

Biomimétisme et bioinspiration

Alain Pavé

Avertissement : ce texte devait constituer un chapitre d'un ouvrage plus général sur la biodiversité¹. Après discussion avec le directeur de la collection « Science ouverte » des Éditions du Seuil, nous avons décidé de ne pas l'inclure car il allongeait la taille du livre et était un peu exotique par rapport à la philosophie du reste de l'ouvrage. Il présente néanmoins un intérêt certain si j'en juge par les demandes de conférences sur le sujet. En faire un livre n'est pas aujourd'hui dans mes objectifs. Il m'a semble utile de le proposer en libre accès sur mon site, mais ne pas hésiter à le citer quand même :

Pavé A., Biomimétisme et biosinpiration, 2017, 21p (accès libre et téléchargeable sur le site www.alain-pave.fr)

On peut également disposer d'une version résumée en anglais et une suite d'images pouvant être utilisées pour une présentation « powerpoint ».

TBI&BM.pdf

Dans beaucoup des discours sur la biodiversité l'accent est mis sur les dimensions négatives, catastrophiques, ou au contraire pour la parer de toutes les qualités, mais ne pourrait-on pas aussi développer une vision équilibrée ?

Tout d'abord, il s'agit de souligner que la biodiversité a de multiples facettes. La plupart sont « classiques », qu'elles soient d'ordre utilitaire et marchand (les produits du vivant), d'ordre esthétique ou récréatif, d'ordre culturel, voire religieux. En revanche, tout ce que nous apporte l'observation et l'étude du vivant comme source d'inspiration n'est pas présenté ni traité au niveau que cela peut mériter.

On peut identifier deux domaines où la bioinspiration est à l'œuvre dans le secteur technologique, on parle, par exemple, de technologie bioinspirée ou biomimétique. On oublie cependant que le secteur social et économique est concerné, avec des conséquences politiques, il s'agit des discours construits en prenant comme modèle le « naturel » et son évolution pour les sociétés humaines. L'expression à l'œuvre aujourd'hui dans le monde vient en droite ligne du darwinisme social. L'évoquer dans ce chapitre nous a paru nécessaire dans la mesure où les mécanismes intellectuels sont analogues, mais avec une portée beaucoup plus grande et qu'elle porte souvent sur des analyses incomplètes ou partisans. L'ingénieur vérifie précisément que ce qu'il fait marche, exécute la tâche attendue, que la copie ou l'analogie fonctionne comme attendu, avec un risque faible ou nul. Ce n'est pas toujours le cas pour le politique...

¹ Alain Pavé, *Le foot et l'escargot, la biodiversité trente ans après*. Éditions du Seuil, 201#.

A cette fin, il est utile de dresser un tableau de la situation. On peut préciser, que pour les aspects technologiques les élèves ingénieurs sont très attentifs quand on leur en parle, ils sont même demandeurs.

Quand le vivant inspire l'ingénieur : un concept récent et... une histoire ancienne

Les hommes s'inspirent de la nature et singulièrement des êtres vivants très probablement depuis l'apparition de sa capacité à élaborer des outils. Il n'en reste pas de traces écrites, si bien qu'on ne peut faire que des conjectures. Ainsi, l'invention du filet peut être associée à l'observation de la toile d'araignée, celle des armes comme le poignard ou la lance, de cornes des animaux, du vêtement en observant la fourrure et l'on pourrait multiplier les exemples. Souvent il y avait coïncidence entre l'objet et le matériaux : poignard en ivoire, vêtements en fourrure. Une célèbre bande dessinée fait revivre ces inventions à travers un personnage : « Rahan, le fils des âges farouches ». Les humains ingénieux de la préhistoire, ancêtres des inventeurs, des innovateurs, des ingénieurs, ont fort possiblement suivi ce cheminement. Cela correspond aussi à l'émergence de la capacité de conceptualisation.

Mais revenons à une histoire plus récente. Sans nul doute que les exemples les plus caractéristiques se trouvent dans l'œuvre de Léonard de Vinci avec notamment ses machines volantes inspirées du vol des oiseaux, des chauves-souris et des libellules². Et si nous regardons l'histoire contemporaine on peut aisément établir que de nombreuses innovations puisent leurs origines dans l'observation du vivant, sans parler d'analogies, parfois hâtives... Mais au fait pourquoi ?

Près de 4 milliards d'années d'innovations

Comme nous l'avons déjà évoqué, les systèmes vivants (organismes, populations, communautés) résultent de près de 4 milliards d'années d'évolution. Progressivement, des êtres vivants très divers sont apparus spontanément. C'est grâce à cette capacité à se diversifier que la vie a pu se maintenir et se développer sur cette planète, à faire que dans cette diversité certains aient pu résister à des variations parfois catastrophiques de leur environnement et à s'adapter à de nouvelles conditions de milieu. Face aux événements aléatoires, souvent violents, de l'environnement, la diversification a été la « solution » émergente : la vie a subsisté d'abord parce qu'elle s'est diversifiée, ensuite parce que les êtres vivants ont évolué, notamment grâce à la sélection de leur capacité de plus en plus grande à s'adapter individuellement et collectivement à des environnements différents et variant de façon plus ou moins imprévisible.

² On peut trouver sur le web de multiples documents à ce sujet, notamment des illustrations qu'il a réalisées dans ses codex. Certaines de ses machines ont été réalisées sous forme de maquettes, par exemple à la fondation Pierre Gianadda, à Martigny, en Suisse, et en taille réelle au Clos Lucé, à Amboise. On pourra aussi se référer à l'ouvrage :

Dominico Lorenza, Mario Taddei, Edoardo Zanon. *Les machines de Léonard de Vinci. Secrets et inventions des codex.* Gründ, Florence, 2006.

De façon générale, l'évolution des systèmes vivants se résume bien grâce au schéma darwinien, une suite « d'essais et d'erreurs » fondée sur deux grandes catégories de processus : d'abord, les processus de reproduction et de variation, ensuite les processus de sélection naturelle. Les premiers contribuent à l'extension et à la diversification, ils créent de la biodiversité, les seconds sont responsables de la limitation à la fois de l'extension de la vie sur la Terre et de la biodiversité.

Au cours de l'évolution, le vivant a produit une grande variété de structures, de matériaux, de composés divers, de formes et de comportements qui peuvent être sources d'inspiration technologique. C'est une des raisons majeures pour s'intéresser à la biodiversité, en allant au delà des discours idéalistes, voire idéologiques, sans pour autant les mépriser, afin de systématiser la recherche pour de possibles innovations. Pour cela, il faut en priorité concilier les motivations des naturalistes, des biologistes et des écologues avec celles des technologues. En gros, adopter une approche interdisciplinaire. Cette idée n'est pas nouvelle, mais cette « ressource intellectuelle » est loin d'avoir été exploitée. C'est un des apports, une des fonctionnalités, un des services, pour emprunter au langage actuel, de la biodiversité si tant est que la biodiversité ait conscience de rendre des services.

Il n'est évidemment pas question de tenter une liste exhaustive, mais de citer des exemples qui nous paraissent illustratifs. Pour les amateurs d'esthétique et de curiosité, on peut signaler le bel ouvrage de Mat Fournier et de Yannick Fourié³.

Quelques repères historiques

Très schématiquement, les principaux acquis ont été obtenus après 1945, les principaux sont la cybernétique, la bionique, la théorie générale des systèmes, l'intelligence artificielle et la robotique. Sinon les idées, certains termes sont tombés en désuétude, comme la cybernétique ou la bionique :

La cybernétique

La cybernétique a été développée à l'origine par Norbert Wiener. Un ouvrage publié en 1948 reste le document fondateur⁴. Il s'est principalement inspiré des résultats de la physiologie, notamment des processus de régulation (cf. figure 6.3). La théorie du contrôle automatique en a été la prolongation. Cette théorie a connu de très nombreux développements et applications. L'informatique est un autre champ qui a grandement bénéficié de cette invention. Les développements mathématiques ont également été très prolifiques, de grande qualité et d'une remarquable efficacité.

