

Préface

Les nouveaux ouvrages de Jean-Claude André sur la conception et l'innovation avec le biomimétisme, en deux volumes, sont bien plus que des ouvrages supplémentaires sur le biomimétisme, ce sont aussi et surtout des ouvrages sur les Sciences de l'Ingénieur, la conception et l'innovation.

Rappelons d'abord la définition très générale du biomimétisme qui consiste en l'utilisation d'une connaissance issue de la nature pour en faire un artéfact technologique. Toute la question, largement traitée dans ces ouvrages, est celle du passage d'une idée puisée dans l'immense répertoire de la nature en un système technique.

Comme la complexité de la nature défie la pensée analytique chère à la science classique, il faut faire éclater les barrières entre les disciplines et être capable de mobiliser une pensée systémique et multidisciplinaire. C'est un vrai changement de paradigme que Jean-Claude André étudie sous tous ses aspects possibles.

Utilisant son expérience de chercheur, de pionnier et de leader dans la fabrication additive, l'auteur prend l'exemple de la 4D pour développer et illustrer les notions de complexité et d'innovation dans un domaine typiquement multidisciplinaire qui demande de nouvelles méthodes, des innovations inopinées et de la sérendipité. Le biomimétisme devient ainsi un exemple du désordre maîtrisé.

La réflexion sur le biomimétisme implique un changement de perspective qui ne peut pas être purement technique, mais doit engager l'ensemble de l'écosystème et le cycle de vie du produit : durabilité, réutilisation, économie de matériaux et d'énergie.

L'ensemble des problèmes évoqués ci-dessus oblige l'ingénieur à introduire la complexité dès la phase de conception/design. L'auteur consacre donc beaucoup de pages aux problèmes de conception et de design qu'il faut maîtriser pour arriver à réaliser des

artéfacts utiles à la société et, si possible, écologiquement vertueux. Le biomimétisme apparaissant ainsi comme le chemin conduisant l'ingénierie vers l'utilisation des matériaux, de l'énergie, des sciences de la nature et du numérique pour le bénéfice de l'humanité. Pour atteindre cet objectif, l'auteur plaide pour l'enseignement de la prise en compte du cycle de vie des artéfacts du berceau à la tombe. On a surtout besoin de sensibiliser les nouvelles générations d'ingénieurs à une conception prenant en compte, non seulement l'économie de fonctionnement des artéfacts, mais aussi leur obsolescence et leur recyclage.

Les réflexions sur la conception rejoignent les idées déjà anciennes de Herbert Simon sur les « sciences de l'artificiel » et sa conception des heuristiques et des solutions « satisfaisantes ». Les solutions apportées par la nature donnent l'exemple de solutions satisfaisantes et économes.

L'auteur aborde enfin la question de la formation des ingénieurs, tout au moins sous deux aspects, celui de l'enseignement de la conception en amont de la réalisation d'artéfacts innovants et frugaux, et aussi sous l'aspect de la sensibilisation des ingénieurs à une pensée complexe, plus systémique et plus pluridisciplinaire que celle qui leur est dispensée actuellement.

Au total, ces ouvrages sont extrêmement riches et Jean-Claude André va bien au-delà du biomimétisme et des exemples d'artéfacts inspirés de la nature ; il aborde toutes les questions posées par la réalisation d'objets complexes de l'idée à la réalisation, en passant par la conception et le design. Il appelle à un changement radical, à la fois dans la pensée technique et dans la formation des ingénieurs pour, en s'inspirant de la nature, réaliser des objets écoresponsables prenant en compte l'économie des ressources et de l'énergie.

Enfin, comme les autres ouvrages de Jean-Claude André, ces volumes fournissent un florilège de citations toutes plus éclairantes les unes que les autres et sont accompagnés d'une très large bibliographie, ce qui en rend la lecture très instructive et jamais rébarbative.

Jean-Charles POMEROL
Président de l'incubateur Agoranov
et du conseil scientifique de ISTE Editions

Ce livre était en cours de fabrication lorsque Jean-Claude André nous a quittés. Ces deux volumes ont donc valeur de testament scientifique de l'auteur qui nous fait partager sa grande expérience de la recherche et de l'innovation et aussi sa vision très lucide des sciences de l'artificiel, un ouvrage qui devrait être le livre de chevet de tous ceux qui s'intéressent aux sciences de l'ingénieur.

