



HAL
open science

Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances

Pierre-Emmanuel Fayemi

► To cite this version:

Pierre-Emmanuel Fayemi. Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0062 . tel-01531185

HAL Id: tel-01531185

<https://pastel.hal.science/tel-01531185>

Submitted on 1 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Mécanique "

présentée et soutenue publiquement par

Pierre-Emmanuel FAYEMI

le 28 novembre 2016

Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances

Directeur de thèse : **Améziane AOUSSAT**

Co-encadrement de la thèse : **Nicolas MARANZANA**

Jury

M. Gilles BOEUF, Prof. Dr., Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
M. Marc DESMULLIEZ, Prof. Dr., School of Engineering, Heriot-Watt University
M. Stephane NEGNY, Prof. Dr., Procédé et Système Industriels, ENSIASET
Mme Kalina RASKIN, Dr., Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis
M. Améziane AOUSSAT, Prof. Dr., LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Campus Paris
M. Nicolas MARANZANA, Prof. Dr., LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Campus Paris
M. Giacomo BERSANO, -, Active Innovation Management SARL

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

**T
H
È
S
E**



Pierre-Emmanuel Fayemi

Thèse de doctorat

Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances

REMERCIEMENTS

Il va sans dire que ces travaux ne sauraient exister sans l'approche collégiale qu'ils ont emprunté. À ce titre, je me dois de mettre en avant un nombre incertain de personnes sans qui, par leurs contributions directes ou indirectes, ces travaux ne seraient qu'une coquille vide.

Je tiens ainsi tout d'abord à remercier les membres du jury Gilles Bœuf (Président de jury), Marc Desmulliez (Rapporteur), Stéphane Negny (Rapporteur) et Kalina Raskin (Examinatrice) d'avoir accepté de prendre part à la soutenance de ces travaux de thèse, tout autant que pour leur analyse et commentaires vis-à-vis des documents formalisés.

Je remercie aussi Ameziane Aoussat et Nicolas Maranzana pour leur encadrement tout au long de ces années et pour m'avoir permis d'intégrer le Laboratoire Conception de Produits et Innovation, j'en mesure plus que jamais aujourd'hui, la chance.

Il m'est impossible de parler du laboratoire qui a accueilli ces travaux sans mentionner l'ensemble des personnes qui le compose. Merci à son équipe encadrante, et particulièrement Claude Gazo, pour l'intérêt qu'ils m'ont accordé ainsi que l'expérience qu'ils m'ont transmise. Merci à ses doctorants, notamment ceux participant à mon Groupe de Travail de Thèse, dont les commentaires ont aiguillé mes réflexions. Merci à son équipe administrative : Séverine Fontaine, Valerie Saffar, Bernard Aubague et Helène Zimmer dont j'ai dû mettre la patience à rude épreuve. Merci aussi à Floriane Laverne pour son soutien à la fois logistique, statistique et psychologique, à Étienne Boisseau, compagnon d'itinérance transalpine ainsi qu'à Thibault Souchet dont la vitesse de codage et l'aisance statistique me laissent pantois.

Ces travaux n'auraient vu le jour sans compter sur la confiance et le dévouement de Giacomo Bersano. C'est à travers lui que j'ai aussi une pensée toute particulière pour toute l'équipe AIM. Collaborer avec eux est l'une des raisons principales d'accomplir mon travail au quotidien. Merci donc à Malte Schöfer dont les discussions quasi métaphysiques ont constitué une fontaine de Jouvence intellectuelle ("Auf einem Wiedersehen freue ich mich") et Claire Vitoux dont la patience et la camaraderie auront agi en boussole tout au long de la rédaction du manuscrit.

Indépendamment du laboratoire et de l'entreprise qui ont accueilli cette thèse de doctorat, il me tient à cœur de remercier d'autres parties prenantes sans qui ces travaux n'auraient pu être mis en œuvre. Merci donc à Tarik Chekchak pour nos déjeuners philosophico-biologiques, ses fulgurances intellectuelles et sa passion revigorante pour le biomimétisme ; merci à lui et à Kalina de porter haut et à bras-le-corps la thématique, leur aspiration pour de meilleurs lendemains constitue une vraie source d'inspiration. Merci à Kristina Wanieck pour nos longues discussions et débats méthodologiques, ainsi que pour sa motivation sans faille et sa bonté rayonnante. Je remercie évidemment Davide Russo et Stefano Ducci pour leurs apports autant théoriques que pratiques ainsi que leur amitié. Un grand merci à Jérôme Guegan et Stéphanie Buisine dont les conseils avisés en statistiques m'ont permis d'esquisser un début de compréhension des rudiments du sujet. Un merci tout particulier à Pascal Crubleau sans qui mon parcours académique se serait sans doute achevé

plus tôt, sa bonté et son soutien m'ont été précieux. Je tiens aussi à remercier les membres du réseau « European Biomimicry Alliance » pour leur énergie, leur curiosité et les espaces d'échanges et de discussions qu'ils ont su créer et entretenir. Merci à Mélanie, Pauline et Anne-Sophie pour leur lieu de pèlerinage rédactionnel qu'elles ont eu la gentillesse de mettre à ma disposition.

Dernier point, et non des moindres, je tiens à adresser des remerciements tout personnels à ma famille ainsi qu'à mes proches. Merci donc à mes parents dont l'amour inconditionnel m'a permis de me réaliser. Merci à mes beaux-parents pour leur accueil et leur bienveillance tout au long de ces longues années. Un merci à mes amis dont je chéris l'amitié et qui parsèment ma vie de moments précieux. Mon plus grand remerciement va, sans une once d'hésitation, à ma femme, Céline, sans qui je ne pourrais être celui que je suis. Les mots me manquent pour lui exprimer ma gratitude, son amour et sa compréhension au quotidien sont ce que j'ai de plus cher. Merci aussi à mon fils Amaël Ayodele Victor, grâce à qui je m'efforce de devenir celui que je souhaiterais être.

En guise de conclusion, j'ai une pensée toute particulière pour le lecteur qui parcourra ces lignes et qui aura préjugé de la qualité des travaux présentés. J'espère sincèrement qu'il trouvera au sein de ce document, le contenu qu'il était venu chercher.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	8
1 CONTEXTE DES TRAVAUX	13
1.1 CONTEXTE INDUSTRIEL DES TRAVAUX	14
1.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX	20
1.3 RECHERCHE EN LIEN AVEC LES TRAVAUX	23
1.4 POSITIONNEMENT DES TRAVAUX AU SEIN DU LABORATOIRE	27
1.5 ENJEUX ADRESSÉS PAR LES PRÉSENTES RECHERCHES	27
1.6 RÉSUMÉ ET CONCLUSION QUANT AU CONTEXTE DES PRÉSENTS TRAVAUX	29
2 ÉTAT DE L'ART	30
2.1 STRUCTURE DE L'ÉTAT DE L'ART	31
2.2 BIO-INSPIRATION	32
2.3 INGÉNIERIE DE LA CONCEPTION	63
2.4 SCIENCES DU VIVANT	86
2.5 BIOMIMÉTIQUE	111
2.6 SYNTHÈSE RELATIVE À L'ÉTAT DE L'ART	141
3 PROBLÉMATIQUE & HYPOTHÈSES	143
3.1 CONSTATS ISSUS DE L'ÉTAT DE L'ART	144
3.2 FORMULATION DE LA PROBLÉMATIQUE	145
3.3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	146
3.4 HYPOTHÈSES	146
3.5 SYNTHÈSE RELATIVE À LA PROBLÉMATIQUE ET AUX HYPOTHÈSES	148
4 PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION	150
4.1 PRÉREQUIS EXPÉRIMENTAL : HARMONISATION DU PROCESSUS BIOMIMÉTIQUE	151
4.2 ANALYSE PRATIQUE : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE	160
4.3 ANALYSE PRATIQUE : PREMIÈRE ÉTUDE – LES ATELIERS	169
4.4 ANALYSE PRATIQUE : DEUXIÈME ÉTUDE – ÉTUDE TERRAIN	180
4.5 BIOMIMETREE- ARBRE DE CLASSIFICATION BIOMIMÉTIQUE (PROBLEM-DRIVEN)	183
4.6 CONCLUSION DE LA PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION	187
5 SECONDE EXPÉRIMENTATION	189

5.1	MODÈLE EXPÉRIMENTAL	190
5.2	PROTOCOLE DE LA SECONDE EXPÉRIMENTATION	196
5.3	RÉSULTATS DE LA SECONDE EXPÉRIMENTATION	201
5.4	CONCLUSION DE LA SECONDE EXPÉRIMENTATION	210
6	CONTRIBUTIONS	211
6.1	CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES	212
6.2	CONTRIBUTIONS ACADÉMIQUES	215
7	CONCLUSION & PERSPECTIVES	218
7.1	CONCLUSION	219
7.2	PERSPECTIVES	226
7.3	PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS	230
	RÉFÉRENCES	232

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La nature possède un luxe dont les entreprises contemporaines ne disposent que trop peu : le temps. Il y a 3,8 milliards d'années, la vie est apparue sur Terre, capitalisant sur l'organisation en structures complexes de molécules capables de la supporter. En mettant ce temps à profit, le vivant n'a eu de cesse de muer, constamment en équilibre instable au gré d'adaptations requises à travers les âges. Dans cette quête d'un optimum fluctuant, un nombre incalculable de « dispositifs », de « procédés » ou encore de « stratégies » ont été générés. En comprenant les mécanismes clés de certains de ces concepts, l'homme a été en mesure d'en transposer les principes à la technologie. Tel est le pari de la bio-inspiration : tirer profit des enseignements de la nature et en transposer ses ingéniosités en vue de favoriser l'émergence d'inventions anthropocentrées et d'ainsi accélérer l'innovation.

De nombreux domaines ont bénéficié de cette approche. Dans le biomédical, le ver de château de sable (*Phragmatopoma californica*) a permis la création de la première colle intracorporelle (Gecko Biomedical) ; l'arénicole (*Arenicola marina*) est à l'origine de la formulation d'une hémoglobine synthétique cinquante fois plus oxygénante (Hemarina), ouvrant de nouvelles possibilités en matière de transplantation. Dans la vision par ordinateur, la chronocam, en utilisant des capteurs inspirés de l'œil humain, modifie la façon d'approcher la captation du mouvement.

Ces quelques exemples d'innovations à l'échelle nationale, en plus d'inscrire la démarche dans une dynamique vertueuse, illustrent le résultat concret du processus de conception bio-inspirée (le « quoi »), laissant entrevoir la portée (le « pour quoi ») et la pertinence de l'approche (le « pourquoi »). Reste la problématique de la mise en œuvre. Les exemples décrits au sein de la littérature ne suffisent aujourd'hui pas à définir les contours d'un domaine de recherche où chaque concepteur serait à même, lui aussi, de capitaliser sur les découvertes inhérentes aux sciences du vivant. C'est à cette question du « comment ? » que s'efforcent de répondre les présents travaux de thèse de doctorat.

Pour ce faire, les présents travaux formalisent une collaboration, sous l'égide d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE), entre l'entreprise Active Innovation Management (A.I.M-Innovation), partie intégrante du groupe IKOS, et du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI, EA 3927), des Arts & Métiers ParisTech (ENSAM). A.I.M est un cabinet de conseil dont la vocation est d'aider les organisations de tous secteurs dans leur démarche d'innovation. L'entreprise crée des méthodologies destinées à la résolution inventive de problèmes techniques et scientifiques des entreprises. AIM se compose de consultants en Développement de Nouveaux Concepts, Développement de Nouveaux Produits, Management de Projet, Management de l'Innovation et Transfert de Connaissance/Technologie. Pour sa part les travaux du LCPI, aussi composé d'une équipe pluridisciplinaire, s'inscrivent dans le domaine du Génie Industriel et alimentent le thème unique et fédérateur de l'optimisation du Processus de Conception et d'Innovation.

Au confluent de ces deux influences, les présents travaux de recherche se positionnent à l'intervalle de trois enjeux, celui industriel visant à favoriser l'adoption des

démarches de conception bio-inspirées par l'industrie, celui scientifique visant à accroître la visibilité du domaine par sa structuration, et celui pédagogique visant à former les potentiels concepteurs bio-inspirés à ses méthodes et outils. Pour répondre à ses enjeux, les travaux considèrent la problématique portant intitulée : « *Comment s'approprier les méthodes biomimétiques et faciliter leur déploiement pour la conception de produits innovants ?* »

Cette problématique a été caractérisée par deux hypothèses de travail. La première hypothèse traite de l'*établissement d'un référentiel des outils biomimétiques à partir d'une analyse pratique de ces derniers*. La seconde hypothèse aborde *la facilitation de l'interaction entre les acteurs de la biomimétique par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie*. Chacune de ces hypothèses a été explorée par l'intermédiaire d'une expérimentation lui étant dédiée. La première expérimentation, après une explicitation du processus biomimétique problem-driven, aborde l'ensemble de la démarche par l'évaluation des outils de conception biomimétique. L'arbre de classification des outils biomimétiques, synthétisé à partir des résultats expérimentaux, constitue l'apport principal de cette expérimentation. La seconde expérimentation introduit un outil de modélisation des systèmes biologiques, basé sur la théorie des systèmes vivants. C'est à travers l'évaluation de cet outil que l'expérimentation s'attache à répondre aux besoins de collaborations transdisciplinaires inhérentes aux démarches biomimétiques. L'emphase mise sur la structuration du domaine, que ce soit par la proposition d'un cadre de référence des outils biomimétiques ou par la formalisation d'un outil organisant les connaissances relatives aux systèmes vivants, définit l'originalité de la recherche.

Afin de rendre compte des travaux mis en œuvre, le présent document a été structuré en sept chapitres :

Chapitre 1 : Contexte des travaux

Ce premier chapitre vise à mettre en perspective les travaux présentés au sein de ce document avec ceux déjà existants au sein de la communauté scientifique des sciences de la conception et de la bio-inspiration. La façon dont le thème de recherche exposé, celui de la conception bio-inspirée, s'inscrit parmi les efforts antérieurs du laboratoire y est aussi détaillée. Le chapitre se clôture sur la formalisation des trois enjeux sous-tendant la présente recherche, à savoir, un enjeu industriel (i.e. faciliter l'adoption des démarches bio-inspirées par les entreprises), un enjeu scientifique (i.e. accroître la visibilité du domaine en l'organisant) et un enjeu pédagogique (i.e. former aux outils et méthodes de conception bio-inspirées). Ces trois enjeux finissent d'ancrer la dynamique relative à la démocratisation de la conception bio-inspirée comme focus clé de cette recherche.

Chapitre 2 : État de l'art

L'état de l'art visant à introduire les travaux autour desquels s'articule la recherche est présenté par ce second chapitre. Bâti en trois piliers (i.e. Ingénierie de la conception, Sciences du vivant et Conception bio-inspiré), ce chapitre s'efforce de présenter un aperçu étendu de chacun des thèmes abordés selon une classification hiérarchique (i.e. Concept, Théories, Processus). Ce segment du document aboutit à un ensemble de conclusions parmi

lesquelles peuvent être citées la quantité limitée de produits biomimétiques existants, la prépondérance de l'adoption de la biomimétique par le secteur industriel dans son essor, ou encore la profusion contre-productive, car désorganisée, de processus et outils biomimétiques existants.

Chapitre 3 : Problématique et hypothèses

Le chapitre 3 met en adéquation le positionnement et les enjeux mentionnés au cours du chapitre 1 (Contexte des travaux) avec les besoins identifiés et les travaux déjà réalisés et cités au sein du chapitre 2 (État de l'art). Cet alignement s'incarne sous la forme d'une problématique intitulée « *Comment s'approprier les méthodes biomimétiques et faciliter leur déploiement pour la conception de produits innovants ?* ». Formulée ainsi, la recherche tend à investiguer deux volets distincts. Le premier volet explore l'angle méthodologique de la conception bio-inspirée ainsi que la sélection de méthodes. Le second volet explore quant à lui l'interface d'interaction entre champs de connaissances distants (i.e. ingénierie et biologie). Chacun de ces volets est transposé en hypothèse amenant chacune à la mise en œuvre d'une expérimentation lui étant dédiée.

Chapitre 4 : Première expérimentation

Le quatrième chapitre présente l'expérimentation visant à valider l'hypothèse, formulée au cours du chapitre 3 (Problématique et hypothèses) selon laquelle « *l'établissement d'un référentiel des outils biomimétiques à partir d'une analyse pratique de ces derniers est possible* ». En amont de l'expérimentation est présenté un travail visant à harmoniser les modèles de processus biomimétiques. L'établissement du modèle de processus biomimétique unifié permet la réalisation de l'investigation théorique des outils biomimétiques. Suivant une liste de critères objectifs, cette exploration aboutit à une première présentation intelligible de la boîte à outils biomimétiques. Un référentiel n'étant, en l'état, pas réalisable, c'est sous l'angle de la subjectivité par l'analyse de la mise en pratique des outils biomimétiques que cette première expérimentation ambitionne de structurer le domaine. Afin de rendre possible cette approche, ce chapitre présente la réalisation de la cartographie et la classification typologique des outils biomimétiques, bases nécessaires à la formulation de la grille d'évaluation des outils biomimétiques. Suite à cela, trois ateliers, faisant intervenir des experts européens de la conception bio-inspirée, et l'étude terrain, comportant des participants de la conférence TRIZ Future (TFC'13), sont introduits. Ce sont ces dispositifs expérimentaux (articulés autour d'une série d'ateliers industriels et d'une étude de terrain lors de la TRIZ Future Conférence de Paris) qui permettent à cette première expérimentation d'aborder l'évaluation des vingt-deux outils biomimétiques retenus selon un angle pratique. Au terme de l'expérimentation, un arbre de décision biomimétique, appelé *BiomimeTree*, permettant aux concepteurs désireux d'implémenter une démarche de conception bio-inspirée est présenté. Cet outil synthétise à la fois les éléments ayant rendu l'expérimentation possible (e.g. processus unifié, cartographie et classification des outils) et les résultats expérimentaux, prodiguant aux

concepteurs un moyen d'identifier la démarche méthodologique la plus pertinente vis-à-vis de leur projet de conception.

