériaux et la bionique. Les projets de biomimétisme peuvent bénéficier du plan fédéral *Hightech strategy 2025*, qui ouvre un financement à hauteur de 1 Md€ sur 10 ans, en complément des financements sur fonds propres des laboratoires nationaux.

Un biomimétisme durable et au service des entreprises et de la biodiversité

Plusieurs industries s'intéressent aujourd'hui au biomimétisme et s'en servent pour améliorer leurs performances au regard de la Responsabilité sociétale des entreprises (RSE)[20] et atteindre leurs objectifs de durabilité. **Il conviendrait de mettre en place des critères précis permettant de valider ce type de démarche afin d'écarter le risque de *greenwashing* ou écoblanchiment[21]** en accord avec la norme ISO 18458:2015 et ses critères de durabilité. Une technologie bio-inspirée devrait répondre à une analyse de cycle de vie (ACV) irréprochable et s'inscrire dans une philosophie affirmée de protection de la biodiversité[22]. **Travailler avec le vivant implique de placer l'éthique au cœur de la démarche.**

Par exemple, l'architecture s'inspire souvent de la nature pour reproduire des formes ou des structures dans un but esthétique mais rarement de développement durable. Pourtant, le bâtiment est un secteur à fort potentiel écologique et la nature peut aider à créer des habitats plus économes et résilients. Le secteur doit aller plus loin dans sa démarche.

Aussi, selon Emmanuel Delannoy, consultant associé du cabinet Pikaia, le biomimétisme est un moyen de « *parler biodiversité aux entreprises* ». Considérer la faune et la flore comme des ressources stratégiques tout autant qu'un bien commun à préserver rejoint l'approche de la permaéconomie[23]. Inspirée des principes de la permaculture[24], elle utilise un biomimétisme dit « d'écosystème » pour repenser l'économie.

En parallèle, certains scientifiques comme Yvon Le Maho[25] militent pour que le biomimétisme devienne un vecteur d'ouverture de la recherche vers la richesse du vivant et ses potentielles applications. Les problématiques d'expérimentation sur les animaux dont on cherche à s'inspirer doivent aussi être prises en compte.

Ainsi, en montrant que le vivant est une source majeure d'idées et d'innovations, le biomimétisme s'inscrit dans le cadre de la lutte contre l'effondrement de la biodiversité. Les scientifiques alertent depuis plusieurs décennies sur l'effondrement de la biodiversité, terrestre ou marine, à un rythme « sans précédent et qui s'accélère »[26]. On estime aujourd'hui qu'un oiseau sur 8 et un mammifère sur 4 sont menacés. Également, la biomasse des insectes volants[27] et des arthropodes[28] aurait diminué d'environ 70 % ces dernières années.

L'IPBES (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques) estimait en 2019 « *qu'environ 1 million d'espèces animales et végétales sont aujourd'hui menacées d'extinction, notamment au cours des prochaines décennies, ce qui n'a jamais eu lieu auparavant dans l'histoire de l'humanité.* »

Les activités humaines, y compris le changement climatique, en sont la principale cause. Des actions sont encore possibles, notamment la sensibilisation des populations et des acteurs économiques. Parce qu'il fait de toute espèce ou de tout écosystème un élément potentiel de solution aux problèmes de l'humanité, le biomimétisme peut fortement contribuer à cette sensibilisation collective. Il est en tout état de cause une puissante incitation à œuvrer en faveur de la biodiversité.

Site Internet de l'OPECST :

http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opecst-index.asp

http://www.senat.fr/opecst/

Recommandations

1. Afin de donner une impulsion décisive, **organiser des Assises du biomimétisme** sous l'égide conjointe du Ministère de la transition écologique, du Ministère de la Mer, du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, du Ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation et du Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance ;
2. **Organiser ces Assises pendant la présidence française de l'Union européenne**, en faisant du biomimétisme un axe de valorisation de la biodiversité marine, polaire et des Outre-mer ;
3. À l'issue de ces Assises, **écrire une feuille de route de la filière en biomimétisme** afin de définir les moyens et d'élaborer les actions à mener à court et moyen terme ;
4. **Nommer un référent Biomimétisme** au sein de chaque **département Innovation des ministères concernés** ;
5. **Mettre en place une charte du biomimétisme** avec les principaux acteurs du biomimétisme, afin que les projets s'inscrivent dans **une démarche globale d'éthique qui respecte des principes de protection de la nature** ;
6. Cette charte donnera lieu à la **création d'un label** pour **mettre en valeur les entreprises** qui s'inscrivent dans une démarche de biomimétisme éthique ;
7. **Soutenir la recherche fondamentale** en biologie et en écologie, au laboratoire et aussi sur le terrain ; **préserver et mieux exploiter les collections des musées d'histoire naturelle** afin d'en faire un catalogue de ressources dont l'ingénierie peut s'inspirer ;
8. **Encourager la formation pluridisciplinaire** des ingénieurs, des architectes, des designers et des biologistes, y compris en développant la certification des formations continues ;
9. **Référencer précisément les projets bio-inspirés dans les appels à projet.** Cela permettra notamment un inventaire plus complet des activités de la filière en France ;
10. **Renforcer les partenariats franco-allemand** dans le cadre de la présidence française de l'Union européenne en 2022. Une réflexion peut être menée sur la création d'une structure européenne de biomimétisme, afin de mutualiser les moyens et les actions.