³ Fournier M., Fourié Y. *Quand la nature inspire la science. Histoires des inventions humaines qui limitent les plantes et les animaux. Edition Plume de carotte, Toulouse, 2011.*

Une petite critique sur l'emploi du terme science : en fait la nature a été la principale source d'inspiration des scientifiques, ici il s'agit plutôt de bioinspiration ou de biomimétisme au sens technologique où nous l'entendons dans ce chapitre.

⁴ Wiener N. *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine. The MIT Press (Cambridge, Mass.) et Wiley (New York), 1948.*

La bionique

En 1958, Jack E. Steele, médecin de l'armée de l'air américaine, crée le terme bionique en faisant principalement le lien entre biologie et électronique. Ce terme a été ensuite très employé pour tout dispositifs qui supplée à des fonctions du vivant (exemple de la main artificielle). Il est encore utilisé, mais les deux termes le biomimétisme et de bioinspiration ont tendance à devenir les plus employés. On pourra se référer, par exemple, à l'ouvrage récent de Agnès Guillot et de Jean Arcady Meyer sur le sujet.⁵

La théorie des systèmes

Ludwig von Bertalanffy publie un ouvrage clé en 1968 : *Théorie générale des systèmes*⁶. Il généralise les approches cybernétiques et fait le pont avec l'écologie (concept d'écosystème) et ensuite bien d'autres domaines tant cette théorie est féconde. L'une des grande qualité de cette approche est d'offrir une véritable méthodologie, intégrant la modélisation mathématique⁷. En France, Jean-Louis Lemoigne en a été l'un des principaux contributeurs au développement de cette théorie. Nous avons été et sommes encore pour beaucoup d'entre nous des adeptes de cette méthodologie, via notamment la variante « Analyse des systèmes »⁸. Certains ont vu dans cette approche soit une version opérationnelle du holisme, soit une alternative à ce concept. On peut signaler que Bertalanffy était un biologiste et l'un des pionniers de la modélisation dans son domaine.

Fin des années 1970 et début des années 1980, un Groupe de recherche, très interdisciplinaire, a été créé et a fonctionné en Rhône-Alpes sur le sujet, sous l'initiative du département Sciences Physiques pour l'Ingénieur du CNRS (GRECO Analyse des systèmes). A titre personnel, j'en ai tiré un grand bénéfice et je n'ai pas été le seul. Ensuite, après la fin de ce groupe, une partie de ceux qui en ont été les principaux animateurs se sont retrouvés dans le Club Edora de l'Inria⁹. Ces deux initiatives ont laissé des traces durables dans la communauté scientifique française.

⁵ Agnès Guillot, Jean-Arcady Meyer *La bionique. Quand la science imite la nature*, coll. « UniverSciences », 2008

⁶ von Bertalanffy L (1968) *General System Theory*, George Braziller Inc., New York, French edition, 1973, Dunod, Paris.

⁷ von Bertalanffy L., *General System Theory*, George Braziller Inc., New York, 1968, Edition française en 1973, chez Dunod, Paris.

⁸ Tiré du site : <http://jean-louislemoine.developpez.com/livres/modelisation/theorie-systeme-general/>
Réédité 3 fois "la Théorie du système général - Théorie de la modélisation" est devenu introuvable en librairie depuis 1999. Lorsque les PUF ont renoncé à publier une 5eme édition, l'auteur, Jean-Louis Le Moigne, a décidé de mettre à la disposition du public une nouvelle version complétée et remaniée sous forme numérique. Ce document est la 5eme édition révisée 2006.

⁹ Les deux rapports de recherche Inria sont téléchargeables :

Rapport 1988 *Les Cahiers d'Edora* (Alain Pavé)

<https://hal.inria.fr/inria-00075688/document>

Notons que cette approche est efficace pour analyser et modéliser les aspects fonctionnels des écosystèmes, au sens des échanges et de transformations de matière et d'énergie, et beaucoup moins pour la dynamique de la biodiversité. L'exemple des systèmes dits « à compartiments » est un des exemples les plus connus (cf., plus loin).

L'intelligence artificielle et la robotique¹⁰

Rappelons qu'au début de l'informatique, dans les années 1950, on parlait des ordinateurs comme étant des « cerveaux électroniques. En fait, ils permettaient d'effectuer efficacement les fonctions calculatoires, grâce à des algorithmes numériques. Ensuite, avec le développement de mémoires de masse, le stockage, la gestion et le traitement des données diverses ont été grandement facilités pour en arriver au « Big data » dont on parle actuellement. Ensuite un nouveau progrès, dans les années 1980, l'intelligence artificielle est inventée, intégrant plus largement des règles logiques et l'organisation de bases de connaissances. Certains collègues informaticiens parlent plus prosaïquement de nouvelles méthodes de génie logiciel, mais il est vrai que ces techniques singent aussi des capacités intellectuelles nouvelles, caractéristiques du cerveau humain : raisonnement logique complexe, structuration et stockage des connaissances, et permettent réellement des progrès dans la simulation des comportements humains mais aussi animaux. Cela étant, nous sommes loin de simuler le fonctionnement du cerveau humain et nous faisons là la même confusion que dans celui de l'ADN. L'ADN n'est pas l'analogue d'une mémoire informatique dans la mesure où cette molécule a sa propre dynamique et une grande diversité d'expression, ce n'est pas uniquement un support d'information au sens de Turing et Shannon¹¹. De la même façon le cerveau humain a une structure très complexe et très dynamique, évolutive au cours

Rapport 1995 : Les Cahiers d'Edora II (Alain Pavé et Jean-Luc Gouzé)

<https://hal.inria.fr/inria-00074149/document>

¹⁰ Quelques références sur IA et Robotique. La littérature est abondante, il a fallu choisir. Comme l'Académie des technologies a discuté et publié sur ces sujets, je me suis limité à ces références en me souvenant que j'ai aussi un peu publié dans le domaine de l'IA (mais les « Cahier d'Edora » y font allusion).

<http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/10-questions-a-sur/posts/les-robots>

10 questions à G. Sabah sur l'intelligence artificielle. Publication de l'Académie des technologies. Ed. Le Manuscrit, 2009, 52 P.

<http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/communications-a/posts/vers-une-technologie-de-la-conscience>

Par ailleurs, les travaux de J.P. Changeux sont incontournables.

¹¹ L'information au sens de Turing (pour son élaboration et son traitement) et de Shannon (pour sa transmission) et de Brillouin est formalisée mathématiquement, indépendante du support et du moyen de transmission. Elle se suffit en elle-même. L'information génétique a été et est encore largement conçue ainsi. On commence à considérer que le support n'est pas indifférent, à savoir que les propriétés physico-chimiques, biochimiques et la structure spatiale comptent non seulement dans sa transcription, mais aussi dans son contenu même. Pour une discussion, plus générale, récente et avancée sur le sujet, on pourra consulter :

Guiseppe Longo, Guillaume Lecointre, Bernard Walliser. L'information : des sciences sociales à la biologie. In « L'évolution des l'univers aux sociétés » (Dir. Muriel Gargaux et Guillaume Lecointre), Ed. Matériologique, Paris, 2015, 455-476.

de la vie, « matériel et logiciels », « information et structure biologique » sont étroitement imbriqués. Par ailleurs, le cerveau, selon Jean-Pierre Changeux, n'est pas seulement réactif, mais actif. De plus, l'émergence de la conscience peut être expliquée par l'organisation de réseaux neuronaux. Récemment et dans la suite des travaux de Benjamin Libet¹², les relations conscient-inconscient ont fait l'objet de modèles convaincants : l'activité cérébrale est permanente et pour la plus grande part inconsciente (travail de fond), si au cours de cette activité un événement singulier est détecté il arrive au niveau conscient et traité en tant que tel¹³.

Ces progrès récents, ont des conséquences en robotique. Sans les développer, retenons que la robotique est un domaine en pleine effervescence et doit beaucoup à l'étude du vivant. Les robots humanoïdes, longtemps réservés à la science fiction, commencent à devenir une réalité. La question de l'émergence de la conscience dans ces robots est actuellement clairement posée, mais à une échéance encore lointaine. En revanche, qu'un certain niveau de conscience soit implanté et simulé, pourquoi pas ?