Chapitre 5 : Seconde expérimentation

Le cinquième chapitre présente la seconde expérimentation visant à valider la seconde hypothèse présentée au cours du chapitre 3 (Problématiques et hypothèses), selon laquelle « *Il serait possible de favoriser l'interaction entre les acteurs par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie* ». Cette expérimentation introduit un modèle de modélisation de systèmes biologiques issus des sciences du vivant et adapté aux besoins en ingénierie. Cette grille de lecture du biologique a été éprouvée par quatre-vingt-huit participants, répartis en quatre populations (i.e douze experts biologistes, douze experts ingénieurs, trente-quatre étudiants biologistes, vingt-huit étudiants ingénieurs), sur deux systèmes biologiques (i.e. le manchot empereur et le mécanisme d'ovulation). Au terme de l'expérimentation, il a été constaté que le modèle accroît l'acquisition de connaissances et facilite la potentielle interaction avec l'expert biologique du système considéré, formalisant son intérêt. La facilité d'usage du modèle est ensuite investiguée afin d'identifier quels sont les prérequis nécessaires à son utilisation. L'Analyse des Correspondances Multiples identifie trois populations rattachées au degré d'usabilité de l'outil (parfaite, bonne et insuffisante). La mise en corrélation des groupes identifiés aux populations des participants aboutit à la conclusion qu'aucun prérequis des connaissances préexistantes sur le système d'étude n'est nécessaire. Ceci conforte le potentiel du modèle à être utilisé par le plus grand nombre de concepteurs biomimétiques.

Chapitre 6 : Contributions

Les contributions apportées par les présents travaux de recherche sont constituées de deux types, à savoir, académiques et industrielles, catégorisées selon les caractéristiques de leurs apports. Les nouvelles définitions, le processus biomimétique unifié, la grille d'évaluation des outils biomimétiques et la formation en biomimétique forment les contributions académiques. L'arbre de décision biomimétique, l'outil de facilitation de l'interaction concepteurs-biologistes et l'offre d'accompagnement en biomimétique forment quant à eux les contributions industrielles. En exergue de ces apports mentionnés, une liste des publications réalisées dans le cadre ou en parallèle des travaux de recherche a été adjointe au présent document.

Chapitre 7 : Conclusion & perspectives

Ce dernier chapitre met en avant les différents résultats de la recherche abordés au cours du chapitre 3 (Première expérimentation) ainsi que du chapitre 4 (Seconde expérimentation) et souligne les perspectives envisageables. La conclusion intègre une mise en adéquation des résultats expérimentaux vis-à-vis des hypothèses de travail et se clôture sur un bilan quant à la recherche mise en œuvre. Les perspectives sont quant à elles multiples. La première poursuite envisageable est liée à la création d'une version hébergée en ligne du BiomimeTree. Cette version, accessible au plus grand nombre sera à même de

répondre à certains des besoins identifiés, tout en apportant de nouvelles données à intégrer à l'analyse statistique. La seconde perspective principale est liée à l'ajout d'une composante comparative à la modélisation présentée lors de la seconde expérimentation. Cet apport dimensionnant introduit la possibilité de faciliter, non plus seulement de l'interface ingénierie-biologie, mais aussi de l'étape de sélection des organismes biologiques d'intérêts (étape 5 du processus unifié). En rendant séquentielle la recherche d'experts biologistes, c'est une accélération dans l'accomplissement du processus biomimétique qui est escomptée.

La construction des différents chapitres présentés est illustrée par la Figure 0.1 (présentant un sens de lecture du bas vers le haut).

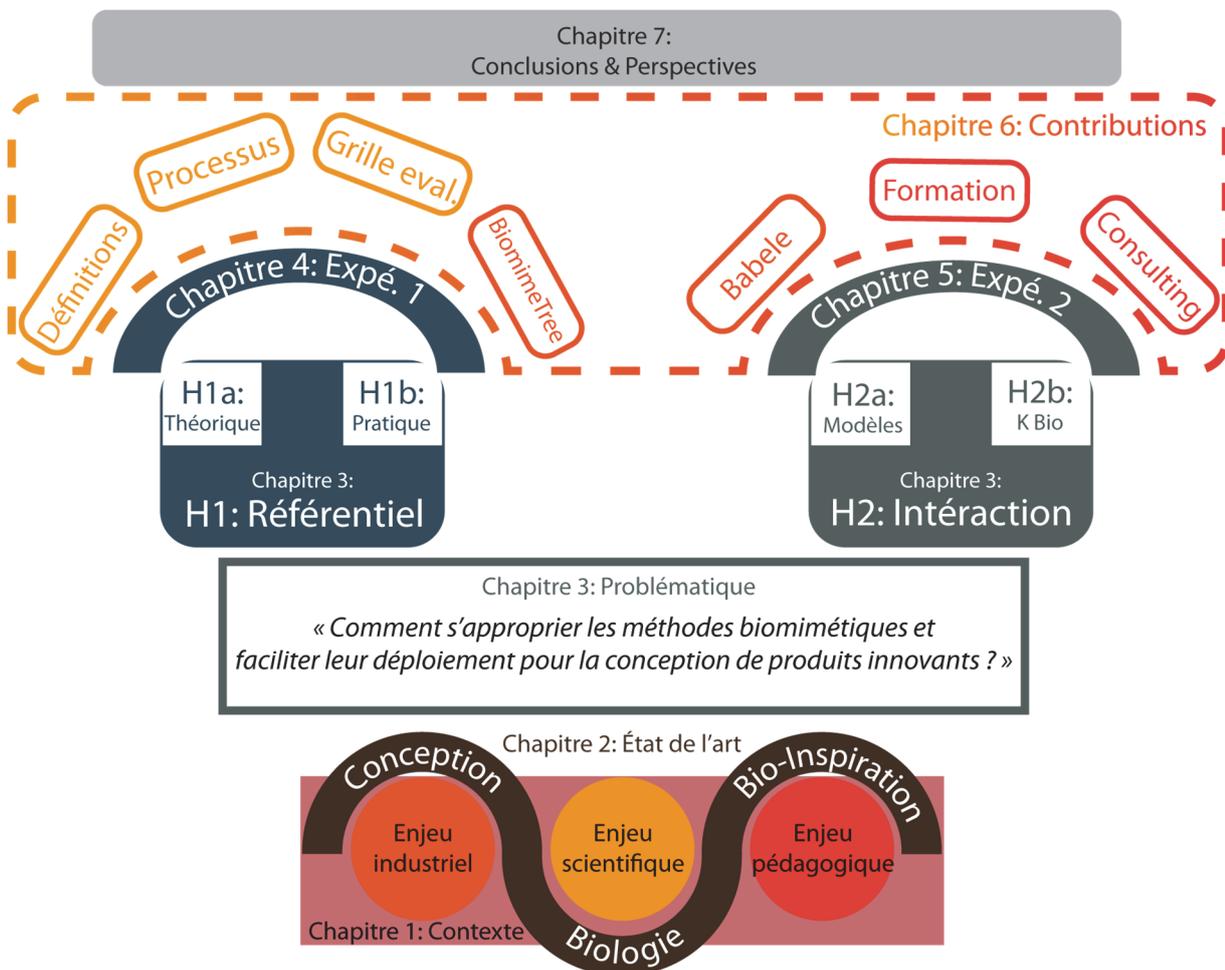


Figure 0.1 – Structure schématique du document

Chapitre 1

–

Contexte des travaux

Positionnement et enjeux de la recherche

*La vie, apparue il y a 3,8 milliards d'années, est présentée par certains comme un laboratoire de Recherche et Développement à ciel ouvert. Force est de constater que la nature est high-tech : dentelle de silicium (composants les semi-conducteurs), écran bioluminescent (Seiche naine d'Hawaï), production de toxines complexes (e.g. **mu-conotoxine GIIIB** produite par **Conus omaria**) sont autant d'exemples, généralement synthétisés à pression et température ambiante (e.g. synthèse du verre par les diatomées, synthèse de la céramique par les ormeaux) dont la technologie ne parvient pas à atteindre le degré de raffinement. Le velcro®, les écrans Mirasol™ ou la peinture **Lotusan**® sont autant d'exemples d'innovations qui s'inscrivent dans une démarche globale, celle de la bio-inspiration. Quelle pertinence et potentiel pour ce type d'approche ? C'est ce que s'efforce d'aborder ce chapitre, délimitant le cadre opérationnel et de réflexion des travaux de recherche présentés au sein de ce document.*

« La nature ne fait rien sans objet. » Aristote (Éthique à Nicomaque ~350)

Photographie issue de Starocket Media.

1.1 CONTEXTE INDUSTRIEL DES TRAVAUX

1.1.1 Innovation

Il est important de distinguer les innovations des inventions. La norme FD X50-271 définit une invention comme « la concrétisation première de l'activité de l'inventeur¹ », définition qui peut être complétée par celle du dictionnaire Merriam-Webster Dictionary [2016b], la détaillant comme « un dispositif, artifice ou processus provenant d'une étude ou d'une expérimentation². »

Dès le début du 20^e siècle, Schumpeter [1939] différencie l'innovation de l'invention en définissant la première comme « [...] la mise en place d'une nouvelle fonction de production », ce qui, d'un point de vue économique, implique une mise sur le marché. Selon Schumpeter [1939], l'invention n'est ni une condition nécessaire ni une condition suffisante à l'innovation, même si la première entraîne souvent l'apparition de la seconde.

Nos économies modernes suivent une tendance croissante relative au nombre exponentiel de découvertes scientifiques et technologiques ; l'innovation, qu'elle soit incrémentale ou de rupture, a dû s'adapter à cet environnement en continuels changements. Trois valeurs permettent de décrire l'écosystème de l'Innovation : économique, social, et environnemental.

1.1.1.1 Contexte économique de l'Innovation

La compréhension du contexte économique est essentielle pour comprendre la relation qu'entretiennent les entreprises vis-à-vis de l'innovation.

Importance croissante

L'innovation est devenue au cours de ces dernières années le principal facteur différenciant des entreprises [Paul, 2011]. À ce titre les entreprises y investissent de plus en plus de ressources [Le Masson et al., 2006], où les départements en charge de l'innovation sont perçus comme source principale dans la génération de revenus, assimilant le reste des départements à un rôle de support [Drucker, 1954].

Accroissement de la compétition

Depuis une trentaine d'années, l'essor des moyens de communication et de transports a grandement augmenté les capacités d'interactions entre individus distants. Il en est de même pour les marchés. Les entreprises n'ont plus à seulement défendre leurs avantages à une échelle locale, mais très souvent aussi à l'internationale, créant par la même occasion le concept de glocalisation [Sharma, 2009]. Cette internationalisation de la

¹ L'inventeur étant défini comme l'individu à être le premier à avoir l'idée originale formalisée

² L'exemple fourni pour illustrer cette définition est celui de l'ampoule électrique, faisant partie des plus grandes inventions du 19^e siècle.

compétition induit des changements fondamentaux dans le rapport des entreprises à l'Innovation. Premièrement, la multiplication des acteurs entraîne de façon quasi mécanique un accroissement de la compétition. Deuxièmement, l'économie occidentale a dû faire face à l'arrivée de nouveaux entrants à bas coup de main d'œuvre. Cette nouvelle concurrence de main-d'œuvre n'est pas exclusive aux activités de fabrication, les activités liées à l'Innovation sont, en effet, aussi en jeu [Le Masson et al., 2006].

Diminution de la croissance

Dans un contexte où la croissance économique mondiale demeure faible, avec peu de perspectives d'amélioration [Johansson et al., 2012], les pressions économiques sur les entreprises se sont accrues, renforçant derechef l'importance de l'Innovation.

Conclusion sur le contexte économique

Face aux éléments mentionnés (i.e. l'importance croissante de l'Innovation, l'accroissement de la compétition et des perspectives de croissance en berne), l'Innovation est passée du statut d'option à celui d'élément central de bon nombre d'entreprises. Le lancement de nouveaux produits est devenu vital pour les entreprises, à la fois sur le plan économique, mais aussi sur le plan financier. Notre dépendance aux nouveaux produits a suivi, de surcroît, une augmentation dans le temps, menant à une situation où des entreprises réalisent quatre-vingts pour cent de leur revenu annuel sur des produits âgés de moins de trois ans [Koudal, 2004]. Ces nouveaux produits n'offrent aujourd'hui qu'un avantage temporaire, engendrant un besoin de remplacement de plus en plus pressant. Pour y répondre, les cycles de mise sur le marché se sont drastiquement écourtés. Résultant de la trimestrialisation des résultats, la recherche et le développement ont également subi une accélération afin d'être en mesure de fournir des résultats quantifiables. De manière générale, c'est l'ensemble de la chaîne de l'innovation qui s'est accéléré au point de faire émerger le concept d'Innovation continue [Boer et Gertsen, 2003].

1.1.1.2 Contexte social de l'Innovation

Les liens entre entreprises, en tant que structure sociale et l'innovation sont historiques. Les premiers laboratoires de recherches sont apparus à la fin du dix-neuvième siècle, avec des desseins fortement empreints d'innovation. Leurs objectifs étaient de concevoir de nouveaux produits intégrant les inventions provenant de concepteurs indépendants et de verrouiller les technologies relatives à travers la brevetisation, afin de se prévenir d'une compétition forte [Le Masson et al., 2006]. Les bureaux méthodologiques naissent avec le Taylorisme, leurs activités divisent la conception de produits nouveaux des tâches routinières.

Depuis les années 80, des changements sociaux ont engendré une augmentation de la mobilité des travailleurs qualifiés, rendant difficiles les verrouillages du savoir au sein d'une entreprise unique. C'est à travers leurs apparitions de cette mobilité que les fournisseurs externes ont été en mesure de renforcer leurs capacités d'innovation. Cette diffusion des connaissances a même été poussée à l'extrême via l'apparition de la

conception centrée utilisateur où ce dernier, fort de la communication de ses attentes et expérience joue un rôle partiel de concepteur [Choulier, 2008].

De nouveaux espaces s'ouvrent à présent à de nouvelles explorations et aux inventions plus audacieuses, mais plus risquées : nouveaux espaces de valeurs, nouvelles fonctionnalités, nouvelles technologies et nouveaux métiers, nouveaux *business models* ou encore nouvelle forme de business marchand [Le Masson et al., 2006]. Une constatation majeure de l'évolution sociale du rôle de l'innovation est son changement de cadre, initialement centré produit, qui s'est aujourd'hui ouvert pour la positionner sur l'ensemble des domaines possibles, la rendant omniprésente

1.1.1.3 Contexte environnemental de l'Innovation

Si les hominidés sont apparus il y a sept millions d'années, l'Homo Sapiens, dans son stade d'évolution en tant qu'espèce (*Homo Sapiens Sapiens*), est survenu il y a environ deux cent mille ans. Au cours de cette période, l'activité humaine s'est drastiquement accrue, impactant la lithosphère au point qu'une partie de la communauté scientifique s'accorde quant à la création d'un nouveau temps géologique, l'Anthropocène [Crutzen, 2002, Crutzen, 2006, Steffen et al., 2007]. Que cette nouvelle époque géologique parvienne au consensus scientifique ou non, son établissement formel soulève la question de l'activité de l'homme vis-à-vis de son environnement. Depuis les années 90, de nombreuses études environnementales sont menées, apportant leur lot de préoccupations relatives aux changements climatiques. Houghton et al. [1990], Thomas et al. [2004], Kiehl et al. [2005] sont autant d'études qui ancrent les scénarios catastrophes dans notre réalité climatique proche.

Indépendamment des enjeux environnementaux, une vaste majorité de notre économie moderne repose sur l'utilisation des ressources naturelles [Hartwick et Olewiler, 1986]. Au cours des années 70, un changement de paradigme a été opéré : ces ressources à la base de notre économie présentent un aspect limité [Solow et Wan, 1976]. Cette nouvelle façon de percevoir les ressources a mené au concept de frontières planétaires [Rockström et al., 2009], véritable étalonnage des changements climatiques s'opérant à l'échelle planétaire.

Pour répondre à l'ensemble de ces problématiques et challenges, les concepts de systèmes économiques et sociaux ont été amenés à être repensés [Passet, 1979], permettant la mise en exergue du besoin de soutenabilité de l'Innovation.