Avant-propos

« Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties. »

(Pascal, *Pensées*)

Frédéric Demoly et Jean-Claude André sont engagés en recherche dans le domaine de l'impression 4D (avec un certain nombre d'ouvrages publiés chez ISTE et ISTE-Wiley). Au fond, cette technologie consiste à en utiliser une autre, l'impression 3D, mais en utilisant des matières ou des matériaux dits « actifs » ou « intelligents » qui, grâce à une stimulation énergétique, peuvent se déformer ou changer de fonctionnalités. Depuis de nombreuses années, dans leurs recherches d'applications centrées sur ce domaine à fort potentiel, ils sont amenés à examiner des travaux issus du biomimétisme qui sont proches de ce cadre d'action (avec des publications conjointes), en particulier pour ce qui concerne l'invention et/ou l'innovation (qui est en fait une composante faible de l'impression 4D). Ces deux volumes sont l'une des conséquences de ces interactions entre idées issues de l'observation de phénomènes de la nature et impression 4D, mais dépassent ce seul thème.

Nous avons envisagé, Fred et moi, pour ces raisons, de rédiger ces ouvrages « à quatre mains » pour vous faire partager nos expériences réciproques, donc mêler nos acquis, fluidifier une rédaction issue de deux expertises différentes (« Conception » à l'UTBM ; « Procédés » à Nancy), éventuellement trouver du temps pour débattre... Il faut dire que 2023 a été une année particulièrement dense pour Frédéric, élu de surcroît membre de l'Institut universitaire de France. Il lui a donc fallu faire des choix difficiles et ces ouvrages n'auront été écrits que par un seul auteur.

Conception et innovation avec le biomimétisme 1 et *Conception et innovation avec le biomimétisme 2* peuvent, pour l'essentiel, être lus indépendamment l'un de l'autre. En effet, y sont abordés des éléments conceptuels, techniques, des démonstrations, des remises en cause conceptuelles comme l'introduction des sciences du design et de l'artificiel, sans oublier une caractéristique très importante liée à la volonté des Hommes à tous les « étages » de soutenir le développement du biomimétisme comme méthode de stimulation d'idées dans le progrès technologique.

Ces deux volumes sont « parsemés » de citations qui, associées au texte, pourraient vous faire penser au-delà de certaines évocations ou informations liées au biomimétisme et ce qui l'entoure ou le permet. Elles sont généralement repérables et rien ne vous empêche de ne pas les prendre en considération lors d'une première lecture.

Introduction

« Chaque jour l'intensité du mouvement, l'activité de l'exploitation s'accroît ; par cela même approche le moment où l'Homme, voyant son avidité le mener à des désastres irrémédiables, sera obligé de se rapprocher de la nature et de demander à la science, non plus la richesse immédiate, mais le salut. »

(Schrader 1891)

« Et il y a beaucoup d'obstacles pour y arriver ! D'autant que la plupart des idées simples ayant été épuisées, les inventions sont généralement complexes et demandent de croiser différentes disciplines. La question de l'interdisciplinarité est cruciale. Là encore, il y a de beaux discours, mais le plus souvent, l'interdisciplinarité telle que pratiquée par exemple au CNRS se limite à avoir des chercheurs qui travaillent en parallèle, chacun de leurs côtés, et ce n'est qu'à la fin que la jonction est réalisée. »

(Usine nouvelle 2023)

« Les savoirs biologiques président à la construction des systèmes techniques biomimétiques mais, dans le même temps, les analogies techniques sont des outils pour penser et percevoir le vivant – chronologiquement, mais aussi logiquement – ; la construction technique précède donc l'imitation de la nature. Isoler une fonction ou chercher à résoudre un problème pratique émane d'un regard sur la nature et les systèmes vivants orienté par un projet technique sous-jacent, qu'il soit explicite ou potentiel. L'imitation ne consiste donc jamais en une simple opération : c'est un processus réitératif qui confronte et compare les différents systèmes. »

