

Le biomimétisme, une voie à explorer pour le Génie des procédés ?

Biomimicry, an avenue to explore for process engineering?

Eric Schaeer¹, Frédéric Demoly², Jean-Claude André¹

¹ LRGP - UMR 7274 CNRS-UL - ENSIC 1, rue Grandville F54000 Nancy

² ICB UMR 6303 CNRS – Université Bourgogne Franche-Comté - UTBM, F90010 Belfort

jean-claude.andre@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ. Le développement exponentiel des usages du numérique impose des évolutions en génie des procédés de transformation de la matière et de l'énergie en termes de formations, mais également en inventions d'origines variées pour le renouveau de la discipline soumise à des contraintes environnementales fortes. Cette situation de quasi-rupture doit se traduire par une meilleure créativité avant d'arriver à des innovations de rupture ou incrémentales. Pour atteindre cet objectif, il est parfois profitable de rapprocher deux domaines normalement disjoints pour faire émerger des idées suffisamment robustes pour devenir appliquées. Cet article traite de cette méthode en s'appuyant sur le biomimétisme. Tirer profit des ingéniosités de la nature peut-elle favoriser l'émergence d'inventions anthropocentriques et d'ainsi accélérer l'innovation dans le domaine du génie des procédés ? C'est le questionnement des auteurs illustrant dans leur quête les opportunités d'une telle démarche de rapprochement avec ses avantages, mais également les limites actuelles de ce dernier.

ABSTRACT. The exponential growth in the use of digital technology is forcing changes in the engineering of material and energy transformation processes, not only in terms of training, but also in terms of inventions of various origins, to revitalize this discipline, which is subject to strong environmental constraints. This near-breakthrough situation needs to be translated into greater creativity before we can achieve breakthrough or incremental innovations. To achieve this objective, it is sometimes useful to bring together two normally disjoint fields to generate ideas that are robust enough to be applied. This article discusses this method, based on biomimicry. Can taking advantage of nature's ingenuity foster the emergence of anthropocentric inventions and thus accelerate innovation in the field of process engineering? This is the question posed by the authors in their quest to illustrate the opportunities and advantages of such an approach, as well as its current limitations.

MOTS-CLÉS. Biomimétisme, génie des procédés, interdisciplinarité, convergence, objets-frontières, innovation, créativité.

KEYWORDS. Biomimicry, Process engineering, Interdisciplinarity, Convergence, Border-objects, Innovation, Creativity.

« Pour penser son activité et libérer sa créativité, l'ingénieur devra savoir penser les fondements des disciplines auxquelles il ou elle fait appel, en comprenant que ce sont des construits, même s'ils « disent le vrai » et proviennent de découvertes. Parallèlement, il ou elle aura à penser à la façon d'établir les transversalités nécessaires » (Dubois et Brault, 2021).

1. Introduction

D'un côté, les crises économiques et sanitaires récentes ont été un révélateur de problèmes préexistants : difficultés en termes d'activités de production et d'approvisionnements de biens de consommation, complexité (fragmentation extrême) des systèmes de production, etc. De l'autre, l'émergence cruciale de l'intelligence artificielle fait perdre de la pertinence aux applicateurs de la science et de la technologie. Raffard (2021) s'interroge sur l'organisation de ces systèmes avec la multiplication des acteurs impliqués à chaque étape de cet acte (avec des risques de méthodes entrant dans une certaine continuité « rassurante »). C'est une évidence, la fourniture, la qualité des biens et leur accessibilité constituent un terrain d'observation privilégié pour réfléchir aux évolutions futures de nos sociétés. Mais, s'exprimer sur ces évolutions, c'est en amont repenser l'invention adaptée à l'évolution d'une société également confrontée à la résolution de problèmes environnementaux graves.

Avec un tel décor, pour le génie des procédés, on peut reprendre une phrase de Jean de la Fontaine : « Ils ne mouraient pas tous, mais tous étaient frappés ». Mais, dans le même temps, ces contraintes peuvent constituer une opportunité pour innover.

D'une manière un peu schématique, depuis quelques siècles où le déterminisme technologique est roi, le monde actuel va chercher sur toute la planète des matières ou des matériaux d'origines naturelles (pétrole, charbon, minerais, matières végétales, etc.) pour les « purifier » en « briques élémentaires ». Tout concepteur va, à partir de ces éléments, les assembler (l'art de l'ingénieur) pour en faire des objets/systèmes compliqués (par exemple un avion) ou leur faire subir des traitements spécifiques (essence, gaz, chimie, principes actifs, etc.). Ce sont ces dispositifs qui participent au bien-être technologique des citoyens. Dans le même temps, ce mode de prélèvement poussé parfois à ses limites induit des effets graves sur l'environnement. En soulignant ici les effets de l'activité humaine sur son évolution, l'Anthropocène favorise le questionnement et des démarches contrefactuelles qui permettent de réinterroger les modes de fonctionnement de la société (société de consommation, limites du déterminisme classique, innovation frugale, nouveaux paradigmes, etc.). Pour autant, malgré des discours alarmistes la demande de nouveautés reste de plus en plus soutenue.

Dans les sciences et les technologies matérielles de l'artificiel, sur la base d'une demande (téléologie, innovation incrémentale), l'ingénieur procédés sait (en principe ; cf. Schaer, Demoly et André, 2024) trouver des voies de production industrielle respectant des critères de faisabilité scientifique et technologique, s'appuyant sur une analyse de cycle de vie (quand elle est possible), ainsi que sur des considérations économiques et des aspects réglementaires, éthiques, environnementaux, sociaux et moraux (Schaer et André, 2020). Le métier de base de l'ingénieur-concepteur consiste ainsi à résoudre initialement des problèmes technologiques concrets liés à la réalisation de preuves de concept avant d'envisager de réaliser et de mettre en œuvre des produits, des systèmes ou des services, dans un cadre de plus en plus contraint lié à l'énergie, aux ressources et aussi à l'environnement. Ces aspects sont généralement pris en compte dès la conception, domaine qui dispose aujourd'hui d'un savoir-faire de plus en plus éminent. Ainsi, par une flexibilité et une agilité, part de sa compétence, il doit être capable de maîtriser (ou simplement de s'associer avec) des spécialités complémentaires, de coordonner des projets interdisciplinaires, etc. Et, en plus, sa créativité peut être attendue pour son inventivité ! Cette conception de plus en plus optimisée et outillée est associée à la maîtrise du temps (avec des augmentations entropiques qui peuvent être importantes dans les réalisations).

Aujourd'hui les questions environnementales sont là (réchauffement climatique, épuisement des réserves, surpopulation, inégalités, etc.) et des solutions robustes devront être rapidement trouvées pour la survie des humains. En rejet de cette situation globale qui devient visible se placent les tenants d'une écologie stricte, voire de la décroissance. Il est certes possible d'être cornupaniste (croyance que les progrès technologiques proposeront des solutions à nos problèmes), évitant un recours à l'idéal écologique - une manière utopique d'en appeler à un autre monde, à d'autres manières de vivre... Cette rupture paradigmatique très importante (pas uniquement pour la seule technologie) imposerait des innovations radicales qui, avec la complexité à prendre en considération, amènerait sans doute les chercheurs, les concepteurs et les ingénieurs à des recompositions disciplinaires, tournées vers les défis écologiques. Elle inviterait, avec les contraintes présentes et la complexité des phénomènes naturels à prendre en considération, à des inventions de rupture qui sortent largement de la culture actuelle des ingénieurs procédés (cf. Schaer, Demoly et André, 2024) (par exemple, innovations sobres - mais un verrou essentiel concerne les aspects recyclages et réutilisations généralisés aux processus industriels : transition d'une production linéaire à circulaire à inventer pour les procédés de transformation de la matière et de l'énergie dans leur ensemble).

La prise en considération des tendances lourdes qui viennent d'être citées fait que toute situation est aussi devenue « complexe ». Une des bases de la complexité est liée à une co-construction qui fait que nous participons aux situations que nous désapprouvons, quand ces situations perdurent (interdépendances et circularité). Et toute tentative visant à trouver des solutions pour opérer un traitement ouvre sur des « abîmes » de complexité (Ramli et al, 2011). « Cela veut simplement (nous)

dire le plus souvent que ce qui vient d'être évoqué dépend d'une multitude de facteurs contradictoires et que l'analyse de ces derniers nécessite des outils eux-mêmes extrêmement sophistiqués » (Balta, 2017). Repérer les contraintes imposées par le concept de complexité, et comprendre de quelle façon ces contraintes bousculent, relativisent et renouvellent bien des habitudes héritées des modes déterministes est une première nécessité. « La pensée complexe s'oppose ainsi à la pensée réductionniste qui prétend connaître le complexe à partir de ses éléments, ce qui la rend incapable de prendre en compte les propriétés émergentes qui font la richesse de la vie » (Balta, 2017).

Tout cela est bel et bon et répond bien à ce que fait la nature, ce que fait l'Homme dans la nature. Mais, comment fait-on pour trouver des solutions aux problèmes évoqués ? Une écologie punitive peu acceptée ou une innovation revisitée qui impose des changements culturels considérables ? Si dans un premier temps, on impose de changer, au moins en partie dans la conception la fonction objectif (de bénéfique financier à bénéfiques financiers et environnementaux), il peut être possible de conserver une certaine stabilité dans les modes de raisonnement des inventeurs/innovateurs en Génie des procédés. Cependant, il convient de se rappeler que, quand on parle d'approches « systémiques » ou de complexité, il s'agit en fait de systèmes qui, en réalité, ne sont que des « sous-systèmes » qui sont corrélés entre eux. Mais, il est possible que le changement de la cible ne suffise pas (c'est même probable) et, pendant qu'il en est probablement encore temps (?), l'approche par la complexité et ses modes de traitement devrait plus largement être introduite dans les formations universitaires et dans les Grandes Ecoles. Par exemple, la maîtrise des propriétés d'un système lors de l'intégration de tous ses composants est possiblement complexe parce que ces derniers peuvent, en étant issus de disciplines scientifiques distinctes, être modélisés selon des principes différents. Ces systèmes hybrides, pour lesquels une partie du système dispose d'une dynamique continue et l'autre reposant sur des éléments discrets peuvent conduire à des incohérences graves (Boulanger, 2014).

Traiter de la complexité est nécessaire pour autant que l'on dispose d'un flux d'idées (André, 2023) dont l'accomplissement doit être validé dans une première étape pour s'appuyer sur son traitement, voire sur des méthodes classiques qui font partie de la panoplie de travail des ingénieurs (TRIZ (Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadac ; acronyme russe de la théorie de résolution de problèmes innovants – cf. Vincent et al, 2006 ; Robles, Négny et Le Lann, 2009), AZIT (Advanced Systematic Inventive Thinking - Horowitz, 2001), méthode C-K (Concepts-Knowledge - Hatchuel et Weil, 2003), Modeling at different scales (Van Geem et Martin, 2010), CA Design (Heintz, Gerbaud et Belaud, 2011), Compartmental Modeling (Jourdan et al, 2019), combination of Microstructure – Formulation – Processing (Chen, 2016), voir également pour d'autres concepts, Towler et Sinnott (2021)). André (2023) s'exprime sur l'émergence d'idées qui ont besoin d'être clarifiées pour devenir une idée stabilisée et susceptible d'aller jusqu'à la preuve de concept (POC). Cette stabilisation peut être atteinte à partir d'une culture scientifique approfondie, mais également par l'échange interdisciplinaire, ce qui correspond à l'approche retenue ici entre Génie des procédés et nature. Ainsi, avant de passer par les fourches caudines du design, c'est surtout cet axe qui sera approfondi. En effet, il sera possible de prendre ensuite en considération, selon Gerbaud, Shcherbakova et Da Cunha (2020), des méthodes du Génie chimique inspiré par la nature qui doit promettre de nombreux avantages en termes de consommation d'énergie, de résilience et d'efficacité, etc., mais qui peine à s'imposer comme une discipline de premier plan, principalement en raison de l'idée erronée selon laquelle il suffirait d'imiter la nature.

Ce constat sert alors de transition pour revenir au biomimétisme qui doit conforter un ressourcement du génie des procédés, en particulier avec le principe de l'évolution du design (constructal law selon Bejan, 2000 et Coppens, 2005). Or, pour rappel important, dans la nature, pour tous les êtres vivants qui la peuplent, les matériaux et les transformations biologiques sont normalement réalisés à faible pression et à faible température, en ne générant pas de rejets qui leur soient toxiques (et même en stockant du carbone sous différentes formes). Les processus développés par la nature sont résilients (mais disposant de leur (très long) temps spécifique), alimentés par des matériaux naturels et renouvelables. « Souligner la dimension écosystémique de la vie aide à expliciter le sens de bio- dans

biomimétisme qui consiste à imiter les traits caractéristiques des organismes autant qu'à reproduire des relations écologiques » (Pitrou, 2020).

Dans cette perspective, en même temps que la perception sensible des corps, on assiste à la saisie, plus intelligible, d'un ensemble de processus et de cycles qui organisent les interactions entre des êtres vivants et les milieux dans lesquels ils vivent. Le biomimétisme qui exploite ce contexte peut être vu comme une approche de conception pour des solutions technologiques qui se veulent originales, durables et éco-responsables. Pour autant, il ne remet pas fondamentalement en cause le système de production déterministe actuel. Le biomimétisme bénéficie cependant d'une forte reconnaissance médiatique depuis une vingtaine d'années (traduite par l'augmentation sensible du nombre de publications au cours du temps comme l'indique la figure 1) et se considère comme un « art d'extraire la connaissance de la nature ». Cette approche récente, fortement soutenue par des écologistes et des industriels, se positionne naturellement dans l'économie de la connaissance et, pour une moindre part, dans les processus de conception/invention. En effet, le biomimétisme peine encore à entrer dans les mœurs des ingénieurs de conception industrielle comme méthode d'innovation systématique et organisée. Est-ce d'ailleurs réaliste ? Dans ce dernier domaine, sans opposer déterminisme et complexité, il peut servir de possible transition entre le présent *statu quo* qui fait toujours ses preuves et des solutions écologiques (pour lesquelles il est nécessaire de clarifier les objectifs et les critères de leur atteinte).

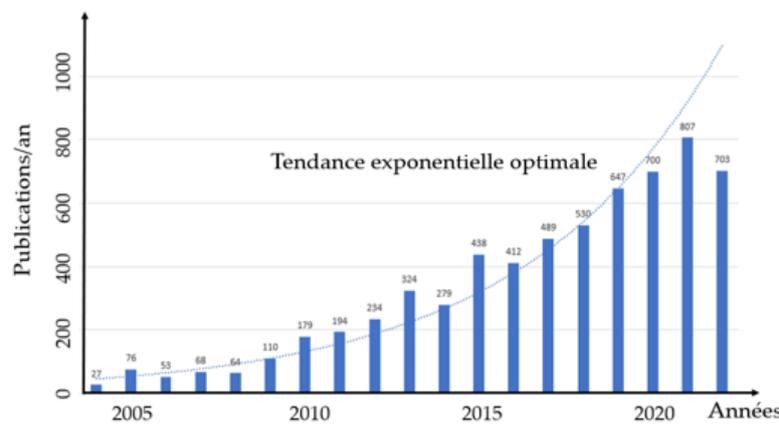


Figure 1. Evolution temporelle du nombre annuel de publications sur le thème « Biomimicry » (selon la bibliothèque du CNRS)

De toutes ces données se posent pour les spécialistes du génie des procédés un certain nombre de questions importantes pour disposer d'un corpus de faisabilité de rapprochement profitable du biomimétisme avec le Génie des procédés définies ci-après :

- Biomimétisme : connaissances à extraire ou discipline ?
- Retour sur l'invention et la promotion d'idées en Génie des procédés ;
- Tentative de mise en pratique.

Ce sont ces différents items qui sont développés ci-après.

2. Biomimétisme : Science ou connaissances à extraire ?

« Le biomimétisme ou conception bio-inspirée est une approche qui propose l'utilisation du vivant en tant que source d'inspiration pour améliorer ou concevoir de nouvelles technologies. Le concept de « biomimétisme » a été introduit dans les années 1990 par Janine Benyus (1997) dans son livre « Biomimicry : Innovation Inspired by Nature ». Le terme a été utilisé à tort pour représenter également des processus où la nature est utilisée physiquement dans la solution, comme

dans les technologies de bio-utilisation et de bio-assistance. D'une part, s'inspirer du vivant pourrait aboutir à des technologies plus innovantes, grâce à la diversité et à la multifonctionnalité rencontrées même chez les systèmes vivants les plus simples. D'autre part, s'inspirer du vivant pourrait aboutir à des technologies plus durables, car chez le vivant, le recyclage de ressources à tous les niveaux, une chimie avec des matériaux abondants et à température ambiante seraient déjà pratiqués depuis 3,8 milliards d'années. Ces processus du vivant ont également été évalués par la sélection naturelle, et seulement les organismes les plus adaptés survivent. Intégrer la conception bio-inspirée au processus d'innovation des entreprises pourrait ainsi permettre la génération de concepts à la fois innovants et durables » (Salgueiredo, 2016).