1.1.1.4 Conclusions quant aux conditions opérantes de l'Innovation

Qu'elles soient dues à la dégradation des conditions environnementales ou à la raréfaction des ressources, les deux approches conduisent à devoir repenser l'activité humaine. Ce besoin de ne pas porter atteinte à la résilience terrestre implique, par le paradigme du changement de l'activité humaine, de devoir repenser notre façon de concevoir, et donc, d'innover.

Le constat réalisé amène à l'identification d'une innovation devant faire plus (omnisciente et diffuse), plus vite (Innovation continue), et avec moins (Innovation

soutenable, responsable). Face à ce paradoxe, la bio-inspiration se positionne comme une voie susceptible d'apporter des réponses à cette contradiction.

1.1.2 Conception bio-inspirée

Bien que le besoin de changement de paradigme ait été établi, son impact sur les activités économiques et le développement technologique reste faible, insensible aux menaces identifiées [Stern, 2007]. L'une des pistes pour justifier ce phénomène serait celle du manque de voie de mise en œuvre. Il semble donc nécessaire de définir le cadre de ce sur quoi la bio-inspiration serait susceptible d'être pertinente, ainsi que sur la nature de sa contribution.

1.1.2.1 Potentiel & portée de la conception bio-inspirée

L'observatoire de l'Eco-Innovation s'est penché sur le thème de bio-inspiration dès le début des années 2010. Son rapport de 2013 [Hargroves et Smith, 2013] mentionne explicitement, tel qu'illustré dans la Figure 1.1, le biomimétisme comme l'un des 8 vecteurs (contenant aussi la conception systémique qui peut être considérée comme bio-inspirée dans une certaine mesure) de l'émergence de la sixième vague d'innovation.

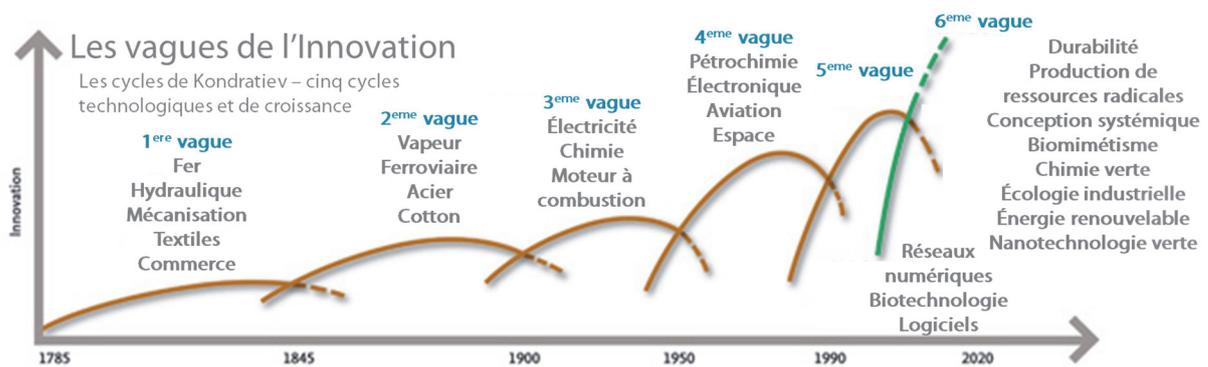


Figure 1.1 - Les vagues de l'Innovation depuis 1785 [Hargroves et Smith, 2013]

À un niveau plus spécifique, une analyse du potentiel de la bio-inspiration à répondre aux défis sociétaux du XXI^e siècle est proposée en Tableau 1.1.

Tableau 1.1 - Pertinence de la bio-inspiration comme source de résolution des grands défis du XXI^e siècle

Défis globaux	Opportunité pour la bio-inspiration	Défis technologiques	Exemples de travaux en liens
[Glenn et al., 2015]	[Gebeshuber et al., 2009]	[Bourgeois et Grou, 2007]	

1. Développement durable & Changement Climatique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Chaleur chimique inspirée des plantes ✓ Chauffage et refroidissement non carbonés ✓ piles à combustible microbiennes 	Gaz à effet de serre	✓ [Zaoui et al., 2015]
2. Eau & Assainissement	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Désalinisation ✓ Gestion des eaux 	Pollution	✓ [Dobson, 1997; Fortuna et al., 2011]
3. Population & Ressources	✗	Consommation de matière	✓ [Jeong et al., 2005; Neto et al., 2014]
		Production alimentaire	✓ [Terry et al., 2005]
		Réduction des déchets	✓ [Zari, 2010; Morganti et al., 2011]
4. Démocratisation	✗		
5. Objectif Global & Décision	✗		
6. Convergence des TIC	✗		
7. Écarts de richesse	✗		
8. Santé	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Nanomédecine ✓ Chirurgie non invasive ✓ Dispositifs biomédicaux 	Maladie cardiaque	✓ [Radisic et al., 2007; Prabhakaran et al. 2011]
		Chirurgie	✓ [Porter et al., 2009; Zal et al. 2009]
		Médicaments ciblés	✓ [Ranney, 2000; Dillow et al., 2002]
		Prothèses intelligentes	✓ [Abboudi et al., 2002; Bougherara et al., 2007]
9.Éducation & apprentissage	✗		
10. Paix & Conflits	✗		
11. Statut de la Femme	✗		
12. Organisation de la criminalité transnationale	✗		
13. Énergie	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conversion ✓ Photosynthèse ✓ Radiosynthèse ✓ Oxydation de l'hydrogène 	Stockage énergétique	✓ [Salgereido, 2015]
		Hydrogène	✓ [Allakhverdiev, 2012]
		Mix énergétique	✓ [Downer et al., 2007; Boden, 2009]
		Fusion nucléaire	✗

	✓ Énergie marémotrice		
14. Science & Technologie	✓ Innovation de rupture	Miniaturisation	✓ [Jeong et al., 2005; Neto et al., 2014;]
		Électronique polarisée	✓ [Jain et al., 2013; Qin et al., 2014]
		Électronique moléculaire	✓ [Tamerler et al., 2010; Srikaya et al., 2003]
15. Éthique universelle		✗	

À la vue des éléments présentés, la bio-inspiration semble bien présenter un potentiel pour aboutir à une Innovation capable de « faire plus » (voir conclusions de la section 1.1.1.4), répondant à la question relative au « pour quoi ? » de la bio-inspiration.

1.1.2.2 Pertinence pour l’Innovation de la conception bio-inspirée

Il convient de souligner que si de nombreux auteurs mettent en avant l’aspect soutenable de la nature comme critère de pertinence de la conception bio-inspirée [Rourke et Seepersad, 2015], cette dernière n’est pas exempte de lacunes sur le sujet.

Un premier exemple de ce constat est celui relatif à l’argument selon lequel la vie a résisté à l’épreuve du temps. Si à un niveau méta le constat est pertinent, le temps moyen de survie d’une espèce est estimé à dix millions d’années [Raup, 1992], menant à un pourcentage d’extinction du biote terrestre supérieur à 99.999 pour cent [Novacek et Wheeler, 1992], contredisant cette durabilité du vivant.

Un second exemple très parlant de la non-soutenabilité systémique de la nature est celui de la formation du pétrole. Si la biosphère recycle la quasi-totalité de ses sous-produits et déchets, une petite minorité de sa matière morte s’accumule par gravité avant d’être emprisonnée dans la roche. Pression et température altèrent, sur une échelle de temps géologique, cette matière « inutilisable » en kérogène puis pétrole. La stratégie mise en place par la nature dans cet exemple est très proche de celle utilisée dans le cadre de l’enfouissement des déchets nucléaires, stratégie notoirement décriée pour son court-termisme.

Ainsi, si affirmer que la nature est intrinsèquement durable s’avère putatif, elle demeure néanmoins plus soutenable que nos technologies dans bien des cas. Dans leurs

travaux, Vincent et al. [2006] se sont efforcés de comparer comment des problèmes étaient résolus, dans le domaine technologique, mais aussi dans le domaine naturel.

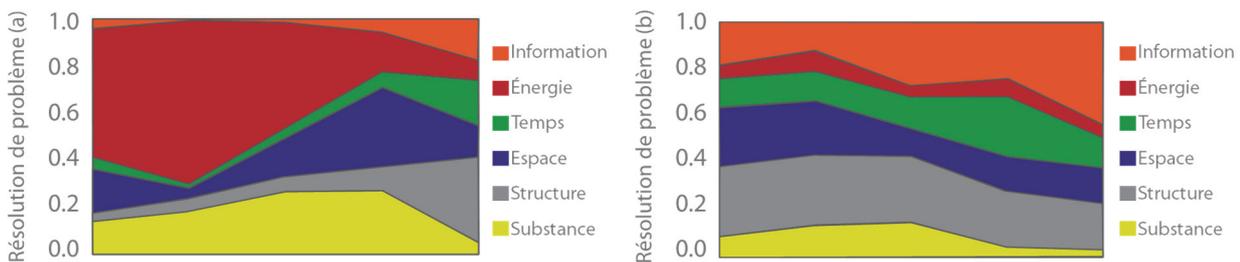


Figure 1.2 - Comparaison des modes de résolution entre technologie (a) et vivant (b) [Vincent et al., 2006].

Comme détaillé dans les deux diagrammes de la Figure 1.2, la technologie a tendance à résoudre ses problèmes à renfort d'énergie à l'échelle microscopique, de matière à l'échelle millimétrique et d'espace à l'échelle macroscopique. De l'autre côté, le vivant présente un diagramme bien plus homogène. Cette homogénéité accrue induit, comparativement à la technologie, une utilisation bien plus importante de la structuration, de la temporalité et de l'information comme mode de résolution. Le premier diagramme fait état des lacunes de notre mode de conception dans un monde aux contraintes écologiques grandissantes, matière, énergie et espaces définissent aujourd'hui, suite à la prise de conscience de leurs limites, les trois pôles de dépenses principales de notre industrie. La bio-inspiration semble donc constituer une piste intéressante et pertinente pour aboutir à une conception plus en accord avec notre environnement, challenge majeur de notre ère moderne, répondant ainsi au « pourquoi » la bio-inspiration.

1.2 CONTEXTE SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX

En tant que domaine à l'interface de plusieurs disciplines (e.g. l'ingénierie de la conception, les sciences du vivant et les sciences de gestions), la bio-inspiration, tout comme les travaux présentés au sein de ce document, aborde des sous-champs disciplinaires très différents que cette section vise à introduire.

1.2.1 Conception et Ingénierie

L'ingénierie de la conception constitue une branche du génie industriel³. Hubka et Eder [1987] proposent une délimitation de l'ingénierie de conception, la segmentant en quatre sous-thèmes: la théorie des systèmes techniques ; la théorie de la conception et

³ Le Génie Industriel étant défini par l'*Institute of Industrial Engineers* comme « concernant la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés mettant en jeu des hommes, des matériaux, des équipements et de l'énergie. Il s'appuie tant sur les connaissances spécialisées et les aptitudes dans le domaine des mathématiques, de la physique et des sciences sociales que sur les principes et méthodes des sciences de l'ingénieur, ceci pour spécifier, prédire et évaluer les résultats de ce type de système. »

établissant dès lors la cognition comme un domaine de recherche d'intérêt pour les présents travaux.

Evolution

La bio-inspiration vise à s'inspirer d'espèces vivantes ou ayant disparu. Les mécanismes d'évolutions sont responsables de l'extinction d'une espèce, mais aussi des caractéristiques définissant une espèce telle qu'elle est observable aujourd'hui. À ce titre, il semble délicat d'aborder la conception bio-inspirée sans aborder l'évolution.

Thermodynamique du vivant

En puisant ses connaissances dans le vivant, la bio-inspiration requiert une compréhension de ce qui définit un organisme biologique. C'est en ce sens que sera abordée la thermodynamique du vivant, composante maîtresse dans l'explication de la vie sur Terre.

1.2.3 Sciences de gestion

Une troisième discipline abordée par les travaux de recherche est celle liée aux sciences de gestion. En intégrant des éléments relatifs au management de l'innovation, aux processus et aux méthodes et outils, le document s'évertue à couvrir « comment les organisations fonctionnent et comment elles affectent et sont affectées par leur environnement », suivant ainsi la définition des sciences des organisations de Jones [2003].

Forest et al. [1997] décrivent une conception qui serait le moteur de l'innovation. Comprendre, décrire et/ou piloter le processus de conception tendrait ainsi à favoriser l'émergence de nouveaux produits, services, procédés ou encore *business models*.

À ce titre, la présente recherche se concentre sur les étapes amont du processus de conception, étapes qui dépeignent un produit encore dans ses phases conceptuelles. Segonds et al. [2009] définissent la « conception amont » comme les « phases de définition et planification du projet, de recherche et de validation du concept ». Le cadre de recherche s'étend de la définition d'un objectif projet à son passage d'un état immatériel (idées, concepts) à un état matériel (e.g. prototypes), tel qu'illustré par la Figure 1.4.

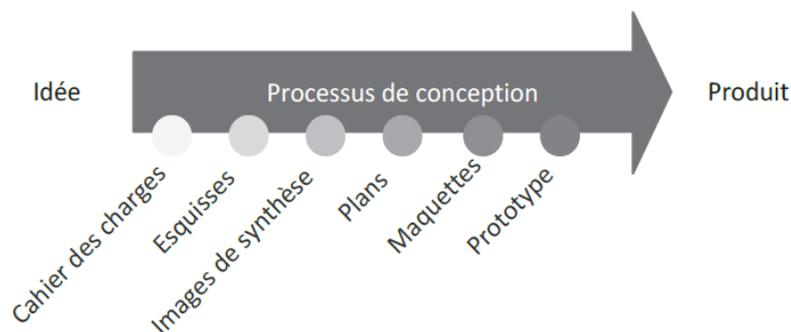


Figure 1.4 – La conception amont [Mougenot, 2008]

Les processus de conception peuvent être catégorisés selon deux grandes typologies liées à leur nature : les processus *bottom-up* et les processus *top-down*. Lahonde [2010] définit l'approche *bottom-up* comme agrégeant des « modèles partiels » encore en développement au sein de laboratoire de recherche, et l'approche *top-down* comme visant à « définir un

modèle générique du processus de conception». Les travaux présentés au sein de ce document, compte tenu des différences entre les deux approches, s'inscrivent dans la perspective *top-down*.

1.3 RECHERCHE EN LIEN AVEC LES TRAVAUX

1.3.1 Recherche en lien avec les travaux à l'international

De nombreux laboratoires à l'international développent et mettent en œuvre la bio-inspiration sous forme de démarche. Certains s'y intéressent en s'attaquant précisément à la mise en œuvre de la démarche (e.g. via le développement d'outils facilitant son implémentation) quand d'autres se concentrent sur la validation du concept et l'estimation avantages que la démarche peut dispenser. Une synthèse des structures de recherche qui abordent la bio-inspiration sous son angle méthodologique est présentée en Figure 1.5.



Pays	Structures de recherche
Allemagne	RWTH Aachen University (Aix-la-Chapelle) ; Biomimetics Innovation Centre (Brême) ; Rhine-Waal University of Applied Sciences (Clèves) ; Deggendorf Institute of Technology (Deggendorf) ; University of Freiburg (Fribourg-en-Brigau); Technische Universität München (Munich)
Angleterre	University of Bath (Bath) ; Cambridge University (Cambridge) ; University of Exeter (Exeter) ; Brunel University (Londres) ; University of Oxford (Oxford) ; University of Reading (Reading) ;
Autriche	Wiener Neustadt (Vienne) ; Carinthia University of Applied Sciences (Villach)
Canada	University of Guelph (Guelph) ; University of Toronto (Toronto)
Danemark	Technical University of Denmark (Lyngby)
Écosse	School of Engineering, Heriot Watt (Édimbourg)
Espagne	Universidad de Zaragoza, (Zaragoza)

États-Unis	Georgia Institute of Technology (Atlanta) ; Massachusetts Institute of Technology (Cambridge); Texas A&M (College Station); Oregon State University (Corvallis) ; Biomimicry 3.8 (Missoula)
France	Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (Paris)
Inde	Indian Institute of Science (Bangalore)
Italie	Politecnico Milano (Milan)
Japon	Japan Advanced Institute of Science and Technology (Ishikawa); Japan Science and Technology Agency (Tokyo)
Pays-Bas	Utrecht University (Utrecht) ; Delft University (Delft)
Suisse	Eidgenössische Technische Hochschule Zurich (Zurich), École polytechnique fédérale de Lausanne (Lausanne)
Taïwan	National Cheng Kung University (Tainan City)

Figure 1.5 – Listes non exhaustives des structures de recherche ayant générées des publications sur la thématique

1.3.2 Recherche en lien avec les travaux en France

La bio-inspiration est un champ disciplinaire diffus, car transverse. Kalina Raskin, chargée du développement scientifique du Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis (*CEEBIOS*), a effectué dans le cadre de ses attributions, un panorama des laboratoires de recherche mettant en application les préceptes de la bio-inspiration [Ricard, 2015]. Quarante-vingt laboratoires ont ainsi été identifiés, pouvant être catégorisés selon leur thème de recherche :

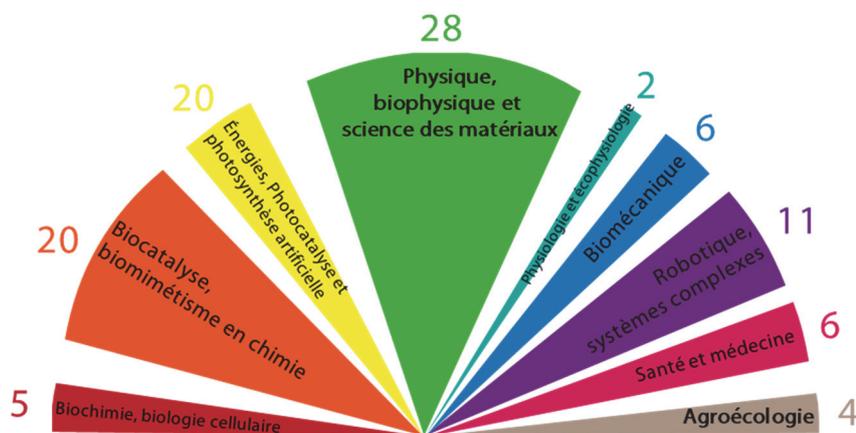


Figure 1.6 – Répartition des laboratoires de recherche français travaillant sur la bio-inspiration selon leur discipline mère

Aucun des laboratoires mentionnés n'aborderont ainsi la bio-inspiration sous son angle méthodologique. Cet élément dénote d'un focus actuel des laboratoires de recherche français sur la mise en pratique de la bio-inspiration. Cette tendance identifiée s'assimile à celle qu'ont vécu certains champs de recherche, tel que la géométrie. Si lors de sa genèse cette dernière correspondait à un ensemble de mesure (e.g. terrain agricole), elle a su dans un second temps se parer d'un ensemble de théories, au point qu'il existe aujourd'hui plus de 120 théorèmes (dont les célèbres de Pythagore et Thales) permettant de faciliter lesdites prises de mesure.

