

Le Biomimétisme : convergence de disciplines

Introduction : qu'est-ce que le biomimétisme ?

Le domaine du biomimétisme est interdisciplinaire par nature. Il consiste à comprendre la structure et la fonction de systèmes biologiques du point de vue biologique, physique, chimique et des sciences des matériaux d'une part, et à proposer des concepts qui permettent aux ingénieurs de fabriquer à partir de ces découvertes des matériaux innovants et des machines originales d'autre part. C'est pour cette raison que nombre d'entre nous lui préfèrent les termes de « *biologically inspired technology* », qui, loin de constituer un simple copier-coller, est plus fidèle à l'esprit de la démarche. Le terme de bionique, accepté en Allemagne et un peu moins dans les pays anglophones, est peu usité en France, cela étant probablement dû à l'image de l'homme bionique, repoussante.

Les matériaux biologiques, bien que formés sur la base de substances très répandues, sont particulièrement judicieusement organisés, depuis l'échelle nano jusqu'à l'échelle macro, et souvent de manière hiérarchique. Les propriétés physico-chimiques des matériaux biologiques, les relations complexes établies entre les structures de surface et l'environnement donnent à ces matériaux de nombreuses fonctions. Cette modularité et hiérarchisation à de nombreuses échelles permettent à la Nature de démultiplier les fonctions de quelques substances de base. Parmi les exemples les plus frappants, on citera la superhydrophobicité, les surfaces autonettoyantes (l'effet lotus) ou la réduction de frottement (voir les dernières combinaisons de nageurs), l'adhésion réversible (pattes de Geckos), les mécanismes

anti-réflexion inspirés de l'œil des insectes, ou les colorations structurales (issues de l'étude des couleurs chatoyantes des insectes ou de la nacre). D'autres thématiques très en vogue concernent la mécanique, tels que les ailes battantes inspirées du vol des insectes, l'auto-réparation inspirée des végétaux ou encore les senseurs miniaturés, les MEMS (pour Micro-electro-mechanical systems). Des robots d'architectures variées, aux capacités locomotrices diverses (marche, vol, nage), sont également développés pour des applications allant de la surveillance dans des endroits confinés, à la recherche de mines, des opérations biomédicales à l'exploration spatiale.

La démarche en biomimétisme est assez proche de celle de la bioprospection de substances naturelles, si ce n'est que l'ingénieur est plus à la recherche d'un concept que d'un produit fini. La diversité des solutions offertes par la Nature ne peut être appréhendée par les ingénieurs seuls. La participation des biologistes, en particulier pour traiter de la question du lien entre structure et fonction, est primordiale. Parmi les cas spectaculaires d'échec des ingénieurs partis trop vite dans l'implémentation de procédures mal étudiées et mal comprises, on pourrait citer les tentatives fort coûteuses de produire des fils d'araignées : les équipes ont cru pouvoir se passer du fait que le fil est un produit issu de multiples glandes excrétales, chacune et de manière simultanée, des fils différents qui se tressent : le fil ultime est tout autant une structure qu'un matériau ; le système de glandes de l'araignée est bien éloigné de la tétine de vache ! Il importe donc que les biologistes soient pilotes ou co-pilotes de ces démarches, en particulier à leurs débuts.

Un domaine en pleine expansion

Domaine en pleine expansion, le biomimétisme est particulièrement développé aux USA et en Chine. Les diverses branches de la recherche au sein ou sous la direction de l'armée américaine, principalement via la DARPA, l'ONR et l'Air Force auront beaucoup contribué à développer ce domaine, et en retour beaucoup fait pour maintenir des pans entiers de la zoologie et la botanique. L'intérêt de la Chine est plus récent, mais la vitesse à laquelle ce pays s'est emparé du

domaine laisse songeur. Au niveau Européen, le programme IST-FET aura fait un travail pionnier et de longue haleine pour aider le domaine à s'organiser au niveau du continent ; il est encore trop tôt pour faire un bilan, mais on peut craindre que l'effort ne soit pas rentabilisé si les structures nationales ne prennent pas le relais au moment où ce programme estime, à juste titre je crois, avoir fait assez pour créer un noyau de cristallisation à l'échelle nécessaire, l'Europe.