Encadré 1. *Le biomimétisme*

2.1. *Cadre général*

Le biomimétisme développé à partir de 1950 environ s'intéresse aux processus, aux systèmes naturels et à leurs modes de fonctionnement, appliqués dans la cybernétique (similitudes entre les fonctions des machines et le fonctionnement du système nerveux chez les humains). L'innovation investit alors une approche éthologique et écologique de systèmes, processus et environnements multiples et non pas une simple activité de production d'objets ou de procédés d'imitation. Son développement doit s'inscrire dans celle des techniques conventionnelles. Selon Antonioli (2013), le XIX^{ème} siècle s'est engagé dans la première révolution industrielle s'appuyant sur la mécanique (une technologie statique, faite de composants séparés), grâce à l'électricité, le XX^{ème} siècle a développé des technologies utilisant des composants associés de façons plus compliquées et le XXI^{ème} siècle pourrait pour cet auteur être orienté vers le développement majeur de systèmes biomimétiques en empruntant le fonctionnement processuel et évolutif de systèmes vivants (c'est un peu ce que tente de faire l'impression 4D dans un autre cadre selon Demoly et André, 2022). Le biomimétisme va-t-il alors s'associer à la complexité dans les processus créatifs pour la réduire ou la conforter ? D'ailleurs, pour Antonioli (2013), notre environnement serait prêt à nous offrir une énorme quantité de structures et de processus qui n'ont été explorés qu'en très petite partie par les designers et les ingénieurs. Il ne s'agit donc pas uniquement d'un simple « réservoir » de matériaux ou d'idées à exploiter en fonction de besoins, « mais d'une entité globale, en mouvement, qui redessine[rait] l'existence humaine tout comme l'Homme ne cesse de la reconfigurer » (Antonioli (2013). Mais, voilà par l'augmentation du nombre de paramètres de liberté à choisir de manière optimale, une difficulté supplémentaire considérable relativement aux savoir-faire des ingénieurs apparaît ! Elle sort de l'environnement éducationnel actuel de nombreuses grandes écoles d'ingénieurs (Schaer, Demoly et André, 2024).

Le biomimétisme, dans la culture des tenants du domaine, ne signifie ainsi pas « copier » l'existant en ayant recours simplement à une analogie visuelle, mais consiste à rechercher des concepts organiques maîtrisés pour aller vers des applications technologiques. Pour les supporters du biomimétisme, le métier de l'ingénieur « bio-miméticien » consiste ainsi à mettre la connaissance issue de la recherche scientifique bio-inspirée au service des industriels. Avec les contraintes environnementales actuelles et futures, il devient naturel de tenter d'apporter des solutions biomimétiques aux processus de conception de l'ingénieur et par suite d'examiner si cette conception peut être intégrée dans les formations. L'ingénieur-concepteur s'investit aujourd'hui dans la gestion d'une complexité réduite à d'apparentes relations causes-effet maîtrisables (et industrialisables), tout en étant en charge de toute la chaîne de valeur, depuis l'idée acceptée jusqu'au produit final (voire son recyclage). La figure 2 adaptée de Gonçalves (2016) fait apparaître dans l'approche biomimétique trois domaines par zone de « visibilité », tout d'abord ce qui est perceptible avec « son bon sens », puis des domaines nécessitant de plus en plus de connaissances biologiques approfondies.

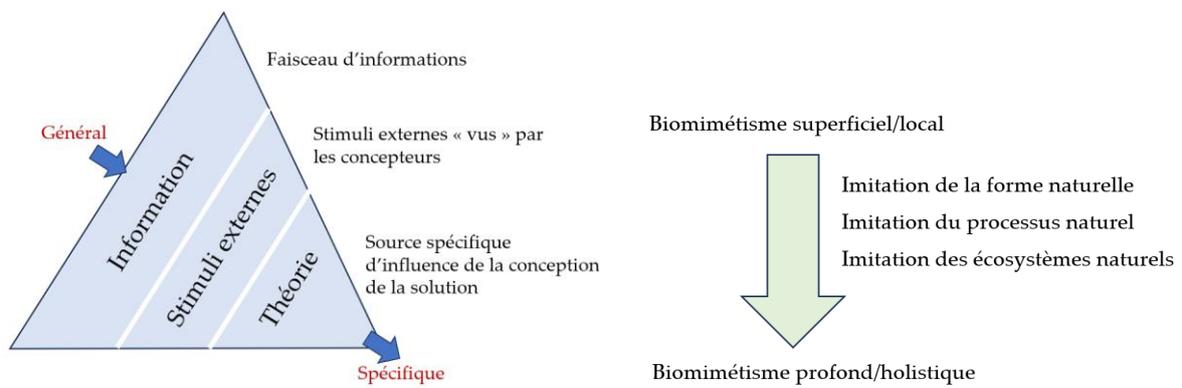


Figure 2. Différenciation entre information, stimuli externes et sources d'inspiration

Rappelons que selon Voiro (2005), la constitution d'un spectre de visibilité « implique de s'intéresser aux processus de constitution de « ce qui doit être vu », aux procédés par lesquels se déploie une évaluation collective « éclairée » définissant « ce qu'il convient de voir », aux manières de diriger l'attention sur des faits saillants, des pratiques ou acteurs spécifiques »... Pour Fayemi (2016), l'un des challenges inhérents aux démarches biomimétiques est la difficulté de communication entre ingénieurs et biologistes (Helms, Vattam et Goel, 2009 ; Nagel et al, 2010) . « Leurs parcours individuels mènent à des divergences disciplinaires et/ou des différences de compréhensions fonctionnelles de concepts (Dougherty, 1992), que celles-ci soient induites par la perception (Dearborn et Simon, 1958), le langage (Tushman, 1978), ou les modes de pensées (Fleck, 2012) ». Il s'agit d'un verrou important que l'on doit faire sauter pour que le biomimétisme puisse se déployer. En l'absence d'un effort conséquent pour atteindre cet objectif, le biomimétisme risque de continuer à se situer dans la « simple » imitation d'une forme naturelle, compréhensible par quelqu'un de curieux ou imaginatif qui, tout seul, peut par l'observation imaginer un transfert technologique (exemple du Velcro, du nez du TGV Japonais, etc.).

Mais en quoi ce concept qui s'inspire de la nature (écoconception) pourrait-il aider l'invention ? L'innovation ? L'intégration raisonnée du biomimétisme par les inventeurs et les concepteurs suppose qu'on sache croiser positivement des logiques d'offre encore insuffisamment fouillées (biomimétisme) avec des approches par la demande, plus rarement par l'offre (difficile problème inverse traité par/pour les entreprises) dans des conditions où c'est toujours/encore la valeur économique qui oriente la cible de l'activité inventive. Ainsi, l'objet d'une réflexion est, en dehors d'un regard sur le biomimétisme et ses approfondissements conceptuels d'une part et sur la création et le métier de concepteur d'autre part, de montrer la difficulté générique de rencontre et d'intégration des deux approches, culturellement très différentes. D'ailleurs, le biomimétisme relève-t-il d'une discipline scientifique (science du réel) ou d'un savoir savant (connaissance de la nature) ?

2.2. Biomimétisme : sciences ou banque de connaissances ?

Si la science est ce que l'on sait pour l'avoir appris, ce que l'on tient pour vrai (connaissance stabilisée), son but est d'approfondir la connaissance et d'augmenter le « stock » de savoir. Dans ce cadre, une discipline comme le Génie des procédés désigne des savoirs développés par une communauté de spécialistes adhérant aux mêmes pratiques de recherche. Elle tend naturellement à l'autonomie, par la définition de ses frontières, par le langage qu'elle se constitue, les techniques et les théories qu'elle est amenée à élaborer et à utiliser. Il y a selon Roqueplo (1997), « pulvérisation » de la science en disciplines qui disposent de leurs jargons, méthodes, mais qui s'appuient toutes par la validation des savoirs créés par une évaluation par les pairs de leur domaine. Les auteurs sont impliqués dans des recherches et des formations en sciences des artefacts, sciences des objets et des systèmes où s'associent connaissance de la nature et intervention de petits bouts de génie humain en vue de résoudre, par des moyens abstraits ou concrets, des problèmes, nés de façon indirecte et lointaine, de préoccupations fonctionnelles... (Approche téléologique gouvernée par les fins). Les transformations de la matière, de l'énergie et de leurs environnements sont ce qui compose tout corps

ayant une réalité tangible... Il s'agit donc d'un domaine immense... où une seule discipline ne peut en général apporter une connaissance éclairée suffisante.

En lien entre approfondissement scientifique et applications, la technoscience souligne la solidarité concrète entre les développements technologiques matériels et des savoirs théoriques, sous forme d'interactions et de rétroactions positives constantes entre les découvertes scientifiques et les inventions techniques (Gagnepain et André, 1998). A partir de domaines scientifiques disjoints, la création et le développement d'une nouvelle discipline ne vont pas de soi. Il convient de s'interroger sur les causes et sur les mécanismes de l'orientation de l'activité de recherche, sur la nature des formations qui la soutient, du choix des objets de recherche, de la construction des questions, du développement des contenus et des méthodes et de l'émergence de nouvelles spécialités scientifiques (Vinck, 2009). Kuhn qu'il cite aurait suggéré que ces domaines séparés peuvent s'influencer fortement quand une communauté scientifique traverse une période de crise et quand la fécondité de son paradigme s'épuise, ce qui n'est à l'évidence pas le cas tant la demande progresse pour des raisons environnementales. Selon Ben-David et Collins (1966), une spécialité scientifique nouvelle ne se développera que parce que les chercheurs issus de disciplines « anciennes » ont les moyens de s'y « épanouir » et d'y créer une nouvelle identité intellectuelle et professionnelle avec le risque de ne pas faire émerger un champ de recherche éminent, reconnu par toute la communauté scientifique. Il ne suffit pas que la spécialité scientifique émerge, encore faut-il qu'elle dispose d'un champ d'études lui permettant de se développer (Stehr et Larsen, 1972).

Le développement d'un tel domaine associant biomimétisme et Génie des procédés dépend de la construction de relations avec des chercheurs des deux domaines (pour autant qu'existent des chercheurs reconnus comme tels dans les deux domaines) ou de personnes disposant d'une sorte de double cursus... Dans ce qui correspond à l'esprit du biomimétisme, les acteurs concernés (de deux côtés) ne sont que des fournisseurs de ressources non exploitées servant d'appui à la créativité en termes de procédés, illustrant un vrai potentiel de progrès scientifique et technologique (légitimation) avec de vrais potentiels de questions et de problèmes de recherche qui peuvent ressourcer l'activité scientifique sans lui faire perdre son âme ! Ce qui est attendu par les chercheurs du domaine « procédés », c'est d'être en capacité de mettre en avant l'intérêt de dispositifs naturels pour construire des fictions narratives qui donnent du sens à l'engagement dans des travaux de recherche nouveaux. Ces réussites doivent autoriser l'émergence de règles pouvant servir à la formation des étudiants en Génie des procédés. Ce domaine forme une discipline scientifique qui construit ses propres objets de recherche (avec les sciences qui concourent à son développement), ses propres approches et modèles. Il n'est donc question que d'une main tendue à la nature pour progresser.

En dehors de généralités ; comment alors réussir (ou pas) une mutualisation, non idéologique, entre nature et artefact, pour trouver des voies d'associations profitables ? Comment l'intégration, activité de frontière et multiscale, est-elle générique ? Il sera intéressant d'inventorier les objectifs poursuivis grâce aux approches biomimétiques (construction de la personne, activités productives, légitimation du pouvoir, etc.), leurs limites, leurs approches de l'invention et de l'innovation afin d'identifier les grands schèmes de relations que l'imitation de la vie actualise. La place des concepteurs jouant « sur les deux tableaux » dans ces systèmes sera examinée pour enrichir la réflexion des auteurs et la faire partager. Par exemple, McKey (2016), sans revenir au nez du TGV ou du déplacement vertical du gecko, met en relief les similitudes entre des morphologies naturelles et des systèmes artificiels humains. Se pose alors la question de la crédibilité du lien et donc du degré d'intentionnalité à l'œuvre dans ces pratiques. Mais, pour l'instant la bibliographie concernant l'invention associée au biomimétisme reste encore relativement muette...

2.3. Dans les faits

« Nous devons nous souvenir que ce que nous observons n'est pas la nature elle-même, mais la nature exposée à notre méthode de questionnement » (Heisenberg, 1958).

Selon l'OMPI (Forbin et Hoarau, 2020), « l'innovation et la créativité sont des maillons essentiels pour la reconstruction économique de l'après-pandémie. Sous l'effet de la crise sanitaire et des mesures de confinement et de limitation des mouvements physiques, la dématérialisation et la numérisation se sont généralisées. Mais cela ne pourra être qu'à la condition de réussir à concilier innovation et créativité, d'une part, et la prise en compte des intérêts individuels et collectifs de l'ensemble de la communauté mondiale, d'autre part ». L'avenir pouvait être assuré par le progrès scientifique, aujourd'hui, trop en dehors des tendances lourdes qui affectent notre planète.

Dans les entreprises, les injonctions à la créativité sont toujours nombreuses, cette dernière devenant une condition *sine qua non* à l'embauche dans des secteurs pourtant non directement ou traditionnellement associés à la création. Elle peut être au cœur des préoccupations des entreprises parce qu'elle est nécessaire dans les processus d'innovation, d'un management « retoileté », voire politiques. Pour autant, les perceptions par les organisations demeurent très focalisées sur les talents individuels qui peuvent s'insérer correctement dans ces écosystèmes économiques. Mais, en France, on n'embaucherait pas volontiers Nikola Tesla ! Or, si les entreprises savent qu'elles ont besoin de changer, les pertes financières qu'elles subissent ne les incitent pas à une prise de risque radicale, donc au changement par rupture...

La perte de chiffre d'affaires générée par la crise, doublée des problématiques associées de gestion de trésorerie, encourage naturellement les dirigeants à se concentrer sur ce qui devient purement et simplement une question de survie. Par ailleurs, les entreprises associées à la transformation de la matière et de l'énergie ont souvent des durées de vie longues, se chiffrant en dizaines d'années, voire plus (à l'exemple de la fabrication du carbonate de sodium plus que centenaire) pour des raisons évoquées dans Schaer et André (2020). Tout le monde se trouve donc amené au même point, une créativité souhaitée, mais une logique qui existait auparavant de suivisme et/ou d'attente et, en conséquence, une certaine probabilité d'être en retard d'une guerre (mais les investissements financiers peuvent être considérables). Il est donc, à ce stade, intéressant d'examiner les apports du biomimétisme dans la transformation de la société productive actuelle.

Dans la « vraie vie » de l'ingénieur-concepteur, il faut disposer d'une observation de la nature susceptible d'être transformée en idée. Il faut donc s'intéresser aux manières de diriger son attention sur des faits saillants, des pratiques naturelles spécifiques. C'est sans doute un moyen de sortir des conservatismes de formation, des rituels, en se forçant à quitter des « mythes d'origine » (Le Breton, 2005). Mais comment décider si l'idée potentielle peut avoir de l'intérêt ? Pour qui ? Fonctionnera-t-on en logique d'offre ou de demande ? Ensuite, plusieurs préoccupations peuvent être à l'œuvre : inventer puis innover pour disposer d'un marché économique renforçant ainsi le concept de biomimétisme... Pour échanger valablement il faut se comprendre, ce qui nécessite une clarification de l'idée et pour atteindre cet objectif, il peut être nécessaire de convoquer différents avis, plutôt scientifiques, issus de disciplines différentes. Cela signifie qu'une idée un peu complexe doit passer par un filtre actif avant d'être acceptée comme une proposition un peu crédible qui subira ensuite d'autres filtres (Csikszentmihalyi, 2006), à moins qu'elle dispose dès le départ d'une « consistance » réelle pour convaincre les partenaires d'aller plus loin.

Offre et/ou demande le biomimétisme s'est quand-même introduit de manière subreptice dans le développement industriel. En effet, Bhushan (2009) rappelle que les propriétés des matériaux et surfaces biologiques résultent d'interactions complexes entre la morphologie de la surface et les propriétés physiques et chimiques. Les structures hiérarchiques avec des dimensions de caractéristiques allant de l'échelle macroscopique à l'échelle nanométrique sont extrêmement courantes dans la nature pour fournir des propriétés d'intérêt applicatif. Or la panoplie des innovations s'enrichit quotidiennement de nouvelles idées issues de la nature : Les dispositifs à l'échelle moléculaire, la super-hydrophobie, l'autonettoyage, la réduction de la traînée dans l'écoulement des fluides, la conversion et la conservation de l'énergie, la forte adhérence, l'adhérence réversible, la portance aérodynamique, les matériaux et les fibres à haute résistance mécanique, l'autoassemblage biologique, l'antireflet, la coloration structurelle, l'isolation thermique, l'auto-guérison (Speck et Speck, 2019) et les

du public. Quelques exemples sont donc repris ci-après, illustrant le potentiel reconnu d'une approche biomimétique.

- TGV japonais, le Shinkansen (Fayemi et al, 2018 ; Da Silva, 2021) : La partie correspondant au nez du Shinkansen, le train à grande vitesse japonais a été conçue en s'inspirant du martin pêcheur dont la forme du bec (qui tantôt vole, tantôt plonge à grande vitesse dans l'eau) lui confère des propriétés aérodynamiques et acoustiques très intéressantes.