La France se situe donc dans une période de transition, avec des compétences avérées dans le domaine, mais où l'ensemble des pays leaders sur le sujet (i.e. Allemagne, États-Unis, Japon et Royaume-Uni) dispose en sus de structures développant une réflexion théorique afin d'en faciliter l'émergence de la démarche.

1.3.3 Recherche en lien avec les travaux au sein du laboratoire

Les travaux de recherche présentés au sein du présent document ont pris place au sein du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI, EA 3927), des Arts & Métiers ParisTech (ENSAM). La recherche mise en œuvre au LCPI est étroitement intégrée et alimente un thème unique et fédérateur, « l'optimisation du Processus de Conception et d'Innovation » le tout organisé selon deux axes majeurs [LCPI, 2016] :

- L'axe métier, dont l'objectif est l'intégration d'un ensemble de professions relatives à la conception (e.g. ingénieurs, designer industriel, ergonomes) au sein des processus d'innovation et de conception par l'extraction et la formalisation de règles, connaissances et outils spécifiques à ces professions.
- L'axe processus, dont l'objectif est la formalisation de différents sous-processus des processus d'innovation et de conception, via le levier que constitue la collaboration, en vue de contrôler et de maîtriser les phases divergentes et convergentes.

Au sein du laboratoire, le thème de la bio-inspiration a déjà été abordé dans le cadre d'un projet de master, portant sur le développement de l'outil « Concept model, basé sur une analogie biomimétique cellulaire » [Bila-Deroussy et Bouchard, 2012]. De nombreux autres travaux explorent des thèmes connexes dans lesquels vont les travaux relatés par le présent document. Certains de ces travaux abordent équitablement les axes métier et processus quand d'autres abordent plus préférentiellement un axe unique. Une sélection, non exhaustive, ayant pour but d'illustrer la recherche mise en œuvre par le laboratoire est ici introduite selon leur positionnement relatif aux axes majeurs de travail.

1.3.3.1 Recherches liées à l'axe métier et processus

L'établissement de la nécessité de l'approche plurielle, interdisciplinaire et collaborative [Aoussat, 1990] constitue les prémisses de la prise de considération de la prépondérance de la modélisation du processus de conception ainsi que des enjeux liés à la formalisation de ce champ de connaissance [Aoussat, 1996, Aoussat et al., 2000].

Schöfer [2015] a étudié l'impact de la composition des groupes, couplé à l'utilisation de méthodes lors des phases amont de conception par transfert de connaissance. Ses travaux ont abouti à la démonstration que la pluridisciplinarité affectait positivement le processus de résolution de problème (à la fois du point de vue de la gestion de l'information durant la résolution et du point de vue de la qualité, quantité et originalité des solutions générées) et que l'usage de méthodologies influençait positivement le processus de résolution de problème ainsi que les idées générées.

1.3.3.2 Recherches liées à l'axe métier

Kim et al. [2010] ont travaillé sur comment les étudiants et les professionnels travaillant en conception catégorisaient les informations durant le processus de création de représentations produites lors des phases divergentes de conception. Les résultats de cette recherche sont un modèle cognitif contenant différents niveaux hiérarchiques de l'information pour la conception (e.g. formes, fonctions, contexte), ainsi qu'un ensemble d'opérations cognitives [Finke et al., 1992] mises en jeu par les concepteurs durant leurs réflexions.

1.3.3.3 Recherches liées à l'axe processus

Vadcard [1996] a présenté ses travaux de doctorat dont la problématique de recherche s'articulait autour de « Comment aider à programmer l'utilisation des outils – pluridisciplinaires et opérants – en conception de produits ? », aboutissant à une classification des outils de conception décrits à l'aide d'une « carte d'identité ».

Thouvenin [2002] qui s'est concentré sur les difficultés méthodologiques formalisera sa problématique de la façon suivante : « Comment optimiser l'accompagnement des PME pour l'innovation ? » Ses travaux tentent d'y répondre en proposant une démarche permettant l'identification des méthodes les plus adéquates.

Maranzana et al. [2009] se sont concentrés sur les façons de mesurer, dans une certaine mesure, l'influence de la qualité des processus de résolution de problème sur la conception. Leurs travaux ont abouti à l'élaboration d'une démarche mesurant la pertinence, l'efficacité et l'efficience des activités relatives à la résolution de problème, ainsi qu'un ensemble de paramètres à satisfaire.

Lahonde [2010] sur la facilitation de la sélection de méthode dans un contexte industriel. Sa problématique, intitulée « Comment aider les concepteurs à sélectionner des méthodes de conception adaptées à un projet donné ? », a abouti à l'élaboration d'un modèle d'aide à la sélection des méthodes de conception mettant en exergue, non pas seulement les attributs des méthodes, mais aussi les caractéristiques du contexte projet.

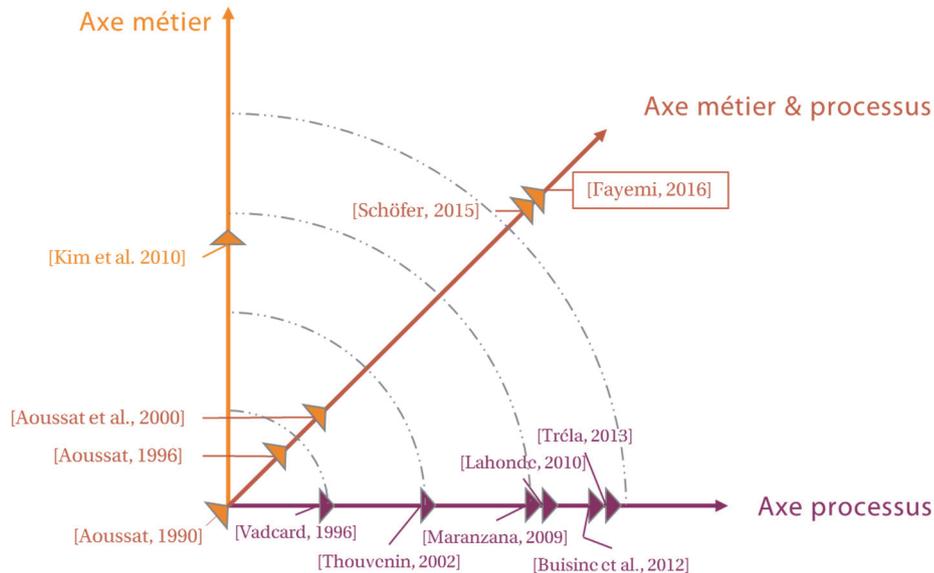
Buisine et al. [2012] ont étudié l'impact de l'utilisation d'un dispositif interactif sur la performance et la collaboration durant un Brainstorming (cf. section 2.5.3.1), poussant l'analyse jusqu'à la mesure de l'impact de l'aspect temporel et social sur la quantité et la qualité des idées produites [Schmitt et al., 2012]. La première étude dénote un effet positif du dispositif sur la performance et la collaboration ; la deuxième expérience démontre la relation positive entre pression temporelle et originalité d'une part et quantité des concepts produits d'autre part.

Tréla [2013] s'est intéressé à l'impact des méthodologies sur les performances relatives à l'innovation au sein d'une entreprise. Sa problématique intitulée « Comment choisir une théorie ou une méthodologie dans le but d'accroître la capacité d'innovation d'une entreprise ? » l'amènera à l'évaluation de méthodes telle que TRIZ (c.f. section 2.3.2.12) et *Blue Ocean Strategy* [Kim et Mauborgne, 2004] et à la conclusion que ces deux approches méthodologiques prodiguent un impact complémentaire sur les performances industrielles (e.g. stratégie de développement, gestion des idées, intégration de données).

1.4 POSITIONNEMENT DES TRAVAUX AU SEIN DU LABORATOIRE

Les travaux présentés au sein de ce document abordent l'intégration de connaissances issues des sciences du vivant aux démarches d'ingénierie de la conception par le biais d'une approche structurée ; ils s'inscrivent ainsi en droite ligne des travaux générés par le Laboratoire Conception de Produit et Innovation présentés ci-dessus. Le positionnement des travaux de doctorat au sein du LCPI est synthétisé par la Figure 1.7.

Figure 1.7 – Positionnement schématique de la recherche vis-à-vis des travaux LCPI cités



De par son sujet spécifique, la présente recherche tend à investir un thème sensiblement nouveau pour le laboratoire, repoussant le périmètre de recherche établi jusqu'alors. En abordant ce thème de la bio-inspiration sous l'angle méthodologique, les travaux s'inscrivent dans une dynamique mondiale jusqu'alors peu abordée par la recherche française.

1.5 ENJEUX ADRESSÉS PAR LES PRÉSENTES RECHERCHES

De par le positionnement émergent de la conception bio-inspirée, nombre de défis restent à relever (e.g. politique, philosophique, normatif) [Gebeshuber et al., 2009]. Les travaux de recherche présentés ici visent à aborder trois d'entre eux, spécifiques et inhérents à la démarche de conception bio-inspirée : l'enjeu industriel, l'enjeu scientifique et l'enjeu pédagogique.

1.5.1 Enjeu industriel : Faciliter l'adoption des démarches bio-inspirées par les entreprises

Le succès de la bio-inspiration peut se mesurer à son adoption par les entreprises ; sans cela, son impact sur notre économie moderne restera limité. Dans l'étude précédemment citée, réalisée par le CEEBIOS sur le biomimétisme en France, 71 entreprises ont été recensées comme travaillant sur le sujet. Force est de constater que sur ces 71 entreprises, de manière analogue au laboratoire de recherche, aucune n'aborde la bio-inspiration de façon transverse, via son angle méthodologique de façon suffisamment structurée pour répondre aux besoins industriels [Ricard, 2015]. Ainsi et tel que le décrit

Kalina Raskin, la France est « encore en période de transition, avec des entreprises demandeuses, mais sans biologistes intégrés dans leur organisation, sans accès aux pools d'experts qui existent pourtant ». Afin de lever ces verrous, la présente recherche ambitionne d'offrir une analyse des différentes théories et méthodes relatives à la bio-inspiration afin qu'une nouvelle offre d'accompagnement à la mise en œuvre de travaux de conception bio-inspirée puisse être formalisée.

1.5.2 Enjeu scientifique : Accroître la visibilité du domaine en l'organisant.

L'enjeu scientifique relatif au cadre de recherche est double et vise à agrandir la visibilité de la recherche, qu'elle soit intra aux chercheurs ou inter entre chercheurs et praticiens. Il est donc nécessaire d'aborder le manque de visibilité de la recherche en conception bio-inspirée, mais aussi leur faible transition dans leur mise en pratique. Le deuxième enjeu en lien a attiré à l'instauration d'un cadre relatif à la collaboration. La collaboration entre chercheurs étant monnaie courante au sein des sciences du vivant [NRC, 2009] et de l'ingénierie de la conception [Segonds et al., 2009], il semble intéressant pour les travaux de recherche qu'ils tendent à faciliter les collaborations entre chercheurs sur la thématique abordée dans le cadre de leur mise en œuvre.

1.5.3 Enjeu pédagogique : Former aux outils et méthodes de conception bio-inspirées

La thématique de l'enseignement est prépondérante au développement de la bio-inspiration. Cerqueira [2016], dans le cadre de son projet d'étude hébergé par le CEEBIOS est parvenue à identifier non moins de cent-vingt offres de formation académique à l'international (dont soixante sur le territoire européen et dix-huit en France). Une analyse plus spécifique permet d'affiner ce nombre, somme toute significatif pour un sujet émergent. Vingt-sept de ces formations sont diplômantes.

En dehors de l'université d'Arizona et d'Utrecht qui dispensent un master complet, les formations (à 41% diplômantes) constituent des modules s'inscrivant dans des programmes plus génériques (e.g. sustainable design, robotique). D'un point de vue général les modules dispensés tendent à suivre des courants de pensées. Par exemple, le master *Bio Inspired Innovation* de l'université d'Utrecht s'inscrit dans la démarche *Biomimicry 3.8* telle que dispensée par Janine Benyus [1997], les différentes formations germaniques suivent les préceptes de la *bionik* tels que formalisés par le *Verein Deutscher Ingenieure* (Association des Ingénieurs Allemands), et les formations de Georgia Institute of Technology abordent exclusivement l'approche centrée autour de la modélisation FBS (voir section 2.3.2.8). Dans un domaine encore jeune où il n'est pas encore possible de savoir quelles théories ou méthodes prendront le pas sur les autres, ce manque de transversalité dans les approches enseignées est potentiellement préjudiciable.

Toujours sur le sujet de la transversalité, il est possible de noter qu'aucune de ces formations sur le territoire européen (ce qui n'est pas le cas aux États-Unis par exemple) n'aborde, une nouvelle fois, la bio-inspiration selon son angle méthodologique (cf. section 1.3.2 et 1.5.1), mais se concentre, en lieu et place, sur l'application de la bio-inspiration en

lien avec une discipline mère spécifique (e.g. science des matériaux, architecture). Cette approche, si elle semble pertinente compte tenu du degré de maturité du domaine, tend à spécialiser et donc cantonner les étudiants à des disciplines spécifiques dans une situation où le potentiel général de l'approche n'a pas encore été défini.

La bio-inspiration met en branle la collaboration entre biologistes et concepteurs. À ce titre, l'essor de la bio-inspiration passera vraisemblablement par une montée en compétences biologiques des ingénieurs, combiné à une montée en compétence d'ingénierie des biologistes.

Ce sont sur ces deux points spécifiques, i.e. la formation transverse aux outils de la conception bio-inspirée et la montée en compétences de ses acteurs, que se doivent de contribuer les présents travaux de recherche.

1.6 RÉSUMÉ ET CONCLUSION QUANT AU CONTEXTE DES PRÉSENTS TRAVAUX

Souvent utilisée de manière tacite, ou cantonnée à des sujets spécifiques (section 1.3.2), la bio-inspiration tend aujourd'hui, grâce à sa nature transverse à se théoriser par l'élaboration d'un ensemble de théories, méthodes et outils (section 1.3.1). Cette théorisation du domaine a pour but d'en faciliter l'implémentation, la rendant plus accessible à l'industrie.

C'est dans cette approche théorique que s'inscrivent les travaux de recherche. De manière plus spécifique, la France accuse un retard sur le sujet [Ricard, 2015] [Casas, 2012]: peu de supports aux démarches industrielles (section 1.5.1) et peu de formations quant aux fondamentaux de la démarche existent aujourd'hui (section 1.5.3). C'est à ces enjeux que vise à répondre la présente recherche, en abordant méthodes et outils de la conception bio-inspirée de la façon la plus holistique possible. À terme, c'est l'émergence d'un cadre à même de contribuer à la collaboration des chercheurs travaillant spécifiquement sur le sujet qui est escompté (section 1.5.2). Afin d'identifier comment il est possible d'adresser ces enjeux, une analyse de la littérature existante est proposée.

Chapitre 2

État de l'art

Investigation théorique de la conception, des sciences du vivant et de la bio-inspiration

Là où le contexte avait pour objectif de présenter la recherche selon sa perspective industrielle et académique, ce second chapitre vise à introduire la littérature au sein desquels les présents travaux de recherche puisent leur inspiration. Les différents sujets afférents à la thématique de recherche seront passés en revue selon 3 perspectives distinctes (i.e. l'ingénierie de la conception, les sciences du vivant et leur télescopage au sein de la bio-inspiration). En fin de section, les points cruciaux ainsi que les problèmes qui ont pu être identifiés durant cette phase de la recherche seront mis en exergue sous la forme d'un résumé en vue d'introduire la problématique ainsi que les hypothèses de recherche, sujets du chapitre suivant.

