

Chapitre I

Introduction à la bio-inspiration

1 ORIGINE DE LA BIO-INSPIRATION : ASPECTS HISTORIQUES

L'ingénierie bio-inspirée est une notion récente en ingénierie dont l'apparition est liée au souhait de promouvoir un développement durable répondant aux problèmes environnementaux posés par l'hyper-industrialisation de notre société : pollutions, épuisement des ressources, changement climatique, disparition d'espèces, ...

La bio-inspiration est une branche des sciences de l'ingénieur qui consiste à s'inspirer de la nature pour améliorer ou développer des produits respectueux de l'environnement tout en étant très performants.

Les applications de l'ingénierie bio-inspirée se retrouvent aujourd'hui dans un grand nombre de domaines industriels : aéronautique, matériaux, informatique, robotique, intelligence artificielle, énergie, habitat, etc. Pourtant, elles ne représenteraient actuellement qu'un peu plus de 10 % des technologies développées par l'homme.

Toutefois en Europe, au Japon et aux États-Unis, le biomimétisme est reconnu comme la technologie de demain et l'intérêt et le financement y sont de plus en plus nombreux. En particulier, des entreprises d'envergure mondiale telles que Ford, General Electric, Herman Miller, HP, IBM et Nike par exemple collaborent avec des scientifiques et conçoivent des laboratoires pour explorer de nouvelles technologies bio-inspirées (Hwang, et al., 2015). Il y a globalement un investissement important dans la recherche pour jeter les bases d'une innovation et de développements futurs en biomimétisme (Shimomura, 2010).

S'inspirer de la façon dont les systèmes vivants surmontent leurs problèmes "d'ingénierie" pourrait réduire la dépendance de l'homme vis-à-vis des ressources limitées de la planète (énergie, matériaux...) et surtout préserver son environnement et son existence. En effet, il semble bien que l'homme ait influé l'avenir de notre planète (nouvelle ère géologique : l'anthropocène⁷) par ses activités (Figure I-1).

Ainsi on estime en ce moment que **chaque année** :

- de 40 à 250 espèces animales ou végétales connues disparaissent ;
- Entre 130 000 et 150 000 km² de forêts sont détruites, dont les forêts primaires ;
- Le désert s'accroît d'environ 65 000 km² ;
- L'épaisseur de glace de l'océan arctique a été réduite de 42% et le pôle nord est maintenant dans l'eau l'été. Le Groenland perd 51 milliards de m³ d'eau chaque année, l'équivalent du débit du Nil.
- Entre 1950 et 1997, la surface des banquises antarctiques a été réduite de 7000 km², la température d'étant élevée de 2,5°C dans cette région ;

⁷ L'Anthropocène est un terme de chronologie géologique proposé pour caractériser l'époque de l'histoire de la Terre qui a débuté lorsque les activités humaines ont eu un impact global significatif sur l'écosystème terrestre. Ce terme a été popularisé à la fin du XXe siècle par le météorologue et chimiste de l'atmosphère Paul Crutzen, prix Nobel de chimie en 1995, pour désigner une nouvelle époque géologique, qui aurait débuté selon lui à la fin du XVIIIe siècle avec la révolution industrielle, et succéderait ainsi à l'Holocène.

-36 milliards de tonnes de CO₂ sont émises dans l'atmosphère ;
 -4,36 milliards de tonnes de pétrole, 5,5 milliards de tonnes de charbon, et 3,19 milliards de milliards de m³ de gaz naturel, sont consommés ;
 -...



Tigre de Tasmanie

Disparition progressive
des batraciens aux US

Dodo



Disparitions d'espèces animales



Premiers réfugiés climatiques (2005) - Village de Lataw sur les îles Torrès, au Nord de l'archipel du Vanuatu, Pacifique Sud. Cette petite localité au beau milieu du Pacifique Sud a dû reculer de plusieurs centaines de mètres, ses 70 habitants devenant ainsi les premiers « réfugiés climatiques » de l'Histoire d'après les Nations Unies.