Conclusion

En fait, les divers thèmes exposés ci-dessus ne sont pas indépendants. La cybernétique a été le domaine fondateur aussi bien du contrôle automatique des procédés, que de l'intelligence artificielle ou de la robotique. Elle a sans doute inspiré la théorie des systèmes, bien que cette dernière ait été surtout développée pour représenter les échanges de matière, alors que la cybernétique était plutôt consacrée aux échanges d'information. Les deux approches sont complémentaires et on les retrouve ensemble dans les systèmes technologiques où il s'agit de contrôler des transferts et des transformations de matière, par exemple dans les procédés chimiques, où capteurs et actionneurs permettent de les réguler. On pourrait dire que l'analyse des systèmes est aussi efficace pour l'étude de processus naturels, mais inversement que certains concepts de la cybernétique sont également utiles dans ces cas, par exemple pour prendre en compte les rétroactions et plus généralement les autorégulations naturelles, sans oublier les systèmes nerveux. En fait, un tel débat n'a plus lieu d'être, les deux se fondant dans une vision générale de la théorie des systèmes.

Biomimétisme et bioinspiration

Dans les années 2000, deux termes sont principalement utilisés : biomimétique, qui vient de la biomécanique et bioinspiration, provenant de l'informatique. Les frontières ne sont pas encore bien définies, si tant est qu'il faille en faire. Néanmoins à travers les usages, il apparaît qu'on parle plutôt de biomimétisme lorsqu'on construit un dispositif

¹² Pour ces travaux, le plus simple est de se référer au site Wikipedia le concernant (site en anglais, car la version française est trop sommaire) :

https://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Libet

¹³ A propos de la conception contemporaine du cerveau, j'ai pu bénéficier d'une conférence donnée à Lyon, par Joseph Remilleux (physicien) et Dominic Sappey-Marinier (spécialiste l'imagerie cérébrale) et intitulée : *Le Cerveau Quantique : une approche de la conscience ?* Centre Psyrene et Université de Lyon.

technologique ressemblant à une entité vivante ou à un élément de cette entité (par exemple, un robot androïde, un bras mécanique, une machine volante à ailes animées) et de bioinspiration quand on ne se limite pas à imiter une entité, mais aussi des processus biologiques, écologiques et évolutifs ou encore de s'en inspirer pour concevoir de nouvelles technologies sans utiliser des biomatériaux. Par exemple, les algorithmes génétiques miment des processus évolutifs de mutation-sélection pour résoudre des problèmes d'optimisation. En fait, le terme de bioinspiration vient principalement de l'informatique et a diffusé largement après.

Pour une vue globale et actuelle du domaine, on pourra se référer à un ouvrage de synthèse récent¹⁴.

Une façon d'apprécier l'impact du mot et du concept sous-jacent, on peut explorer des bases de données et comparer les occurrences avec d'autres mots apparus récemment. Comme nous l'avons fait pour le mot biodiversité (figure 6.1). Nous avons utilisé la base de données bibliographique du groupe Nature. On voit ainsi que :

- bionique est ancien, régulièrement utilisé, mais peu, en se méfiant des emplois commerciaux (exemple de la société Fuji-Bionics)
- biomimétisme est très peu utilisé et assez réservé à une communauté française. Cependant, il es sans doute promis à un bel avenir (cf. article de l'équipe d H. Arribart dans *Nature Materials*)¹⁵
- Bioinspiré décolle depuis les années 2000, avec une amorce qui ressemble à celle observée pour deux autres mots, des véritables « *success stories* » : bioinformatique et biodiversité.

Une tendance est perceptible, mais dont l'usage n'est pas encore quantifiable, au moins dans le langage, celle d'écoinspiration, qui prolonge celle de bioinspiration, pour les technologies qui prennent comme référence les structures et processus écologiques.

On oublie souvent que la vie inspire d'autres domaines, notamment politiques et économiques jusqu'à confondre discipline scientifique et mouvement politique. Tout cela évite en fait d'en dire plus... Dans un ouvrage précédent¹⁶, et ce n'est évidemment pas le seul, les risques de confusion des genres et les dangers associés ont été soulignés à propos, par exemple, de celles avérées entre religion et politique, justifiant l'ordre social, celle de l'ancien régime des théocratie, entre religion et science à propos du créationnisme. Il n'est donc pas inutile d'en dire quelques mots.

¹⁴ Esmail Jabbari, Deok-Ho Kim, Luke P Lee, Amir Ghaemmaghami, Ali Khademhosseini. *Handbook of Biomimetics and Bioinspiration: Biologically-Driven Engineering*. World Scientific, Singapour, 3 volumes, 2014. Cette série d'ouvrages est, à notre connaissance, qui offre actuellement la vision la plus complète sur le sujet.

¹⁵ Clément Sanchez, Hervé Arribart & Marie Madeleine Giraud Guille. *Biomimeticism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems*. *Nature Materials*, 2005, 4, 277-288 doi:10.1038/nmat1339.

¹⁶ Pavé A. *La course de la Gazelle. Biologie et écologie à l'épreuve du hasard*. EDP Sciences, Les Ulis, 2011.

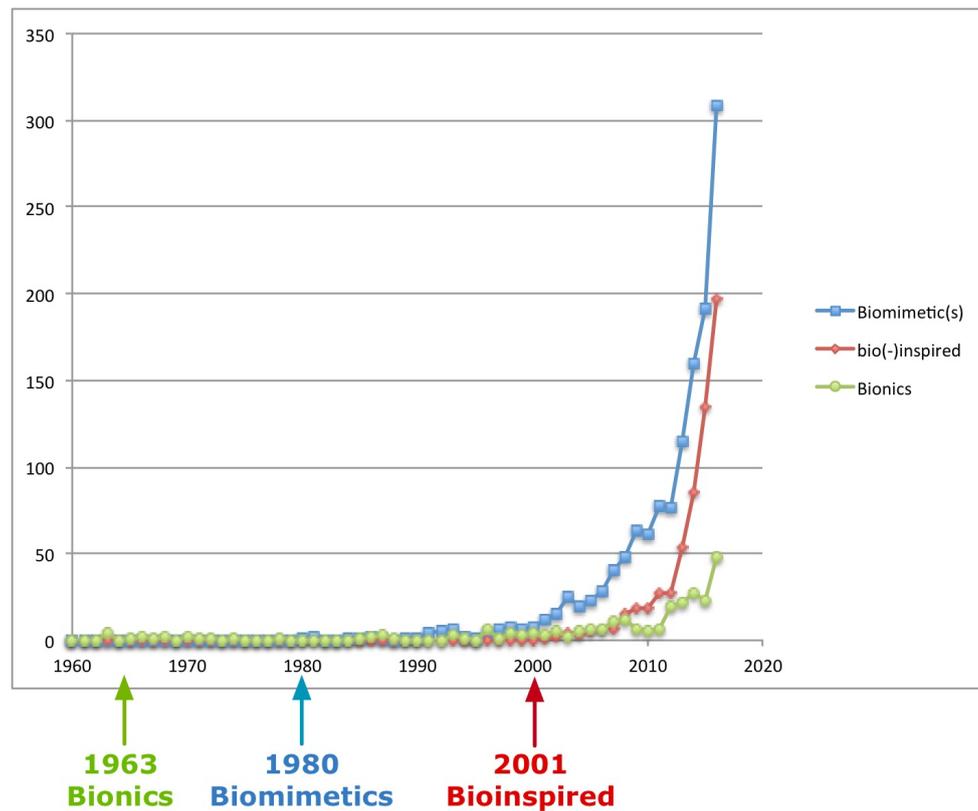


Figure 1. Exemples de néologismes apparus depuis 1990 et porteurs d'idées nouvelles : Biodiversité /Bionics (plus ancien)/ Technologies bioinspirées (Bases de données du groupe *Nature*).

Au total et aujourd'hui, on peut identifier les domaines suivants :

- L'informatique bioinspirée
- Les matériaux bioinspirés
- L'énergétique bioinspirée
- La mécanique bioinspirée
- La chimie bioinspirée
- L'agriculture écoinspirée (ou agroécologie)
- L'économie et les sciences sociale (un peu trop) bioinspirées.

Chaque secteur mériterait un chapitre spécifique, ce n'est pas l'objet de l'ouvrage, aussi nous contenterons nous de présenter quelques exemples.