- Profil aérodynamique de voitures (Miller, 2008 ; O'Rourke et Seepersad, 2013 ; Hwang et al, 2015 ; Wei, Xu et Bian, 2020 ; Chowdhury et Loganathan, 2022) : Le design automobile a eu une influence sur l'extérieur des voitures, mais aussi sur leur fonction. Les aspects d'économie et d'efficacité énergétique du biomimétisme ont été adoptés dans les voitures, comme l'a démontré le prototype de voiture concept bionique de Daimler-Chrysler. L'extérieur de la voiture est proche de la forme du poisson-boîte, ce qui la rend stable et aérodynamique.

- Structures renforcées et/ou déployables (Bao et al, 2010 ; Sinn et Vasile, 2022 ; Shyam, Eggermont et Hepp, 2022 ; Becker et al, 2022) : Les cylindres minces en polymères renforcés par des fibres sont utilisés comme structures de bras de robots, en avionique et dans le spatial. Une conception biomimétique d'un cylindre avec des nœuds, imitant le bambou a permis de valider l'idée.

- Ailes d'avion et hélices (Michelson et Naqvi, 2003 ; Irwin et Pavcnik, 2004 ; Church, 2022) : Airbus, une société d'aviation européenne (comme Boeing aux USA), utilise les modes de fonctionnement des oiseaux en vol pour concevoir ses avions. En outre, les oiseaux qui volent sur de courtes et de longues distances ont des plumes et des formes différentes. Ces observations ont été utilisées pour concevoir des avions qui doivent parcourir des distances plus courtes et plus longues de manière différente.

- Velcro (Hwang et al, 2015 ; Bœuf, 2014 ; Descola, 2018) : Le nom de Velcro que tout le monde connaît est issu de l'association des mots « velours » et « crochet » par George de Mastral (un ingénieur suisse) qui avait observé sur son chien la présence de fruits « poilus » d'un végétal assez commun appelé *Xanthium strumarium* (la bardane) qui s'accrochent fortement aux poils (mais aussi la possibilité de les retirer), avec cette tenue mécanique et une possible réversibilité, le velcro a pu naître.

- Adhésifs (Hwang et al, 2015 ; Deming, 2011 ; Wilke et al, 2014 ; Antonioli, 2013 ; Sanchez, 2018 ; Fayemi et al, 2013 ; Narayanan, Dhinojwala et Joy, 2021 ; ASI Adhesives & Sealants, 2022) : Chacun sait que les moules classiques appelées *Mytilus edulis* (ne se détachent pas facilement des rochers, car elles possèdent une force d'adhérence, due au byssus (Un coussinet de byssus d'un rayon de 2 mm est capable de soulever des poids allant jusqu'à 12,5 kg). La structure du byssus est issue de la réticulation de fibres de collagène et d'une protéine qui est plus durable que n'importe quelle autre fibre. Les fibres de nanotubes de carbone (CNT) cultivées et les adhésifs macromoléculaires réticulés agissant respectivement comme le collagène et la protéine du byssus.

- Synthèse du verre (Chekchak et Lapp, 2011) : Devant les propriétés optiques du squelette de verre d'*Euplecta*, une éponge des grands fonds, les scientifiques se demandent comment cet organisme peut synthétiser du verre d'excellente qualité. La biosynthèse du verre imite la synthèse protéique d'*Euplecta*.

- Matériaux structurés à forte tenue mécanique (Ganewatta, Wang et Tang, 2021) : Le riz ou les haricots conditionnés sous vide se raidissent lorsqu'ils sont comprimés. Les particules en forme d'octaèdre ont été imprimées en 3D avec des fibres en nylon, selon un arrangement semblable à

celui d'une cote de mailles ayant ensuite été encapsulé dans une enveloppe en plastique et comprimé.

- **Immeuble s'inspirant des termitières et architecture biomimétique** (Fayemi et al, 2018 ; Hwang et al, 2015 ; Turner et Soar, 2008 ; French et Ahmed, 2010 ; Chekchak et Lapp, 2011 ; Oguntona et Aigbavbo, 2017 ; Vitalis, 2021 ; Ahamed, Wang et Hazell, 2022) : Les termites sont sensibles à la chaleur et contrôlent les flux d'air en créant de nouveaux tunnels et en ouvrant ou fermant les opercules en fonction de la température extérieure. Même lorsque la température extérieure atteint 40°C, les nids maintiennent une température interne de 30°C. Bien qu'il semble que les termites n'aient développé ce système qu'en raison de leur sensibilité aux stimuli externes, il est plus efficace pour maintenir la température que tous les systèmes de ventilation, de chauffage et de refroidissement créés par l'homme. Des immeubles ont été réalisés en exploitant le système développé par les termites.

- **Traitement anti-reflet** (Hwang et al, 2015 ; Lee et Graham, 1986) : L'aréflexie est un phénomène observé dans les yeux des papillons de nuit, qui reflètent toutes les longueurs d'onde de la lumière au-delà du spectre de la lumière visible pour les bloquer. Cela permet au papillon d'éviter les prédateurs et de voir ses proies dans l'obscurité. Ce principe est utilisé à des fins militaires, pour des optiques de lunettes mais aussi pour les diodes électroluminescentes des cellules solaires.

- **« Morphos », cristaux photoniques et ordinateurs** (Bila, 2016 ; Berthier, 2021 ; Fiori, 2022) : La couleur bleue des ailes du Morpho, papillon d'Amérique centrale. Sa couleur est due à la structure en « nano-trous » des écailles sur lesquelles la lumière se réfléchit. Des industriels sur ce principe créent des vêtements sans colorants, ni pigments ou luttent contre la contrefaçon.

- **Mouillabilité** (Bœuf, 2014 ; Descola, 2018 ; Taleb, Darmanin et Guittard, 2018 ; Da Silva, 2021) : Les microstructures de la feuille de lotus la rendent non « mouillable ». La notion de tension superficielle conduit à des applications pour des vitres, des essuie-glaces et des peintures d'intérieur.

- **Lubrifiants** (Nadein et al, 2021) : La zone où le fémur et le tibia se rejoignent est couverte de pores chez le ténébrion meunier (*Tenebrio molitor*), pores qui excrèteraient une substance lubrifiante plus performante que le téflon. La création de nouvelles versions synthétiques inspirées de la nature est envisagée.

- **Matériaux** (Antonioli, 2013 ; Fayemi et al, 2013 ; Descola, 2018 ; MTECT, 2019 ; Tee et al, 2021 ; Li et al, 2024) : Du fil de l'araignée, aux métamatériaux en passant par la nacre et le ciment... Ce domaine est très vaste et mériterait probablement (en dehors de cet article) des compléments et des approfondissements.

- **Robot anguille sous-marin** en 3D (Boyer et al, 2015) : « Reproduire les performances d'un poisson par simple imitation de sa forme et de sa fonction serait impossible car la mise au point d'un véhicule fléchissant de façon lisse et continue est au-delà des possibilités actuelles de la robotique » (Triantafyllou et Triantafyllou, 1995). Le caractère continu des poissons constitue une difficulté importante de la recherche. Ce projet renforce le côté biomimétisme en réalisant un prototype de robot anguille « plus continu » (poly-articulations) que ses homologues actuels. En remarque, il pourrait être judicieux de reprendre ce type d'opération à l'aune des connaissances actuelles en impression 4D (Demoly et André, 2022).

- **Autres robots** (Hwang et al, 2015 ; Witte et al, 2004 ; Boxerbaum et al, 2012 ; Wright et al, 2007 ; Viollet, Dupeyroux et Serres, 2020 ; Astley, 2022) : En robotique biomimétique, les mécanismes moteurs des animaux et des insectes sont imités (pattes et de pieds robotisés). Des bras robotisés appliquent les mécanismes des os et des articulations de serpent ou de la trompe d'un

éléphant. De plus, un iRobot sensible à la pression est capable d'adhérer efficacement à sec, inspiré par les micro-pois sur les semelles d'un gecko, etc.

- **Micro-fluidique** (Hu et al, 2019) : Il s'agit de mimer la vascularisation naturelle sur puce, dont des structures tridimensionnelles (3D) complexes dans des hydrogels chargés de cellules à l'aide de méthodes micro-fluidiques et d'autoassemblage pour des modèles *in vitro* biomimétiques qui doivent compléter les modèles animaux existants.

- **Eclairage public et LED** (Muséum Toulouse, 2022) : L'étude des lucioles a permis d'augmenter de 65% la puissance lumineuse des LED. Par ailleurs, des plantes bioluminescentes sont envisagées pour l'éclairage municipal ou pour les habitations...

- **Cape d'invisibilité** (Muséum Toulouse, 2022) : Des animaux marins, calmars, seiches ou pieuvres ont des pigments de la peau de ces animaux qui contiennent une protéine, la réflectine qui, en milieu acide, devient opaque aux rayonnements infrarouges. Elle serait utilisée par les militaires pour dissimuler hommes et matériels aux dispositifs de vision nocturne.

- **Design biomimétique** (du Plessis et al, 2019 ; Goss et al, 2022) : Il ne s'agit pas ici de réalisation d'objets mais de leurs méthodes de réalisation conduisant également à des méthodes de re-conception autorisées en particulier par les procédés de fabrication additive. Il envisage la production d'objets en métamatériaux (lattices) et possiblement multifonctionnels.

- **Sécurité dans les transports** (Ramirez, 2012 ; Terrier, Glaus et Raufflet, 2017 ; Da Silva, 2021) : Un système de déplacement anticollision inspiré des bancs de poissons avec des déplacements collectifs sans heurts a été réalisé. Cette conception biomimétique permettrait à des véhicules automatisés de rouler en diminuant les accidents et la congestion du trafic.

- **Ensemencement stimulé** (Luo et al, 2023) : Inspirés par les graines d'Erodium, des supports de graines auto-perceurs en bois sont transformés en actionneurs de flexion ou d'enroulement hautement rigides qui enfoncent la semence dans le sol.

Gilles Bœuf (2014) cite par ailleurs une liste d'opérations biomimétiques intéressantes, dont certaines pourraient avoir un intérêt en Génie chimique ou des procédés : « Dans le monde marin, « imitation » du derme des requins pour fluidité, vitesse de pénétration et viscosité dans l'eau, non-fixation de fouling (salissures naturelles) ayant amené à des combinaisons de natation très performantes ou à des revêtements de coques de navires ; conception d'éoliennes et de carlingues d'avion en observant et développant les aspérités des corps des baleines à bosse pour mieux pénétrer air ou eau et gagner de l'énergie ; pales d'hydrolienne et d'hélices sous-marines inspirées de pieuvres, nage à réaction beaucoup plus efficace que les hélices, réacteurs à partir des structures du nautilaire »... (voir également Chaturvedi et al, 2022 ; Pouydebat, 2022). Par ailleurs, UCL (2023) présente une liste de sujets, différents de ceux présentés ci-dessus, propositions qui pourraient alimenter la réflexion sur des thèmes applicatifs d'intérêt.

Avec les « unk-unks » pour « unknown unknowns » (Graham, 2014), une opération est mal définie (systèmes mal conditionnés et/ou complexes) lorsque la situation, le résultat attendu et la voie pour atteindre l'objectif sont difficiles à formuler. Pour Garrette, Phelps et Sibony, (2021), la rareté de ce type de travail à résultats incertains en limite la généralité. En entreprise, ils exigent souvent la réunion de plusieurs domaines de connaissances qui excèdent les capacités de la plupart des individus (dont certains sont hors-entreprise). Sans doute que ce dehors n'est pas sans lien avec ce qui est visible, mais comment le savoir ? Or, ce que montre cette présentation, certes non exhaustive, c'est que les succès du biomimétisme concernent des objets ou des idées d'objets de recherche (dont peu de sujets concernant le Génie des procédés). Ce résultat constitue une indication pour s'engager en formation sur ce thème...

Ce constat est d'ailleurs conforté par les travaux de Lurie-Luke (2014) qui a rassemblé des données de la littérature concernant les éléments naturels servant de point de départ à des applications (cf. figure 4).

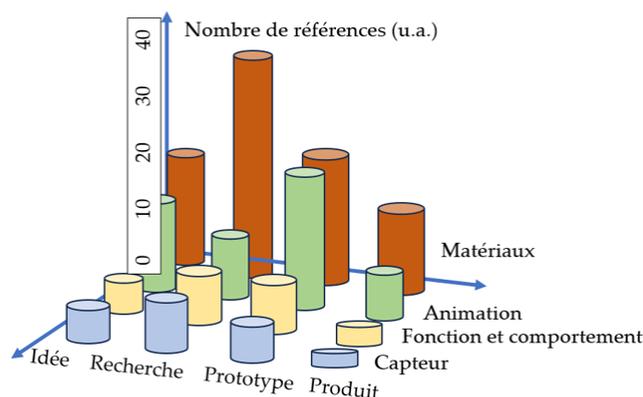


Figure 4. Nature des applications biomimétiques

Comme beaucoup de belles idées générales, le biomimétisme est parti de la simple imitation de forme ou de fonctionnement proche du vivant en s'intégrant et en se combinant sur des sujets particuliers aux sciences de l'ingénierie pour faire émerger des applications et des modes de production alternatifs, sans que des approfondissements majeurs soient observés (cf. figure 2). Or, l'accélération du progrès technologique dépend de l'exploitation de la croissance exponentielle de la quantité et de la variété des données disponibles par/pour l'informatique. Le calcul et l'automatisation de l'acquisition des données pourraient permettre aux systèmes automatisés d'analyser les données et d'extraire des connaissances, de créer des alertes et de guider l'acquisition de données supplémentaires, etc. (Intelligence artificielle). En ce sens un travail (considérable) est à faire ! Mais par qui ? En tout cas, cette réflexion sort du présent travail.

3. Evolutions du métier d'ingénieur et un peu de biomimétisme

En examinant les programmes de nombre d'Ecoles d'ingénieurs, la tendance académique dominante consiste largement à proposer des formations comme celles proposées pour des scientifiques « unidimensionnels », ce qui pour Dias de Figueiredo (2014) rend l'occurrence combinée des compétences en un seul diplômé presque impossible (cf. Schaer, Demoly et André, 2024). Selon cet auteur, avec les apprentissages déterministes classiques (réponse à des questions techniques), un « ingénieur complet » serait une combinaison de stratège-intégrateur, de scientifique-penseur, d'Homme d'affaires-humaniste-négociateur et d'homme d'action... Paradoxalement, pour Jamet et Vincent (2016), les étudiants apparaissent de plus en plus déconnectés de cette philosophie éducative. Leur culture deviendrait plus nomade, en affichant vis-à-vis des connaissances un comportement de « chasseurs cueilleurs ». Comme cela a été constaté, ils sont intéressés par des interactions en temps réel et des expérimentations. Leurs modes de pensée, réticulaires et transversaux, s'écarteraient de plus en plus des canons d'une offre de formation déterministe et disciplinaire.

Dans ce contexte, Rosalind Williams (2002) déclarait que l'ingénierie comme profession avait besoin de se revisiter parce que les composantes qui ont fait de l'ingénierie un support essentiel au développement sociotechnique sont en train de se séparer. D'une part, depuis peu, des réalisations majeures en ingénierie n'auraient pas été initiées par des ingénieurs, mais par d'autres personnes issues plutôt de domaines scientifiques. D'autre part, le besoin de formations sur des approches interdisciplinaires n'est pas suffisamment pris en compte dans les programmes.

S'ouvrir dans un cadre de développement durable au biomimétisme ne couvrira pas tout le champ de ces remises en cause (accélééré depuis peu par le redéploiement de l'intelligence artificielle ; cf. par exemple Ahmed, Wahed et Thompson, 2023), mais en quelques séances permettrait aux étudiants de

constater les limites de leurs formations, nécessitant de mieux relier le vrai monde à l'aspect « décharné » (mais efficace) des formations actuelles. En effet, même si l'information circule plus rapidement et largement que jamais, l'acquisition de compétences transverses et plus encore connectives sont valorisées aujourd'hui car associées à de précieuses capacités d'empathie et d'innovation en situation complexe (Christensen et al, 2013). Pour aborder ces situations, marquées par de nombreuses interdépendances, l'hybridation entre disciplines est requise. C'est, indépendamment de la matière même du biomimétisme une voie qui permet des ouvertures sur la nature. Il s'agit bien de permettre un « lâcher-prise » pour que les étudiants sortent de leurs « zones de confort » pour trouver des pistes de solution originales pour leurs domaines grâce à l'exploration d'un monde qui leur est normalement étranger (cf. Pinker, 2011).

Enfin, cette ouverture permettrait des expérimentations, certes en nombre modeste (d'ailleurs non limitées dans leur principe au seul biomimétisme), sur l'intérêt d'activités économiques profitables ancrées dans la notion de liens (cf. GWI, 2023 ; Industrial Commons, 2023). Il s'agit, par exemple de réseaux intégrés de structures de productions de pointe ayant, en plus de leur activité principale, pour mission le réseautage, la réduction des productions de déchets, la gestion intelligente des ressources communes, mais également un « espace de création » pour la communauté des acteurs.