« Va toujours par le chemin le plus court, et le plus court est le chemin tracé par la nature » Marc-Aurèle

Photographie issue de deathtothestockphoto

2.1 STRUCTURE DE L'ÉTAT DE L'ART

Ce mémoire de thèse aborde le sujet de la bio-inspiration. Dans ce contexte, la portée du support méthodologique pour faciliter l'intégration de connaissances issues des sciences du vivant au sein d'un développement technologique revêt un intérêt particulier. Comme souligné par le premier chapitre (Contexte), les recherches pertinentes puisent leur origine dans l'ingénierie de la conception, les sciences du vivant, ainsi que dans le domaine à la croisée de ces deux champs scientifiques, la bio-inspiration elle-même ; origines qui définissent la structure de cet état de l'art. À chacun de ces niveaux, une analyse des différents concepts, approches théoriques et processus seront passés en revue, comme qu'illustré par la Figure 2.1.

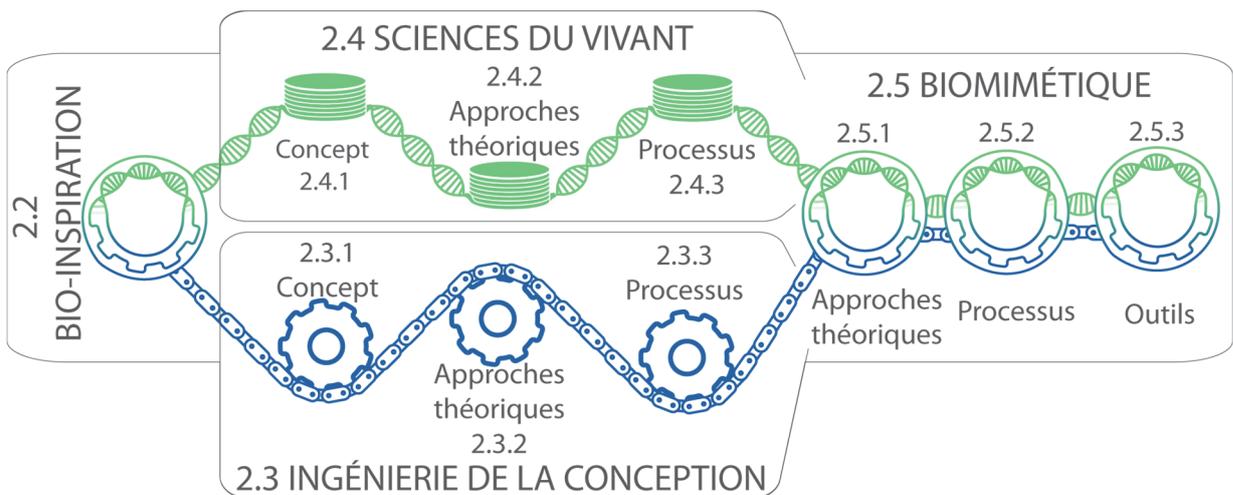


Figure 2.1 - Structure de l'état de l'art

Le premier point abordé par cet état de l'art concerne le concept défini par la bio-inspiration. Afin de définir ce qu'est la bio-inspiration, un historique en sera présenté, succédé par une exploration des définitions du domaine ainsi qu'une proposition de nouvelles définitions pour les termes bionique, biomimétisme et biomimétique. Une fois ce cadre de la conception posé, cette section explorera les tendances évolutives du domaine et décrira trois cas de conception bio-inspirée réussis. Les conclusions de cette sous-partie de l'état de l'art amenant à s'interroger quant au rôle des sciences du vivant ainsi que de l'ingénierie de la conception dans la bio-inspiration, toutes deux seront investiguées séquentiellement. Ces deux piliers constitutifs de la biomimétique seront explorés selon une structure commune décrivant leurs concepts, les approches théoriques autour desquels ils s'établissent, puis les processus selon lesquels ils s'incarnent. Au terme de ces deux sous-chapitres de l'état de l'art, l'emphasis sera portée sur un sous-embanchement spécifique de la bio-inspiration : la biomimétique. Ce champ disciplinaire représentant l'approche méthodologique de la bio-inspiration (et ainsi, dans une certaine mesure, la conception bio-inspirée) sera explicité en trois volets : les approches théoriques qui le régissent, les processus qui le décrivent, et les outils qui facilitent son implémentation.

2.2 BIO-INSPIRATION

La bio-inspiration, aussi simple soit-elle sémantiquement parlant, nécessite, pour qui veut en délimiter le périmètre, d'aborder de nombreux sous-concepts. Son caractère multidisciplinaire et son étendue d'applications possibles rendent nécessaire une prise de recul certaine pour en appréhender le concept. Dans cette section, représentée schématiquement par la Figure 2.2, un historique du domaine (voir section 2.2.1), ainsi qu'une analyse sémantique (voir section 2.2.2) seront présentés, dans un effort de dresser un tableau qui, s'il ne saurait être exhaustif, investiguera les blocs élémentaires requis à la compréhension de ce qu'est la bio-inspiration. De nouvelles définitions seront proposées en vue de structurer les différents sous-concepts abordés (voir section 2.2.3). Un aperçu des évolutions du domaine lors des récentes années sera proposé afin de comprendre dans quelle dynamique s'inscrivent les présents travaux (voir section 2.2.4). En fin de section, la présentation de trois exemples de réussite biomimétique, parmi les plus connues du domaine, sera introduite en vue d'en déceler l'importance de l'approche méthodologique au cours de leur conception (voir section 2.2.5).

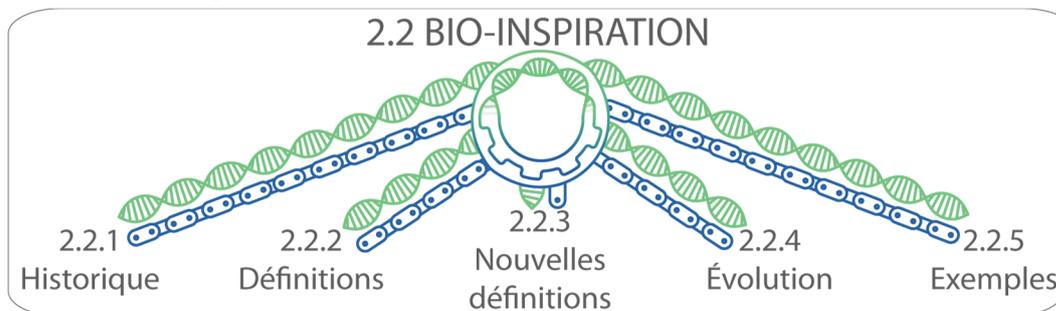


Figure 2.2 - Structure de la section relative à la bio-inspiration

2.2.1 Historique

La datation de l'apparition de la bio-inspiration, si tant est que cela soit pertinent, apparaît être difficile à formuler, même de façon grossière. Si ses premières traces irréfutables remontent à la Renaissance par l'intermédiaire de Léonard de Vinci et ses études du vol des oiseaux pour la conception de ses ornithoptères et automatons [Da Vinci, 2013], voir Figure 2.3, les premières investigations des connaissances issues du vivant relatives au vol lui sont antérieures.

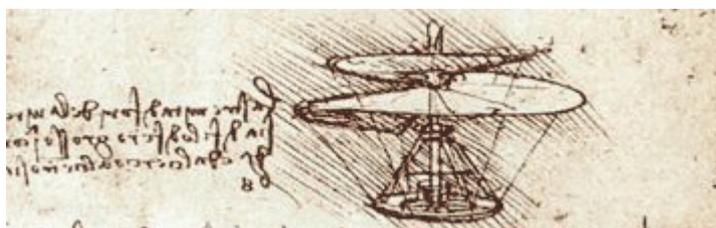


Figure 2.3 - Croquis de la vis aérienne de de Vinci (Extrait du Manuscrit B Institut de France-1487), parmi les premières traces historiques de la bio-inspiration.

L'envol de la bio-inspiration

Abbas Ibn Firnas (810-887), cristallisant la fascination que l'homme a pour le vol aérien, n'aura eu de cesse, tout au long de sa vie, que de tenter de décrypter le mécanisme mis en œuvre par les oiseaux [Jamsari et al., 2013]. Près de mille ans plus tard, à la fin du XIX^e siècle, Otto Lilienthal [1911] concevra ses planeurs suite à l'étude de la capacité de portance de l'extrados des ailes d'oiseau. Un siècle supplémentaire s'écoulera avant que Clément Ader, fasciné par les chauves-souris et plus particulièrement la roussette et son ossature lui permettant d'effectuer de courts vols planés, réalise son *avion III*, aux caractéristiques aérodynamiques sans précédent [Vincent et al., 2006]. Ce sont tous ces travaux, parmi tant d'autres, qui mèneront les frères Wrights sur le chemin de la réussite en 1903 [Hwang et al., 2015], avec leur *Flyer* inspiré des vautours, finissant d'imprimer la marque de la bio-inspiration au domaine de l'aviation. Encore aujourd'hui nombre d'innovations de l'aéronautique (e.g. les winglets des grands rapaces américains, microdrones inspirés des insectes) puisent leur inspiration de la nature.

Diffusion au tissu économique

En faisant abstraction de preuves tangibles, il est possible de trouver une origine bien plus ancienne à la bio-inspiration. Plusieurs spécialistes s'accordent en effet à tirer un parallèle entre les premières traces de filet de pêche, datant du Tarentien (environ -100 000), et de la façon qu'ont les araignées de tisser leurs toiles [Pavé, 2013]. De manière plus directe, la technique de chasse sur la banquise, initiée par les Inuits, il y a plus de 4 000 ans [Langevin, 2012], semble difficilement pouvoir trouver une autre source d'inspiration que de la façon dont les ours polaires arrivent à cette même fin.

Confusius attribue, d'après une légende chinoise, la découverte de la soie au XXVII^e siècle avant Jésus Christ par l'impératrice Leizu. En s'efforçant d'extirper de sa tasse de thé une larve y étant tombée accidentellement, elle déroule le fil constituant le cocon et découvre les intérêts multiples de la soie [Powers, 2013].

Bien que cet écrit soit apocryphe, il n'en reste pas moins que les premiers fragments de soie recensés à ce jour sont datés, tel que décrit dans l'histoire, aux environs de -2500 [Vainker, 2004]. Sans constituer un cas de bio-inspiration en soi, l'exemple de la soie illustre plutôt l'intérêt technologique que l'homme peut puiser dans l'observation de la nature. Ce même exemple de la soie a cependant conduit, vers la fin du XIX^e siècle à un cas d'innovation bio-inspirée concrète. Le parasite pébrine mettant à mal l'intégralité des élevages de vers à soie français, Hilaire de Chardonnet développe en 1884 par la transposition du mécanisme de création naturelle de la soie en un procédé technologique s'articulant autour de cellulose et de collodion, la « soie artificielle » [Tucker et al., 2012].

Diffusions militaires

Sur le même principe de l'observation des animaux, les armées romaines développèrent la *testudo* (la tortue), formation militaire défensive inventée par les Gaulois [Deyber, 2009]. Cette technique défensive permet aux pelastes, légionnaires chargés de la mise en œuvre de la formation, d'avancer tout en réduisant leurs pertes, jusque-là

inévitables engendrées par les tirs ennemis. La manœuvre consiste à imiter la disposition des écailles de la tortue, chaque protagoniste des rangs hors ligne de front étant chargé de positionner son bouclier oblong à l'horizontale, formant en définitive un pavé droit supposément impénétrable aux tirs ennemis. La *testudo* n'est pas le seul aboutissement militaire inspiré de la tortue, durant les invasions japonaises, dans l'est lointain, le Général Yi Sun-sin construisit pour répondre aux raids ennemis ses *turtleships*, navires de guerre renforcés [Pemsel, 1977], démontrant qu'un même organisme, voire une stratégie existante chez un organisme donné, peut être source de plusieurs concepts.

Diffusion à l'architecture

La fin du 19^e siècle voit l'émergence de l'architecture bio-inspirée. La tour Eiffel (1889) constitue un exemple souvent insoupçonné de bio-inspiration. Quarante ans après sa construction, Hermann von Meyer érige les fondements de la tour lors d'une étude à Zurich visant trabécules, treillage de saillies osseuses capables de supporter jusqu'à une tonne de pression. Le transfert de connaissances entre Zurich et Paris sera effectué par Karl Cullman qui traduira la découverte de von Meyer sous la forme du modèle mathématique qu'utilisera Gustave Eiffel pour l'élaboration de sa célèbre tour [Eggermont, 2011].

Mais la tour Eiffel n'est pas le seul bâtiment célèbre à puiser son inspiration dans le vivant, Yahya et al. [2006] en propose d'autres exemples :

- Le *Canada's Royan Market*, inspiré de la coquille d'huitre ;
- Le *Pan Am Terminal* de l'aéroport JFK à New York, inspiré de la constitution du nymphéa ;
- Le *Crystal Palace* de Londres, inspiré du nénuphar ;
- Le pavillon américain de l'exposition universelle de 1976 à Montréal, inspiré des radiolaires
- Le terminal de pèlerinage de l'Aéroport de Jeddah, le Stade olympique de Munich, le Stade National d'athlétisme de Sydney, les zoos à Munich et au Canada, l'aéroport de Denver dans le Colorado et le *Schlumberger Cambridge Research Center* en Angleterre, tous inspirés de la toile d'araignée.

L'exemple cristallisant probablement le mieux l'impact que peut avoir l'appropriation de connaissances issues de la nature sur l'architecture s'articule autour des travaux d'Antonio Gaudí. Si ce dernier a souvent eu recours à des motifs naturels pour ses travaux de décoration (e.g. les colonnes de la façade de la *Casa Batlló*, apparenté à une structure osseuse [Vincent, 2014a]), le Temple *Expiatori de la Sagrada Família*, communément appelé *Sagrada Família*, œuvre emblématique de l'artiste, témoigne d'une approche bio-inspirée viscérale. Plutôt que d'utiliser des colonnes standard, Gaudí met en place des structures verticales qui reprennent l'apparence de troncs d'arbres. Indépendamment de leur capacité de portance supérieure, l'utilisation de ces *troncs de pierre* a été pensée pour transposer certaines valeurs jusqu'ici exclusives aux forêts (e.g. l'isolement, l'intimité) à l'expérience religieuse, prodiguant une connexion plus étroite au divin [Orman, 2013].

Diffusion dans les sciences

L'architecture, bien qu'inexorablement présente via son courant qu'est le *biomorphisme*, n'est pas le domaine exclusif d'expression au fil des âges de la bio-inspiration. De manière analogue, les sciences ont grandement profité de la diffusion de connaissances issues du vivant.

C'est en 1637 que René Descartes [1931] s'appuyant sur les travaux de William Harvey⁴ [1962] articulera en premier l'idée selon laquelle les animaux peuvent être assimilés à des « machines », opérant selon des principes mécaniques. Cette approche influencera les travaux de Giovanni Borelli [2012] point de départ du champ de recherche scientifique que constitue la biomécanique.

De manière analogue, les sciences ont grandement profité de la diffusion de connaissances issues du vivant.

- Eli Metchnikoff (prix Nobel 1908) a posé, en 1882, les fondations de la défense auto-immune non spécifique à un organe, la phagocytose, par l'observation de l'universalité du mécanisme de défense des larves d'étoiles de mer. Il intitulera plus tard sa découverte « immunité ».
- Paul Portier et Charles Richet (prix Nobel 1913) découvrent le choc anaphylactique (réponse immunitaire exacerbée) en étudiant les venins sécrétés par les filaments pêcheurs des méduses physalies océaniques.
- Otto von Warburg (prix Nobel 1931) identifie le mécanisme empêchant deux spermatozoïdes de pénétrer le même ovule par l'étude puis l'abstraction du mécanisme existant chez les oursins.
- Hodgkin et Huxley (prix Nobel 1963) explicitèrent le mécanisme de transmission des influx nerveux par des expérimentations sur des encornets.
- Kandel (prix Nobel 2000) découvre les éléments clés de la mémoire à long terme des *Aplysia*.
- Hunt et al. (prix Nobel 2001) identifient la Cycline B, protéine essentielle dans la régulation du cycle cellulaire à partir d'oocytes purifiés d'étoile de mer.
- Shimomura (prix Nobel 2008) isole la GFP, protéine utilisée dans une grande variété d'application due à sa fluorescence, à partir d'une méduse *Aequorea Victoria*.
- Blackburn, Greider et Szostak (prix Nobel 2009) ont grandement contribué à la recherche sur le vieillissement et le cancer en explicitant le mécanisme de réplication des chromosomes par leur étude d'un protozoaire cilié appelé *Tetrahymena*.

Ces douze prix Nobels de médecine puisant leur inspiration du monde biologique marin et recensés par Gilles Bœuf [2007], démontrent que nombre de nos découvertes ayant révolutionné nos connaissances scientifiques au XX^e siècle n'auraient pu exister sans la bio-inspiration.