Au niveau national, l'analyse du cas français est faite dans le dernier paragraphe de cette contribution, et on s'arrêtera un instant sur l'Allemagne, place forte par excellence. Des instituts entiers, des groupes de recherche bien établis et riches, des GDR financés à hauteur de plusieurs millions d'euros par an, des masters focalisés sur ce domaine ou encore des sociétés savantes se complètent harmonieusement. L'Allemagne est le seul pays qui se soit doté d'une feuille de route pour ce domaine (il est possible que les Chinois en aient conçu une). On y lit que le nombre de publications et brevets augmente spectaculairement, que le nombre de projets soutenus par plusieurs organismes de recherche a augmenté en proportion depuis les années 2000, que le nombre de congrès, de prix technologiques ou académiques est impressionnant et que le nombre de parcours universitaires avec la bionique comme spécialité a littéralement explosé : plus de 10 universités ont un tel parcours, et il est même possible d'étudier la bionique comme parcours exclusif dans trois universités à partir du L1 ! On remarquera aussi le joyeux mélange d'universités dites « d'élites » et d'instituts proches de nos IUT. Cette montée en puissance marie harmonieusement les grands Instituts de Recherche (Fraunhofer, Max Plank), les universités (Bonn, Bayreuth, Aachen, München) et les écoles d'ingénieurs (Gelsenkirchen, Ilmenau). Les sociétés savantes se multiplient également, ce qui rend très naturel le choix de Berlin pour le siège de la plus grande société internationale de bionique (Biokon International). Évidemment, l'Allemagne en tire déjà et en tirera dans le futur un avantage clair en termes industriels. Ceci n'est pas seulement le produit de l'effort décrit, portant sur plus d'une décennie, mais tient aussi au fait que le tissu des PME accueille un nombre important de docteurs comme personnes clés : le flux de savoir technique y est constant. Il n'est en effet pas inhabituel, je le

dis pour l'avoir vécu plusieurs fois, d'observer un directeur de PME (d'une petite industrie textile de quelques centaines d'agents par exemple) proposer de cofinancer une thèse sur un sujet potentiellement porteur, concernant des organismes vivants, tels que les araignées ou les plantes.

La démarche par un exemple : les micro-senseurs artificiels inspirés des poils de grillons

L'étude des senseurs de flux a surtout été conduite en utilisant les blattes et grillons. Ces derniers ont, tout comme les autres insectes, de grandes quantités de poils filiformes, qui sont parmi les senseurs les plus sensibles : ils mesurent en effet des déplacements d'air de l'ordre de l'Angström et des vitesses de flux de l'ordre de 30 microns par seconde. Si l'on considère l'énergie nécessaire pour qu'un potentiel d'action soit généré par un poil, alors on aboutit à la conclusion qu'il ne faut pas plus d'un dixième de l'énergie contenue dans un photon. En d'autres termes, ces senseurs travaillent au niveau du bruit thermique. Cette sensibilité extraordinaire explique pourquoi plusieurs groupes de chercheurs ont étudié ces senseurs du point de vue biomécanique et neuronal depuis des décennies, et pourquoi le monde de l'ingénieur y trouve une source d'inspiration pour imaginer des micro-capteurs ultra-performants.