4. Un retour sur l'invention

« Puisque le caractère fondamental du vivant est contenu dans son organisation, l'investigation coutumière d'une partie ou des processus ne peut offrir une explication complète d'un phénomène vital. La tâche principale de la biologie doit donc être de découvrir les lois régissant les systèmes biologiques. Nous pensons que cet effort de découverte constitue un fondement pour la biologie théorique engendrerait un changement fondamental de notre perception du monde » (Von Bertalanffy, 1972).

Il existe de nombreuses analyses de la créativité (Boden, 1999 ; 2004 ; Fayemi, 2016 ; Goel et al, 2014 ; Gabora, 2013 ; André, 2023 ; etc.). Il convient en effet, pour répondre aux besoins exprimés par la société (ce qui amène à éviter de cantonner le chercheur dans sa discipline et dans son activité lui permettant de dépasser les limites du savoir), de trouver des voies de « transgression » qui doivent autoriser et soutenir de nouveaux couplages culturels. Pour anticiper dans son domaine sur la demande sociétale qui pourra lui être faite (ou qu'il a envie de promouvoir), l'ingénieur doit-il s'engager, seul ou avec d'autres, dans une réflexion prospective, uniquement sur des visions d'applications potentielles ou, de manière plus complexe sur des concepts nouveaux ou des idées révélées par la nature ? La créativité, une fois acceptée, est une voie de transgression du conservatisme disciplinaire.

Pour autant, Fayemi (2016) nous rappelle que la recherche des idées biomimétiques est une démarche fastidieuse. « Provenant de différentes disciplines, les termes encourus diffèrent, aucun mot clé capable de fédérer l'ensemble, ou même une partie, des outils facilitant l'implémentation concrète d'une démarche bio-inspirée, ne semble exister. Il est probable que l'émergence d'une telle balise faciliterait l'agrégation des outils biomimétiques, facilitant l'accès des potentiels développeurs d'outils aux connaissances relatives au sujet ». Mais, c'est possiblement un passage obligé pour opérer des changements ou des suppressions d'une ou plusieurs contraintes de l'espace exploré traditionnellement par les spécialistes du Génie des procédés, qu'il s'agisse d'approches « solution-based » ou « problem-driven ».

Dans ce projet d'une aventure nouvelle, on peut se contenter de rencontres fortuites allant d'un constat de la possible exploitation de systèmes naturels accessibles à un possible usage en Génie des procédés à des applications profitables dans ce même domaine, mais si l'on veut rendre plus prégnante une logique d'action, il peut être intéressant de partir des conclusions pour remonter aux causes (délicat problème inverse) impliquant connaissances disjointes à rassembler (interdisciplinarité) et Génie des procédés pour gérer les propositions en termes méthodologiques et pratiques (dont la gestion ultérieure de la complexité dans l'innovation). Mais, en amont de ces considérations, « pour mieux comprendre

le processus de construction de nos savoirs issus de notre pratique, il faudrait remonter à l'expérience ontologiquement première où on se situe, avec l'idée exprimée, à un point antérieur à la distinction entre l'intuition et l'intelligence. C'est notamment pourquoi nous parlons, rappelons-le, d'un antécédent expérientiel permettant l'enclenchement de la construction d'une nouvelle représentation du monde, en passant par une forme de redéfinition du moi, en tant que participant à ce monde » (Gambier, 2019).

De manière évidente, les premiers pas des changements induits par ce déclencheur qu'est l'idée sont particulièrement importants puisqu'ils conditionnent l'émergence d'une proposition crédibilisée. De fait, l'idée émerge au cours de l'action issue de l'observation de la nature comme une intrusion contingente, car elle rompt ou apporte des éléments nouveaux qui sortent des savoirs précédemment acceptés (idée selon Lavelle (1992) d'une « appréhension confuse »), sorte d'apprentissage transformateur (de manière plus ou moins radicale). Il se définit ultérieurement par un changement de représentation de son environnement. C'est d'ailleurs à partir de cet espace de connaissances préalables, associé à une représentation (ancienne, mais robuste), qu'émerge une idée. Gambier (2019) considère qu'une « traduction » de l'idée passe par une sorte de hub, d'échangeur où se croisent diverses disciplines et/ou métiers, mais sans qu'on sache exactement les conditions et les effets de ces croisements : Pour reprendre la proposition de Marc Augé (1992), les disciplines convoquées seraient plutôt dans une relation de « consommation », de « digestion » avant de faire émerger une réciprocité, malgré une volonté initiale de partage dans/pour une rencontre qui doit être fructueuse. En effet, les notions de représentation, et surtout celle du changement de représentation, sont centrales puisqu'on vise à rendre crédible ce qui va être une idée.

Un élément important doit être rappelé, c'est qu'émettre une idée demande d'être capables de sortir des sentiers battus et d'accepter des propositions alternatives à des propositions initiales, elles-mêmes, non approfondies. L'idée, pour beaucoup, est arrivée par hasard ! Mais, pour Mishima (1989), « parler du hasard, c'est nier la possibilité de toute loi de cause à effet. Le hasard est finalement l'unique élément irrationnel que peut accepter le libre arbitre ». De son côté Horenstein (2002) traite de l'idée issue d'une seule personne, disposant d'une culture scientifique adaptée pour rassembler les pièces du puzzle par le biais d'un bricolage un peu savant qui rassemble avec l'élément nouveau des éléments scientifiques et techniques maîtrisés pour garder une idée du tout. Ce bricoleur dispose donc d'une certaine culture dont des éléments scientifiques sont organisés « jusqu'à ce que tout à coup – de manière presque surprenante – cela prenne du sens et que l'innovateur puisse dire « eurêka » » (Millier, 2016). En revanche, pour des situations moins assurées, les caractéristiques de l'idée ne sont pas complètement déterminées et le nombre de solutions et/ou voies de solution capables de satisfaire (ou pas) le besoin sous-jacent peut être élevé. Pour le biomimétisme, certains considèrent utile d'associer des spécialistes de la nature (de quels spécialistes disciplinaires parle-t-on ?), mais la possibilité d'échanges constitue une voie de stabilisation de cette « appréhension confuse ». En effet, la capacité créative ne peut s'exprimer que par la capacité qu'à l'individu à passer outre le jugement majoritaire et peut nécessiter des appuis (McCauley, 2012).

Pour Layton (1976), « Du point de vue de la science moderne, la conception n'est rien, mais du point de vue de l'ingénierie, la conception est tout. Elle représente l'adaptation à dessein de moyens pour atteindre une fin préconçue, l'essence profonde de l'ingénierie ». Dans ce cadre, le but de l'opération de clarification, a comme mission de vérifier que si le préalable de l'idée ne fait pas sens, il est jugé sans valeur (Cholle, 2020). Avec le soutien d'un groupe plutôt informel qui participe à la clarification de la pré-idée, il doit être possible d'observer un moment un peu magique où l'idée naissante n'est pas encore confrontée aux contraintes de la recherche et effleure à peine ce qui pourrait être une réalité. C'est une naissance ! « La dialectique à l'œuvre lors de cette séquence longue, entre le geste créatif et sa pleine réalisation, englobe ainsi la genèse, la circulation, la réception et l'appropriation de connaissances nouvelles, et ceci à un niveau collectif aussi bien qu'individuel » (Ancori, 2014). La figure 5 donne une idée de ce qui est attendu du travail de clarification. Au départ dans une coopération idée-expertise de clarification, qu'elle qu'en soit la nature, il y a normalement un désir, celui de travailler avec « l'autre » parce que sa pratique résonne avec la nôtre ou bien la

questionne, celle de sortir de son quotidien, etc. Il y a une envie de partage, quitte à changer son point de vue par les apports de l'autre. C'est bien le renouvellement du regard et du point de vue que la mutualisation de savoirs suggère un processus de « déterritorialisation » pour reprendre l'idée de Deleuze et de Guattari (1972).

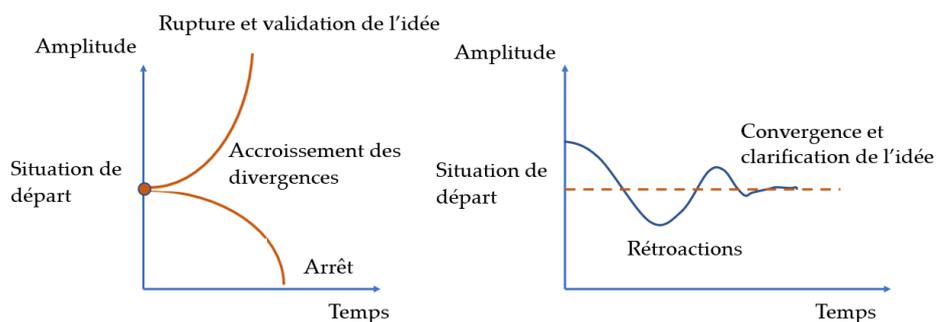


Figure 5. Clarification d'une pré-idée

Les formations spécialisées et de haut niveau diminuent par formatage disciplinaire les opportunités d'innovation et, quand des idées émergent, des difficultés à trouver des solutions viables apparaissent pour des raisons liées à la médiocre convergence d'idées (André, 2023). Pour avancer, une diversité de points de vue motivés est nécessaire, avec le risque qu'ils entrent en conflit. Réconcilier et synthétiser les points de vue pour que « le tout forme plus que la somme des parties », telle est l'essence de la science de l'intelligence collective. On observe un renforcement des interactions sociales, qu'apprendre et contribuer dans un environnement de travail ludique et sans jugement tend à augmenter fortement la motivation des étudiants, leur engagement, ainsi que leur satisfaction de participer à des opérations pédagogiques nouvelles porteuses de remises en causes scientifiques, ouvertes sur la société.

C'est avec des étudiants de dernière année de l'ENSIC, une des grandes écoles d'Ingénieurs de l'Université de Lorraine, que nous avons tenté de valider ces différents concepts pour la composante « Génie des procédés ». Avec une visée future orientée pédagogie, nous n'avons pas cherché à introduire des éléments extérieurs pour permettre aux étudiants de garder leur relationnel et surtout leur spontanéité. Ce sont ces éléments qui sont décrits ci-après.

5. Idées biomimétiques en Génie des procédés

Selon Ripoll, Godino-Ojer et Calzada (2023), les enseignants de Génie chimique ou des procédés constatent que leurs étudiants sont découragés par la nature hautement technique des sujets enseignés, qu'ils comprennent mal comment le sujet est lié à leur domaine et qu'ils manquent d'aptitudes et de compétences de base en matière d'ingénierie. L'objectif du projet d'exploration de l'usage du biomimétisme pour le développement du génie des procédés était de motiver des étudiants pour un projet consistant à un jeu entre égaux (élèves-ingénieurs de dernière année de l'ENSIC) et de surmonter des difficultés posées par les cours magistraux (cf. encadré 2). A cette fin, une série de questions/réponses/débat pratiques a été conçue pour un groupe de 5 étudiants avec une activité d'apprentissage rapide sur le biomimétisme avec deux cibles principales : traiter de verrous liés aux opérations unitaires du Génie des procédés, pour envisager de possibles inventions. Volontaires pour l'expérimentation, sensiblement de même niveau, ils se sont auto-sélectionnés de manière à éliminer au maximum les « effets de robe » faisant émerger des concurrences néfastes. De manière évidente, pour des raisons de temps (une demi-journée) et de compétences, seule la partie « émergée » du biomimétisme accessible à une vision externe au champ naturel a été ciblée (cf. figure 2).

Il n'y a, en tout état de cause, pas volonté de rechercher à séparer, voire opposer les technosciences des activités scientifiques essentiellement cognitives, théoriques, symboliques et d'observation du monde. Au contraire, dans le développement scientifique actuel, plusieurs cultures

et visions peuvent/doivent cohabiter et s'enrichir l'une l'autre. « La recherche, qui prend en compte les problèmes scientifiques de la société, peut-être tout aussi fondamentale que l'autre et qu'il n'y a pas de dichotomie, mais un continuum qui va de la Science à l'Application » (Gagnepain et André, 2008). En tentant de resituer « la recherche et les chercheurs dans le contexte de la vie de la cité » (Pompidou, 2004), ce petit travail a été lié à l'existence de certaines étroitesse des hypothèses, d'investissement dans des opérations créatives et à risque élevé, de préférences individuelles, de nature des interactions et de mutualisation de savoirs, etc. En tentant de réfléchir au rôle des dispositifs d'échanges et des rapports de force s'exerçant tant entre personnels en interne, qu'en externe, la démarche souhaitait échapper aux discours pédagogiques conventionnels internes. D'ailleurs, pour certains le Génie des procédés ne serait qu'une « boîte à outils », constituée pour l'essentiel de méthodologies quantitatives s'appliquant encore avec succès à beaucoup de réalités étudiées, pour d'autres un paradigme dont les concepts engagent en profondeur la compréhension des procédés de transformation de la matière et de l'énergie.

Dans un travail d'entretien approfondi avec les enseignants-chercheurs, réalisé en 2016 par Marine Horckmans, la discussion avec les formateurs ne dégage pas l'idée d'une fonction objectif pédagogique ordonnée de l'extérieur en lien avec leurs travaux de recherche : l'applicabilité des recherches qui façonnerait en profondeur le regard des chercheurs sur leur propre activité scientifique n'irait pas systématiquement vers la formation. L'enquête a mis à jour la faiblesse des médiations sociales par le jeu desquelles les relations d'individu à individu se seraient vues transformées et modelées pour éviter une anarchie éducationnelle et pour s'inscrire dans une compatibilité globale faisant sens pour la formation des ingénieurs ENSIC. Quelle énergie est alors fournie pour atteindre cet état d'équilibre dynamique permettant de lutter contre les premier et second principes ? Dans les faits, n'apparaît-il pas clairement une conception du monde de la recherche centrée sur soi, sa promotion et un fétichisme normé de l'évaluation nationale qui lui est adaptée et peu sur l'enseignement ? Les relations entre acteurs apparaissent-elles alors en second plan, pourquoi pas en antagonisme ? Y-a-t-il une volonté d'organiser la pédagogie en vue d'une fin opératoire « éclairée » ?

En s'impliquant dans une telle action en profondeur, la motivation individuelle, si l'on savait la faire émerger, devrait pouvoir révéler « l'intelligence collective », le soutien informel à la curiosité, à l'anticipation et démultiplier la performance créative. Pour la recherche, la plupart des enseignants-chercheurs développent leurs talents au sein du LRGP – UMR 7274 CNRS-UL. Plusieurs tendances, parfois paradoxales, sont ressorties :

Aucun membre du LRGP ne sait bien ce qui se passe dans tous les autres bâtiments/les autres équipes ;

Très peu d'interactions en dehors du travail quotidien (projets communs) ;

Quelques équipes sont refermées sur elles-mêmes (des « CNRS enfouis au fond de leur laboratoire ») ;

Mais, une volonté souvent affichée de s'ouvrir d'avantage aux autres composantes du LRGP.

La diversification des domaines d'application du Génie des procédés a conduit au recrutement de personnels ayant des compétences « complémentaires », mais qui ont parfois du mal à être « canalisées » ou plus simplement associées. Ils se spécialiseraient dans des domaines avec lesquels les autres équipes de l'unité de recherche ne peuvent guère interagir, faute de possibilité d'impliquer ces disciplines dans des travaux sur des « objets-frontière » qui constituent leur activité principale. Cependant, la majorité des personnel s'est montrée plutôt intéressée (mais avec des réserves) par l'idée de travailler sur des projets communs et transverses, pendant qu'un tiers du personnel a

annoncé son refus d'y contribuer, même avec financement. Certains évoquent par ailleurs des réserves dues à de possibles abus : peur de se faire voler ses idées, d'avoir affaire à des profiteurs, à perdre du temps, etc. Comment assurer un esprit d'équipe afin que tous les membres jouent le jeu ?

Dans ces conditions, si seul le critère d'évaluation est pris en compte, il n'y a pas de vrais liens entre membres du personnel de l'unité de recherche (si l'on pousse le propos à ses limites). Chacun fonctionne alors dans son silo, dans l'indifférence aux autres, ce qui peut définir une forme d'attracteur stable du fonctionnement d'une entité qui se rapproche plus d'un hôtel équipé en instruments, etc. que d'une « unité » de recherche, car toutes les possibles tensions, la « substance sociale », se traduisent par la mesure quantitative du (seul) facteur d'impact des travaux scientifiques. Pourtant, ne peut-on pas penser que le fonctionnement « harmonieux » d'une telle structure passe par la recherche dynamique de réduction des déséquilibres et des tensions internes tout en gardant comme objectif (imposé) l'efficacité de ses travaux et l'ouverture sur des sujets neufs et attractifs ?

Sur cette base, il conviendrait, de manière un peu cynique ou simplement managériale, de maîtriser des stratégies d'induction comportementales qui vont faire accepter la nouvelle donne relationnelle dans son cadre réparti dans l'ensemble de l'unité, mais encore de la faire désirer, formatage d'engagement à s'engager dans un comportement organisationnel spécifique, utile mais nouveau... « Le sens de nos actes, de nos vies, est effectivement situationnel : l'individu n'est jamais « producteur de sens », le sens émerge de ce soubassement multiple et contradictoire, ensemble ouvert et donc non démontrable, infini » (Benasayag, 2010).