L'informatique bioinspirée

Ce domaine a été pionnier dans l'utilisation du terme, on peut identifier une diversité de références :

- Emploi du terme « cerveau électronique » devenu désuet
- Intelligence artificielle (années 1980)
- Réseaux neuronaux (idem)
- Robotique (partie logicielle)
- Algorithmes génétiques

- Algorithmes évolutionnistes
- Automates cellulaires
- Systèmes coopératifs (individus-centrés et multi-agents)
- ...

Les performances des algorithmes expliquent cette diversité d'approches. Mais, au delà de ces capacités calculatoires, il peut y avoir une réflexion, en retour, sur les aspects biologiques car ces algorithmes sont aussi quelque part des modèles. Par exemple, on s'interroge de plus en plus sur les performances réelles du cerveau humain qui semblent dépasser de beaucoup, tant dans les capacités mémorielles que calculatoires les plus gros ordinateurs actuels.

Les processus de régulation inspirés de l'étude des métabolismes animaux et végétaux

La cybernétique a été en partie développée sur la réalisation technique de régulateurs. À titre d'exemple nous pouvons prendre l'exemple de la thermorégulation chez les homéothermes (figure 2)

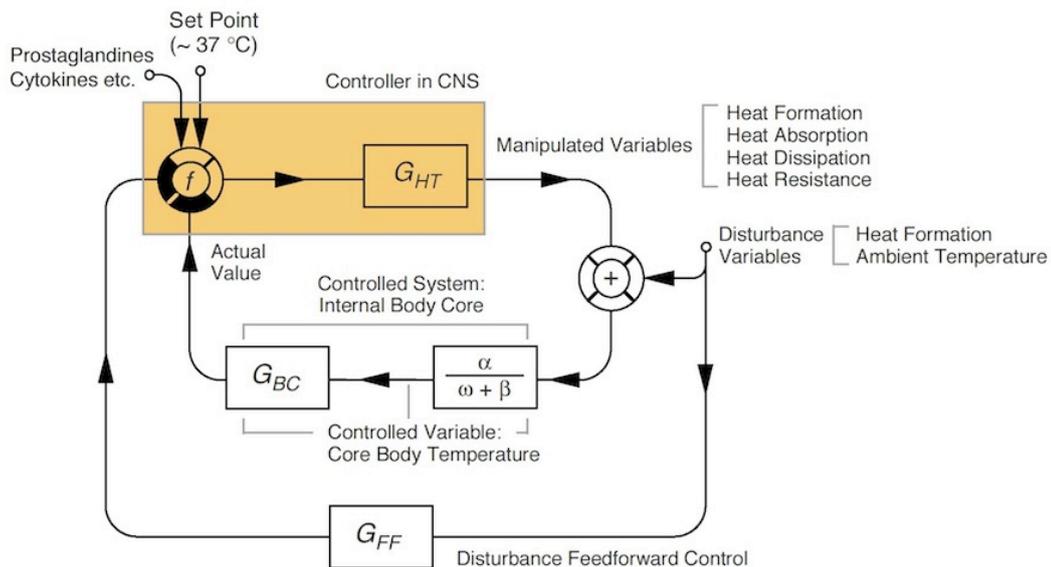


Figure 2. L'un des exemples d'analyse cybernétique appliqué au processus de thermorégulation chez les homéothermes mettant en évidence le système de rétroaction.

Les systèmes à compartiments

Les systèmes à compartiments ont été très développés et utilisés dans les sciences biologiques pour représenter et modéliser les flux de matières entre diverses structures (les compartiments). C'est le cas en biologie médicale et en pharmacologie pour l'étude du devenir des médicaments dans un organisme lors des phases d'étude et aussi pour leurs suivis chez les patients lors de traitements très délicats. Les compartiments sont naturellement identifiables et correspondent aux organes. Dans d'autres cas, ils sont plus diffus, par exemple, lorsqu'on parle des flux biogéochimiques au niveau planétaire. En dynamique des populations, les compartiments correspondent à des statuts démographiques, par exemple de reproducteurs ou de non reproducteurs : juvéniles et

certaines adultes, pas uniquement les individus vieillissants, mais parfois pour des raisons « sociales », par exemple dans des groupe d'animaux à mâle ou femelle dominant (cf. figure 6.4).

Les systèmes à compartiments ont fait l'objet d'une littérature abondante, car ils sont très efficaces pour modéliser une large diversité de situations biologiques, mais pas uniquement. C'est un chapitre important de la théorie des systèmes car ils proposent des modélisations graphiques, des schémas fonctionnelle en « boîtes et flèches » particulièrement parlantes, et des modélisations mathématiques efficaces. La théorie du contrôle y trouve un champ d'application important. Par exemple, dans le domaine médical pour définir des « posologies optimales » à savoir quand et à quelle dose prendre un médicament de façon à ce qu'à la fois la toxicité soit minimale et l'efficacité thérapeutique maximale.

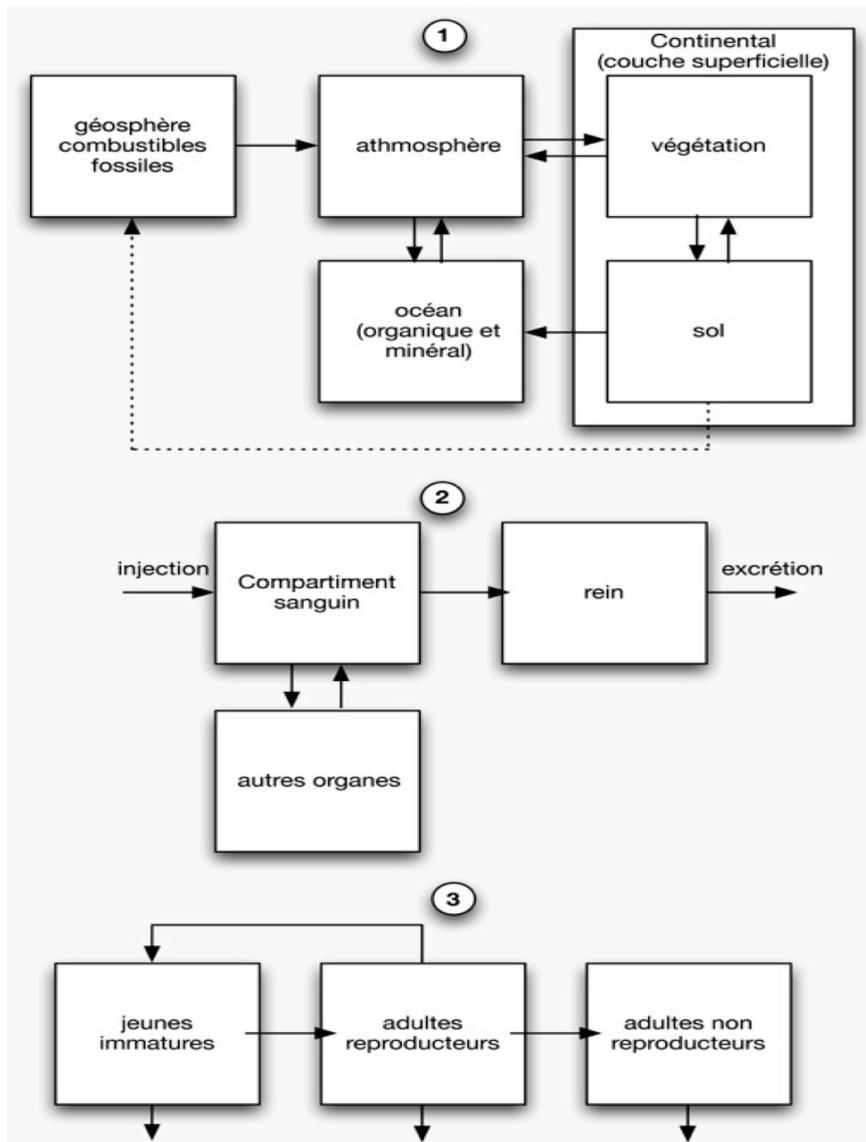


Figure 3. Exemples de systèmes à compartiments : (1) le cycle du carbone dans le contexte climatique, (2) un exemple simple en biomédecine, (3) un modèle de dynamique de population.