⁴ Harvey assimila le premier, en 1628, le cœur à une pompe propulsant activant le sang à travers le système vasculaire.

Conclusion sur l'histoire de la bio-inspiration

Cette brève description de la bio-inspiration de la naissance de l'homme à nos jours traduit deux choses. La première est qu'elle ne peut être vue comme un simple épiphénomène lié au monde la conception ; son impact sur la connaissance et le nombre d'inventions et de découvertes qui en découlent est trop conséquent pour cela. Deuxièmement, elle ne peut pas non plus être rattachée à un simple effet de mode, son historique est trop ancien et trop présent pour que cela puisse être le cas.

2.2.2 Définitions historiques

Si, comme abordée dans la section précédente, la bio-inspiration diffuse ses principes depuis des temps ancestraux, son approche a évolué et les travaux quant à sa formalisation, notamment, sont contemporains. Au cours de cette évolution, les concepts relatifs à la conception bio-inspirée ont été définis de différentes manières au sein de la littérature. Comme précisé par Von Gleich et al. [2010], les définitions servent à la fois à spécifier, mais aussi à délimiter ce qu'englobe, et donc réciproquement ce qu'exclut, chacun des termes.

Bionique (« bionics »)

Le terme bionique est une construction basée sur la racine grecque *βίος* (*bíos*) (« la vie ») auquel est adjoint, en français, le suffixe *-ique* provenant d'*électronique*, en anglais, le suffixe *-ics* provenant d'*electronics*, et en allemand, le suffixe *-ik* provenant de *mechanik*.

Étant le terme relatif à la bio-inspiration, le plus ancien⁵, il serait néanmoins simpliste, dans un effort de compréhension du sens et de l'origine du terme, de ne s'arrêter qu'à la stricte étymologie.

Selon le dictionnaire de l'Académie, le terme bionique, « composé du radical de biologie et de la finale d'électronique », est une « science qui étudie les processus biologiques d'un point de vue technique, en vue d'y découvrir des principes pouvant s'appliquer au domaine militaire ou industriel ». La bionique investit donc tout particulièrement les propriétés mécaniques du vivant, s'efforçant de les transposer dans le domaine de l'ingénierie ; intégrant de ce fait la robotique, le développement de capteurs bio-inspirés ou encore la biomécanique [Ricard, 2015].

Biomimétique (« biomimetics »)

Le mot biomimétique est construit sur la même racine grecque *βίος* *bíos* couplée au grec ancien *μιμητικός*, *mīmētikós* (« imitatif »). Les fondements du terme sont, comme pour la bionique, plus profonds que sa simple analyse sémantique.

Tout comme la vie, la biomimétique puise son origine des océans. En 1940, Otto H. Schmitt identifie une conduction variable, ou du moins partielle, le long des axones des

⁵ Dès 1985, le Muséum National d'Histoire Naturelle lui consacrait une exposition sous le titre « Inventions de la nature et innovation industrielle - la bionique » [Ricard, 2015].

calamars géants lors des réponses non linéaires d'un nerf n'étant pas supposé permettre la conduction [Schmitt et Schmitt, 1940]. C'est à partir de cette observation que naîtra la bascule de Schmitt (aussi appelé trigger de Schmitt), visant à éliminer le bruit des signaux électriques des circuits imprimés. Bien que polymathe, c'est cette bascule thermionique bio-inspirée qui donnera à Otto H. Schmitt, le physicien, l'opportunité de proposer, ce qu'il appellera plus tard *biomimetic*, sa définition de la biophysique en 1957.

« *La biophysique n'est pas tant une question de sujet que de point de vue. C'est une approche des problèmes issus des sciences du vivant sous l'angle de théories et technologies de la physique. Réciproquement, la biophysique est aussi l'approche qu'aurait un biologiste à un problème de physique ou d'ingénierie, bien que cet aspect ait été grandement délaissé* » Traduit de [Schmitt, 1957] cité dans [Harkness, 2002].

Le premier usage de l'adjectif *biomimetic* sera anonymement attribué, par l'Oxford English Dictionary, à l'index du volume 132 du magazine Science, publié en 1960. L'index fait référence à deux articles, chacun proposant une nouvelle appellation pour une convention portant sur des dispositifs simulant des fonctions biologiques [Jacobs, 2014]. C'est l'extrapolation de la suggestion de l'auteur du premier article, prônant l'utilisation du suffixe *-mime* pour ce type de dispositifs [Van Bergeijk, 1960], par le compilateur de l'index qui serait à l'origine du mot *biomimetic*, le terme n'apparaissant dans aucun des articles référencés [Jacobs, 2014].

Près de 10 ans après sa définition de la biophysique, en 1969, Schmitt présentera lors du 3^e Congrès International de Biophysique, un article intitulé « *Some interesting and useful biomimetic transforms* » marquant la première utilisation formelle du terme *biomimetic* sans que ce dernier ne soit toutefois encore défini [Schmitt, 1969].

Le dictionnaire Webster lui attribuera en 1974, la définition suivante, au demeurant inchangée à ce jour :

« *L'étude de la formation, la structure, ou la fonction de substances ou matériaux produits biologiquement (tels les enzymes ou la soie) et de mécanismes et procédés biologiques (telles la synthèse protéique ou la photosynthèse) principalement dans le souci de développer des produits similaires par des mécanismes artificiels imitant ceux provenant de la nature.* » Traduit de Webster [2016a].

Cette définition présente deux significations possibles pour la biomimétique : la synthèse artificielle de matériaux, substances ou autres configurations structurales de sources naturelles et l'imitation de procédés biologiques par la création de produits. Chacune de ces significations se concentre exclusivement sur le résultat sans aborder spécifiquement la contribution dynamique potentielle de la biomimétique dans le développement de ces produits, matériaux ou structures. Pour y remédier Sørensen [2004] propose d'adjoindre à la définition de biomimétique, la composante suivante:

« *L'imitation de procédés naturels complexes autoassemblés afin d'obtenir des artefacts dynamiques intégrant des capacités d'adaptation et d'auto-entretien.* » Traduit de [Sørensen, 2004].

Bar-Cohen [2006] propose, une évolution se voulant plus générique de la définition.

« Nouvelle science représentant l'étude et l'imitation des méthodes, modèles et procédés de la nature. Bien que certains de ses configurations et modèles basiques puissent être copiés, de nombreuses idées provenant de la nature doivent être adaptées afin de servir d'inspiration aux capacités techniques humaines. » Traduit de Bar-Cohen [2006].

Dans un effort d'harmoniser *bionics* et *biomimetics*, Gleich et al [2010] proposent une nouvelle définition.

« La biomimétique est une tentative d'apprendre de la nature ; elle aborde le développement d'innovation sur la base de l'investigation de structures, fonctions, procédés et systèmes naturels, optimisé par leurs évolutions. » Traduit de [Von Gleich et al., 2010].

Biomimétisme (« Biomimicry »)

Biomimétisme partage la même étymologie que biomimétique, délaissant le suffixe *-ique* pour le *-isme* plus empreint d'idéologie.

La première mention du terme est attribuée à Merrill [1982] et sa formalisation des travaux de thèse dans le domaine de la chimie intitulée : « Biomimicry of the Dioxygen Active Site in the Copper Proteins Hemocyanin and Cytochrome Oxidase ».

L'essor de ce terme s'effectuera au cours des années 90, à travers l'émergence de la bio-inspiration verte [Bonser et Vincent, 2007]. Nachtigall [1997] sera l'un des premiers à introduire les critères de soutenabilité comme partie intégrante de la bionique. C'est sous l'influence de Benyus [1997], par l'intermédiaire de son ouvrage « *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature* », que le terme acquiert l'importance qui est aujourd'hui sienne, ainsi que son sens:

« Une nouvelle science qui étudie les meilleures idées de la nature puis imite ses concepts et procédés pour résoudre les problèmes humains. » Traduit de Benyus [1997].

De par cette définition, la nature possède un rôle de modèle, d'étalon et de mentor, ancrant la soutenabilité comme l'objectif principal du biomimétisme. Le biomimétisme s'impose rapidement comme l'un des termes relatifs à la bio-inspiration les plus utilisés aux États-Unis [Jacobs, 2014]. L'humilité et la volonté d'apprendre engendrées par la démarche du biomimétisme mènent potentiellement à une sacralisation de la nature. Cet aspect entraînera une diffusion plus limitée du terme en Europe et particulièrement en Allemagne qui lui privilégiera l'utilisation de la bionique [Jacobs, 2014].

En France, le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) [2014] s'est approprié le terme en proposant la définition suivante :

« Le biomimétisme consiste à observer et à reproduire artificiellement des propriétés essentielles (formes, matériaux, processus, interactions) d'un ou plusieurs systèmes biologiques, pour mettre au point des procédés et des organisations permettant un développement durable des sociétés à un faible coût économique et environnemental. »
[MEDDE, 2014].

Ce même ministère [2015] synthétisera cette définition lors de sa préconisation de soutien au sein de la Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) 2015-2020, qualifiant le biomimétisme de :

« [...] démarche qui consiste à aller chercher notre inspiration, pour une innovation durable, dans la nature. » [SNTEDD, 2015].

La soutenabilité ne s'est cependant pas avérée exclusive au biomimétisme. En 2007, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) [Laffite et Saunier, 2007] introduit au sein de ses activités le concept de la biomimétique comme une discipline qui :

« [...] vise à : -repérer un comportement remarquable dans la fabrication de matériaux par le vivant ; -comprendre la relation qui s'établit entre le comportement de fonctionnement et la structure de fabrication ; - et à répliquer cette structure pour élaborer des matériaux durables, selon des processus préindustriels, c'est à dire de façon rapide, standardisée, en recherchant le moindre coût. » [Laffite et Saunier, 2007].

Cette initiative de mise en avant de la durabilité au sein de la biomimétique a pour conséquence de participer à la création de frontières poreuses entre les concepts de biomimétisme et de biomimétique.

En sus de ces définitions ancrées dans la bio-inspiration, deux autres concepts (i.e. la cybernétique et la théorie des systèmes) s'avèrent conceptuellement suffisamment proches pour être introduits dans la présente section : la cybernétique et la théorie des systèmes.

Cybernétique

La cybernétique désigne, en son sens original, la science de gouverner. Issu du grec *kubernêtikê*, de *kubernân*, signifiant gouverner, c'est initialement au sens littéral qu'il sera utilisé à l'antiquité.

« SOCRATES: Or again, in a ship, if a man having the power to do what he likes, has no intelligence or skill in navigation [*αρετης κυβερνητικης, aretes kybernetikes*], do you see what will happen to him and to his fellow-sailors? » Plato, *Alcibiades I*; traduit par Benjamin Jowett [1874] à partir de la traduction de *Gorgias* (511).

De ce gouverner dérivera « gouverne », « gouvernail », « gouvernement » ou encore « gouverneur » qui partagent donc tous une étymologie commune avec la « cybernétique ». C'est cette approche sociétale qui sera formalisée dans la classification des sciences proposée par Ampère (1775-1836) [1856].

Si son champ d'investigation originel est large, son interprétation contemporaine se concentre principalement sur une interprétation technocentrée de sa définition. Cette définition moderne, proposée par Wiener [1948], présente la cybernétique comme étant :

« [...] la science du contrôle et des communications dans les animaux et les machines, communication correspondant à la réception et la digestion d'information, et contrôle constituant l'utilisation de cette information dans une action directe. » [Wiener, 1948].

L'ensemble de la cybernétique s'articule autour du principe de la boucle rétroactive, alimentant un système décisionnel (e.g. tel un dispositif de régulation des écarts de trajectoire). La cybernétique requiert une compréhension fine des systèmes organiques et/ou organisationnels, pour pouvoir établir l'analogie pertinente permettant la

transformation de systèmes initialement automatisés, qu'ils soient en silicone, industriels, ou sociétaux, en systèmes autogouvernés.

L'informatique, la robotique contemporaine, les réseaux de communication, les sociétés, sont autant d'exemples qui découlent directement de l'application de la cybernétique. Bien qu'aujourd'hui délaissée [Stebbing, 2011], la cybernétique aura laissé une marque sur le siècle qui l'aura vue naître. La croissance inexorable de l'importance de l'information et de la complexité des systèmes dans nos sociétés modernes laisse entrevoir un avenir certain pour les préceptes qu'elle a su dispenser.

Ainsi, sans être pleinement rattachée à la bio-inspiration, la cybernétique, de par sa définition, partage l'idée selon laquelle il existerait un lien entre le contrôle artificiel, voire industriel, et le contrôle physiologique, permettant au premier de tirer profit du second à travers une démarche d'analogie. La cybernétique constitue donc, en soi, un champ disciplinaire reposant sur une démarche de bio-inspiration.

Théorie des systèmes

La théorie des systèmes tire ses racines des travaux de Joseph H. Woodger [2014]. En 1930, ce dernier explore les niveaux hiérarchiques d'organisation de la biologie et en identifie plusieurs axes communs. L'hypothèse derrière la théorie des systèmes est que, par extrapolation, tout système existant s'articulerait de manière analogue à un système vivant. Une meilleure compréhension du fonctionnement d'un système biologique se répercuterait sur notre façon de percevoir et d'élaborer les systèmes auxquels nous faisons face, tel qu'illustré par la citation suivante :

« 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 un fondement pour la biologie théorique engendrerait un changement fondamental de notre perception du monde. » Von Bertalanffy [1972]

La systémique, autre nom de la théorie des systèmes, constituerait donc une méthode scientifique transversale, possédant de nombreuses ramifications en fonction de son domaine d'application (e.g. théorie des systèmes dynamiques, quand appliqué aux mathématiques) et permettant de dépasser les limites des approches réductionnistes [Von Bertalanffy, 1950].

Conclusion sur l'approche sémantique de la bio-inspiration

L'émergence et les évolutions des définitions relatives à la bio-inspiration dénotent à la fois un intérêt croissant pour le domaine, tout autant qu'un besoin croissant de formalisation inscrivant la bio-inspiration et ses concepts connexes sur le même chemin que l'ingénierie de conception au siècle dernier, vers une discipline scientifique à part entière.

En contrepartie, cette abondance de termes et de définitions engendre une confusion quant à leur périmètre sémantique respectif. Bien que plusieurs tentatives en vue de clarifier ces termes existent [Vincent et al., 2006, Zari, 2007, Gruber, 2010, Von Gleich et al., 2010], le

débat persiste au sein des différentes disciplines scientifiques de rattachement (e.g. robotique, matériaux, architecture).

Drack et Gebeshuber [2013] mettent en avant l'aspect flou et métaphorique des définitions existantes. Les « inventions de la nature (bionique) », « bonne conception de la nature (biomimetics) », ou encore « meilleures idées de la nature (biomimétisme) » sont autant d'expressions dénuées de clarté.

En définitive, il est raisonnable de considérer chacun des termes présentés comme synonymique (tel que le font plusieurs auteurs, e.g. [Vincent et al., 2006, Shu et al., 2011, Rawlings et al., 2012, Goel et al., 2013] si l'on se réfère à leurs résultats respectifs, à savoir, des inventions qui n'auraient vu le jour sans l'intégration de connaissances issues des sciences du vivant au sein de leur processus de conception. Mais les termes présentés ici proviennent et sont aussi utilisés par différentes communautés travaillant dans des champs connexes à la bio-inspiration. Leurs définitions et interprétations sont donc d'une part interconnectées, mais diffèrent aussi en termes de signifiés et de priorités de recherche. Ces différences, pouvant parfois être minces, sont amplifiées dès lors qu'il s'agit d'analyser la portée d'application ainsi que la mise en œuvre des différents concepts présentés [Fu et al., 2014, Badarnah et Kadri, 2015]. Il semble dès lors préjudiciable pour leurs disséminations que bio-inspiration, bionique, biomimétique et biomimétisme ne profitent pas de champs sémantiques spécifiques, offrant une meilleure lisibilité du domaine et facilitant ainsi l'émergence de communautés distinctes. En sus de traiter leurs redondances sémantiques, il semble nécessaire que ces différents concepts adoptent aussi des définitions explicites possédant des frontières définies pour qu'aucun de ces termes ne soit galvaudé [Drack et Gebeshuber, 2013].

2.2.3 Nouvelles définitions pour la conception bio-inspirée utilisées par les présents travaux

Face au flou sémantique relatif à la bio-inspiration tel que présenté en section 2.2.2, le premier travail effectué par le Comité Technique ISO 266 dans le cadre des travaux de normalisation de la biomimétique a été de clarifier les différents termes servant à décrire le domaine. »

Bio-inspiration (« Bio-inspiration »)

« Approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques »
[ISO/TC266, 2015b].

Dans cette définition, la bio-inspiration constitue un concept générique susceptible de regrouper nombre de sous-concepts et pratiques.

Bionique (« Bionics »)

« Discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques. »
[ISO/TC266, 2015b] tel qu'aligné avec les travaux précédemment publiés
(i.e. [Fayemi et al., 2013, Fayemi et al., 2014, Fayemi, 2015])

Cette définition place au cœur l'interprétation littérale des suffixes *-ique* (électronique) et *-ik* (mechanik), afin de proposer un concept tel qu'aujourd'hui utilisé par les communautés des sciences de la robotique. Il est à noter que cette définition respecte aussi l'interprétation populaire du terme relative à la série « L'Homme qui valait trois milliards », vecteur qui a contribué à la démocratisation du terme au cours des années 70.