Figure I-1 : Illustrations de l'ère anthropocène.

Si l'espèce humaine veut survivre tout en connaissant des conditions de vie les plus favorables possibles, il lui faut très rapidement adopter des pratiques créant un développement durable. La bio-inspiration est une solution à préconiser.

Toutefois s'inspirer de la nature n'est pas réellement un nouveau concept même si cette approche est médiatisée depuis quelques années. Les humains observent le monde du vivant pour y trouver des réponses aux problèmes les plus complexes de la société depuis les temps les plus anciens et probablement depuis le début de l'histoire de l'humanité. Ainsi se vêtir de peaux d'animaux à fourrure pour aider à maintenir sa température corporelle ou faire du feu pour éclairer et chauffer relève d'une bio-inspiration d'ordre de l'imitation de la nature et cela donc depuis les origines de l'homme.

Cette idée de reproduire les phénomènes naturels au service de l'activité humaine se retrouve dans l'agriculture qui est née il y a une dizaine de milliers d'années. La bio-inspiration en agriculture dépasse la seule imitation puisqu'il faut en effet modifier les caractéristiques et propriétés initiales des espèces cultivées ou élevées pour répondre aux besoins de la société humaine. Les plantes cultivées doivent être toutes au même stade de maturité par exemple pour la récolte et les grains de céréales doivent avoir les meilleures caractéristiques pour faire de la farine, etc.

Par la sélection l'homme a donc influencé l'évolution de nombreuses espèces animales et végétales devenant ainsi un acteur influant de l'évolution car à partir de la naissance de l'agriculture, un processus de développement d'activités humaines de moins en moins dépendantes des contraintes du milieu (de la nature) a commencé.

L'application ultime de la bio-inspiration en agriculture par exemple serait de produire des aliments et des matières premières « naturelles » (similaires à celles produites naturellement) sans avoir recours à des organismes vivants. Les récents développements des connaissances et de la technologie pourraient rendre ou rendront cela possible dans un futur plus ou moins proche.

On peut faire remonter au moyen âge une volonté affichée de s'inspirer de la nature pour le développement des techniques.

A cette époque, Leonardo da Vinci (1452-1519) disait à ses élèves "allez prendre vos leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur". On retrouve cette bio-inspiration par exemple dans ses dessins sur des machines destinées à voler dans l'air ou aller sous l'eau. La machine dessinée reproduit alors les formes et les structures d'organismes évoluant dans l'air ou dans l'eau. Tout au cours de l'évolution industrielle et hyper-industrielle de la société humaine, la bio-inspiration sera donc toujours présente mais tout comme Mr Jourdain (dans le Bourgeois Gentilhomme de Molière) faisait de la prose sans le savoir, de nombreux développements technologiques ont relevés de la bio-inspiration sans en être conscient.

Au début du siècle dernier, dans la lignée de Leonardo Da Vinci, l'ingénieur Français Clément Ader imagine et réalise des machines volantes bio-inspirées (Figure I-2). Il déclare « Le vol des oiseaux et des insectes m'a toujours préoccupé... J'avais essayé tous les genres d'ailes d'oiseaux, de chauve-souris et d'insectes, disposées en ailes battantes, ou ailes fixes avec hélice... je découvris l'importante courbe universelle du vol ou de sustentation. ».