Cette démarche démontre qu'une grande diversité, celle des processus du vivant on peut trouver des modèles communs, des sortes d'invariants. Cette remarque est d'ailleurs à portée plus générale : le fait que des classes de modèles s'appliquent à une diversité de situations, du moléculaire à la population et à l'écosystème, montre une certaine unité du monde vivant derrière sa grande diversité. C'est ce que j'ai essayé d'exprimer dans l'ouvrage « Les cailloux de petit Poucet », où précisément les modèles sont présentés comme des sortes de petits cailloux permettant de ne pas se perdre dans la forêt touffue des sciences de la vie et de détecter des processus génériques¹⁷.

Les matériaux

Les exemples qu'on pourrait qualifier de récemment classiques sont la fleur de lotus, pour des propriétés hydrophobes et de la patte du gecko pour ses propriétés adhésives.



Figure 4. La fleur de lotus et la patte du gecko, deux cas typiques qui ont conduit à des matériaux bioinspirés, hydrophobes, pour le premier exemple, et adhésifs pour le second.

La fleur de lotus a une surface hydrophobe. Cette propriété est due à de microscopiques protubérences ciliées. Cette « solution naturelle » a été imitée pour faire des vitres autonettoyantes et aussi pour résoudre les problèmes de circulation des fluides dans les microcanalisation des « *labs on chips* » (laboratoires sur puces).

Le gecko est un petit lézard domestique largement répandu dans la zone intertropicale. Il se déplace aisément sur des surfaces verticales (murs) et même sur les plafonds. Cette adhérence est due à des ventouses sur les doigts et aux propriétés locales de la peau. Il a fallu quelque temps pour comprendre que cette propriété est due à une nanostructure qui permet d'utiliser des forces de Van der Waals localement faibles et à très faible portée mais amplifiées par le nombre et la texture.

Chimie bioinspirée

La chimie des substances naturelles biologiquement actives s'appuie sur les structures moléculaires des produits en question, qui sont ensuite modifiées pour augmenter

¹⁷ Pavé A. *Les cailloux du Petit Poucet*. EDP Sciences (2015)

l'efficacité et diminuer la toxicité ou encore pour trouver des voies de synthèse. Par exemple, le taxol, produit par l'If est un anticancéreux. La production à partir d'extraits naturels est très limitée (feuilles de l'If). En cherchant des précurseurs et en étant guidé par la structure du taxol, Pierre Potier et son équipe ont trouvé le taxotère qui s'est avéré plus efficace et plus facile à produire.

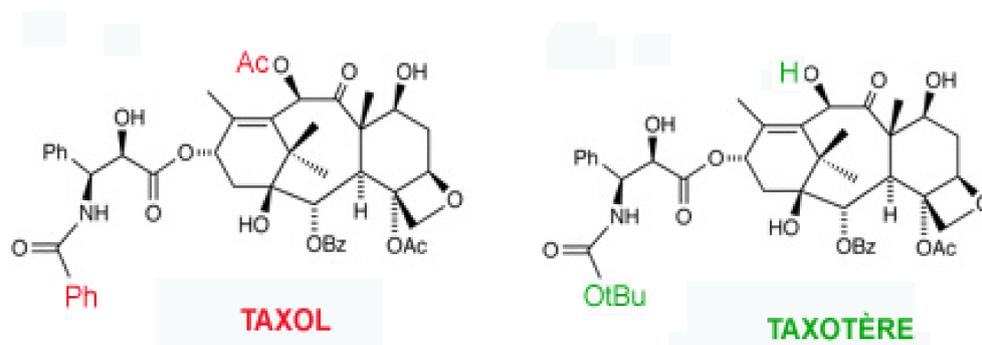


Figure 4. Le taxol, extrait de la feuille de l'if et le taxotère, molécule trouvée lors de la recherche sur la synthèse du taxol.

C'est sans doute dans le domaine du médicament qu'on trouve le plus d'exemples de chimie bioinspirée. Il est bon d'en dire un peu plus, car c'est évidemment intéressant en termes de santé individuelle et collective. C'est aussi et de ce fait, économiquement important, voire considérable.

Stratégies de recherche de substances naturelles biologiquement actives

Une grande partie des médicaments proviennent de pratiques dites traditionnelles, comme l'aspirine, et de découvertes fortuites, comme la pénicilline. Les sources principales sont d'abord les végétaux, puis les bactéries et des animaux. La découverte de telles substances relève de plusieurs approches qu'on peut qualifier d'une part de classique, et, d'autre part, de bio ou d'éco guidées. La question de la biodiversité est centrale.

Stratégies classiques : ethnologiques, échantillonnage systématique

La démarche la plus ancienne relève de ce qu'on appelle aujourd'hui l'ethnopharmacologie, c'est-à-dire détecter, dans les pratiques traditionnelles, l'utilisation de plantes pour soigner des états pathologiques. Ce fut d'ailleurs sur ce type d'exemple que les débats sur la « Convention sur la diversité biologique » ont été initiés à la conférence de Rio, en 1992. Cela étant, ce type de méthode ne conduit pas toujours à des percées significatives, par exemple l'effet placebo peut faire espérer à une vertu curative, alors qu'il en est rien. Parfois, l'utilisation traditionnelle traite d'une pathologie alors que la recherche mène à trouver une autre propriété médicamenteuse. L'exemple de la pervenche de Madagascar est l'exemple classique, très utilisée dans les médecines traditionnelles pour soigner une diversité de maladie, elle contient des alcaloïdes ayant

des propriétés anticancéreuses, notamment la vinblastine, largement valorisée par une firme pharmaceutique. Le débat a porté sur le juste retour vers les peuples qui occupent les territoires en questions et qui en ont une utilisation pratique cataloguée dans les « savoirs » traditionnels. Nous n'entrerons pas dans ce type de débat sauf de dire qu'ils ne sont pas simples. Par exemple, à l'exception des cas d'endémismes très importants, les plantes se trouvent dans une diversité de lieux géographiques peuplés par des populations différentes, alors comment distribuer les bénéfiques ? Pourrait-on considérer qu'il s'agit d'un bien commun à gérer aussi de façon commune ? Beaucoup de spécialistes de diverses disciplines consacrent du temps à cette importante question. Il reste à signaler que les exemples d'utilisation de ressources naturelles vivantes, parfois frauduleuse, a conduit au concept de « biopiraterie » déjà évoqué, dont on peut parfois prouver la réalité et dans d'autres cas semblent relever de phantasmes collectifs. Enfin, l'utilisation traditionnelle n'est pas toujours sans danger, les plantes en question sont souvent toxiques et une mauvaise préparation peut être mortelle, curieusement on parle très peu de ces accidents¹⁸. Il n'est pas de mon propos de citer des « anecdotes » révélatrices, qui n'ont pas valeur de démonstration, mais j'ai pu mesurer lors de ma carrière la part de l'idéologie et du phantasme dans ces discours. Ici encore, on note que la biodiversité a des facettes positives, mais d'autres négatives et ce n'est rendre service à personne que de ne pas le reconnaître et l'évaluer.

Un autre approche est de faire un échantillonnage systématique sur un territoire limité et ensuite de tester systématiquement des extraits (screening). Le test direct sur des organismes malades et sur toutes les pathologies n'est pas possible. On fait donc des choix, par exemple de ne tester que des propriétés antibiotiques ou anticancéreuses, mais la combinatoire reste énorme. Les résultats sont tempérés. On peut néanmoins regretter que certaines initiatives n'aient pas pu être concrétisées, faute de financement. Cela a été le cas de l'entreprise Entomed, dont l'idée de départ se fondait sur la connaissance du système immunologique des insectes (travaux de Jules Hofmann, couronnés par le prix Nobel). Une importante campagne de recherche systématique a été menée, notamment en Guyane, les premiers résultats étaient encourageants et les équipes compétentes, mais il faut du temps pour en arriver à valoriser, or les financiers ont le regard rivé sur le court terme et cette société a dû fermer en 2005¹⁹ dans une certaine et coupable indifférence. Cet exemple montre que le développement d'idées nouvelles n'est pas facile. Un autre exemple, lui stabilisé, est celui lancé par le

¹⁸ Par exemple, en Guyane, une enquête a été menée à ce sujet par deux chercheurs de l'IRD, ethnobotanistes et ethnopharmacologue, des excellents spécialistes de la question : le nombre de décès n'est pas négligeable (plus de 10 sur la période 1993-2000).