(Provost *et al.* 2020)

« Les ingénieurs, bien qu'ils l'ignorent, sont les vrais philosophes du monde postmoderne. »

(Mitcham 1998)

Les frontières nous séparent et devraient cependant nous lier parce qu'elles n'ont pas qu'un rôle de fermeture ; en effet, elles permettent des comparaisons, des compétitions, des alliances, etc. Ce que l'on constate, c'est que les sciences et les industries fonctionnent avec des frontières pour démarquer leur territoire, pour délimiter leurs domaines, leurs valeurs, leurs objets et leurs cultures. Toutefois, la notion de frontière suppose la fin d'un espace plus ou moins autonomisé, avec son jargon vernaculaire et ce qui va avec, le début d'un autre différent, voire étranger au premier (ne serait-ce que les habitants). Mais, comme cela se trouve dans la « vraie vie » avec les travailleurs frontaliers, il y a des raccordements qui illustrent l'interpénétration ou la continuité des espaces, des métissages ou l'émergence d'intérêts communs. Cette considération peut être exploitée pour mieux comprendre les liens tissés entre certains domaines de la science, de l'industrie et de la société.

Dans les secteurs industriels très concurrentiels, les industries s'engagent dans la recherche de la meilleure performance *via* l'innovation et, pour atteindre cet objectif, s'ouvrent depuis plusieurs dizaines d'années sur la pertinence des travaux académiques, même si certaines frontières limitent (au moins dans notre pays) ces échanges dont l'utilité est évidente. C'est bien ce qui s'est produit pour l'impression 3D (André 2018) qui a pu atteindre rapidement la morphologie complexe à toutes les échelles de nombre d'entreprises en intervenant dans la conception, le design d'artéfacts commercialisables, etc. Une difficulté réside cependant dans la manière dont la recherche académique s'empare d'un sujet en approfondissant, modélisant des travaux sur des éléments singuliers (par exemple le comportement d'un matériau), alors que du point de vue de l'autre côté de la frontière, c'est une vision holistique qui est recherchée avec la maîtrise des interdépendances, possiblement complexes. Schématiquement, ce changement est celui de la transition de l'invention à l'innovation.

Divers problèmes ont émergé dans différents domaines liés à l'obtention et la production lors de la crise de la Covid-19. Depuis, le contexte international s'est durci avec la montée des nationalismes, de guerres et un affrontement commercial et technologique entre Chine et États-Unis. L'Union européenne ne peut plus ignorer l'importance à sa dépendance vis-à-vis des importations de biens et/ou de matières, ce qui se traduit par l'urgence de renforcer son autonomie. Cela suppose une meilleure maîtrise des technologies génériques, des capacités industrielles et des filières d'approvisionnement les plus essentielles : énergie, défense, électronique, matériaux critiques, alimentation, santé, numérique et ses nombreuses applications, le tout sous des contraintes au moins environnementales fortes.

Or, 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, innovation frugale, nouveaux paradigmes, etc.). Pour autant, malgré des discours alarmistes, la demande de nouveautés reste toujours soutenue.

Dans les sciences et les technologies de l'artificiel, sur la base d'une demande (téléologie, innovation incrémentale), l'ingénieur sait (en principe) trouver des voies de production industrielle respectant des critères de faisabilité scientifique et technologique, s'appuyant sur une analyse de cycle de vie (lorsqu'elle est possible), ainsi que sur des considérations économiques et des aspects réglementaires, éthiques, sociaux et moraux. 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 (sciences du design), domaine qui dispose aujourd'hui d'un savoir-faire éminent permettant de passer de l'invention à l'innovation. Ainsi, par une flexibilité et une agilité, qui sont une 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. 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).