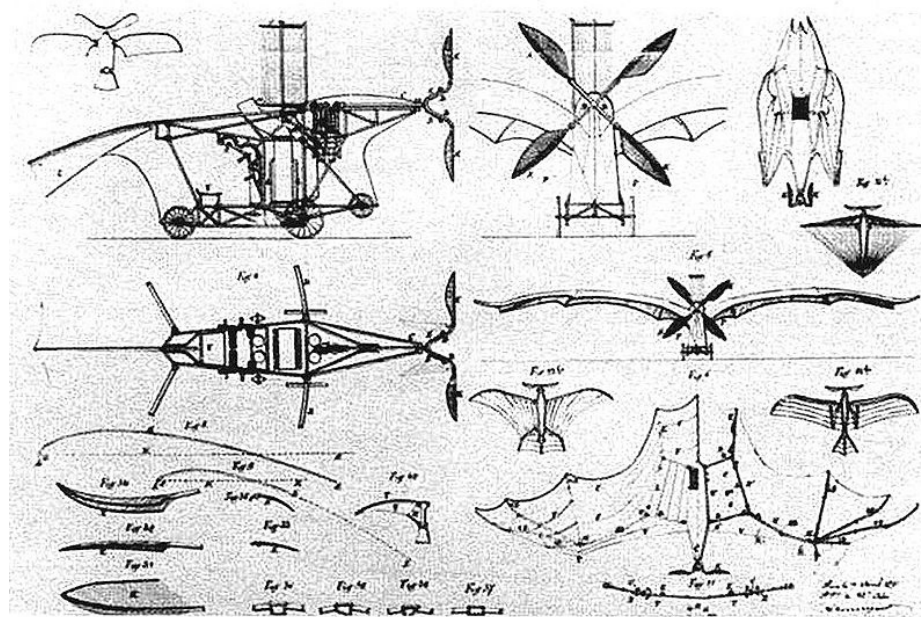


Figure I-2 : Schémas de l'avion Eole issu du dépôt de brevet par Clément ADER.

L'exemple fondateur de l'intérêt économique avec une réussite industrielle de la bio-inspiration est celui de la conception du Velcro.

Le Velcro est un matériau tissé formé de 2 bandes recouvertes chacune d'une texture particulière (Figure I-3). Ces 2 bandes se lient de façon réversible lors de leur mise en contact. L'idée de cette bande auto-agrippante est venue à l'ingénieur Suisse Georges de Mestral en 1941 lors du retour d'une promenade dans la campagne avec son chien. Il remarqua qu'il était difficile d'enlever les fleurs de grande bardane (*Xanthium strumarium*) accrochées à son pantalon et aux poils de son chien. En observant les fleurs composées de crochets il développa la bande auto-agrippante et déposa le brevet en 1951. Le principe repose sur une bande constituée d'une couche de petits crochets en forme d'hameçons et d'une bande avec une couche de petites boucles. Quand les 2 bandes sont mises en contact les crochets s'agrippent aux boucles créant une liaison réversible en exerçant une force de traction.

On qualifie parfois cette découverte d'accidentelle mais elle résulte d'une observation attentive d'un phénomène naturel qui a inspiré une application technologique. Son succès est lié à sa simplicité apparente et à son efficacité de lier réversiblement 2 surfaces. La Bardane favorise sa reproduction en utilisant des animaux comme vecteurs grâce à la liaison de ses fleurs fécondées avec les poils de l'animal vecteur, hôte temporaire de la fleur jusqu'à son décrochage, sa retombée sur le sol et son éventuelle germination si les conditions sont favorables.

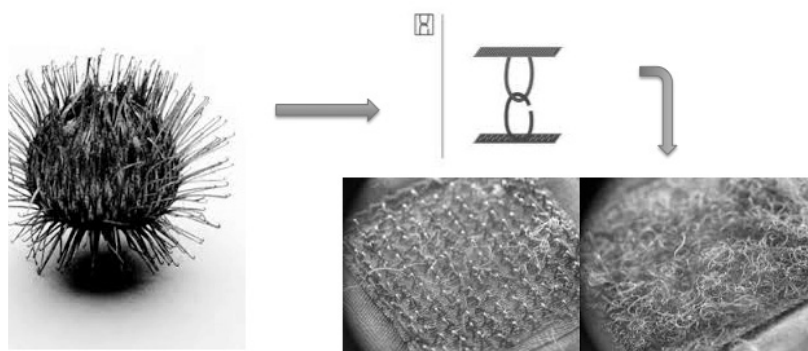


Figure I-3 Fleur de Bardane ; principe de la liaison réversible ; les 2 bandes auto-agrippantes.