Personnes Consultées

Mme Kalina Raskin, directrice générale de la société coopérative d'intérêt collectif Ceebios

Mme Chrystelle Roger, présidente de la société Myceco

M. Stéphane Viollet, directeur de recherche, responsable de l'équipe biorobotique à l'institut des sciences du mouvement Etienne-Jules Marey (CNRS/Université Aix-Marseille)

M. Jerome Casas, membre honoraire de l'Institut universitaire de France, professeur à l'institut de recherche sur la biologie de l'insecte (CNRS/Université de Tours)

M. Emmanuel Delannoy, consultant associé, société Pikaia

M. Yvon le Maho, membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite à l'institut pluridisciplinaire Hubert Curien (CNRS/Université de Strasbourg)

Mme Annabelle Aish, cheffe du projet *Bioinspire-Muséum* au Museum national d'Histoire naturelle

M. Jian-Sheng Sun, professeur, directeur du département « Adaptation du vivant » au Museum national d'Histoire naturelle

M. Yves Bréchet, membre de l'Académie des sciences, professeur à l'institut polytechnique de Grenoble, directeur scientifique de la société Saint-Gobain

Mme Florence Dufrasnes, directrice *Space Systems Technical Strategy, R&D/T, IP & Spectrum Management* de la société Airbus

Mme Delphine Bouvier, directrice internationale de la transition *Green Sciences* de la société L'Oréal

M. Pierre Meyer, directeur des partenariats industriels au sein des affaires industrielles européennes de la société RTE

M. Sidney Rostan, président de la société Bioxegy

Mme Genevieve Sengissen, responsable de la formation continue de l'Ecole nationale supérieure de création industrielle – Les Ateliers

M. Emmanuel Chiva, directeur de l'Agence de l'innovation de défense

Colonel de Peyret, directeur du *Battle Lab Terre* au Ministère des Armées

Mme Natasha Heil, chercheuse au Laboratoire de modélisation pour l'assistance à l'activité cognitive de la conception de l'unité mixte de recherche Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine (CNRS/Ministère de la Culture)

M. Olivier Guerret, vice-président de la société M2I Life Sciences

M. Jean-Philippe Steyer, M. Jean-Jacques Godon, directeurs de recherche au Laboratoire de biotechnologie de l'environnement de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)

Entretiens avec les acteurs allemands :

M. Olivier Schwarz, professeur à l'Université de Siegen, responsable du département de biomimétisme appliqué à l'ingénierie médicale à l'institut Fraunhofer

M. Peter Fratzl, professeur, directeur du département biomatériaux de l'institut Max Planck

Membres du BMBF (Ministère fédéral allemand de l'Education et de la Recherche) :

Simone Flach (Referat 224 – Service « Coopération avec l'Europe et Israël »)

Christine Ernst, Tom Wünsche (Referat 521 - Service « Avenir du travail et création de valeur ; Industrie 4.0 »)

Silvia Ebert et Olaf Rotthaus (opérateur de projet PTJ-*Projekt Träger Jülich*)

Rosita Cottone (referat 523 – Service « Matériaux innovants – batteries »)

Références

[1] *Une exposition sur le thème « Le biomimétisme de Léonard de Vinci à nos jours » a même eu lieu en 2019 avec le soutien du CNRS :* https://cesr.cnrs.fr/actualites/actualites-scientifiques/exposition-sinspirer-du-vivant-le-biomim%C3%A9tisme-de-l%C3%A9onard-de

[2] *Dans son célèbre Ted Talk (visionné plus de 1.5 millions de fois à ce jour), Janine Benyus invite le spectateur a « imaginer créer le printemps » et tous les processus en jeu pour mettre en avant l'organisation et l'efficacité de la Nature en action :* https://www.ted.com/talks/janine_benyus_biomimicry_in_action?language=fr#t-84002 .