I.1. Cadre général

Apollon avait accordé à Cassandre le don de prophétie dans l'espoir qu'elle lui accorderait ses faveurs. Elle s'y refusa et Apollon se vengea en faisant en sorte que ses prophéties soient ignorées. C'est ce qui s'est passé depuis cinquante ans (voire plus, avec les prédictions d'Arrhenius au XIX^e siècle). Aujourd'hui, les questions environnementales sont là (réchauffement climatique, épuisement des réserves, 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 et 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, amèneraient sans doute les chercheurs à des recompositions disciplinaires (André 2023), tournées plus profondément vers les défis écologiques. Elle inviterait, avec les contraintes présentes et la complexité des phénomènes naturels à prendre en considération, à plus d'inventions de rupture, créations qui sortent largement de la culture actuelle des ingénieurs de conception. Par exemple, innovations sobres, mais un verrou essentiel concerne les aspects recyclages et réutilisation généralisés aux processus industriels : transition (rapide ?) d'une production linéaire à circulaire à inventer pour les procédés de transformation de la matière et de l'énergie dans leur ensemble.

1.2. Invention et biomimétisme

La prise en considération des problèmes environnementaux (réchauffement climatique, épuisement des réserves, surpopulation, inégalités, etc.) fait que toute situation est aussi devenue « complexe ». Une des bases de la complexité est liée à une coconstruction qui fait que nous participons aux situations que nous désapprouvons, lorsque ces situations perdurent (interdépendances et circularité). Et toute tentative visant à trouver des solutions pour opérer un traitement ouvre sur des « abîmes » de complexité. « 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 bénéfice financier à bénéfices financiers et environnementaux, voire autres), il sera possible de conserver une certaine stabilité dans les modes de raisonnement des innovateurs. Cependant, il convient de se rappeler que, lorsque l'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 (idée d'hyperobjets ; voir (Morton 2013 ; Citton 2016)). Mais il est possible, inerties aidant, que le changement de la cible ne suffise pas (c'est même probable) et, pendant qu'il en est 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 écoles pour servir aux innovations et à la société.

Or, pour rappel, dans la nature, pour tous les êtres vivants qui la peuplent, les matériaux et les transformations biologiques sont 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 temps spécifique qui peut être très long), 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. Le biomimétisme qui exploite ce contexte peut être vu comme une approche de conception pour des solutions technologiques qui se veulent originales, durables et écoresponsables. Pour autant, il ne remet pas fondamentalement en cause le système de production déterministe actuel. Le biomimétisme bénéficie d'une forte reconnaissance médiatique depuis une vingtaine d'années et se considère comme un « art d'extraire la connaissance de la nature ».

Cette approche récente, fortement et simultanément 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). Dans ce contexte, pour un ingénieur-concepteur, il s'agit de se construire une représentation qui puisse être telle qu'elle maintient le questionnement, aide à comprendre les fondements des connaissances acquises, à se rendre compte d'évolutions nécessaires et à les mettre en œuvre, permet possiblement d'accéder à des découvertes originales (issues en particulier des interfaces) et lui permet

de saisir ce qu'il peut en faire (à moins qu'il ait fonctionné dans l'autre direction). Une épistémologie liée à ce domaine, dans lequel le biomimétisme peut trouver toute sa place, est évolutive à l'image de l'évolution des sciences et des techniques et des innovations associées (Dubois et Brault 2021).

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) et dans l'innovation technologique en supportant l'émergence d'idées issues de domaines disjoints de ceux des ingénieurs. Cette dernière investit alors une approche éthologique et écologique de systèmes, processus et environnements multiples et non pas une simple activité de production systématique d'« objets » d'imitation, inscrite dans celle des techniques conventionnelles. Selon Antonioli (2013), le XIX^e 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^e siècle a développé des technologies utilisant des composants associés de façons plus compliquées et le XXI^e siècle pourrait pour cet auteur être orienté vers le développement 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 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, selon ce même auteur, notre environnement serait prêt à nous offrir une énorme quantité de structures et de processus qui n'ont été explorés qu'en 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, une difficulté supplémentaire considérable !