Enquêtes sur les intoxications par les plantes en Guyane française : aspects ethnobotaniques et médicaux. Elodie Dorangeon et Christian Moretti, in « Des sources du savoir aux médicaments du futur » (dir. Jacques Fleurentin; Jean-Marie Pelt et Guy Mazars), IRD éditions, 2002, 358-361.

<http://books.openedition.org/irdeditions/7257?lang=fr>

Une présentation générale est disponible sur le site :

<http://medecinetropicale.free.fr/cours/intoxplante.pdf>

Il s'agit d'un cours de médecine tropicale proposé par Pierre Aubry, professeur de médecine.

¹⁹ <http://www.usinenouvelle.com/article/entomed-ferme-ses-portes.N10871>

Laboratoire Pierre Fabre à Toulouse où la robotisation permet d'automatiser les essais. La collaboration avec le CNRS est très efficace (laboratoires communs et collaboration avec l'Institut de Chimie des Substances Naturelles, fondé par Pierre Potier).

Mais alors où est la bioinspiration ? En fait dans ces démarches on arrive, avec un peu de chance²⁰, à détecter un extrait actif. Cet extrait est souvent un mélange d'espèces chimiques qu'on va isoler par des méthodes de séparation physico-chimiques. Une fois identifiée une espèce active, on passe à l'étude structurale, l'idée est de comprendre ce qui, dans la structure, explique l'action thérapeutique et de trouver des voies de synthèse ou d'hémisynthèse, à savoir à partir de précurseurs plus faciles à produire que la molécule active, mais aussi de fabriquer des variantes avec un double objectif : diminuer la toxicité et augmenter l'efficacité. La démarche qui a conduit au taxotère a été de ce type : le précurseur est plus facile à produire à partir de l'écorce de l'arbre que de ses feuilles.

A retenir que l'industrie des parfums a une démarche analogue, sauf que les tests sont conduits par des experts : les « nez ». Par exemple, le linalol est une base du célèbre parfum « N° 5 de Chanel ». La synthèse et l'hémisynthèse du linalol est même devenu un « cas d'école » dans les formations de chimistes. Les produits de synthèse sont très courants dans l'industrie des parfums, cette démarche évite de surconsommer les produits naturels, comme le bois de rose, et donne plus de précision dans l'élaboration délicate des fragrances, qui sont très soigneusement dosées.

Recherche bio et éco-guidée

Beaucoup de processus biologiques et écologiques sont sous la dépendance de signaux chimiques ou plus généralement de métabolites qui exercent des effets locaux ou à distance. Ainsi les fourmis se déplacent en balisant leur chemin avec des phéromones, certains arbres agressés par un ravageur libèrent une substance volatile qui détecté par leurs congénères les conduit à synthétiser des substances de défense. Nombreux sont les animaux qui secrètent du venin, soit à des fins prédatrices, soit pour leur défense, rarement pour le « fun », mais sait-on jamais ! La compréhension des phénomènes intègre cette chimie et dans la foulée de s'en inspirer pour d'autres utilisations, par exemple de répulsifs ou de l'utilisation des propriétés toxiques à fortes dose, par exemple des venins, qui peuvent, à faible dose et plus ou moins transformés, devenir des substances médicamenteuses. Ce type de démarche a été au centre de la stratégie proposée par le programme Amazonie du CNRS lors d'une réunion à Kourou en octobre 2009. Les aléas des budgets et des politiques institutionnelles n'ont pas permis de soutenir à la hauteur souhaitée les projets sélectionnés. Citons quand même le soutien à

²⁰ je suis obligé d'utiliser ce mot car cette recherche se fait un peu au hasard, mais attention, ce n'est pas de la sérendipité. En effet ce qu'on appelle sérendipité est la découverte fortuite, non attendue, non espérée, alors qu'ici, si la démarche compte une large part d'aléatoire, le résultat est attendu ou du moins espéré. En revanche, pour la pénicilline on peut parler de sérendipité.

des équipes travaillant sur les venins qui ont pu, par la suite, décrocher un projet européen intitulé Venomics²¹.

Énergie

Encore ici, nous n'évoqueront que des exemples. Le cas le plus flagrant est le captage de l'énergie solaire et sa transformation en molécules vecteurs d'énergie. On pense bien sûr à la photosynthèse : production d'hydrogène par des « feuilles » minérales bioinspirées ou par des procédés biomimétiques, en utilisant directement l'énergie solaire. Nous nous limiterons ces exemples, non seulement pour essayer de cerner l'essentiel, mais aussi parce que l'énergie provenant de notre étoile est considérable²² par rapport à ce que nous produisons et consommons.

La reproduction, voire l'amélioration de la photosynthèse est une voie qui relève du biomimétisme. Celle qui utilise d'autres voies, par exemple de catalyse chimique, relève plus de la bioinspiration. D'ailleurs à ce point de notre discours, on peut convenir que le biomimétisme est une catégorie particulière de la bioinspiration. Plusieurs équipes en France mènent des recherches sur ces sujets, par exemple à Grenoble, à l'université, au CEA et au Collège de France, sous la responsabilité de Marc Fontecave²³). Parmi les autres équipes, on peut citer aussi celle de Daniel Nocera au MIT dont les travaux portent sur la conception d'une feuille artificielle produisant directement de l'hydrogène moléculaire (figure 5).

²¹ La presse, notamment les journaux scientifique, s'est fait l'écho de la création de ce consortium porté notamment par la petite société VenomeTech, le CNRS et le CEA, avec plusieurs partenaires européens. Parmi les articles publiés sur le sujet, signalons celui de National Geographics (25/11/2013) :

<http://www.nationalgeographic.fr/8394-fabriquer-des-medicaments-grace-aux-500-venins-repertoires/>

²² D'après Wikipédia, mais ce sont des données dont je disposai par ailleurs, la Terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt ($6,12 \times 10^{11}$ gigawatt/h). Gardons le joule comme unité d'énergie et le joule par seconde comme unité de puissance, nous recevons donc du soleil $1,7 \times 10^{17}$ joules par seconde, dont 122×10^{17} sont absorbés alors que le reste est réfléchi. L'énergie totale absorbée sur une année est donc de $3\,850 \times 10^{21}$ joules, la photosynthèse capte environ 3×10^{21} J (0,078%), le vent contient $2,2 \times 10^{21}$ J (0,057%), et l'ensemble des usages humains de l'énergie, $0,5 \times 10^{21}$ J (0,013%) dont $0,06 \times 10^{21}$ J (0,00156% du total et 12% des usages) sous forme d'électricité. Tout cela pour dire que notre production et notre consommation et extrêmement faible par rapport à l'énergie incidente.

²³ <http://www.college-de-france.fr/site/marc-fontecave/biographie.htm>

<http://fondationecologiedavenir.fr/index.php/13-interviews/21-interview-de-marc-fontecave>

Rutherford A.W., De l'hydrogène à partir du soleil et de l'eau. CLEFS, CEA, 51, 2005, 49-51.

La feuille artificielle en action.

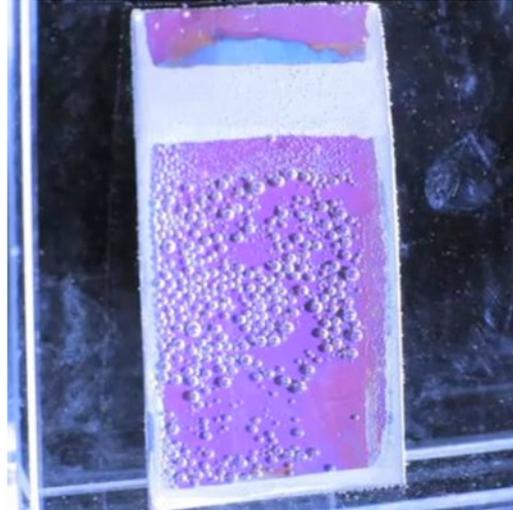


Figure 6.6. Feuille de silicium portant des catalyseurs à base de cobalt (Co), de nickel (Ni) et de Molybdène (Mo) (Daniel Nocera, MIT²⁴). Cette feuille plongée dans de l'eau et éclairée produit sur une des faces de l'hydrogène et de l'autre de l'oxygène, une sorte d'électrolyse locale.