Biomimétisme (« Biomimicry »)

« Philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (i.e social, environnemental et économique). »

[ISO/TC266, 2015b], tel qu'aligné avec les travaux précédemment publiés (i.e. [Fayemi et al., 2013, Fayemi et al., 2014, Fayemi, 2015])

Cette définition met l'emphase sur deux concepts distincts : l'aspect philosophique lié à l'usage du suffixe *-isme* et l'intégration du développement durable comme motivation première de ce type d'approche. La définition présentée ici respecte le sens original tel qu'introduit par Janine Benyus [1997], sans l'enfermer dans une sacralisation de la Nature qui peut être perçue comme oppressante pour ceux n'ayant pas suivi la formation de Biomimicry 3.8.

Biomimétique (« Biomimetic »)

« Coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines d'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, de leur abstraction en modèles, ainsi que le transfert et l'application de ces modèles à la solution. »

[ISO/TC266, 2015b], tel qu'aligné avec les travaux précédemment publiés (i.e. [Fayemi et al., 2013, Fayemi et al., 2014, Fayemi, 2015])

La définition proposée pour le terme biomimétique fait la part belle à son aspect méthodologique. Il est à noter mimétisme – copie – Abstraction, toujours une copie.

Conclusion sur les nouvelles définitions

Selon les définitions présentées, les termes bio-inspiration, bionique, biomimétique et biomimétisme peuvent être distingués selon une spécificité d'analogie et un domaine relatif d'appartenance, comme illustré en Figure 2.5.

Selon ces axes d'analyse, la bio-inspiration s'étend de la simple inspiration favorisant la créativité de façon générale (relatif à la phase divergente de la créativité), jusqu'à la conception de nouvelles solutions (relatif à la phase convergente de la créativité). Cette concrétisation des idées peut se fonder sur une vague analogie par l'adaptation de principes génériques extraits de la biologie (conception bio-inspirée) ou par l'abstraction, le transfert et l'application de connaissance issue de systèmes biologiques spécifiques (Biomimétique). La définition de la biomimétique implique une compréhension fine des phénomènes sous-jacents découverts dans la nature, ce qui n'est pas indispensable pour la conception bio-inspirée.

Du point de vue des domaines d'application, la bio-inspiration peut, en considérant son utilisation actuelle, être spécifique à la mécanique, en émulant – i.e. en répliquant (e.g. robotique), améliorant (e.g. transhumanisme) ou remplaçant (e.g. médecine) – des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques (Bionique), être spécifiques dans son souci de soutenabilité (biomimétisme), ou non-étiqueté spécifiquement, e.g. relative aux nanotechnologies, science des matériaux, architecture, aérodynamique ou ingénierie moléculaire.

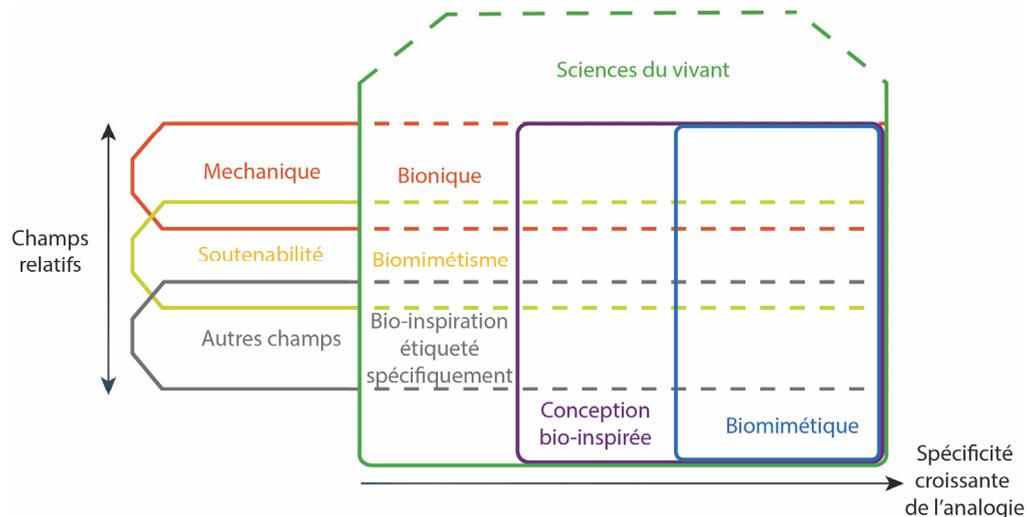


Figure 2.4 - Analyse selon deux axes de la bio-inspiration

Ces définitions présentent, tel qu'illustré par la Figure 2.5, des concepts sémantiques distants sans que ces derniers soient excluants (e.g. une approche de conception bio-inspirée soutenable (liés au biomimétisme) peut aussi être biomimétique si structurés pour en respecter la définition).

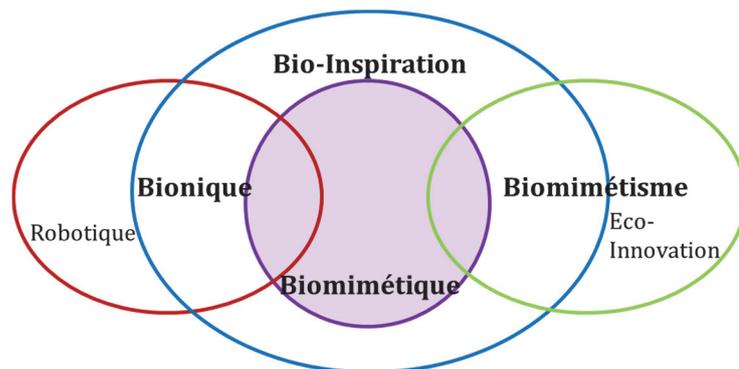


Figure 2.5 - Cartographie sémantique de la bio-inspiration et de ses concepts relatifs

Indépendamment de proposer une lisibilité accrue du domaine de recherche qu'est la bio-inspiration, ces définitions ont aussi su susciter l'adhésion jusqu'à créer un consensus international parmi les délégations des états participant aux travaux de normalisation (i.e. Belgique, Canada, Chine, République tchèque, France, Allemagne, Israël, Japon, Royaume-Uni).

Les travaux présentés au sein de ce document s'attèlent à faciliter la diffusion de la bio-inspiration au sein des praticiens du monde des entreprises, i.e. concepteurs et

ingénieurs souhaitant implémenter une démarche de bio-inspiration au sein de leur environnement professionnel. Comme mentionné dans le premier chapitre (i.e. Contexte), l'innovation actuelle se doit d'être formalisée autant que faire se peut. Compte tenu de ce contexte et à la vue des définitions formulées au sein de cette section, les travaux de recherche aborderont de façon plus spécifique le concept défini par la biomimétique.

2.2.4 Évolution de la conception bio-inspirée

Tout comme l'ingénierie de la conception a évolué au cours de son développement (voir section 2.3.1.1), la conception bio-inspirée, fort de son jeune âge et de sa mise en lumière fait état d'un fort développement au cours des deux dernières décennies.

2.2.4.1 Un champ de recherche dynamique

Avec un nombre de publications scientifiques doublant tous les deux à trois ans [Lepora et al., 2013] fait preuve d'un dynamisme certain, avec notamment des publications dans les revues scientifiques à haut impact (e.g. *Nature*, *Advanced Materials*). Forts de cette vitalité, illustrée par la Figure 2.6, un certain nombre de journaux spécialisés, présentant de relativement bons facteurs d'impacts, ont vu le jour. Parmi ces derniers il est possible de citer : *Biomaterial* (H-index de 207), l'*Applied Bionics and Biomechanics* [2008] (H-index de 13) ; le *Journal of Bionic Engineering* [2007] (H-index de 27) ; *Bio-inspiration and Biomimetics* [2007] (H-index de 36) et le *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering* [2011] (H-Index de 5). Mais la biomimétique ne se cantonne pas aux revues spécialisées, les grands journaux des sciences de la conception ont aussi fait preuve de leur intérêt via la publication de numéros spéciaux (e.g. spécial issue en 2005 de *Design Studies*, special issue en 2014 du *Journal of Mechanical Design*). La même tendance est observable au niveau des conférences internationales relatives à l'ingénierie de la conception via la création de « special tracks » à chacune des conférences *Design* (depuis 2012) et à l'*International Conference on Engineering Design* (ICED) (depuis 2013).

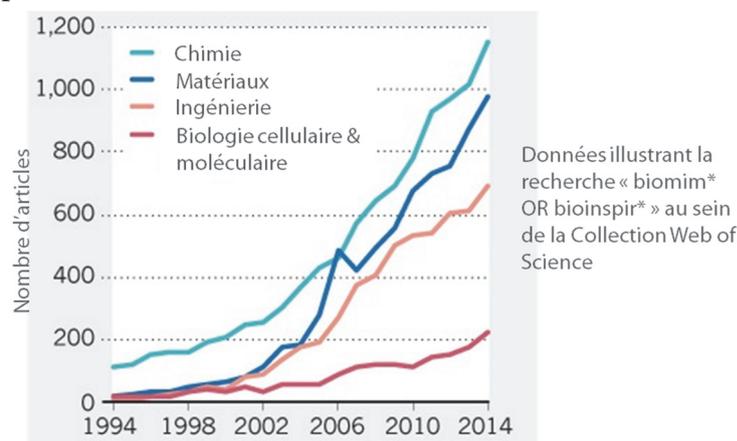


Figure 2.6 – Tendances des publications ayant attiré à la biomimétique [Snell-Rood, 2016]

2.2.4.2 Émergence de lieux et réseaux dédiés

La biomimétique est une discipline qui ne se vit pas qu'à travers les publications, elle sait aussi faire la part belle aux contacts entre les individus. Ces dernières années ont vu la naissance de centres de recherche dédiés au sujet de la bio-inspiration. Ces centres, qui capitalisent sur le nombre de laboratoires de recherche traitant de la bio-inspiration, ont pour objectif premier une mise en commun des moyens et des connaissances en vue d'accélérer le développement de la thématique.

Biokon (Allemagne)

Historiquement parmi les premiers réseaux à s'être établi (le premier ayant été créé par Messieurs Julian Vincent et Jérôme Jérónimidis, alors professeurs à l'université de Reading au Royaume-Uni) le *Biokon* allemand a été créé sous la houlette du ministère de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) qui l'a financé à hauteur de 8,4 millions d'euros (2,4 millions d'euros en 2001 puis 6 millions d'euros en 2004). Le *biokon* est le premier réseau dédié à la bio-inspiration à être régi par une feuille de route structurée. La structure allemande qui a pour objectif de fédérer les efforts en matière de biomimétique et d'en démontrer le potentiel au monde industriel présentent des résultats plus qu'engageants [Casas, 2012]:

- Forte croissance du nombre de publications et de brevets.
- Augmentations proportionnelles du nombre de projets soutenus par plusieurs organismes de recherche (depuis les années 2000).
- De nombreux prix technologiques ou académiques.
- Nombre important de cursus relatif à la bio-inspiration (plus de 10 universités ont ce type de parcours, dont trois étant exclusivement centré autour du thème).

Casas [2012] identifie aussi des raisons justifiant potentiellement le succès allemand :

- La structure est pilotée par des scientifiques, souvent biologistes, mais pas seulement, reconnus internationalement pour leurs travaux.
- La capacité de ces personnes à fédérer à l'extérieur de leur laboratoire de rattachement.
- Des industriels qui misent sur une stratégie de soutien à la recherche biomimétique sur le long terme.
- Des opérateurs qui financent, amplement, sur le long terme et de manière concertée un programme d'actions.
- Une biologie de l'organisme forte, affranchie d'une hiérarchisation des sciences.

iHub (États-Unis)

Le Hub de San Diego voit le jour en avril 2007, des efforts conjoints de la ville de San Diego, du zoo de la ville et de membres affiliés au réseau *Biomimicry 3.8*. Les missions de la structure sont la commercialisation de solutions biomimétiques et le développement de nouveaux programmes d'enseignements. Des 162 entreprises initiales, l'initiative CleanTech en inclut aujourd'hui près de 450. Le zoo et la ville de San Diego ont conjointement travaillé avec certains partenaires (i.e., San Diego State University, University of California, Point

Loma Nazarene University, University of San Diego, et CONNECT) afin d'accroître la sensibilité au biomimétisme et de faciliter l'établissement de San Diego comme lieu principal du développement du biomimétisme aux États-Unis [FBEI, 2010].

CEEBIOS (France)

Initié en milieu d'année en 2014, le Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis (CEEBIOS) ambitionne de devenir un hub national pour les acteurs du domaine, qu'ils soient publics ou privés, ainsi qu'un incubateur pour projets bio-inspirés, comblant le fossé entre recherche amont et industrie. Air Liquide, Eiffage, Renault, L'Oréal, Corning, Interface et plusieurs PME sont autant d'entreprises à être devenues membres officiels du CEEBIOS et qui mettent en œuvre les moyens en vue d'introduire la bio-inspiration comme une nouvelle opportunité pour une R&D responsable.

Centre for Naturally-Inspired Manufacturing (Royaume-Uni)

Issu d'une série de workshops initiée par le Professeur Marc Demulliez (e.g. celui du 5 et 6 décembre 2014 tenu à la *Royal Society of Edinburgh*, celui du 18 février 2015 tenu à la *Loughborough University*, celui du 5 janvier 2016 tenu à l'*University of Cambridge*) le *Centre for Naturally-Inspired Manufacturing* (NIM) est un projet en cours visant à la création d'une structure promouvant un biomimétisme capable de répondre aux attentes de l'industrie.

2.2.4.3 Impact industriel

La bio-inspiration ayant pour vocation de générer des innovations, il est possible de considérer sa transposition au domaine industriel est primordiale pour qu'elle puisse être perçue comme pertinente. Il est dès lors important d'apporter un éclairage sur la situation quant à son appropriation actuelle par le monde des entreprises.

Normes

C'est en 2011 que l'Organisation internationale de normalisation a initié ses travaux sur le biomimétisme [Durand et al., 2012]. Sous l'impulsion d'une proposition allemande et reprenant pour base la norme nationale allemande relative à la *bionik* (notamment sous l'angle des matériaux), les travaux ont rencontré l'adhésion active (pays participants) de la Belgique, de la France, d'Israël, du Japon et de la République tchèque (pays classés par ordre alphabétique), dans un premier temps, puis du Canada, de la Chine, du Royaume-Uni et de la Suisse en 2014 et une adhésion passive (pays observateur) de l'Argentine, de la République de Corée, du Danemark, de la Finlande, de Hong-kong, de l'Inde, de la République islamique d'Iran, du Kazakhstan, de la Malaisie, des Pays-Bas, de la Pologne, de la Serbie, de la Suède et de la Thaïlande.

À ce jour, deux normes ont été publiées. La première est la norme ISO 18 458 [ISO/TC266, 2015b], intitulée « Biomimétique - Terminologie, concepts et méthodologie », constitue le bloc identitaire des travaux des comités techniques ayant pour ambition de fournir un cadre méthodologique à la démarche.

La deuxième norme, ISO 18 459 ou « Biomimétique - Optimisation biomimétique » spécifie « les fonctions et domaines d'application des méthodes d'optimisation biomimétique » [ISO/TC266, 2015a]. Ces méthodes ayant pour objectif « d'allonger la durée de vie et de réduire le poids des composants tout en favorisant l'utilisation étendue de ces méthodes en soutien au développement durable » [ISO/TC266, 2015a].

Deux projets de norme demeurent, à ce jour, en cours de formalisation :

- Une norme sur les « Structures et matériaux » portée par le groupe de travail numéro 2 du comité technique ISO 266 (projet sous la direction de la délégation allemande).
- Une norme sur l'Infrastructure des connaissances en biomimétique portée par le groupe de travail numéro 4 du comité technique ISO 266 (projet sous la direction de la délégation japonaise).

Un troisième projet de norme est actuellement à l'étude. Portée par la délégation française, cette proposition aborde le sujet de la soutenabilité relative à la bio-inspiration en abordant le thème de la « biomimétique verte ».

Il est à noter qu'aucune de ces normes, ou projets de normes, n'aborde l'axe de la réglementation publique. Elles constituent en lieu et place des documents conceptualisant l'approche selon différents pans afin de mettre à disposition du grand public une formalisation des connaissances actuelles sur le sujet.

Le recul actuel est encore trop limité pour réellement mesurer l'impact de ces normes. Elles ont néanmoins le succès d'avoir réussi à créer un consensus international quant à l'entendement même de ce concept qui se veut difficile à appréhender. Fort de ce consensus, le projet de norme 18458 constitue, en plus du document résultant, une première collaboration avérée entre experts japonais et européens sur le sujet de la structuration des bases de données biomimétiques et de leurs mises en œuvre.