« Les périodes créatrices ou novatrices sont précisément celles où, sous l'influence de circonstances diverses, les Hommes sont amenés à se rapprocher plus intimement, où les réunions, les assemblées sont plus fréquentes, les relations plus suivies, les échanges d'idées plus actifs » (Durkheim, 1967). A l'évidence, les entretiens ne font pas apparaître de rencontres favorisées permettant le débat constructif... Cela ne signifie pas pour autant qu'il aurait lieu (ou pas), mais il a été difficile dans l'inertie ambiante et traditionnelle dans des unités ayant une qualité scientifique reconnue dans leurs travaux, de soutenir des forces potentiellement émergentes permettant les évolutions, évolutions qui devraient rentrer dans l'idéal collectif.

Dans ce contexte, et c'est dommage, il paraissait difficile de s'appuyer sur le seul corps professoral de l'ENSIC ne définissant pas toujours un couplage clair entre formation et recherche, pour tenter d'expérimenter cette ouverture vers le biomimétisme...

Encadré 2. *Pourquoi et comment cette activité particulière a existé en dehors du corps enseignant ?*

5.1. Cadrage

Salgueiredo (2016) rappelle que la littérature scientifique concernée par la conception bio-inspirée peut être analysée sous deux aspects :

- « La caractérisation de ce processus de conception, identifiant les étapes, les processus mis en œuvre, les théories de la conception qui peuvent l'expliquer ;
- Les méthodes pour mettre en œuvre ce processus de conception. Les bases de données, analyses fonctionnelles, [...] etc. ».

Cette vision certes très utile s'affranchit de l'idée d'avoir découvert une idée transférable et de l'avoir sélectionnée (Pomerol, 2022) alors que l'on se situe dans un monde incertain, à l'interface entre nature et sciences de l'ingénieur. Plusieurs méthodes et outils tentent d'aider à une décision d'un point de vue « extraction d'idées issues de la nature » et aide à l'innovation pour appliquer la conception bio-inspirée. Citons, en s'appuyant sur Salgueiredo (2016) :

- Bases de données : comme par exemple AskNature2 ;
- Ontologies (Vincent, 2014) ;
- Recherche par mots-clés dans des textes écrits en langage naturel (Shu, 2010) ;
- Veille bibliographique (Vincent, 2009) ;
- Recherche sur internet (Vandevenne et al, 2013) ;
- Consultations d’experts ;
- Utilisation de l’intelligence artificielle (IA) ;
- Outils permettant une analyse fonctionnelle plus ciblée (Nagel et Stone, 2012 ; Helfman Cohen, Reich et Greenberg, 2014) ou une meilleure description des problèmes et des solutions biologiques (Vincent et al, 2006 ; Sartori et al, 2010 ; Wiltgen et al, 2011 ; Kruper et al, 2018).

Ceci étant, il est ici envisagé que l’on soit capable de disposer d’une idée biomimétique et d’un questionnement d’ingénierie sur le « comment aller plus loin » ? On se trouve dans des situations où il faut croiser des savoirs disjoints, très interdisciplinaires avec de nombreuses incertitudes. Ce croisement ne peut être opéré avec des étudiants s’initiant déjà au biomimétisme (mais pourrait se mettre en place dans une phase postérieure).

5.2. Opérations unitaires du Génie des procédés

Un paradoxe central du Génie des procédés est la diversité qui se cache derrière une unité apparente ou au moins une cohérence proposée, réelle expression-valise. Si l’on prend, par exemple, une revue de premier plan dans le domaine comme AIChE J. (American Institute of Chemical Engineering Journal), il est possible de mettre en évidence la diversité du domaine, avec des articles d’approfondissement et d’objets-frontières originaux qui exploitent des savoir-faire stabilisés en Génie des procédés. Lorsque l’on tente de comparer les articles scientifiques entre eux, il n’est pas toujours aisé de les considérer comme appartenant strictement au même domaine scientifique. D’ailleurs l’absence de consensus de la part du monde scientifique sur une définition du Génie des procédés et la diversité irréductible des pratiques couvertes par cette science de l’ingénieur, vieille d’un peu plus d’un siècle aux USA et au Royaume-Uni, sont les symptômes de son statut épistémologique particulier (Schaer et André, 2020). Et c’est là la démonstration à la fois d’une force, l’inclusion dans une communauté de pensée et, dans le même temps, une faiblesse par transfert (une autre forme de délégation) vers des objets actuels qui ont besoin du support des connaissances du domaine (cf. encadré 2). Cette richesse est primordiale grâce aux ouvertures qu’elle permet. Mais, dans le même temps, elle risque de devenir une science serve de domaines socialement plus porteurs (dont celles qui concourent à son développement).

Mais le domaine du Génie des procédés a sans doute besoin pour évoluer qu’il existe des controverses scientifiques et techniques, de nouvelles énigmes pour stimuler son imagination ; la riche vascularisation entre son pré-carré proche de la socio-économie et ses associés naturels nombreux (et parfois compliquée dans les relations) peut constituer un atout pour son ressourcement, un avantage considérable quand on connaît la difficulté d’inventer dans des opérations interdisciplinaires de tels espaces collectifs (Schaer et André, 2020). Toutefois, dans la logique d’une transformation de la matière industrialisable, la place de cette discipline n’est que partielle, elle n’intervient que très rarement en première instance de ce développement (ce qui lui a conféré pendant longtemps une image de science serve, voire de simple technologie support). La figure 6 provenant de Freund et Sundmacher (2008), illustre ce qui en est entendu par opération unitaire associée à des modules fonctionnels (et qui rentre dans les formations ENSIC).

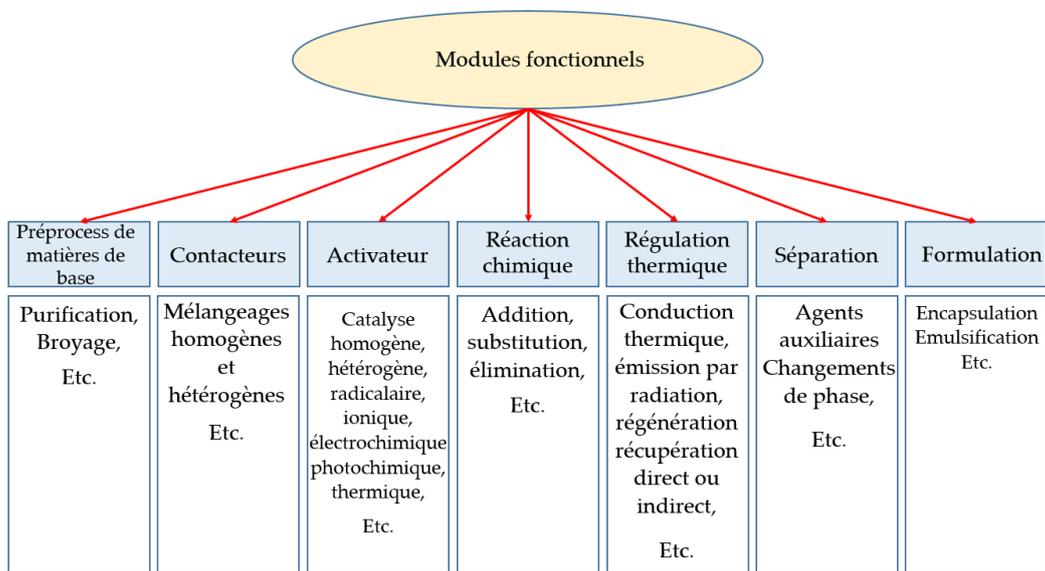


Figure 6. Séquence de modules fonctionnels

Le tableau 1 illustre l'existence de besoins spécifiques pour les opérations unitaires visant soit des ruptures technologiques, soit des progrès améliorés.

Domaine	Sous-domaine
Economies d'énergie et de matières premières	Tous (OIE, 2015)
Production plus propre	Elimination à la source Substitution du procédé Substitution des produits Réduction à la source par modification du procédé Minimisation des déchets (dont recyclage et utilisation sur place)
Recyclage	Recyclage extérieur Récupération Valorisation des déchets
Maintenance, vieillissement	Tous (Rabiller-Baudry, 2009)
Contrôle de la pollution	Captage Traitements chimiques, physiques, biologiques
Elimination des déchets	Enfouissement Stockage
Gestion des données, Big Data	Tous

Tableau 1. Verrous généraux (Schaer et André, 2019 ; OIE, 2015 ; Rabiller-Baudry, 2009)

Pour les étudiants les souvenirs récents sur les formations liées à ce domaine ne se traduisent pas par une attractivité bien élevée, d'autant plus que dans l'apprentissage rapide des savoirs, on n'a pas fait systématiquement état de verrous scientifiques et/ou technologiques qu'il serait avantageux de faire sauter. Ils n'ont *a priori* qu'une idée très imprécise des domaines à explorer, encore moins par la voie biomimétique.

5.3. Idées « spontanées »

Expliqué en amont d'une réunion réunissant des collègues impliqués dans les formations et la recherche en Génie des procédés, l'objet plan était de procéder à une association d'idées/d'images ou de présenter des « technologies biomimétiques » déjà existantes pour stimuler la créativité des présents et, à terme, la création de compétences résilientes. Ainsi, les attendus étaient de faire émerger une idée technologique, à partir de photographies issues de la nature, d'opération unitaire s'appuyant sur une propriété ou sur un mécanisme présent dans la nature et répondant à une des problématiques du Génie

des procédés (cette méthode se rapproche d'Ideamatch (<https://ideamatch.io/>) qui, générale, utilise deux photographies, une concernée par la nature, l'autre par un artéfact). Ici, disposant normalement d'une connaissance actuelle sur le génie des procédés, seule une photographie issue de la nature a été utilisée – cf. encadré 3). Un ensemble de photographies fournies par les auteurs a ainsi permis après environ quelques heures de propositions et de débats (parfois animés), la fourniture d'une liste d'idées, traduite par le bilan résumé ci-après :

- 1- Conception d'un réacteur ou d'un bioréacteur similaire à un estomac. Ce réacteur doit pouvoir remplir les fonctions d'un réacteur classique, mais doit agir de façon autonome, c'est-à-dire sans commande électrique apportée par l'extérieur. Ainsi, l'idée est à associer un système de vannes permettant le contrôle des entrées et sorties de matière autonome comme la nature sait le faire ;
- 2- Conception d'un réacteur à cavitation s'inspirant du mécanisme de la pince de la crevette pistolet. Le principe de cavitation peut permettre de créer de la turbulence au sein d'un fluide et de favoriser ainsi le transport ou le mélange des fluides, ou le nettoyage de surfaces par éliminations de dépôts, voire de la sonochimie ;
- 3- Conception d'un réacteur tubulaire à base de structures actives à faible nombre de Reynolds (ou équivalent non newtonien) pour faire le la 3D Food à partir de fluides devenant pâteux ;
- 4- Reproduction des fonctions biologiques des branchies des poissons pour améliorer l'extraction gaz-liquide ; utilisation d'échangeurs fractals (cf. poumons) ;
- 5- Utiliser des structures inspirées des peaux de requins pour les parois internes de conduite afin d'éviter le phénomène d'encrassement ;
- 6- Développer, par exemple pour des joints, des principes d'autoréparation comme le font les arbres dont on extrait la sève ;
- 7- A l'exemple des vaisseaux sanguins, envisager l'implémentation d'un système avec des « ressorts macromoléculaires » dans les conduites pour sécuriser leur paroi interne (amortisseur hydrodynamique pour améliorer la durée de vie des conduites réalisées en matériaux fragiles) ;
- 8- Conception de nanorobots se déplaçant comme un serpent capable de s'infiltrer dans tout type de milieu et capable de s'assembler pour former une plus grande structure fonctionnelle ;
- 9- Conception d'une technologie de capture de l'humidité ambiante à la manière du coléoptère d'Afrique condensant l'eau à la surface de ses micro-pois ;
- 10- Utilisation de « cailloux » ou autres éléments permettant le broyage de constituants à la manière des oiseaux broyant leur nourriture dans leur estomac ;
- 11- Mise en place de radars/capteurs utilisant les ondes comme marqueurs pour le contrôle de procédés (exemple : contrôle de niveau). Cette technologie peut s'inspirer de l'écholocation des chauves-souris utilisant des ultrasons (ces types de capteurs existent déjà) ;
- 12- Capteur de sécurité stoppant un procédé en cas de danger et basé sur le phénomène de repli de la feuille de Mimosa par stimulation par le toucher ;
- 13- EPI (Equipement de Protection Individuelle) qui se referme/s'ouvre en présence d'un produit chimique toxique ou vêtement 4D de sécurité (imperméable en présence de pluie, changement de couleur avec la chaleur, ventilation en présence d'humidité, etc.) ;
- 14- Fabrication de nouveaux matériaux plus résistants (matériaux auxétiques, lattices, métamatériaux) s'inspirant des structures hexagonales créées par les abeilles dans les ruches ;
- 15- Surface photochrome changeant de couleur pour absorber plus ou moins la lumière, donc la chaleur (inspiré du papillon et du caméléon) ;
- 16- Surface devenant anti-dérapante au contact de l'eau ou d'un solvant ;
- 17- Revêtement hydrophobe comme la feuille de lotus pour l'imperméabilisation de surface par exemple ;
- 18- Utilisation de ressources naturelles pour concevoir des nouveaux matériaux à base de bambou, avec une association de chitine et de protéines de soie ou encore avec des fils de soie des araignées, mêlant résistance, souplesse et légèreté ;
- 19- Recyclage des fils de soie de l'araignée afin d'envisager un nouvel usage. Ceci rentrerait par exemple dans le cadre d'un modèle circulaire avec une production sans déchet.

Des questions du type suivant ont été posées :

- A quoi cela vous fait-il penser ? Qu'est ce qui se cacherait dans cette image ?
- Quelles propriétés seraient-elles intéressantes d'exploiter ?
- A quels mécanismes/technologies existant(e)s cela vous fait-il penser ?

Une liste des images suivante a servi de point de départ : une structure de nid d'abeille, un organe vivant, une termitière, des structures ligneuses, une fleur de badiane, un caméléon, un stomate, un serpent, une chauve-souris, un gecko, une toile d'araignée, de la peau de requin et autres mammifères marins, le papillon Morpho, la feuille du lotus, la pomme de pin, la crevette pistolet. De très modestes explications ont parfois été nécessaires, mais sans plus.

Encadré 3. *Exemples retenus*

Comment cela a été montré dans ce texte avec des pratiques inventives simples, l'activité biomimétique se rapproche de ce que tout étudiant engagé dans des travaux sur l'innovation a appris : « Keep it simple ». C'est ce qu'ont proposé les étudiants de l'ENSIC, relativement monochromes en termes d'éducation, en proposant des opérations/des objets d'intérêt simples dans un contexte relationnel serein.

5.4. Pour aller un peu plus loin

Pour Gregory (1996), « la méthode scientifique est un modèle de comportement de résolution de problèmes employé pour découvrir la nature de ce qui existe, alors que la méthode de conception est un modèle de comportement employé pour inventer des choses de valeur qui n'existent pas encore. La science est analytique ; la conception est constructive ». C'est cette logique de conception que les étudiants ont souhaité explorer. Ainsi, après la sélection d'une idée, la fin provisoire de l'opération signifie qu'une décision peut être prise et donc légitimée à la fin d'une expertise scientifique rapide menée avec les auteurs et par l'aptitude technologique envisagée (réalisation de la Preuve de Concept) à y répondre. Cette solution d'action suppose qu'on ait su apprécier des aspects opérationnels, d'en connaître les paramètres et, si possible avoir une petite idée des suites envisageables en comparant les mérites potentiels de plusieurs options. L'anticipation et l'explication des effets potentiels font partie des conséquences attendues. On retrouve ici, ce qui a été présenté dans Schaer, Demoly et André (2024) concernant en invention/innovation des propositions « satisficing » introduites par H.A. Simon (1996) avec les sciences de l'artificiel.

Ces activités, ne vont pas de soi et engagent des prises de risque concernant le devenir de l'idée, certes encore fragile, d'autant que les décisions à prendre s'inscrivent dans un environnement compétitif qui pourrait l'affecter (que les étudiants peuvent ne pas connaître). « Qu'est-ce que décider sans bases solides, dans la complexité et dans le flou ? Qu'est-ce qu'agir sans confiance préétablie en des institutions, en l'absence de normes stables ? En quoi la précaution, la prudence, la souplesse, la réversibilité deviennent-elles des ressources facilitant (et des contraintes limitant) la décision et l'action ? En quoi l'instauration de formes diverses de délibération aide à affronter des dilemmes insolubles ? En quoi la sagesse pratique ou la réflexivité peuvent servir de principe de guidance de l'action ? La liste des interrogations n'est pas close. Au contraire même, le champ en semble bien large, le problème serait plutôt d'en circonscrire le périmètre » (Soulet, 2017)...

Dans une Ecole engagée dans le domaine des procédés de transformation de la matière et de l'énergie, mais ayant quelques liens avec la matière à transformer ou à produire, la plupart des propositions liées au groupe de « brainstorming » traitent de manière très spécifique d'opérations particulières pour lesquelles des choix opérationnels « au doigt mouillé » sont proposés. C'est ainsi qu'après les 19 propositions qu'ont été sélectionnés deux opérations, l'une visant un réacteur auto-

adaptatif (vannes issues de l'idée de stomates ou celle d'effet bilame de la pomme de pin), l'autre d'une aide à la plantation de semences sur des sols perturbés par impression 4D (matière activable de certains végétaux). Ce travail complémentaire a été réalisé par deux étudiants avec les auteurs sur une durée de deux semaines (en s'appuyant sur l'expertise de Demoly et André, 2022).