Mécanique : drones insectes, arbres et pylônes

Le vol des oiseaux a été pendant longtemps une référence, en fait comme nous l'avons signalé depuis Léonard de Vinci. Bien qu'ils n'aient pas donné lieu à des réalisations pour les phases ailes battantes, le vol plané a été la base du développement des avions. Récemment, on s'est intéressé au vol des insectes pour faire des microdrones. Ainsi, la direction générale de l'armement soutient un projet de recherche sur le sujet : REMANTA, développé par l'ONERA²⁵.

On peut également citer le projet Robobee²⁶ développé à l'université de Harvard.

Dans un tout autre domaine, celui des structures verticales, les arbres peuvent également être des sources d'inspiration. Il est d'ailleurs très intéressant de constater que des spécialistes de la mécanique du bois, en tant que matériau « multi-usage », du

²⁴ <http://www.sciencemag.org/content/334/6056/645.abstract>

²⁵ <http://www.onera.fr/dcps/remanta>

²⁶ Robert Wood, Radhika Nagpal et Gu-Yeon Wei, « The Robobee Project Is Building Flying Robots the Size of Insects », *Scientific American*, vol. 308, no 3, 11 mars 2013, p. 60-65.

<http://robobees.seas.harvard.edu>

<http://www.scientificamerican.com/article/robobee-project-building-flying-robots-insect-size/>

http://www.scientificamerican.com/article/robobees-takes-off/?WT.mc_id=SA_printmag_2013-03

meuble à la charpente, de l'artisanat d'art à l'objet industriel sophistiqué, soient venus à s'intéresser à l'arbre sur pied, à l'arbre dans son milieu forestier.

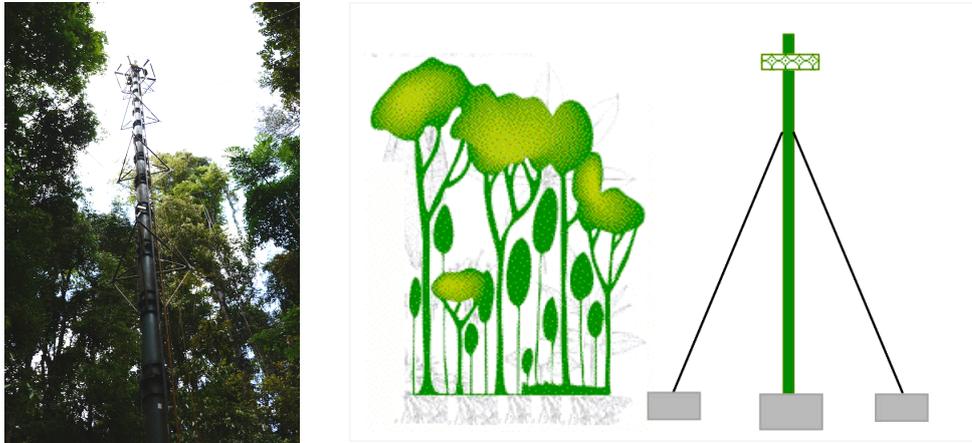


Figure 6.7. Structures verticales : les pylônes du dispositif d'accès à la Canopée du camps des Nouragues en Guyane sont métalliques avec des renforcements, alors que les arbres et même hauteur sont des structures verticales plus légères bien qu'ils aient une plus forte prise au vent et à la pluie. La mécanique de l'arbre sur pied peut donner des idées sur la fabrication de structures verticales légères et très résistantes.

Pourquoi un arbre tient-il debout ? Une question qu'on peut se poser, que nous nous sommes posés en Guyane lorsque nous avons érigé trois pylônes métalliques nécessaires au montage du dispositif COPAS d'observation de la canopée. Juste un peu plus haut que les arbres environnant, avec moins de prise au vent, nous avons été obligé de les ancrer solidement dans le sol, de les haubaner et de les renforcer. Les arbres du voisinage d'élèvent fièrement sans de tels accessoires (figure 6.7).

Pilotage de systèmes techniques : chauves-souris et missiles

Outre la cybernétique et la systémique, les processus inspirés du comportement animal ont été développés. C'est, par exemple, le cas du guidage des missiles fondés sur l'analyse du vol des chauves-souris insectivores. Beaucoup de proies exhibent des comportements aléatoires face à un prédateur, pour le dérouter, c'est le cas de la gazelle face à son prédateur préféré, le guépard, ou d'insectes pour éviter de servir de plat de résistance à des chauves-souris. Réciproquement, les chiroptères concernés adoptent une trajectoire dite de « constant bearing » (gisement constant), efficace pour des proies ayant un comportement erratique autour d'une direction moyenne de déplacement. La chasseresse, plutôt que de fondre sur sa proie, suit une trajectoire presque parallèle à cette direction et diminue progressivement la distance par rapport à celle de la proie. Elle est aidée en cela par son système d'écho-location particulièrement efficace²⁷. Cette

²⁷ Ghose K. Horiuchi T.K., Krishnaprasad P.S. Echolocating bats use a nearly time-optimal strategy to intercept prey. *Proc. Bio Sci*, 1995, 261 : 233-238.

observation a inspiré les concepteurs de missiles pour l'interception de cibles volantes adoptant des trajectoires plus ou moins erratiques (avions de chasse ou autres missiles).

Conception et gestion d'écosystèmes : technologies écoinspirées

On peut également déceler l'émergence technologies « écoinspirées ». L'exemple des écosystèmes est connu, à travers les flux de matières et d'énergie, mais aussi comme exemple d'utilisations de l'aléatoire, pour concevoir des systèmes durables à partir de la notion, quelque peu hérétique, de système auto-désorganisé. Nous en avons présenté un exemple à propos de la critique de la loi aire-espèces dans le chapitre 3 (figure 3.5). Les grandes forêts naturelles ont souvent une structure interne plutôt aléatoire, diversifiée hétérogène, dont on a vu qu'elle facilite leur résilience. Par exemple, nos forêts souvent monospécifiques, aussi fréquemment équienne (arbres de même âge), pourraient être progressivement remplacées par des peuplements mélangeant des arbres d'espèces différentes, plantés à des années successives. Cela étant, on comprend qu'il faut simultanément concevoir des modes de gestion et d'exploitation différentes.

En fait, nous devons penser qu'il existe une gradation entre des systèmes écologiques laissés à leur fonctionnement propre (ou spontané), comme les grandes forêts intertropicales, et des systèmes très artificialisés, comme les villes, les jardins ou même nos campagnes et nos forêts. Cela étant, on ne contrôle pas tout. Par exemple, comme nous l'avons déjà évoqué, la nature « sauvage » reconstituée, une sorte de « jardin de Julie », au sein de l'ENS de Lyon comptait au départ 250 espèces de plantes (il y a une dizaine d'années), maintenant, il y en a plus de 600, 350 s'étant installées spontanément... Comme quoi, il y a des lieux où la biodiversité augmente singulièrement, de façon naturelle. Dans quelle mesure faut-il contrôler cette diversification progressive et comment ?