Aujourd'hui, la plupart des inventions ou des innovations reliées à la nature viennent de l'extraction de ce que l'on en a compris, souvent visuellement, pour aller jusqu'à des applications profitables. Ce passage depuis le vivant à l'artificiel ne se traduit pas par une copie au sens strict, mais par une inspiration/interprétation de ce que la nature pourrait fournir à un développement technologique en attente d'idées. En effet, ce qu'offre cette nature nécessite d'être observé, réfléchi, analysé, muri avant d'être intégré – *via* une imagination sensible et éduquée – dans le monde technique qui, de plus en plus, est à la recherche d'idées originales pour progresser. C'est pour ces raisons qu'avec les contraintes environnementales présentes, des solutions biomimétiques pour le progrès technologique sont des ruptures recherchées, pour autant qu'elles apportent une valeur ajoutée intéressante relativement à l'existant (originalité, désirabilité, robustesse, intégration dans la chaîne de valeurs, recyclage, coût, etc.). Mais en quoi ce

concept qui s'inspire directement ou indirectement de la nature (éco-conception) pourrait-il aider l'invention ? L'innovation ? L'intégration raisonnée du biomimétisme par les inventeurs et les concepteurs suppose que l'on sache croiser positivement des logiques d'offre encore insuffisamment fouillées (biomimétisme) avec des approches par la demande (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 qui est menée dans ce travail 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 (surtout issues de cultures et de pratiques également très différentes). D'ailleurs, le biomimétisme relève-t-il d'une discipline scientifique (science du réel ou de l'artificiel) ou d'un savoir savant (connaissance de la nature) ? Comment alors réussir (ou pas) une mutualisation, non idéologique, entre nature et artéfact, pour trouver des voies d'associations profitables ? Comment l'intégration, activité de frontière et multiscalaire, 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.

En recherche orientée, on se situe dans un entre-deux entre invention et innovation technologique. La place des concepteurs jouant « sur les deux tableaux » dans ces systèmes sera examinée pour enrichir la réflexion 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 les pratiques. Mais, pour l'instant, la bibliographie concernant l'invention associée au biomimétisme reste encore relativement muette.

À ce stade, un certain nombre de questions génériques se pose : quelle est la nature du regard que le thème porte sur le monde (sa cible) ? Quel est le lien essentiel entre la créativité, l'imagination et l'application (approches causales ou heuristiques) ? La façon dont ses chercheurs observent, décrivent et interprètent le monde est-elle très différente de celles des chercheurs en sciences dures ? De quelle façon leur culture intellectuelle et leurs approches influencent-elles l'activité ? Comment la complexité est transformée en approches heuristiques à causalité élevée ? Quel est l'objet scientifique propre (subsidaire) de la recherche sur le thème ? Quels sont ces phénomènes du monde que la recherche peut revendiquer comme objets d'étude propres ? Pour la connaissance et la compréhension de quels phénomènes, la recherche biomimétique est-elle compétente ?

Considère-t-elle le monde comme un projet, pendant que les sciences assurées l'auraient vu comme un objet ? Si les travaux à visée pratique sont hors champ parce que juste technologiques, le but d'une science-objet serait-il de dégager des connaissances scientifiques robustes, inscrites dans un paradigme, pour les rendre disponibles ? Et sur quels aspects ? Etc.

En sortant de recherches par les « moyens de l'art » ou de pratiques de quête créative, aucun effort épistémologique original et paradoxal de la recherche n'est parvenu, dans un cadre de complexité important, à créer une « discipline interdisciplinaire ». Rappelons que, selon Bonnardel (2009) : « La créativité est la capacité à générer une idée, une solution ou une production qui soit à la fois nouvelle et adaptée à la situation et, dans certains cas, considérée comme ayant une certaine utilité ou valeur. » Alors, sur les thèmes orientés nature-ingénierie, peut-on développer, acceptée par ceux qui les font vivre, une science qui repose sur un savoir commun, des méthodes, un système de valeurs, mais aussi sur des activités et des stratégies pour élaborer et consolider ces savoirs et méthodes, des réseaux de chercheurs reconnaissant les résultats : un paradigme ? Pour rappel, ces sciences ne seraient pas définies par l'objet qu'elles étudient (voir section 1.1.4.4), mais ce sont elles qui le détermineraient. Il pourrait s'agir d'une science appelée « postnormale » (Goldkuhl 2020) par opposition aux stratégies classiques de résolution des problèmes, appropriée lorsque la complexité est présente, avec des enjeux de décision élevés (et lorsque les méthodologies traditionnelles sont inefficaces).