5.4.1. Réacteur auto-adaptatif

L'idée (non biomimétique), déjà été exprimée par Zhong et Langrish en 2020 et de manière plus littérale par Li et al, 2020. Indépendamment de cet aspect, l'objet est de réaliser un réacteur chimique ou biochimique sensible à l'avancement d'une transformation de matière (d'où un réacteur batch) en ce sens où c'est l'avancement qui implique un vidage du réacteur, avec des entrées adaptées : le changement issu de la réaction doit donc être « reconnu » pour agir sur des vannes réalisées en matériaux actifs, sensibles au pH. Deux cas ont été envisagés, celui de la production de vinaigre à partir d'éthanol, celle plus complexe de la production d'acide succinique (par les étudiants). L'acide succinique est utilisé dans de nombreuses applications industrielles : surfactant et détergent (Kirstetter, 2016) ou encore comme intermédiaire pour la production de polymères et de résines. Pour sa production, un procédé enzymatique est utilisé. Le mécanisme réactionnel (très simplifié) est présenté ci-dessous en condition d'anaérobiose et sous action enzymatique :



Les produits de départ sont alors les suivants : du glucose, du dioxyde de carbone et l'enzyme, de l'oxygène (Briki, 2021 ; Escanciano et al, 2022). Pendant la phase de fermentation, il faut maintenir une température proche de 30°C, le pH va peu à peu décroître, l'opération étant terminée lorsque que le milieu atteint un pH de 5,5. Selon Le Neindre et Cancouet (2009), de nombreux polymères ont un comportement pH « sensible ». Les polyacides portant le groupe carboxylique avec un pKa d'environ 5-6 sont les plus représentatifs des polyacides faibles. Parmi eux, le poly(acide acrylique) (PAAc) et le poly(acide méthacrylique) (PAMA) sont fréquemment cités. Ces matériaux peuvent être utilisés pour réaliser des vannes sensibles au pH à partir de structure de type bilame (cf. figure 7) le matériau actif étant fixé sur une structure passive élastique.

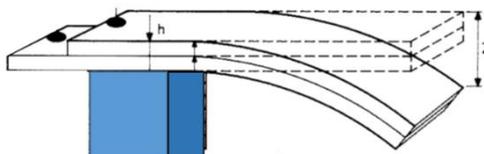


Figure 7. Bilame : partie supérieure en PAAc ou en PAMA, partie inférieure en acide poly-lactique (PLA) peu sensible au pH

Cet aspect étant susceptible d'être résolu, se pose la question de l'agitation dans le réacteur : elle peut être atteinte par des polymères sensibles de manière réversible à la lumière (changement des dimensions spatiales entre la nuit et le jour selon Mahimwalla et al, 2013). Elle reste cependant peu efficace, mais correspond aux durées de réaction qui sont de plusieurs jours. Mais, l'on doit aussi jouer aussi sur l'apport de gaz : oxygène et/ou gaz carbonique ; c'est donc cet apport qui a été privilégié à partir d'une pompe solaire telle que présentée sur la figure 8.

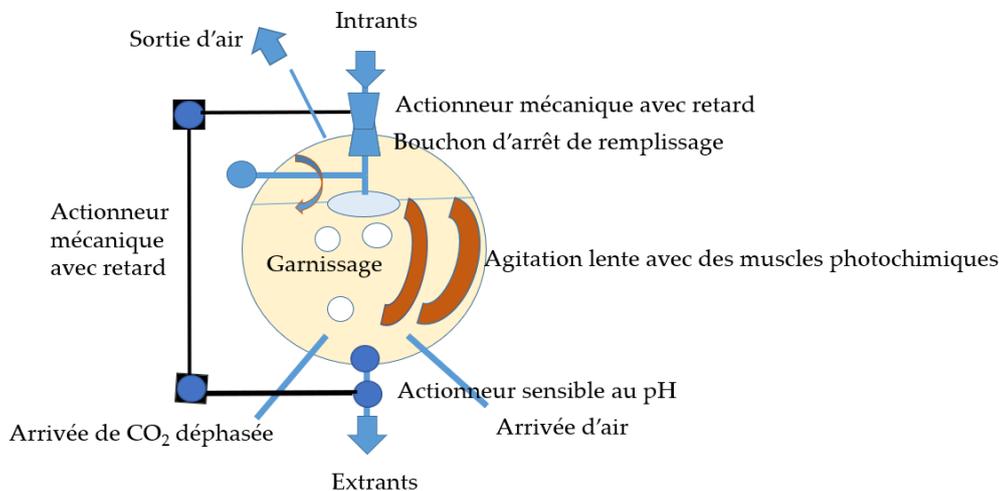


Figure 8. Schéma général du réacteur auto-adaptatif

Pour les flux d'entrées et de sorties, des systèmes d'actionneurs sont placés en amont et en aval du réacteur. Du côté des intrants, un premier bouchon d'arrêt de remplissage doit permettre de stopper l'alimentation quand le volume de liquide dans le réacteur atteint une valeur limite (suivant le niveau de liquide dans le réacteur). Un actionneur mécanique avec retard est aussi placé en amont. Celui-là est relié avec l'actionneur sensible au pH situé en aval du réacteur. Ce dernier actionneur s'active et permet la vidange du réacteur quand la valeur cible de pH est atteinte (5,5 dans le cas considéré). Ainsi, quand cet actionneur, qui fait office de vanne, s'ouvre, le premier actionneur se ferme via la liaison d'actionneur mécanique avec retard. Cette partie du procédé permet d'éviter que l'entrée et la sortie du réacteur soient ouverts en même temps. De plus, des « muscles photochimiques », faits à partir d'un polymère contenant l'azobenzène (Mahimwalla et al, 2013), sont présents sur la paroi interne du réacteur. L'éclairage solaire permet à ces muscles de s'activer en entamant un rythme de contraction/décontraction. C'est ce rythme qui engendre une agitation dans le réacteur. Enfin, une arrivée d'air est placée pour contrôler l'aération dans le réacteur. Ce système de bullage sert aussi à agiter le mélange. Une sortie d'air est ajoutée afin d'éviter toute accumulation des gaz dans le réacteur. Par ailleurs, sur cette figure n'est pas représenté le dispositif d'injection d'air. Celui-ci fait l'objet de la figure 9.

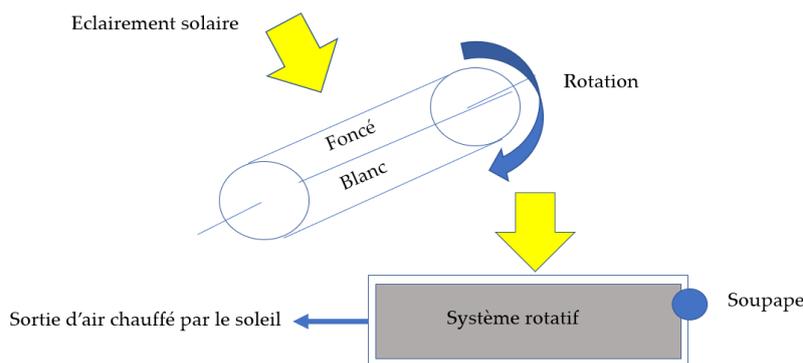


Figure 9. Schéma pour une pompe solaire

Pour la description de ce dispositif, la surface du système rotatif est pour une moitié noircie et de l'autre moitié blanche. Encore une fois, l'énergie solaire va être la source d'énergie utilisée. En effet, l'énergie de l'éclairage solaire va être convertie par la surface noire en énergie thermique au sein du cylindre. L'augmentation de la température va provoquer une augmentation proportionnelle de la pression dans le système rotatif. L'air présent à l'intérieur va donc pouvoir être expulsé à partir d'une certaine pression. Pour permettre au système de refroidir, la surface foncée du cylindre réalisée en élastomère va « gonfler ». Ce gonflement va déstabiliser le cylindre et engendrer une rotation de ce dernier. Ce sera donc la partie blanche qui sera soumise à l'éclairage solaire suite à cela. Ceci

permet à la surface foncée de se dégonfler et perdre en énergie thermique. A partir d'un certain point, le cylindre retrouvera sa position initiale et retournera avec une surface foncée face à l'éclairement. La soupape permet de faire entrer l'air dans le système rotatif, mais empêche sa sortie de ce côté.

5.4.2. *Ensemencement en milieu perturbé*

Pour Luo et al, (2023), l'ensemencement aérien permet de couvrir rapidement de vastes zones physiquement inaccessibles afin d'améliorer la qualité des sols et d'éliminer l'azote résiduel en agriculture, ainsi que pour le reboisement après incendie et la restauration des zones sauvages. Cependant, il souffre d'un faible taux de germination, en raison de l'exposition directe des graines non enterrées au soleil, au vent et aux oiseaux granivores, ainsi que de l'humidité et de la température indésirables de l'air. Les graines d'*Erodium cicutarium* mieux connues sous le nom de « Bec-de-grue commun » ou « cicutaire », sont remarquablement dynamiques. Ce qui nous intéresse ici est leur propriété à s'enfoncer dans le sol de façon autonome. En effet, une fois dispersées sur la terre, les graines s'enfoncent avec ce qu'on appelle des « mouvements hygroscopiques ». Luo et al (2023) proposent leur usage pour aider des graines d'autres espèces plus fragiles à se développer. Cependant, les plantes d'érodium sont très vivaces et peuvent devenir concurrentes de celles qu'elles doivent aider !

En utilisant un hydrogel biodégradable et biocompatible capable d'encapsuler une graine, une petite quantité d'eau et de l'engrais (dans un seul ou différents compartiments internes à ce vecteur), cette enveloppe pourrait faire office de carapace pour protéger la graine d'attaques extérieures (animaux, conditions météorologiques de type grêle). Cette carapace pourrait disposer de mini-piques, à la manière des épines sur les rosiers ou des chardons. De par ses propriétés activables, elle serait amenée à changer de forme sous une stimulation par l'eau de pluie (idéale pour les déformations des hydrogels selon Demoly et André, 2022). Cette forme réalisée pour obtenir une preuve de concept en impression 4D, devrait favoriser l'enfouissement de la graine, car elle « creuserait » la terre et permettrait sa protection le temps qu'elle se trouve en surface. De plus et si l'hydrogel contient de l'eau et des nutriments en son sein, le changement de forme permettrait aussi de les relâcher au même niveau que la graine. De ce fait, cela accélérerait la germination de la graine.

L'impression 4D (Kamps et al, 2017 ; Chaturvedi et al, 2022, Demoly et André, 2022) exploite la conception classique de la fabrication additive (André, 2018) réalisée avec ou pour disposer de matériaux actifs, sensibles à une stimulation énergétique comme l'interaction physicochimique entre l'eau et des hydrogels. Il est ainsi possible d'imprimer un emballage protecteur réalisé en impression 3D avec un hydrogel. Au moment où l'on décide de l'ensemencement, il peut être envisagé de plonger les couples semence-emballage dans une solution adaptée d'engrais et d'eau, permettant à la plante de croître dans ce milieu local favorable à cette forme originale de plantation. L'impression 4D devrait permettre de choisir des formes d'emballage adaptées aux différentes graines.

Parmi, les différents hydrogels, il est possible de retenir des hydrogels biodégradables (cf. Gladman et al, 2016 ; Saroia et al, 2018 ; Dutta et al, 2021 ; Courtine, 2022). Ces matériaux ont généralement été développés pour des applications en bio-printing (André, 2018). Il faudrait donc les tester pour envisager un emballage protecteur adapté. Par ailleurs, avec des machines 3D multi-matériaux, il est possible de mimer ce que sait faire la nature (cf. El-Dabaa, Islam et Sherif, 2021). Pour autant, les matériaux classiquement utilisés en impression 4D sont des polymères à faible module d'Young (Demoly et André, 2022) et c'est le cas particulièrement des hydrogels. Dans ces conditions, il n'est pas envisageable de se permettre de mimer strictement le fonctionnement des graines d'érodium, mais juste d'enrober les graines avec une protection mécanique et de contenir différents nutriments. Avec un hydrogel faiblement déformé, il est facile de réaliser une pièce 3D dans laquelle la graine est introduite, le couple est si nécessaire séché et enferme la graine. Ce n'est qu'au moment où l'on envisage l'ensemencement que le couple support-graine est humidifié avant dépôt sur le sol. La figure 10 indique une forme possible de la pièce 3D servant à la distribution des graines.

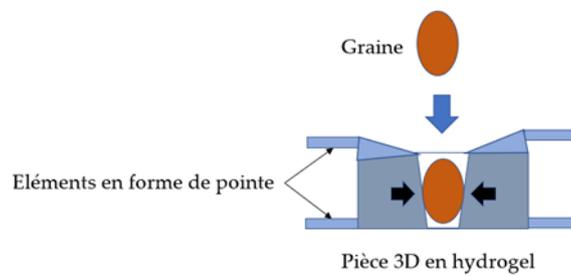


Figure 10. *Forme possible du support d'ensemencement*

5.4.3. Un futur ?

Ces deux exemples ont été développés sur des bases temporelles courtes (moins de deux semaines), mais ce temps a servi à donner un peu de consistance à des idées encore fragiles. Pour autant, il faudrait aller plus loin et valider le réalisme de telles propositions... Mais ceci est une autre « histoire pédagogique » à examiner pour des évolutions possibles dans l'enseignement de l'École.

6. Discussion

Aujourd'hui, le savoir est presque incommensurable. Mais que vaut ce savoir ? Les concepts (les paradigmes), les opérations unitaires nous aident à prendre de la distance pour « moins » penser tout en restant très efficaces. Il faut peut-être apprendre à apprendre, et organiser l'information autour de la connaissance en allant jusqu'au public critique qui souhaite être éclairé (dont les décideurs font partie). Cette situation, où les systèmes dans lesquels l'Homme est impliqué, s'engage de plus en plus dans l'exploration de la complexité. C'est avec le biomimétisme une rupture qui reconnaît le caractère exceptionnel et problématique du vivant et de tout ce qui touche le vivant (hard et soft). Il peut être ici utile d'invoquer, pour illustrer la complexité et son étude, la nécessaire acceptation de l'incertitude et de la démarche heuristique dans la compréhension des problèmes dits « complexes » reliés par exemple à la santé, à l'environnement, donnant ainsi une valeur plus grande au qualitatif, au « sensible », à l'heuristique, plutôt qu'au seul quantitatif vérifiable comme cela a été rappelé dans Schaer, Demoly et André (2024). Des différences irréductibles entre disciplines impliquées dans un projet interdisciplinaire nécessitent de travailler sur les concepts et méthodes nouvelles pour sortir du découpage disciplinaire permettant d'effectuer des recherches sur des objets-frontières (grâce à l'apport des disciplines qui apportent des bases stabilisées de connaissances). Il ne s'agit donc pas de faire un procès à l'approche traditionnelle du fonctionnement de la recherche, mais d'ouvrir plus le champ de la convergence honnête d'intérêts en vue de fins opératoires correspondant à des niveaux d'intégration dépendant de la complexité des thèmes.

Or, dans l'approche initiale, il s'est juste agi de trouver à plusieurs des idées qui mériteraient une réflexion plus approfondie qu'elles ne l'ont été pour savoir si elles avaient du sens et pouvaient être le point de départ d'une possible aventure industrielle. Pour autant, la démarche proposée avec des étudiants motivés (et amusés) montre sa faisabilité, même si dans le temps imparti elle ne peut satisfaire les prérequis et les contraintes applicatives, même futures. Des propositions saillantes ont été exprimées ; les étudiants sortent ainsi, pour une durée courte, des apprentissages rapides de savoirs utiles pour leur futur emploi. Mais, à ce stade, il n'est pas question de trop s'engager dans les concepts de complexité ou de déterminisme ! C'est en analysant le potentiel porteur d'idées fragiles exprimées par l'opération de brainstorming que l'idée « consistante » se structure engageant l'opération vers la recherche d'autres idées et de savoirs complémentaires. Dans cette transition engagée partiellement, la suite des opérations à mener pour atteindre une preuve de concept se dessine facilement.

Ce principe évolutif a pu être mis en œuvre avec des esprits libres de toute concurrence, quasiment sous forme d'un jeu intellectuel. Cette petite réussite amène les auteurs à se poser quelques questions relativement à cet essai :

- Est-ce générique à des situations autres que le biomimétisme ?
- Peut-on aller au-delà de presque-évidences (cf. figure 2) ?
- Est-ce possible dans des conditions où des concurrences entre personnes existent ?
- Comment réintégrer des aspects conceptuels pour accompagner ce type d'exercice (cf. Schaer, Demoly et André, 2024).