3 *Le biomimétisme peut s'inspirer aussi bien de la faune que de la flore. Cette dernière inspire depuis déjà longtemps, notamment le secteur pharmaceutique. On estime d'ailleurs que plus de la moitié des médicaments existants sur le marché sont inspirés ou dérivés de composés naturels issus majoritairement des végétaux.*

[4] https://inpn.mnhn.fr/docs/communication/livretInpn/Livret-INPN-especes-2021.pdf

[5] *Quelques chiffres complémentaires : La France abrite 10 % des 2 millions d'espèces connues dans le monde, soit environ 200 000 espèces. La moitié se trouve en France métropolitaine et le reste Outre-mer. 80 % de ces espèces sont dites « continentales » (terrestres ou d'eau douce) alors que la France possède la 2e ZEE mondiale. Un biais existe car l'inventaire de la biodiversité marine s'avère plus compliqué et il reste encore beaucoup d'espèces à découvrir. Enfin, 11 % des espèces présentes sur le territoire sont endémiques, ce qui signifie qu'elles n'existent que sur le territoire français (notamment dans les Outre-mer). Nous sommes donc les seuls garants de leur survie et de leur conservation.*

[6] https://www.mnhn.fr/fr/collections *Riche de 400 ans d'histoire, les collections du Museum d'histoire naturelle de Paris sont uniques au monde. Elles recèlent de faune et de flore fossilisées ou naturalisées, mais aussi d'archives documentaires qui en font une mine d'informations très large.*

[7] https://ceebios.com/

[8] https://presse.ademe.fr/2019/11/lademe-sengage-pour-le-developpement-du-biomimetisme-en-partenariat-avec-le-ceebios.html

[9] https://www.myceco.com/

[10] https://www.bioxegy.com/

[11] https://www.technopolepaysbasque.fr/fr/4-sites-technopolitains/id-ocean/actualite/biomimetisme-luppa-creee-un-master-en-materiaux-bio-inspires.html

[12] https://formation-continue.ensci.com/developpement-durable/nature-inspired-design

[13] https://synapses.polytechnique.fr/catalogue/2021-2022/ue/478/MEC574-biomimetisme?from=D1

[14] *Plus récemment, la chenille des chars trouve son origine dans le mode de déplacement de l'insecte lui-même ou les essaims de drones reproduisent le comportement d'intelligence collective des essaims de guêpes ou frelons.*

[15] https://www.airbus.com/innovation/future-concepts/biomimicry/fellofly.html *Les moteurs d'avions produisent un vortex dans leur sillage. L'avion suiveur se placerait dans le courant ascendant de ce vortex et bénéficierait d'un effet de portance qui limiterait la poussée de ses propres moteurs. La balance entre distance de sécurité et gain d'énergie implique que le suiveur devra se placer environ 3 km derrière l'avion principal.*

[16] *Selon Airbus, une tonne de carburant économisée équivaut à 3 tonnes de CO_2 non-émis (*https://www.lefigaro.fr/societes/comment-airbus-s-inspire-des-oiseaux-migrateurs-pour-economiser-du-carburant-20200103 *).*

[17] https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aau0307

[18] *Le pôle Nord magnétique – à distinguer du Pôle nord géographique- dépend des courants induits par les mouvements du noyau terrestre, composé de fer liquide. Historiquement situé au Canada, il se déplace actuellement à la vitesse de 40 km/an vers la Sibérie depuis les années 1990. Étant un élément naturel, le champ magnétique ne peut être brouillé c'est pourquoi une large partie des systèmes de navigation mondiaux, y compris ceux de l'OTAN par exemple, reposent sur le Modèle magnétique mondial, qui devient de plus en imprécis et doit être mis à jour régulièrement pour suivre ces mouvements.*

[19] https://www.rte-france.com/nos-engagements/la-mer-quand-lavenir-passe-par-le-dialogue

[20] *Il s'agit, selon le Ministère de l'Économie, de « la contribution des entreprises aux enjeux du développement durable » et selon la Commission européenne de « l'intégration volontaire par les entreprises de préoccupations sociales et environnementales à leurs activités commerciales et leurs relations avec les parties prenantes ».*

[21] *Le « greenwashing », ou écoblanchiment, est un procédé de marketing ou de relations publiques utilisé par une organisation pour se donner une image trompeuse de responsabilité écologique.*

[22] https://www.strategie.gouv.fr/debats/biomimetisme-leviers-de-developpement-perspectives-france

[23] https://www.pikaia.fr/vos-enjeux/permaeconomie/

[24] *La permaculture est un concept agricole qui repose principalement sur trois piliers : prendre soin de la terre, prendre soin de l'humain et partager équitablement.*

[25] *M. Yvon le Maho, membre de l'Académie des Sciences, a été précurseur de l'observation des manchots en Antarctique, dans leur environnement naturel. Cette technique lui a permis de découvrir la protéine antimicrobienne présente dans l'estomac des manchots et qui leur permet de conserver du poisson dans leur estomac à 37° C sans dégradation.*

[26] https://ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment-Fr

[27] https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185809

[28] https://www.nature.com/articles/s41586-019-1684-3