Chez les blattes et grillons, ces poils sont principalement situés sur deux sortes d'antennes à l'arrière du corps, les cerques. Les poils sont très minces, de l'ordre de la dizaine de microns, et relativement longs, les plus longs atteignant les 2 mm. La base du poil est très complexe, et la mécanique fine peu comprise. Une série de membranes assure une flexibilité maximale. Un seul neurone innerve le poil. À la base du poil se trouve un autre capteur, appelé campaniforme, qui perçoit les infimes déformations de la cuticule lorsque le poil bute contre le bord de sa base. On voit ici que deux capteurs, aux propriétés géométriques et aux principes de mesure très différents, travaillent de concert, formant un *système de mesure intégré* capable de mesurer des forces sur une plage de valeurs importantes : depuis les infimes vibrations de l'air jusqu'aux tensions dans la base du poil,

une fois la course de ce dernier terminée. On remarquera aussi que, de par sa construction et son positionnement, le senseur campaniforme prend le relais et est également sensible à de faibles forces. Je ne connais pas de capteurs technologiques pensés « système » de manière aussi intégrée.

L'information nerveuse est ensuite transmise au ganglion terminal, une unité de traitement locale. L'information de tous les poils (parfois des centaines) converge ici et est relayée par des interneurons. La compression et la convergence de l'information sont alors très importantes : quelques 1500 neurones provenant des cerques sont traitées par seulement 20 interneurons. Il est intéressant ici de relever, à nouveau, l'intérêt des insectes et des arthropodes pour comprendre de tels phénomènes. Il est en effet possible d'identifier et de numéroter des neurones de manière individuelle, de les retrouver d'individu à individu et donc de faire des cartographies en 3D de systèmes neurobiologiques complets, une tâche excessivement difficile, voire quasi-impossible sur les vertébrés. Cette invariance et ce relativement petit nombre de neurones expliquent en partie l'engouement de la communauté en neuromécanique/neurobotique pour le modèle insecte.

L'information ne circule pas uni-directionnellement, car des impulsions nerveuses transitent également depuis le cerveau principal de l'insecte dans le ganglion principal. Une fois prétraitée dans le ganglion terminal, l'ensemble de l'information remonte alors rapidement via de véritables autoroutes de l'information (le diamètre des interneurons est très grand, car il faut aller très vite, dans une fuite) vers des ganglions supérieurs, où elle est intégrée avec le système moteur des pattes arrières. On a donc un système de traitement de l'information local, *un système distribué*, ce qui est une autre spécificité des invertébrés – justifiant l'intérêt des chercheurs pour ce groupe d'organismes.

Le dernier stade d'intégration est le comportement. Percevoir un flux d'air est utile dans le contexte de la prédation, mais aussi dans le contexte des relations sexuelles (le chant). Le grillon et la blatte possèdent dans leur ganglion terminal une véritable carte du monde extérieur leur permettant de sentir d'où vient le danger et, comme nous

l'avons montré récemment, de percevoir la vitesse de l'objet qui fonce sur eux et probablement sa nature: ami ou ennemi? Où fuir est un autre problème, et d'autres considérations interviennent alors.

Nous avons démontré très récemment que les poils étaient optimaux et qu'ils avaient même maximisé la capture d'information. En d'autres termes, il ne peut y avoir un autre *design* de poil pour ce but bien précis. Cependant, il est nécessaire d'admettre que ces senseurs, tout aussi performants qu'ils soient pour quantifier une quantité physique précise, sont aussi utiles dans d'autres contextes. Ils remplissent en effet aussi des fonctions de senseurs du toucher, ou de senseurs de proximité d'objets par électrostatique, phénomènes non étudiés à ce jour, mais facilement observables lorsqu'une blatte se déplace dans la litière. En conclusion, des senseurs pourtant ultra-performants selon un critère bien précis, sont aussi dans les faits multifonctionnels. Ceci interroge aussi bien le biologiste, confronté à des multiples forces de sélection sur un système quasi optimal dans une dimension, que le technologue à la recherche simultanée de hautes performances et de résilience à d'autres contraintes. La sélection naturelle opère sur toute cette chaîne de mesures et d'actions. Ainsi, la sensibilité extrême du poil est d'autant plus étonnante qu'elle est potentiellement « perdue » dans la chaîne des étapes sur laquelle la sélection naturelle agit. *A contrario*, nous n'avons que peu, voire aucune, idée du degré d'optimisation de toute la chaîne et des autres éléments la constituant.