Conclusion

Comment tenter de concilier déterminisme et indéterminisme ? Sans doute, pour les auteurs, il n'y a pas à choisir entre les deux, mais plutôt à articuler ces logiques antinomiques : le monde est parfois déterministe (ce que cherche l'industriel « procédé » parmi d'autres) et souvent indéterministe, tout dépend de la finalité du système étudié. Mais, de manière évidente, le débat n'est pas clos. Ainsi, on constate une cohabitation, tant à propos des phénomènes naturels que des comportements des vivants. Pour « changer le monde », il nous faut et faudra toujours créer, inventer, innover sur de nouvelles bases de savoirs en sachant que les ruptures culturelles à opérer sont de taille, puisqu'après des siècles à envisager une vie par le dépassement de la nature, il faut désormais envisager une survie plus systémique, plus complexe, plus contrainte avec elle. Ce sera sans doute difficile et prendra du temps, car nos formations sont encore construites sur la pensée analytique héritée des siècles précédents et on ne sait pas si un dirigeant acceptera de prendre le risque de sortir des chemins tracés... Alors, en innovation, c'est l'étude de cette possible transition, avec ses limites, via le biomimétisme qui a été exploitée – mais peu approfondie - dans cet article (champ des possibles, critères de légitimité, futurs envisageables, etc.). Dans ces conditions, le lecteur saura si la prévision de Clifford Siskin (2016) expliquant comment l'Occident moderne passera d'un paradigme traitant des « systèmes du monde » à un autre où le réel sera abordé comme un « monde de systèmes » qu'il faudra bien enseigner aux futurs ingénieurs.

Bibliographie

- Ahamed M.K., Wang H., Hazell P.J. (2022) “From Biology to Biomimicry: Using Nature to Build Better Structures – A Review” *Construction and Building Materials*, 320, 126195.
- Ahmed N., Wahed M., Thompson N.C. (2023) “The growing influence of industry in AI research - Industry is gaining control over the technology's future” *Science*, 379, 884-88.
- Ancori B. (2014) « Communication, cognition et créativité dans les sociétés de la connaissance - A propos de deux dilemmes » *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 9, 45–93.
- André J.C. (2018) “From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing - Volume 1: From the first concept to the present applications; Volume 2: Improvement of the present technologies and constraints; Volume 3: Breakdown innovations: Programmable matter; 4D Printing and Bio-Printing” ISTE/Wiley Ed. – London – UK.
- André J.C. (2023) “Knowledge production modes between science and applications” ISTE/Wiley Ed. London – UK.
- Antonioli M. (2013) « Toujours la vie invente... » *Chimères*, 81, 139-151.
- ASI Adhesives & Sealants (2022) “Opportunities and Challenges of Biomimicry in Adhesives R&D” <https://www.adhesivesmag.com/articles/99441-opportunities-and-challenges-of-biomimicry-in-adhesives-r-and-d>
- Astley H.C. “Chapter Ten: Slithering across worlds—snake-inspired robots for extraterrestrial exploration” in Shyam V., Eggermont M., Hepp A.F. Ed. (2022) “Biomimicry for Aerospace, Technologies and Applications” Elsevier Ed. – Amsterdam – NL.
- Augé M. (1992) « Non lieux, introduction à une anthropologie de la sur-modernité » Le Seuil Ed. – Paris - France.
- Balta F. (2017) « La complexité à la portée de tous - Une nécessité citoyenne » Erès Ed. – Paris - France.
- Banken E., Oeffner J. (2023) “Biomimetics for innovative and future-oriented space applications - A review” *Frontiers in Space Technology*, 3 - <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frspt.2022.1000788/full>
- Bao L., Kamada N., Qian D., Shirayi T., Gotou S., Kemmochi K. (2010) “Improvement of the Bending Characteristics of Thin FRP Cylinders by Imitating Nodes of Bamboo” *Advanced Composite Materials*, 19, 157-170.

- Baumeister D. (2014) “Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices” cité par Fernhaber et Stark, (2019) “Biomimicry: New insights for entrepreneurship scholarship” *Journal of Business Venturing Insights*, 12, e00137.
- Becker J., Speck O., Göppert T., Speck T., Müller C. (2022) “Learning from Self-Sealing Deformations of Plant Leaves: The Biomimetic Multilayer Actuator” *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 2200215.
- Bejan A. (2000) “Shape and structure, from engineering to nature” Cambridge University Press Ed. – Cambridge – UK.
- Benasayag M. (2010) « Organismes et artéfacts » La Découverte Ed. – Paris.
- Ben-David J., Collins R. (1966) “Social factors in the origins of a new science: The case of psychology” *American Sociology Review*, 31, 451-65.
- Benyus J. (1997) “Biomimicry: Innovation Inspired by Nature” Harper & Collins Publishers Ed. – New-York – USA.
- Bertalanffy L. (von) (1972) "The history and status of general systems theory" *Academy of Management Journal*,
- Berthier S. (2021) « L'éveil du Morpho - Bio-inspirez-vous ! » Flammarion Ed. – Paris - France.
- Bhushan B. (2009) “Biomimetics: lessons from nature—an overview“ *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A367, 1445–1486.
- Bila Y. (2016) « Le biomimétisme, un concept, une philosophie pleine d'avenir » *ESResponsible.org* <https://www.esresponsible.org/article361.html>
- Birki A. (2021) « Production de succinate par *Corynebacterium glutamicum* en microaérobiose : approches expérimentales et numériques, de l'échelle métabolique au bioréacteur » PhD Université de Lorraine – Nancy – France.
- Boden M.A. (1999) “Dimensions of creativity” MIT Press Ed. – Boston - USA.
- Boden M.A. (2004) “The creative mind: Myths and mechanisms” Psychology Press Ed. – New-York - USA.
- Bœuf G. (2014) « Biomimétisme et bio-inspiration » Victoires éditions, « Vraiment durable », 5/6, 43-55.
- Boulanger F. (2014) « Modélisation multiparadigme pour la conception des systèmes » *Modéliser & simuler – Tome 2*, 703-724. Editions Matériologiques – Paris.
- Boxerbaum A.S., Shaw K.M., Chiel H.J., Quinn R.D. (2012) “Continuous wave peristaltic motion in a robot” *International Journal of Robotic Research*, 31, 302–318.
- Boyer F., Alamir A., Chablat D., Khalil W., Leroyer A., Lemoine P. (2015) « Robot anguille sous-marin en 3D » *Techniques de l'Ingénieur Réf. S7856 V1*, 15, 407-426.
- Birki A. (2021) « Production de succinate par *Corynebacterium Glutamicum* en microaérobiose : Approches expérimentales et numériques, de l'échelle métabolique au bioréacteur » Thèse de l'Université de Lorraine – Nancy.
- Chaturvedi I., Jandyal A., Wazir I., Raina A., Ul Haq M.I. (2022) “Biomimetics and 3D printing - Opportunities for design applications” *Sensors International*, 3, 100191.
- Chekchak T., Lapp K. (2011) « Biomimétisme, la nécessaire resynchronisation de l'économie avec le vivant » *Ecologie & politique*, 43, 159-166.
- Chen X.D. (2016) “Scoping biology-inspired chemical engineering” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24, 1-8.
- Cholle F. (2020) “Squircle, a New Way to Think for a New World” Squircle Academy Ed. – New-York – USA.
- Chowdhury H., Loganathan B. (2022) “Chapter Eight - Biomimetics of boxfish: Designing an aerodynamically efficient passenger car” 211-235 *Biomimicry for Aerospace - Technologies and Applications* - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128210741000074>
- Christensen C., Dyer J., Gregersen H. (2013) « Le gène de l'innovateur : Cinq compétences qui font la différence » Pearson France Ed. - Montreuil-sous-Bois - France.
- Church R.A. “Chapter Nine: Thresholds of nature: How understanding one of nature's penultimate laws led to the Power Cone, a biomimetic energy source” in Shyam V., Eggermont M., Hepp A.F. Ed. (2022) “Biomimicry for Aerospace, Technologies and Applications” Elsevier Ed. – Amsterdam – NL.
- Coppens M.O. (2005) “Scaling up and down in a nature inspired way” *Industrial Engineering Chemical Research*, 44, 5011-5019.

- Coppens M.O. (2019) "Nature-Inspired Chemical Engineering, a Transformative Methodology for Innovation" Opening talk at Nature-Inspired Engineering Conference, Cetraro, - Italy, 8-13 sept. 2019 - <https://www.proceedings.com/content/051/051420webtoc.pdf>
- Courtine C. (2022) « Hydrogels macro et supramoléculaires photo-stimulables dans le visible » PhD Université Paul Sabatier – Toulouse - France.
- Csikszentmihalyi M. (2006) « La créativité » Robert Laffont Ed. – Paris - France.
- Da Silva S.J. (2021) « Le biomimétisme au-delà de l'inspiration formelle : Recommandations aux designers de produits pour une intégration du biomimétisme dans le processus de développement de produits » Maîtrise en design, Université de Québec – Québec - Canada - <https://corpus.ulaval.ca/server/api/core/bitstreams/05144568-8271-4f3c-b639-d06f32b9bdc6/content>
- Dearborn D.C., Simon H A. (1958) "Selective perception: A note on the departmental identifications of executives" *Sociometry*, 140-144.
- Deleuze G., Guattari F. (1972) « Capitalisme et schizophrénie » Editions de Minuit – Paris - France.
- Deming T.J. (1999) "Mussel byssus and biomolecular materials" *Current Opinion in Chemical Biology*, 3, 100–105.
- Demoly F., André J.C. (2022) "4D Printing – Volume 1: Between disruptive research and Industrial application – Volume 2: Between Science and Technology" ISTE/Wiley Ed. London – UK.
- Descola P.(2011) « L'Écologie des autres. L'anthropologie et la question de la nature » Quae Ed. – Versailles.
- Descola P. Ed. (2018) « Les natures en question » O. Jacob Ed. – Paris – France.
- Dias de Figueiredo A. (2014) « De la nature historique des pratiques d'ingénierie » *Revue d'anthropologie des connaissances*, 8, 245-278.
- Dougherty D. (1992) "Interpretive barriers to successful product innovation in large firms" *Organization Science*, 3, 179-202.
- Dubois M.J.F., Brault N. (2021) « Manuel d'épistémologie pour l'ingénieur » Editions Matériologiques – Paris.
- Durkheim E. (1967) « De la division du travail social » PUF Ed. - Paris.
- Dutta S.D., Hexiu J., Patel D.K., Ganguly K., Lim K.T. (2021) "3D-printed bioactive and biodegradable hydrogel scaffolds of alginate/gelatin/cellulose nanocrystals for tissue engineering" *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 644-658.
- Eadie L., Ghosh T.K. (2011) "Biomimicry in textiles: past, present and potential. An overview" *Journal of the Royal Society – Interface*, 8, 761–775.
- El-Dabaa R., Islam S., Sherif A. (2021) "Digitally Encoded Wood: 4D Printing of Hygroscopic Actuators for Architectural Responsive Skins" 241-252 in "Architecture in the Age of Disruptive Technologies: Transformations and Challenges" [9th ASCAAD Conference Proceedings ISBN 978-1-907349-20-1] Cairo (Egypt) 2-4 March 2021.
- Escanciano I.A., Wojtusik M., Esteban J., Ladero M., Santos V.E. (2022) "Modeling the Succinic Acid Bioprocess: A Review" *Fermentation*, 8, 368.
- Fayemi P.E., Maranzana N., Aoussat A., Bersano G. (2013) « Contextualisation des outils biomimétiques afin de développer une nouvelle méthodologie » Conférence/8 2013 Biarritz. https://www.researchgate.net/publication/279866494_contextualisation_des_outils_biomimetiques_afin_de_developper_une_nouvelle_methodologie
- Fayemi P.E. (2016) « Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances » PhD ENSAM-ParisTech - Paris – France - <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01531185/file/FAYEMI.pdf>
- Fayemi P.E., Chekchak T., Bersano G., Maranzana N., Aoussat A. (2018) « Biomimétisme et supports méthodologiques » *Techniques de l'Ingénieur*, Réf. IN 218.
- Fiori G. (2022) « Biomimétisme : Comment le papillon peut voler à notre secours ? » <https://veridik.fr/2022/10/03/biomimetisme-comment-le-papillon-peut-voler-a-notre-secours/> <https://www.arte.tv/fr/videos/092973-000-A/les-papillons-une-mine-d-inspiration/>
- Fleck L. (2012) "Genesis and development of a scientific fact" University of Chicago Press Ed. – Chicago – USA.
- Forbin S., Hoarau O. (2020) « OMPI - Organisation mondiale de la propriété intellectuelle » *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 2020/4, 97-100.

- FRB - Fondation sur la recherche sur la biodiversité (2020) « Biomimétisme et biodiversité » <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2020/02/FRB-Synthese-Biomimetisme-et-biodiversite.pdf>
- French J.R., Ahmed B.M. (2010) “The challenge of biomimetic design for carbon-neutral buildings using termite engineering” *Insect Science*, 17, 154–162.
- Freund H., Sundmacher K. (2008) “Towards a methodology for the systematic analysis and design of efficient chemical processes – Part 1. From unit operations to elementary process functions” *Chemical Engineering and Processing*, 47, 2051–2060.
- Gabora L. (2013) “Research on creativity” 1548-1558 iCarayannis E.G. Ed. ”Encyclopedia of Creativity, invention, and entrepreneurship” Springer Ed. – New-Delhi – India.
- Gagnepain J.J., André J.C (1998) « Les savoirs de l'ingénieur » 91-100 in Barbier J.M. Ed. « Savoirs théoriques et savoirs d'action » PUF Ed. – Paris - France.
- Gambier Y. (2019) « Traductologie et médias : les défis de l'interdisciplinarité » in *Interdisciplinarity and Translation Studies - Syn-Thèses*, 9-10, 11-24.
- Ganewatta M.S., Wang Z., Tang C. (2021) “Chemical syntheses of bioinspired and biomimetic polymers toward biobased materials” *Nature Reviews Chemistry*, 5, 753.
- Garrette B., Phelps C., Sibony O. (2021) « Résoudre un problème : la compétence clé que vous n'avez pas apprise à l'école » 37-66 in Garrette B., Phelps C., Sibony O. Ed. « Trouvez-moi la solution ! Les méthodes de résolution de problèmes des meilleurs consultants en stratégie » Flammarion Ed. – Paris - France.
- Gerbaud V., Shcherbakova N., Da Cunha S. (2020) “A nonequilibrium thermodynamics perspective on nature-inspired chemical engineering processes” *Chemical Engineering Research and Design*, 154, 316-330.
- Gladman A.S., Matsumoto E.A., Nuzzo R.G., Mahadevan L., Lewis J.A. (2016) “Biomimetic 4D printing” *Nature Materials*, 15, 413–418.
- Goel A.K. Helms M.E. (2014) "Theories, Models, Programs, and Tools of Design: Views from Artificial Intelligence, Cognitive Science, and Human-Centered Computing 417-432 in “An Anthology of Theories and Models of Design” Springer Ed. – New-York – USA.
- Gonçalves M. (2016) "Decoding designers' inspiration process," TU Delft, Delft University of Technology – Delft – NL - <https://research.tudelft.nl/en/publications/decoding-designers-inspiration-process>
- Goss D. , Penick C.A., Grishin A., Bhate D. “Chapter SIX: Bio-inspired design and additive manufacturing of cellular materials” in Shyam V., Eggermont M., Hepp A.F. Ed. (2022) “Biomimicry for Aerospace, Technologies and Applications” Elsevier Ed. – Amsterdam – NL.
- Gregory S.A. (1996) “The Design Method” Butterworth Ed. – London – UK.
- GWI – Good Work Institute (2023) “Do Good Work” <https://goodworkinstitute.org/>
- Graham D.A. (27-03-2014) “Rumsfeld’s Knowns and Unknowns : The Intellectual History of a Quip” *The Atlantic*, <https://www.theatlantic.com/politics/archive/2014/03/rumsfelds-knowns-andunknowns-the-intellectual-history-of-a-quip/359719/>
- Hatchuel A., Weil B. (2002) “A new approach of innovative design : an introduction to C-K theory” *Communication at the “14th International Conference on Engineering Design” Stockholm – Sweden*, 109-110 (exec.summ.), full paper no. DS31_1794FPC in Folkesson A., Gralen K., Norell M., Sellgren U. Ed. “Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design” <https://www.designsociety.org/publication/24204/A+NEW+APPROACH+OF+INNOVATIVE+DESIGN+%3A+AN+INTRODUCTION+TO+C-K+THEORY>.
- Helfman-Cohen Y., Reich Y., Greenberg S. (2014) “Biomimetics: Structure–Function Patterns Approach” *Journal of Mechanical Design*, 136, 111108.
- Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. (2009) “Biologically inspired design: process and products” *Design Studies*, 30, 606-622.
- Heintz J., Gerbaud V., Belaud J.P. (2011) “Models driven conception of an Computer Aided Mixture Design tool” *Computer Aided Chemical Engineering*, 29, 1608-1612.
- Heisenberg W. (1958) “Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science” Harper Ed. – New-York – USA.
- Helms M., Vattam S.S., Goel A.K. (2009) "Biologically inspired design: process and products," *Design studies*, 622,.
- Horckmans M. (2016) « Prospective en Génie des Procédés » PRD ENSIC-UL – Nancy.