Il y a un art du retrait, qui n'est ni l'abandon, ni le désengagement, et qui passe par une nouvelle normativité et un nouvel empire que les humains devraient conquérir, cette fois sur eux-mêmes. Comment tenter de concilier déterminisme et indéterminisme ? Sans doute, il n'y a pas à choisir entre les deux, mais à articuler ces logiques antinomiques : le monde est parfois déterministe et souvent indéterministe, tout dépend de la finalité du système étudié et du regard que l'on porte sur lui. Ainsi, on constate la 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. 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...

Toutes ces questions ne peuvent être abordées dans ces deux volumes de manière rationnelle et surtout approfondie, car le système d'interaction sciences dures et biomimétisme est vaste et situé dans un cadre où certaines idéologies tentent de changer les

relations qu'ont les citoyens avec leur environnement naturel. De nombreuses voies peuvent, dans un cadre d'incertitudes et d'incomplétudes évident, être exploitées pour poursuivre la promotion plus ou moins encadrée du progrès technologique : du débat social au formatage du citoyen, de la démocratie au « meilleur des mondes ». On imagine donc bien une résistance fondamentale liée à une interaction difficile entre science et technologie d'une part, effets positifs et négatifs pour le public d'autre part, interaction qui renforce la dimension responsable de la recherche, en particulier technologique. Mais, qui, dans ce contexte, est responsable de la définition du « Bien » ?

Les sciences elles-mêmes encadrent, à leur manière, ce qu'elles rencontrent dans leur mode de représentation, « c'est-à-dire le domaine de leur recherche, donc le réel effectif, vers lequel elles se pressent et qu'elles pénètrent du regard » (Heidegger 2019). Avoir une opinion, savoir, sont des modes de la représentation surtout lorsque des incertitudes existent sur la scientificité robuste des connaissances, ce qui peut induire des confusions des représentations et des risques pour des propositions crédibles d'innovations effectives. Associer nature et technologie dans le biomimétisme, c'est obligatoirement disposer de connaissances non équilibrées et risquer de rentrer dans de possibles confusions peu propices aux « vraies » inventions. Par exemple, il serait possible d'émettre des réserves à l'égard de ce concept « à la mode » de biomimétisme qui n'exprimerait qu'« amalgame, agglutination, confusion, collusion » avec une « fusion » de certains concepts, fusion « intellectuellement indéfendable, car « grossière et intéressée » (Séris 1994). Si le sujet du biomimétisme a besoin d'une « conscience », en dehors d'opérations biomimétiques individuelles, sur des sujets un peu complexes, elle devrait résulter de la coopération de plusieurs intervenants : des chercheurs de nombreuses disciplines, des techniciens et des entrepreneurs, des bailleurs de fonds et des actionnaires, des juristes et des économistes, des commerciaux et des publicistes, etc. « Le sujet réel du [biomimétisme] est très différent du sujet (cartésien, kantien) supposé rationnel, universel, animé par l'intention purement cognitive, typique de la science moderne » (Hottois 2006).

Les designers revendiquent des méthodologies qui leur sont propres (Gregor et Hevner 2013). Elles sont organisées autour de grandes étapes (identification du problème, conception des artefacts, évaluations à différents stades) qui s'appuient sur les connaissances scientifiques disponibles pour construire une preuve de concept (Pascal et Rouby 2017). Comme il est nouveau, le problème est conceptualisé sans ancrage direct avec les pratiques existantes, le concepteur dispose de son imagination en lien avec ce que la littérature existante a produit. Les cas d'invention, preuves de créativité, posent dans un pilotage par la demande comme connu le problème à résoudre, mais dans le cas d'invention spontanée (sérendipitaire), la définition du problème est, par essence, mal connue et mal structurée. C'est, pour Pascal et Rouby (2017), un défi à part entière à traiter.

Bref, cher lecteur, devant tous ces questionnements, vous vous contenterez d'un vagabondage où nature et ingénierie tenteront d'échanger pour trouver des synergies efficaces. Alors, en innovation, c'est l'étude de cette possible transition *via* le biomimétisme qui servira de fil conducteur dans cette réflexion (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 » est envisageable.