Les tailles et géométries des poils, tout comme leur densité élevée, impliquent qu'une version technologique de groupe de senseurs ne peut pas être assemblée, mais uniquement produite de manière monolithique. Les MEMS ont la bonne taille, et leur technologie fut identifiée comme la plus adéquate dans une démarche bio-inspirée. Dans le cadre des deux projets Européens CICADA et CILIA (IST-FET), nous avons, en collaboration avec les collègues de l'université de Twente (Prof. G. Krijnen), procédé à de nombreuses itérations bio-inspirées de poils MEMS. L'idée est ici de pouvoir non seulement recréer des poils artificiels, mais de construire de véritables canopées. Le concept de caméras de flux, emprunté aux caméras optiques, nous

permettrait de mesurer avec grande précision spatiale des flux infimes et complexes. Les caméras sont alors faites de 25-100 poils MEMS par cm^2 , chacun pouvant être adressé individuellement. Les performances des senseurs MEMS que l'équipe de Twente a développé au cours des 10 dernières années a progressé de manière importante : partie d'un rapport de performance avec le grillon de 1 : 10000, la dernière génération de MEMS est moins performante que la Nature d'environ un ordre de grandeur seulement. Le système biologique n'a cependant pas livré tous ses secrets et il peut encore servir de source d'inspiration, en particulier dans la partie neuronale. En effet, il y a encore des marges de progression au niveau de la capture d'information, car les poils naturels semblent être capables d'utiliser le « bruit » interne à la cellule et externe par un procédé connu sous le nom de résonance stochastique. Une autre source d'inspiration est la position relative des poils qui détermine également leurs influences hydrodynamiques ; un comportement d'ensemble de poils plus ou moins faiblement couplés est supposé, un cas typique de propriétés émergentes de systèmes non-linéaires.

Les performances des MEMS fabriqués aujourd'hui sont proches de celles de la Nature, faisant de ces projets un succès du biomimétisme. Pour autant, des limites quasi-infranchissables apparaissent : les matériaux utilisés sont très friables, rendant les capteurs peu utilisables dans la réalité. Les phénomènes d'adhésion/collage (le terme anglais de *stiction* est le plus adéquat) lorsque le poil est stimulé au-delà de sa limite le rendent vite inopérant. *A contrario*, un poil de grillon peut fléchir grandement et revenir à sa position d'origine même après avoir été stimulé bien au-delà de sa limite. Une sensation diffuse de cul-de-sac technologique est parfois perceptible dans notre communauté ; la nécessité d'une révolution dans la manière même de concevoir l'ontogénie des senseurs MEMS semble inéluctable (les ingénieurs parleraient probablement d'assemblage).

Les poils senseurs de flux sont les capteurs biomimétiques pour lesquels les communautés d'ingénieurs et de biologistes peuvent au mieux se retrouver grâce aux mathématiques appliquées de la dynamique des fluides. Ce langage fonctionne comme un ciment entre

le discours et la réalité, entre les différentes communautés aux dialectes différents, accepté par tous. Ceci est pour l'instant un atout unique, permettant la confrontation régulière des démarches des uns et des autres, ainsi qu'une *méthode quantifiable de comparaison des performances de la Nature et des systèmes bio-inspirés*. En effet, bien trop de tentatives biomimétiques tirent leurs noms d'une comparaison visuelle oiseuse entre l'objet naturel et l'artefact technologique.

France : peut faire mieux

La France est très en retard dans ce domaine. Les groupes actifs, avant tout à appartenance CNRS et Universités, se comptent sur les doigts d'une main, voire deux selon les contours que l'on veut bien donner à cette science. Un réseau bionique CNRS RTP (Réseau transdisciplinaire thématique) « technologie inspirée de la locomotion animale: aérodynamique, capteurs et pilotes automatiques » a été soutenu par deux départements du CNRS. Le budget fut, sur 3 ans, de 15000 euros, prolongé de deux fois 10000 euros, à mettre en regard avec les millions accordés aux GDR allemands! Cette comparaison montre l'ampleur du différentiel entre les deux pays, ou plus exactement l'avance de l'Allemagne sur ses partenaires européens.