Extensions : quand l'évolution inspire le politique et l'économique

Dans la foulée des écrits de Charles Darwin, Herbert Spencer, un philosophe et sociologue britannique, Herbert Spencer, applique les idées développées pour l'évolution biologique en général à celle des sociétés humaines. Il invente de ce fait ce qui sera appelé le « darwinisme social ». L'idée est claire : les sociétés humaines évoluent de façon spontanée, naturelle de la même façon que les autres êtres vivants et se structurent spontanément. Il n'y a donc pas lieu d'intervenir, de réguler, de mettre en place ou de maintenir des institutions, de soutenir spécifiquement les « non adaptés », en caricaturant à peine : les pauvres le sont parce qu'ils ne sont pas adaptés. Parmi les mécanismes en œuvre, la compétition est identifiée et privilégiée. C'est elle qui fait émerger le meilleur, comme dans la nature, encore que le meilleur est une catégorie anthropique. Cette vision a été reprise régulièrement, approfondie, par exemple par Friedrich Hayek, qui fait le constat juste d'une grande complexité de nos systèmes sociaux et économiques, et qui propose dans la foulée de laisser ces systèmes évoluer spontanément, encore une fois, comme dans la nature, et donc de ne pas réguler, voire de déréguler, sous-entendu qu'intervenir ne peut que contrecarrer la dynamique globale

résultant de la combinaison des comportements individuels. Là encore la compétition est vue comme le mécanisme clé. On trouve ce type de position dans les réflexions de l'école d'économie de Chicago (Milton Friedman), dans la politique mise en place dans les années 1980 par Margaret Thatcher et Ronald Reagan, et aujourd'hui encore très largement dans le monde, au point que la sphère politique pense que c'est une économie débridée (au sens étymologique, sans bride, sans contrainte) qui spontanément va conduire à l'amélioration de la vie, du bonheur pour le plus grand nombre (l'idée géniale de Jeremy Bentham) sur la planète et participer à la structuration spontanée de nos sociétés. Il suffit de gérer mollement. Et pourtant, force est de constater que cela ne marche pas vraiment, pas plus que des systèmes très dirigistes, très contraignants, comme ce fut le cas en Union Soviétique, à cela près quand même qu'une part importante de liberté subsiste, mais que nous constatons une espèce de chaos généralisé. Hé oui ! En reprenant les termes de Donald Worster, l'écologie n'est pas qu'ordre, elle peut-être aussi, et plus fréquemment, chaos.

En fait, on peut d'abord remarquer que « naturaliser les humains et leurs sociétés » ne correspond pas à une réalité : il faut intégrer les particularités de ces êtres vivants qui ne sont pas mus uniquement par leurs fonctions biologiques. Ensuite, privilégier certains mécanismes évolutifs, comme la compétition, ne correspond pas non plus à une réalité : la coopération est au moins aussi importante, dans la nature et singulièrement chez les humains. Sans parler du rôle de l'aléatoire qui est mal intégré et contrairement à ce qu'on pourrait penser, n'est pas qu'un facteur de désordre, car en permettant d'explorer des éventualités non prévues à l'avance est aussi facteur de progrès. On pourrait multiplier les exemples. Ne soyons pas innocents beaucoup de ceux qui prônent une faible régulation, ou même une dérégulation, et simultanément l'accroissement de la compétition en ne parlant que de compétitivité, au détriment de la collaboration et de l'établissement ou du renforcement des liens sociaux qui vont avec, ne sont pas sans arrière pensée, mais qui traduisent aussi souvent une grande naïveté²⁸... Et l'on oublie souvent la durée sur laquelle s'étale l'évolution biologique, et même, comme on l'a vu que des processus naturels peuvent l'accélérer et la contrôler.

Un autre biais a été celui de l'eugénisme, qui a suivi de peu le darwinisme social. Un dénominateur commun, celui de fustiger les non adaptés (à quoi ? à la société ultralibérale pathologiquement compétitive et inégalitaire ?) et alors d'essayer de corriger la trajectoire en limitant leur reproduction en pensant que là est la source et non pas le contexte social. Alors, dans les versions les plus extrêmes on stérilise, on élimine. On peut aussi favoriser la reproduction de ceux et celles qu'on pense les meilleurs. Ne pas penser que ce type de position, dans la version « moyenne », n'existe plus, nous l'avons déjà mentionné à propos de Paul Ehrlich. Là il ne s'agit pas d'une analogie de nature, mais s'appuyant sur la sélection non pas naturelle, mais artificielle, des améliorateurs de variétés animales. C'est une autre facette, quelque peu sombre, de la

²⁸ Très curieusement dans les procédures d'évaluation scientifique, très compétitives, on prête une attention à la capacité des équipes à établir des collaborations. Un peu de sagesse dans une folie collective !

bioinspiration. Les humains ne sont ni des gazelles de la savane africaine, ni des troupeaux de vaches... en tout respect pour ces animaux !

Déjà à partir de ces remarques on détecte une lecture partielle et partielle du fait évolutif et biologique, sans s'interroger sur la pertinence de l'utiliser à des fins politiques. Il n'en demeure pas moins que nos sociétés évoluent avec ce qui caractérise l'évolution à savoir des ruptures, l'erreur est de ne pas intégrer dans notre conception de cette évolution les caractéristiques particulières des humains. La nature n'a pas de conscience au sens des humains qui peuvent penser et maîtriser en partie les dynamiques sociales et les changements de société. On le fait d'ailleurs, même ceux qui prônent un darwinisme social à la mode d'aujourd'hui.

La bioinspiration est utile, mais ce n'est pas la panacée. Quand il s'agit de technologies on peut maîtriser le processus et contrôler les conséquences, quand il s'agit du fait social, c'est beaucoup plus difficile et souvent la volonté et le courage manquent.

Prenons un autre exemple, celui de l'écologie. Quand on analyse, même sommairement, les discours de ceux qui s'y réfèrent, on note des biais analogues, par exemple, d'un côté on animalise les humains qui ne seraient que des animaux parmi d'autres, et inversement on humanise des animaux. On peut tout à fait être d'accord pour ne pas massacrer les requins, peut-être quand même en veillant sur notre sécurité et celle de nos enfants ! Sans oublier qu'on ne discute jamais avec eux, comme le suggérait une banderole sur l'Institut océanographique en évoquant un malentendu entre les hommes et les requins... Tout cela n'est pas irréductible, il faut simplement savoir d'où on parle et pourquoi : le malentendu ne peut pas être une catégorie scientifique, au mieux celui d'un sentiment personnel ou collectif dans une association, pour préserver ce groupe d'animaux, si nous l'estimons nécessaire. La bioinspiration et l'analogie anthropique, là encore, montrent des limites.

En tout état de cause, le vivant n'a pas fini de nous étonner et de nous inspirer pour le meilleur et pour le pire.

La biologie techno-inspirée ou socio-inspirée, des liaisons dangereuses ?

Inspiration dans un sens, pourquoi pas dans l'autre ? En pratique, c'est ce qui s'est passé et ce qui se passe encore. Descartes et pas mal d'autres voyaient dans les êtres vivants des sortes de mécaniques, les automates de Vaucanson traduisaient une bioinspiration, mais l'analogie fonctionne dans l'autre sens. Il est par exemple tentant d'assimiler les neurones à des microprocesseurs, les axones et les dendrites à des câbles et les synapses à des connexions et alors le cerveau à un ordinateur. Cette analogie qui a marché un moment est battue en brèche : les « calculs » semblent délocalisés. La séparation logiciel-matériel, comme on l'a déjà signalé ne marche pas au niveau du cerveau. La séparation du corps, élément mécanique, matériel et de l'esprit, de l'âme immatérielle, une sorte de logiciel, était admise, bien avant l'invention des ordinateurs. Elle ne semble pas correspondre à ce qu'on trouve aujourd'hui, tout est intriqué.

Le fameux ADN est ainsi analysé et vu comme une sorte de ruban magnétique, une « mémoire morte ». On sait que la réalité est un peu plus subtile. Ainsi la simple transcription en ARN n'est pas une sorte de copie, tant est qu'un gène peut être éclaté et qu'il faut déjà coller les morceaux. Ensuite la traduction en séquence protéique est un processus moléculaire qui ressemble peu à ce qui se passe dans un ordinateur. La molécule elle-même n'est pas un simple support d'information au sens classique car sa structure tridimensionnelle, ses transformations multiples, ses propriétés physico-chimiques, jouent un rôle encore à préciser. Ce n'est pas un support neutre d'une information génétique, c'est un élément actif d'expression d'une information qu'il faut bien qualifier de biologique.

Entre économie et écologie, il y a aussi des transferts de concepts. On parle d'économie d'un organisme (où est la monnaie ?), de stratégie démographique d'une espèce (déjà évoqué : où est le plan de bataille ?), de bénéfice, de profit, etc.

On pourrait multiplier les exemples. En fait, ce type d'analogie n'est pas à rejeter a priori, son utilité a été montrée, mais il faut savoir s'en débarrasser lorsqu'elle n'est plus pertinente et surtout être conscient qu'il s'agit d'images pour aider à penser et ne représente en aucune façon une réalité tangible. Le danger est de réduire le vivant à une mécanique plus ou moins sophistiquée, ou à introduire subrepticement des dimensions propres aux sociétés humaines pour parler des objets de nature. Nous en avons déjà discuté, mais il est bon de le rappeler à ce niveau.