I.3. Bibliographie

- André, J.-C. (2018). *De la fabrication additive à l'impression 3D/4D – Volume 1 : des concepts aux réalisations actuelles ; Volume 2 : améliorations des techniques actuelles et leurs limites ; Volume 3 : Innovations de rupture*. ISTE Editions, Londres.
- André, J.-C. (2019). *Industrie 4.0. Paradoxes et conflits*. ISTE Editions, Londres.
- André, J.-C. (2023). *Modes de production des savoirs entre science et applications – Volume 1 : Concepts ; Volume 2 : Applications*. ISTE Editions, Londres.
- Antonioli, M. (2013). *Toujours la vie invente....* Chimères, 81, 139–151.
- Balta, F. (2017). *La complexité à la portée de tous – Une nécessité citoyenne*. Erès, Paris.
- Bonnardel, N. (2009). Activités de conception et créativité : De l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives. *Le travail humain*, 72, 5–22.
- Citton, Y. (2016). Accélérer notre attention collective aux hyper-objets. Dans *Accélération !*, de Sutter, L. (dir.). PUF, Paris 205–224.
- Demoly, F., André, J.-C. (2022). *Impression 4D – Volume 1 : Entre recherché disruptive et applications industrielles ; Volume 2 : Entre science et technologie*. ISTE Editions, Londres.
- Dubois, M.J.F., Brault, N. (2021). Tentative de définition de la science et de l'épistémologie. Dans *Manuel d'épistémologie pour l'ingénieur*, Dubois, M.J.F., Brault, N. (dir.). Editions Matériologiques, Paris, 17–33.
- Godet, M., Durance, P., Mousli, M. (2010). Créativité et innovation dans les territoires. Conseil d'Analyse Économique [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.cae-eco.fr/staticfiles/pdf/092-a.pdf>.
- Goldkuhl, G. (2020). Design Science Epistemology – A pragmatist inquiry. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 32, 39–80.

- Gregor, S., Hevner, A.R. (2013). Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact. *MIS Quarterly*, 37, 337–356.
- Heidegger, M. (2019). « Philosophie » et « science ». Dans *Pensées directrices – Sur la genèse de la métaphysique, de la science et de la technique modernes*. Le Seuil, Paris, 133–175.
- Hottois, G. (2006). La technoscience : de l’origine du mot à ses usages actuels. *Recherche en soins infirmiers*, 86, 24–32.
- McKey, D. (2016). Paysages bio-culturels et biomimétisme à un niveau écosystémique. Dans *Des êtres vivants et des artéfacts*, Pitrou, P., Coupaye, L., Provost, L. (dir.). Les actes de colloque du musée du Quai Branly, Paris. doi.org/10.4000/actesbrantly.647.
- Mitcham, C. (1998). The importance of philosophy to engineering. *Teorema*, XVII, 27–47.
- Morton, T. (2013). *Hyper-objects: Philosophy and Ecology after the End of the World*. University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Pascal, A., Rouby, E. (2017). Les scénarios d’usage comme support aux méthodologies de Recherche en Design Science dans le cas d’invention. *Systèmes d’information & management*, 22, 47–78.
- Pitrou, P. (2020). Le biomimétisme comme système. *Techniques & Culture*, 73, 34–43.
- Provost, F., Kamili, L., Pitrou, P. (2020). Enquêter sur l’imitation du vivant. *Techniques & Culture*, 73, 208–221.
- Schaer, E., André, J.-C. (2020). *Un renouveau du génie des procédés – Volume 1 : historique et formations ; Volume 2 : Recherche ; Volume 3 : Prospective*. ISTE Editions, Londres.
- Schrader, F. (1891). *Atlas de Géographie Moderne*. Hachette, Paris.
- Séris, J.P. (1994). *La technique*. PUF, Paris.
- Siskin, C. (2016). *System: The Shaping of Modern Knowledge*. MIT Press, Boston.
- Usine nouvelle (2023). Il faut se battre avec les puristes de la science pour innover [En ligne]. Disponible à l’adresse : <https://www.usinenouvelle.com/article/il-faut-se-battre-avec-les-puristes-de-la-science-pour-innover-pointe-jean-claude-andre-co-inventeur-de-l-impression-3d.N2181247>.