La physique a pourtant révolutionné la biologie moléculaire et cellulaire et, depuis peu, une partie des neurosciences depuis déjà quelques décennies. Il suffit pour s'en convaincre de feuilleter des livres comme *Biological Physics* (P. Nelson, 2004), *Biophysics of computation* (C. Koch, 1999) ou tous les nouveaux ouvrages traitant de la physique de la molécule seule. On attend beaucoup des avancées possibles du biomimétisme dans le développement durable, le domaine de la conservation d'énergie ou la capture d'énergie solaire par exemple. La montée en puissance de la Chine, qui, par le volume de publications, a déjà dépassé les USA, la structuration de l'Allemagne, combinée avec sa volonté de changer en profondeur de système d'approvisionnement énergétique, et l'émergence de la discipline « systems biology » indiquent que ce domaine est en passe de devenir une discipline autonome d'ici moins d'une décennie.

Comment alors expliquer que notre pays soit l'un des plus mauvais élèves en matière de biomimétisme, tout comme il l'a été de manière catastrophique en matière de cybernétique biologique – autre domaine d'interface? L'interdisciplinarité, voulue et proclamée par tous, est dans les faits bien difficile à mettre en place. Elle demande du temps et une alchimie très particulière entre individus. Elle nécessite un regard mélangé de bienveillance et de curiosité entre domaines scientifiques, qui est fort éloigné de l'arrogance et de la complaisance que l'on retrouve si communément. Les biologistes cherchent trop souvent dans le physicien/mathématicien une boîte à outils, une solution clef en main, une sous-traitance. Bien des non-biologistes ont le même comportement: aussitôt un problème biologique superficiellement identifié, ils s'en éloignent immédiatement pour revenir à leur occupation première. Ces démarches ont tout de l'instrumentation respectueuse et montrent le peu d'intérêt pour la plus value du mariage de savoirs différents. On le voit bien, vivre l'interdisciplinarité est plus vite dit que fait, et la décennie nécessaire pour comprendre un tant soit peu le poil du grillon et s'en inspirer pour aboutir à un micro-senseur performant en est un bel exemple. Mais ceci est valable pour tous, dans tous les pays, et ne peut donc pas servir d'explication pour le retard français. Peut-être faut-il chercher les raisons de cette incapacité à générer des domaines d'interface dans le triptyque hautement toxique (i) d'une hiérarchie implicite des sciences dans un pays reléguant la biologie nécessaire au biomimétisme loin derrière la physique et les mathématiques, hiérarchie incompatible avec l'esprit de rencontres entre pairs, (ii) d'une vision « silos » des sciences, aboutissant à des commissions et comités aux objets et questions figés, et (iii) d'un effondrement terriblement avancé de nombreux domaines des sciences naturelles comme la zoologie, la biologie des organismes, la neuro-éthologie, certains pans de la biochimie classique, ou encore la morphologie fonctionnelle. La dernière hypothèse que je formulerai est que le biomimétisme n'est pas en fait une nouvelle science, mais plutôt une démarche qui transcende et traverse des sciences différentes; les visions verticales implicites dans la hiérarchisation actuelle des sciences et dans l'esprit « silo » sont alors un frein puissant à l'essor de cette superbe mise en pratique de l'interdisciplinarité. Ces considérations dépassent largement le cercle académique et ont une

implication immédiate dans le domaine industriel : on estime que les 100 produits biomimétiques les plus importants ont généré environ 1,5 milliards de dollars durant la période 2005-2008. En parallèle et de manière sous-jacente, les publications et dépôts de brevets biomimétiques dans les autres pays phares montrent tous la même tendance : croissance exponentielle. À bon entendeur...

(Notes)

1 Université de Tours, Institut de Recherches sur la Biologie de l'Insecte (IRBI) – UMR CNRS 7261.