Depuis cette réussite technologique et économique, la bio-inspiration séduit et se développe dans tous les secteurs industriels.

Au fur et à mesure de son développement et de son application dans les domaines les plus variés, la bio-inspiration initialement très empirique se formalise de plus en plus. Les connaissances nouvellement acquises en mathématiques (fractales), en physique (thermodynamique loin de l'équilibre, physique quantique) ou en sciences de la vie et écologie permettent le formalisme requis en ingénierie.

Il convient en premier de définir avec précision la bio-inspiration et d'en présenter les concepts généraux.

2 DEFINITIONS ET CONCEPTS

Le terme biomimétisme est couramment utilisé comme synonyme de bio-inspiration. Ce terme désigne l'application des formes et mécanismes du vivant à divers domaines techniques. Le terme vient du grec, *bios* (vie) et *mimesis* (imiter).

Le mot anglais « biomimetic » est apparu publiquement pour la première fois en 1974 dans le dictionnaire Webster (Meridian Webster Dictionnary) accompagné de la définition suivante :

'The study of the formation, structure, or function of biologically produced substances and materials (as enzymes or silk) and biological mechanisms and processes (as protein synthesis or photosynthesis) especially for the purpose of synthesizing similar products by artificial mechanisms which mimic natural ones.'

Soit en français "L'étude de la formation, de la structure ou de la fonction des substances et des matériaux produits biologiquement (comme des enzymes ou la soie) et des mécanismes et processus biologiques (comme la synthèse des protéines ou la photosynthèse), en particulier aux fins de synthétiser des produits similaires par des mécanismes artificiels qui imitent les naturelles (Vincent, Bogatyreva, Bogatyrev, Bowyer, & Pahl, 2006).

Janine M. Benyus, biologiste et environnementaliste américaine, a rendu populaire cette expression au niveau mondial et l'approche correspondante au cours de ces dernières décennies (Benyus, 2011).

Dans de nombreux pays de langue anglaise, le terme de biomimicry est d'ailleurs plus utilisé que bio-inspiration ou bioinspired engineering.

Existe-t-il alors une différence entre le biomimétisme et la bio-inspiration ?

Une première approche proposée par des chercheurs français consiste à considérer que la bio-inspiration est un concept (un ensemble) constitué de diverses actions et de donner une définition précise aux divers termes utilisés pour désigner ces actions que sont la biomimétique, le biomimétisme et la bionique (Encadré I-1).

La biomimétique (*Biomimetic*): La biomimétique est un processus créatif interdisciplinaire entre la biologie et la technologie dans le but de résoudre des problèmes anthropocentriques par l'abstraction, le transfert et l'application de connaissances issues de modèles biologiques.

Le biomimétisme (*biomimicry/biomimesis*) : le biomimétisme est une philosophie consistant à prendre la nature pour modèle, notamment à un niveau organisationnel, afin de répondre aux enjeux du développement durable (sociaux, environnementaux et économiques).

Bionique (*Bionic*) : La bionique est une discipline très liée à la robotique visant à la reproduction, l'augmentation ou le remplacement de fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques.

Encadré I-1 Définitions des termes liés à la bio-inspiration selon l'approche « techniques de l'ingénieur » (Fayemi, 2015).

Dans cette approche le biomimétisme n'est pas qu'une simple copie de la nature et évite d'associer le biomimétisme au degré le plus faible de la bio-inspiration. Cette approche représente un parti pris pour s'affranchir de l'étymologie du mot biomimétisme. Toutefois elle ne permet pas d'avoir une approche internationale cohérente. Une réflexion est en cours au niveau international pour normaliser les termes et définitions de la biomimétique et de ses champs connexes avec la constitution d'un comité technique ISO/TC266.