- Horenstein, M.N. (2002) “Design concepts for engineers” Prentice Hall Ed. - Upper Saddle River – USA.
- Horowitz R. (2001) “From TRIZ to ASIT in 4 steps” The TRIZ Journal, <http://www.triz-journal.com/archives/2001/08/c/index.htm>
- Hu C., Chen Y., Tan M.J.A., Ren K., Wu H. (2019) “Microfluidic technologies for vasculature biomimicry” *Analyst*, 144, 4461–4471.
- Hwang J., Jeong Y., Min Park J., Lee K.H., Hong J.W., Choi J. (2015) “Bio-mimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine” *International Journal of Nanomedicine*, 10, 5701–5713.
- Industrial Commons (2023) “Work for the Common Good” <https://theindustrialcommons.org/>
- Irwin D.A., Pavcnik N. (2004) “Airbus versus Boeing revisited: international competition in the aircraft market” *Journal of International Economy*, 64, 223–245.
- Jamet P., Vincent F. (2016) « Comprendre et gérer la transition éducative » *Annales des Mines - Réalités industrielles* 2016/2, 9-12.
- Jourdan N., Neveu T., Potier O., Kanniche M., Wicks J., Nopens I., Rehman U., Le Moullec Y. (2019) “Compartmental Modelling in chemical engineering: A critical review” *Chemical Engineering Science*, 210, 115196.
- Kamps T., Gralowa M., Schlicka G., Reinhart G. (2017) “Systematic Biomimetic Part Design for Additive Manufacturing” *Procedia CIRP*, 65, 259–266.
- Kirstetter A-S. (2016) « Etude de la fixation du carbone inorganique chez la levure pour la production industrielle de molécules d’intérêt » PhD Université Paris-Saclay – Orsay - France.
- Kruper R., Vincent J.F., Abraham E., Soar R. (2018) “Towards a Design Process for Computer-Aided Biomimetics” *Biomimetics*, 3, 14.
- La Fontaine J. (de) (2020) « Les animaux malades de la peste (1678-1679) » Courtes et Longues Ed. – Paris – France.
- Lavelle L. (1992) « De l’acte » Aubier Ed. – Paris - France.
- Layton E.T. (1976) “American Ideologies of Science and Engineering” *Technology and Culture*, 17, 688-701.
- Le Breton D. (2005) « Rites personnels de passage » 101-108 « Rituels » Hermès Ed. – Paris - France.
- Le Neindre B., Cancouët P. (2009) « Des matériaux intelligents : les polymères stimulables » *Techniques de l’Ingénieur* Réf : IN69 v1.
- Lee D.W., Graham R. (1986) “Leaf optical properties of rainforest sun and extreme shade plants” *American Journal of Botany*, 73, 1100–1108.
- Li Z.T., Zhu L., Zhang W.L., Zhan X.B., Gao M.J. (2020) “New dynamic digestion model reactor that mimics gastrointestinal function” *Biochemical Engineering Journal*, 154, 107431.
- Li J., Zhu Y., Yu H., Dai B., Jun Y.S., Zhang F. (2021) “Microbially Synthesized Polymeric Amyloid Fiber Promotes β -Nanocrystal Formation and Displays Gigapascal Tensile Strength” *ACS Nano*, 15, 1843–11853.
- Li J., Li M., Koh J.J., Wang J., Lyu Z. (2024) “3D-printed biomimetic structures for energy and environmental applications” *DeCarbon*, 3, 100026.
- Luo D., Maheshwari A., Danielescu A., Li J., Yang Y., Tao Y., Sun L., Patel D.K., Wang G., Yang S., Zhang T., Yao L. (2023) « Autonomous self-burying seed carriers for aerial seedind » *Nature*, 614, 463-470.
- Lurie-Luke E. (2014) “Product and technology innovation: What can biomimicry inspire?” *Biotechnology Advances*, 32, 1494–1505.
- McCauley M. (2012) “Creative Thinking: Linking Environment, Vision, Change, and Strategy” *Small War Journal*, <http://smallwarsjournal.com/jrnl/art/creative-thinking-linking-environmentvision-change-and-strategy>
- McKey D. (2016) « Paysages bio-culturels et biomimétisme à un niveau écosystémique » in Pitrou P., Coupaye L., Provost L. Ed. « Des êtres vivants et des artefacts » Les actes de colloque du musée du quai Branly Ed. – Paris – France - <https://doi.org/10.4000/actesbranly.647>
- Mahimwalla Z. (2013) “Characterization of photo-induced photo-mechanical responses in azobenzene polymers” PhD Université Mc Gill – Montréal – Canada.
- Michelson R.C., Naqvi M.A. (2003) “Beyond biologically \$ inspired insect flight” von Karman Institute for Fluid Dynamics RTO/AVT Lecture Series on Low Reynolds Number Aerodynamics on Aircraft Including Applications in Emerging UAV Technology, 1–19.

- Miller J.D. (2008) “Humanitarian Engineering: Addressing the Global Influence of Applied Technology” PhD of the Queen’s University – Kingston – Canada.
- Millier P. (2016) « L’ingénieur, le bricoleur et l’innovateur » *Entreprendre & Innover*, 28, 48-62.
- Mishima Y. (1989) « Neige de printemps » Gallimard Ed. – Paris - France.
- MTECT - Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2019) « Le biomimétisme » <https://www.ecologie.gouv.fr/biomimetisme>
- Muséum Toulouse (2022) « Le biomimétisme, un concept, une philosophie pleine d’avenir » <https://www.museum.toulouse.fr/-/le-biomimetisme-un-concept-une-philosophie-pleine-d-avenir> et https://www.museum.toulouse.fr/documents/10180/155075961/BiblioThemaWeb_BIOMIMETISME_JUIN2015.pdf
- Nadein K., Kovalev A., Thøgersen J., Weidner T., Gorb S. (2021) “Insects use lubricants to minimize friction and wear in leg joints” *Proceedings of the Royal Society, B* - <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1065>
- Nagel J.K., Nagel R.L., Stone R.B., McAdams, D.A. (2010) "Function-based, biologically inspired concept generation" *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24, 521-535.
- Nagel J.K., Stone R.B. (2012) “A computational approach to biologically inspired design. *Artificial Intelligence for Engineering Design*” *Analysis and Manufacturing*, 26, 161–176.
- Narayanan A., Dhinojwala A., Joy A. (2021) “ Design principles for creating synthetic underwater adhesives” *Chemical Society Review*, 50, 13321-13345.
- O’Rourke J.M., Seepersad C.C. (2015) “Towards a Methodology for Systematically Generating Energy- and Materials-Efficient Concepts Using Biological Analogies” *Journal of Mechanical Design*, 137, 091101
- Oguntona O.A., Aigbavbo C.O. (2017) “Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry” *Energy Procedia*, 142, 2491-2497.
- OIE – Observatoire de l’Industrie Electrique (2015) « La consommation d’énergie dans l’industrie en France » <http://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/oie.pdf>
- PIL – Presidential Innovation Lab (2016) “The Students of the Future” https://www.acenet.edu/Documents/The-Students-of-the-Future.pdf#xd_co_f=YWVIOTRiMDUtMmE0Ni00YTU1LWFjNmYtMGVlODk5ZjNjODQ0~
- Pinker S. (2011) “The Better Angels of our Nature: The Decline of Violence in History and its Causes” Penguin Books Ed. – London - UK.
- Pitrou P. (2020) « Le biomimétisme comme système » *Techniques & Culture*, 73, 34-43.
- Plessis A. (du), Broeckhoven C. (2019) “Looking deep into nature: A review of micro-computed tomography in biomimicry” *Acta Biomaterialia*, 85, 27–40.
- Plessis A. (du), Broeckhoven C., Yadroitsava I., Yadroitsev I., Hands C.H., Kunju R., Bhate D. (2019) “Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing” *Additive Manufacturing*, 27, 408–427.
- Pomerol J.C. (2022) « Action dans l’incertain – De la décision à l’action » ISTE Ed. – Londres – UK.
- Pompidou A. (2004) « Pour une renaissance de la culture scientifique et technique » *Assises nationales de la culture scientifique et technique*, Axiales 26-31.
- Pouydebat E. (2022) « Quand les animaux et les végétaux nous inspirent » O. Jacob Ed. – Paris - France.
- Rabiller-Baudry M. (2009) « Nettoyage et décolmatage des membranes de filtration » *Techniques de l’Ingénieur* - Réf : J2797 V1.
- Raffard P. (2021) « Géopolitique de l’alimentation et de la gastronomie - De la fourche à la FoodTech » Le Cavalier Bleu Ed. – Paris - France.
- Ramirez M. (2012) “Insights into eco-design practices amongst the world’s largest carmakers” *Communication au 16th ERSCP European Roundtable for sustainable Consumption and Production – Istanbul - Turkey.*
- Ramli A., Zaidi Mat Desa M.S., Tuan Muda T.S., Jamaludin A.K. (2011) “The Importance of Ecological and Spiritual Approaches in Chemical Engineering towards Practical Conception of Sustainable Development” *The Inaugural Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2011, 2-5 June , Osaka – Japan* https://www.researchgate.net/profile/Azizan-Ramli/publication/312906547_The_Importance_of_Ecological_and_Spiritual_Approaches_in_Chemical_Engineering_towards_Practical_Conception_of_Sustainable_Development/links/5889641892851c06a133edc8/The-Importance-of-Ecological-and-Spiritual-Approaches-in-Chemical-Engineering-towards-Practical-Conception-of-Sustainable-Development.pdf

- Ripoll V., Godino-Ojer M., Calzada J. (2023) "Development of engineering skills in students of biotechnology: Innovation project "From laboratory to industry"" *Education for Chemical Engineers*, 43, 37–49.
- Robles G.C., Négny S., Le Lann J.M. (2009) « Case Based Reasoning and TRIZ : a coupling for Innovative conception in Chemical Engineering" *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 4, 239-249.
- Roqueplo P. (1997) « Entre savoir et décision, l'expertise scientifique » INRA Ed. – Paris - France.
- Salgueiredo C.F. (2016) « Biomimétisme et Véhicule Décarboné : génération de concepts innovants bio-inspirés à partir de la théorie C-K » PhD - Université Paris-Saclay – Evry - France.
- Sanchez C. (2018) « Mieux comprendre la nature pour créer de nouveaux matériaux » 305-322 in Descola P. Ed. « Les Natures en question » O. Jacob Ed. – Paris - France.
- Saroia J., Yanen W., Wei Q., Zhang K., Lu T., Zhang B. (2018) "A review on biocompatibility nature of hydrogels with 3D printing techniques, tissue engineering application and its future prospective" *Bio-Design and Manufacturing*, 1, 265–279.
- Sartori J., Pal U., Chakrabarti A. (2010) "A methodology for supporting "transfer" in biomimetic design" *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 24, 483–506.
- Schaer E., André J.C. (2020) "Process Engineering Renewal – Volume 1: Background and Training ; Volume 2: Research – Volume 3: Prospects" ISTE/Wiley Ed. London – UK.
- Schaer E., Demoly F., André J.C. (2024) « Quelle(s) formations pour une recherche industrielle ? » *Entropie, en cours d'évaluation*.
- Shepherd D.A., Sutcliffe K.M. (2015) "The use of anthropomorphizing as a tool for generating organizational theories" *Academy of Management; Annals*, 9, 97–142.
- Shu L. (2010) "A natural-language approach to biomimetic design. *Artificial Intelligence for Engineering Design*" *Analysis and Manufacturing*, 24, 507–519.
- Shyam V., Eggermont M., Hepp A.F. Ed. (2022) "Biomimicry for Aerospace, Technologies and Applications" Elsevier Ed. – Amsterdam – NL.
- Simon H.A. (1996) "The Sciences of the Artificial" The MIT Press Ed. – Cambridge – USA.
- Sinn T., Vasile M. "Chapter Seventeen: Smart deployable space structures inspired by nature" in Shyam V., Eggermont M., Hepp A.F. Ed. (2022) "Biomimicry for Aerospace, Technologies and Applications" Elsevier Ed. – Amsterdam – NL.
- Siskin C. (2016) "System : The Shaping of Modern Knowledge" MIT Press Ed. – Boston – USA.
- Speck O., Speck T. (2019) " An Overview of Bioinspired and Biomimetic Self-Repairing Materials" *Biomimetics*, 4, 26.
- Siskin C. (2016) "System : The Shaping of Modern Knowledge" MIT Press Ed. – Boston – USA.
- Soulet M.H. (2017) « Les épreuves de l'incertain » <https://calenda.org/404235?file=1>
- Stehr N., Larsen L. (1972) "The rise and decline of areas of specialization" *American Sociologist*, 7, 5-6.
- Taleb S., Darmanin T., Guittard, F. (2018) "Switchable and reversible superhydrophobic surfaces: Part one in book *Biomimetics*" https://www.researchgate.net/publication/321676827_Switchable_and_reversible_superhydrophobic_surfaces_Part_one
- Tee Y.L., Maconachie T., Pille P., Leary M., Do T., Tran P. (2021) "From nature to additive manufacturing: Biomimicry of porcupine quill" *Materials & Design*, 210, 110041.
- Terrier P., Glaus M., Raufflet, E. (2017) « Biomimétisme : outils pour une démarche éco-innovante en ingénierie. *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement, 16 - <https://journals.openedition.org/vertigo/17914>
- Towler G., Sinnott R. (2021) "Chemical Engineering Design" Elsevier Ed. Oxford – UK.
- Triantafyllou M.S., Triantafyllou G.S. (1995) "An Efficient Swimming Machine" *Scientific American*, 272,000, 64-70.
- Turner J.S., Soar R.C. (2008) "Beyond biomimicry: what termites can tell us about realizing the living building" Paper presented at: Proc. 1st Int. Conf. Industrialized, Intelligent Construction - <https://www.esf.edu/efb/turner/publication%20pdfs/Beyond%20Biomimicry%20MS%20distribution.pdf>
- Tushman M.L. (1978) "Technical communication in R & D laboratories: The impact of project work characteristics" *Academy of Management Journal*, 21, 624-645.

- UCL – University College London (2023) “Nature-inspired research projects” <https://www.ucl.ac.uk/nature-inspired-engineering/research-0>
- Van Geem K.M., Martin G.B. (2010, November, 18) “Process design: an example of Modeling at different scales” 5-6 Journée scientifique du CODEGEPPRA 2010 – Grenoble - France
- Vandevenne D., Caicedo J., Verhaegen P.A., Dewulf S., Duflou J. (2013) “Webcrawling for a biological strategy corpus to support biologically-inspired design” 83-92 in Chakrabarti A. Ed. “CIRP Design 2012” Springer Ed. – London – UK.
- Vincent J.F., Bogatyreva O.A., Bogatyrev N.R., Bowyer A., Pahl A.K. (2006) “Biomimetics: its practice and theory” *Journal of the Royal Society Interface*, 3, 471-482.
- Vincent J.F. (2014) “An Ontology of Biomimetics” 269–285 in “Biologically inspired Design: Computational Methods and Tools” Springer-Verlag Ed. – London - UK.
- Vinck D. (2009) « Construction des sciences et des disciplines scientifiques : question pour la recherche en soins infirmiers » *Recherche en soins infirmiers*, 98, 5-11.
- Viollet S., Dupeyroux J., Serres J. (2020) « Le robot fourmi AntBot - Conception et réalisation d’un robot bio-inspiré » *Techniques & Culture*, 2020/1, 128-141.
- Vitalis L. (2021) « Pier Luigi Nervi, l’architecture biomimétique avant la lettre ? MAP - Modèles et simulations pour l’Architecture et le Patrimoine - <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03359251/document>
- Voirol O. Ed. (2005) « Visibilité / Invisibilité » Lavoisier Ed. – Paris - France.
- Wei Y., Xu F., Bian S. (2020) “Noise Reduction of UAV Using Biomimetic Propellers with Varied Morphologies Leading-edge Serration” *Journal of Bionic Engineering*, 17, 767–779.
- Wilke P., Helfricht N., Mark A., Papastavrou G., Faivre D., Börner H.G. (2014) “A direct biocombinatorial strategy toward next generation, mussel-glue inspired saltwater adhesives” *Journal of the American Chemical Society*, 136, 12667–12674.
- Williams R. (2002) “Retooling: A Historian Confronts Technological Change” MIT Press Ed. – Cambridge – USA.
- Wiltgen B., Goel A., Vattam S. (2011) “Representation, indexing, and retrieval of biological cases for biologically inspired design” 6880, 334-347 (Notes in Computer Science) in Ram A., Wiratunga N. Ed. “Case-Based Reasoning Research and Development” Springer Ed. - Berlin – Germany.
- Witte H., Hoffmann H., Hackert R., Schilling C., Fischer M.S., Preuschoft H. (2004) “Biomimetic robotics should be based on functional morphology” *Journal of Anatomy*, 204, 331–342.
- Wright C., Johnson A., Peck A., McCord Z., Naaktgeboren A., Gianfortoni P., Gonzalez-Rivero M., Hatton R., Choset H. (2007) “Design of a modular snake robot” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS (Intelligent Robots and Systems) San Diego – USA. Oct 29 - Nov 2, 2007, Ref WeD4.6.
- Zhong C., Langrish T. (2020) “A comparison of different physical stomach models and an analysis of shear stresses and strains in these system” *Food Research International*, 135, 109296.