Dans l'attente d'une clarification et d'une standardisation, nous développerons dans cet ouvrage une autre approche mettant en avant la bio-inspiration plutôt que le biomimétisme.

Cette approche est donc de respecter la lecture la plus directe de l'étymologie du biomimétisme et donc de définir plusieurs niveaux ou plusieurs degrés de bio-inspiration allant du plus simple : la copie (imitation) de formes et structures vivantes jusqu'au plus complexe : la transposition (extrapolation) de principes et de fonctionnement de structures vivantes, nous pouvons alors classer le biomimétisme comme le premier niveau ou premier degré de la bio-inspiration.

Nous pouvons donc dire que la bio-inspiration incluant le biomimétisme fait appel à la transposition et à l'adaptation des principes et des stratégies élaborés par les organismes vivants et les écosystèmes (Figure I-4).

Connaître ces principes nous apparaît primordial car nous ne pouvons pas créer ce que nous ne comprenons pas (Richard Feynman)⁸.

L'avantage de cette distinction entre le biomimétisme et la bio-inspiration permet de poser les deux questions suivantes :

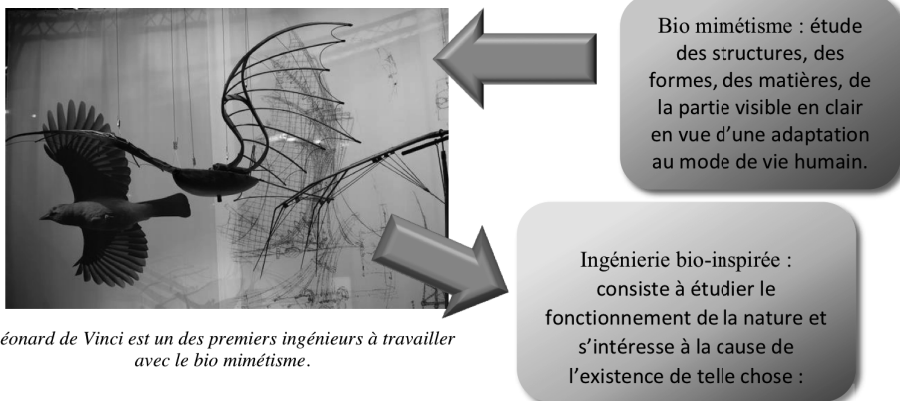
Pourquoi les ingénieurs imitent le vivant ?

Pourquoi le vivant inspire les ingénieurs ?

A la première question pourrait correspondre le biomimétisme et à la seconde pourrait correspondre la bio-inspiration.

⁸ Prix Nobel de physique en 1960 « What I cannot create, I do not understand ».

Le bio mimétisme tire parti de ce qui se trouve dans la Nature tandis que l'ingénierie bio inspirée part d'un principe, d'une propriété de la Nature pour l'appliquer à un tout autre domaine.



Léonard de Vinci est un des premiers ingénieurs à travailler avec le bio mimétisme.

Figure I-4: Illustration du biomimétisme et de la bio-inspiration.

Les deux questions précédentes peuvent également nous permettre de comprendre l'intérêt de l'ingénieur à imiter ou s'inspirer du vivant. Il convient pour cela de confronter les attendus de l'ingénierie d'une part et les propriétés et spécificités du vivant d'autre part.

Pour illustrer ceci et avant de détailler par la suite les spécificités du vivant, prenons l'exemple du domaine des matériaux. C'est en effet dans ce domaine que de nombreuses études ont été réalisées à partir de « l'observation » de propriétés macroscopiques telles que mécaniques, hydrophobiques, optiques, etc., et de l'analyse des structures aux plus petites échelles et des techniques de biosynthèse (Meyers, 2008).

Si l'on se réfère aux propriétés mécaniques, on peut réaliser une classification en figurant dans des diagrammes les types de matériaux suivant leurs propriétés mécaniques en fonction de leur densité (Figure I-5).