Politique publique

Les initiatives soutenables sont souvent dirigées par les régulations gouvernementales ou les « lubies » de responsables d'entreprises spécifiques. Les régulations peuvent cependant être modifiées quand la croissance économique ou l'emploi se retrouve en danger [Smith, 2015]. Les actionnaires d'une entreprise seront toujours portés sur le rendement sous-jacent et la profitabilité, mais les individus et les investissements sont de plus en plus tournés vers l'intégration des préoccupations sociales et environnementales. À ce titre, la bio-inspiration offre un pont entre les intérêts économiques et environnementaux en apparence incompatibles. L'approche proposée peut constituer un partenariat gagnant-gagnant : les innovations bio-inspirées permettent aux entreprises de générer des profits tout en atteignant des objectifs de soutenabilité [Smith, 2015].

Au niveau européen, la stratégie d'« Innovation au service d'une croissance durable : une bioéconomie pour l'Europe » n'intègre pas aujourd'hui la bio-inspiration dans ses outils préconisés [Eggermont et al., 2015]. Il est cependant notable que la Commission européenne ait initié un groupe de travail ayant pour ambition de définir un agenda 2020 de R&D qui intègre les solutions inspirées de la nature et la renaturation des

villes [Eggermont et al., 2015], inscrivant la bio-inspiration dans l'échiquier des politiques de financements européens.

En France, la future Agence de la biodiversité a vu ses missions modifiées en première lecture par l'Assemblée nationale afin qu'elle ait un but, comme précisé dans le texte transmis au sénat, de « soutenir les filières de la croissance verte et bleue dans le domaine de la biodiversité, en particulier le génie écologique et le biomimétisme » [Ricard, 2015]. Ce positionnement s'aligne avec la définition de la bio-inspiration comme un axe prioritaire du Commissariat Général du Développement Durable, à l'origine d'un premier inventaire de la recherche française et de l'innovation ayant attiré au biomimétisme présentant conjointement une évaluation de son potentiel dans le cadre d'une économie verte et résiliente [Durand et al., 2012]. En septembre 2015, le rapport et avis en faveur d'un support gouvernemental vis-à-vis d'une feuille de route quant à la bio-inspiration a été proposé par le Conseil Economique Social et Environnemental et unanimement adopté [Ricard, 2015].

Tableau 2.1 - Projets financés par l'ANR dont le sujet concerne en partie le biomimétisme. Source : ANR, cité dans [Ricard, 2015]

Année	Nombre total de projets financés par l'ANR	Nombre de projets de 42 mois ou plus	Nombre de projets de 36 mois ou moins	Financement moyen pour un projet de 42 mois ou plus	Financement moyen pour un projet de 38 mois ou moins
2006	10	2	8	500 000 €	312 541 €
2007	11	3	8	664 819 €	329 487
2008	3	1	2	1 124 447 €	428 486 €
2009	9	1	8	200 000 €	408 599 €
2010	3	1	2	599 991 €	487 500 €
2011	6	-	6	-	242 671 €
2012	12	6	6	902 522 €	451 290 €
2013	4	2	2	521 034 €	271 166 €
2014	11	10	1	428 670 €	148 044 €
Janvier-juin 2015	1	-	1	-	204 880 €

À travers les différents éléments cités, le positionnement politique Européen, et tout particulièrement français, en faveur des démarches liées à la bio-inspiration semble difficilement réfutable.

Économie

L'impact économique d'un champ de recherche est difficile à évaluer et s'appuie sur l'analyse de conjectures plus ou moins pertinentes pour un périmètre d'étude. Ainsi, plus son périmètre est restreint, meilleure la véracité de l'étude prospective sera.

La bio-inspiration n'étant ni un produit, ni une activité, mais une démarche transversale susceptible de concerner plusieurs domaines d'activité, il est difficile d'identifier les facteurs économiques afin d'en dimensionner le potentiel.

Dans son édition de 2014, l'environnement en France, emprunte une approche englobante des évolutions possibles, décrivant une bio-inspiration dont "la dynamique d'évolution est particulièrement liée aux domaines des EnR (l'emploi a augmenté de 11.6% en moyenne par an sur la période 2004-2012), de la réhabilitation des sols et des eaux (+12,1%) et de la recherche et développement (+8%)" [Ricard, 2015]. Il ne serait donc, d'après ces travaux, pas possible d'isoler et de quantifier l'impact actuel et futur de la bio-inspiration en terme économique, sa part imputable sur une dynamique donnée n'étant aucunement vérifiable. À la vue de l'ensemble de ces éléments, le faible nombre d'analyses économiques quant à l'impact potentiel de la bio-inspirée sur une économie donnée semble logique. Il est donc d'autant plus logique qu'aucune étude étendue sur son impact global n'ait encore vu le jour.

Les études existantes les plus abouties en la matière sont celles du Fermanian Business & Economic Institute (FBEI), études réalisées en 2010 et 2013 [FBEI, 2010, FBEI, 2013], dépeignant l'essor probable de la thématique sur le territoire américain.

Le FBEI y estime que les innovations bio-inspirées devraient représenter environ 300 milliards de dollars du produit intérieur brut (PBI) d'ici 2025 pour une économie américaine globale estimée à 21 000 milliards de dollars de bien et service. Cette prévision positionne la bio-inspiration comme plus génératrice de valeur, avec 28 milliards de dollars de plus, que l'industrie du logiciel (estimé à 282 milliards de dollars, chiffres issus du *US bureau of economics analysis*). Cet impact sur l'économie américaine a été ajusté en 2013 [FBEI, 2013] avec une participation au PIB à hauteur de 425 milliards de dollars en 2030 (calculé pour la valeur de dollars américains de 2013), pour une économie globale américaine estimée à 25 000 milliards de dollars. Les industries qui devraient bénéficier le plus des innovations bio-inspirées sont celles de la construction (comprenant le secteur du ciment et du béton), de la fabrication chimique et de la production, distribution et stockage électrique, tel qu'illustré dans la Figure 2.7. Les innovations bio-inspirées devraient représenter 113 milliards de dollars dans ces secteurs à eux seuls, soit un quart du PIB attendu relatif aux innovations bio-inspirées.

Cette nouvelle analyse confirme la tendance identifiée en 2010, à savoir, une importance limitée, mais significative de la bio-inspiration sur l'économie américaine et

imprime un rythme de croissance soutenue pour la thématique, cette dernière passant de 1.43% du PIB en 2025 à 1.7% en 2030, soit 0.27% de croissance en 5 ans.

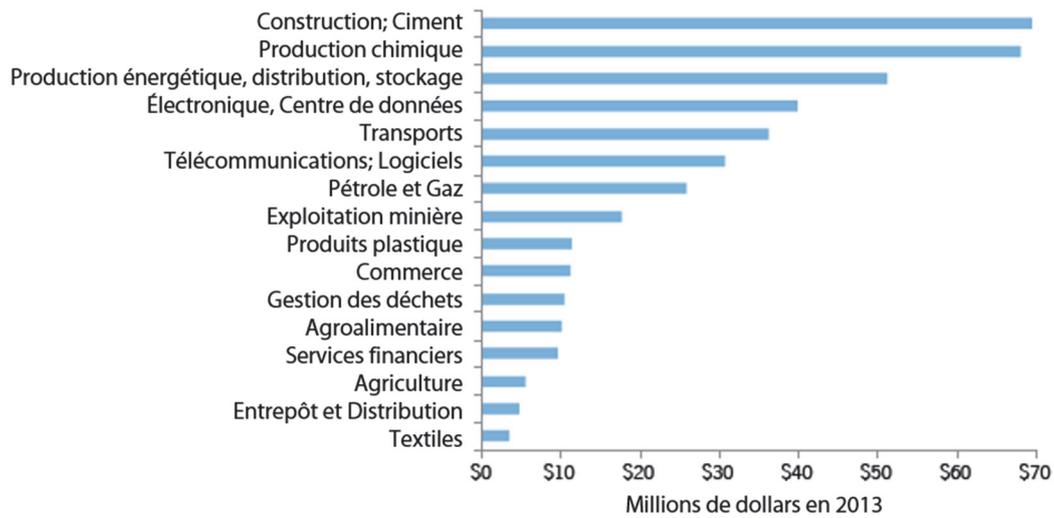


Figure 2.7 - Prospective quant à l'impact des innovations bio-inspirées sur le PIB américain en 2030, traduit de [Smith, 2015]

Alors que les produits bio-inspirés devraient impacter les performances économiques de secteurs variés tels que les transports, l'électronique, ou encore l'agroalimentaire, il est aussi attendu de ces derniers qu'ils jouent un rôle positif quant à la création d'emplois dans ces secteurs. Par répercussion au taux de pénétration des différentes industries, l'innovation bio-inspirée devrait, comme illustrée en Figure 2.8, approximativement générer près 1,6 million d'emplois à l'horizon 2025 [FBEI, 2010] et 2,4 millions à l'horizon 2030 [FBEI, 2013].

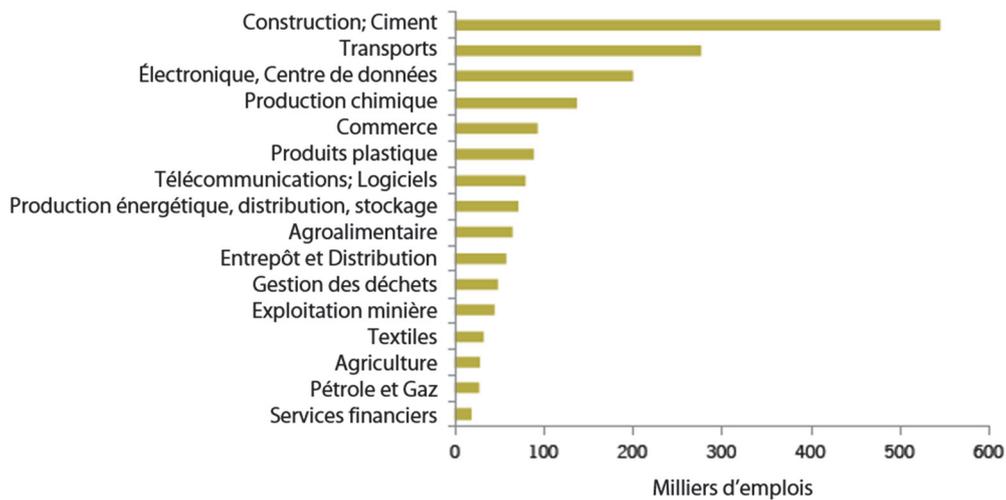


Figure 2.8 - Prospective de l'impact des innovations bio-inspirées sur l'employabilité en 2030, traduit de [Smith, 2015]

L'extrapolation de ces études prospectivistes à l'échelle américaine a permis au FBEI de formaliser des premières projections quant à l'impact de la bio-inspiration sur l'économie mondiale. La bio-inspiration devrait y générer environ 1 000 milliards de dollars, soit 1% du PIB mondial, à l'horizon 2025 [FBEI, 2010] et 1 600 milliards de dollars, soit 1.1% du PIB mondial, à l'horizon 2030 [FBEI, 2013]. Cette part plus réduite du pourcentage de la bio-

inspiration du PIB mondial, en comparaison avec celui des États-Unis (respectivement 1.43% et 1.7% pour 2025 et 2030), est expliquée par la prise en considération du postulat selon lequel la bio-inspiration devrait avoir un taux de pénétration plus faible au sein des économies ayant une maturité technologique plus faible [FBEI, 2013].

L'impact de la bio-inspiration sur l'économie globale ne se limite cependant pas à la « simple » création de valeur. En s'appuyant sur les estimations de la banque mondiale, le FBEI projette que l'épuisement des ressources et la pollution devraient représenter environ 3.8% ou 5 500 milliards de dollars du PIB mondial en 2030. La bio-inspiration, aidée par son intérêt formulé par la Chine, devrait permettre une réduction potentielle de 9% ou 500 milliards de dollars des coûts envisagés [FBEI, 2013].

Brevets

La bio-inspiration a pour vocation d'aboutir à des innovations. En ce sens, pour en mesurer l'impact, il est nécessaire de quantifier la capacité des solutions générées à produire des revenus technologiques pour l'industrie. Un indicateur pour obtenir ce type de mesure est l'activité en matière de brevets. Les brevets sécurisent un droit légal d'exploitation, requérant cependant pour cela un effort financier considérable. Cet investissement démontre la confiance qu'a un déposant en son invention à recouvrer, *a minima*, les sommes versées lors du processus de mise sur le marché [Bonser et Vincent, 2007].

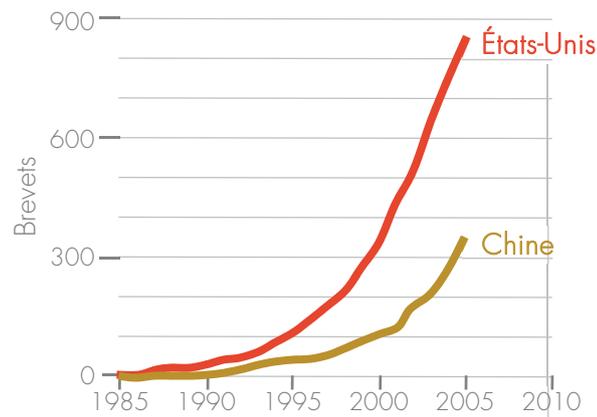


Figure 2.9 - Croissance des brevets déposés en Chine et aux US [Bonser et Vincent, 2007]

Le dépôt de brevets suit la tendance perçue dans l'analyse de la production scientifique, elle s'inscrit dans un dynamisme certain, présentant un rythme de croissance exponentiel, que ce soit sur le marché chinois ou américain [Bonser et Vincent, 2007]. Ces chiffres laissent présupposer d'une bonne capacité de la bio-inspiration à diffuser dans le domaine industriel.

Produits

Si le dynamisme de la brevetabilité est un index pertinent, il se doit d'être vérifié par un audit concret du nombre de produits mis sur le marché. Pendant plusieurs décennies, la bio-inspiration n'a été représentée que par un unique produit, le Velcro®. Cette véritable *success-story*, sécurisée par non moins de mille sept cents brevets, a rapporté annuellement à son fabricant environ cent millions de dollars [Bonser, 2005].

De nombreux exemples illustrent la capacité de la bio-inspiration à mettre en application des principes biologiques dans des disciplines diverses, telle que l'aéronautique, l'ingénierie de surface, l'architecture ou la conception en général, afin de générer des solutions innovantes [Bar-Cohen, 2006, Vincent et al., 2006].

Malgré cette constatation, un très faible nombre de produits biomimétiques (i.e. répondant aux critères d'éligibilités tels que cités dans la norme ISO 18458 (i.e. Analyse, Abstraction, Transfert et Application) [ISO/TC266, 2015b]) semblent à ce jour commercialisés. Dans son effort de recensement, Jacobs et al. [2014] dénombrent sur un ensemble de 303 études de cas biomimétiques (pour 379 cas d'études prétendument biomimétiques) seuls 28% d'entre eux sont à ce jour mis en vente, 60% sont en cours de développement, 8% n'en sont qu'au stade de concept et 2% ont subi un arrêt de commercialisation.

Le rapport de l'institut Terrapin [Smith, 2015] analysant cent exemples biomimétiques selon les grands défis du XXI^e siècle (i.e. carbone, eau, matériau, conversion énergétique, optique, thermorégulation, dynamique des fluides, systèmes d'information et systémique) tire le même constat : si la preuve de concept de la bio-inspiration existe, son potentiel reste relativement inexploré, ses pratiques n'ayant que peu diffusé dans le domaine industriel.

2.2.4.4 Conclusion sur l'évolution de la biomimétique

Toujours dans son étude de 2011 le Fermanian Business & Economic Institute introduit une proposition de regard transversal par l'intermédiaire d'un index « Da Vinci » qui vise à mesurer l'activité de recherche et d'innovation dans le domaine de la bio-inspiration [FBEI, 2011]. L'évolution au cours des dernières années de cet index, constitué à hauteur de 30 % du nombre de publications (source: Thomson Reuters Web of Knowledge Database), de 30 % du nombre de brevets (source: United States Patent & Trademark Office), de 15 % du nombre de bourses de recherche attribuées (Source: National Science Foundation and National Institute of Health) et de 25 % du montant des bourses de recherche attribuées (source: National Science Foundation and National Institute of Health) est présenté en Figure 2.10.

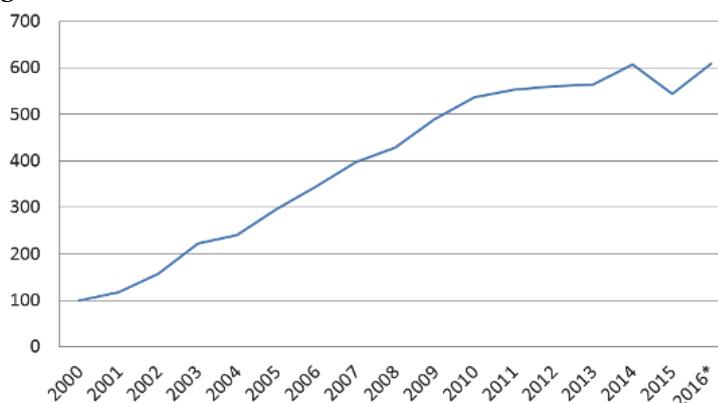


Figure 2.10 - Index global Da Vinci de 2016 [FBEI, 2013]

Comme mis en avant par le FBEL, les activités liées à la bio-inspiration ont subi au cours de ces dix dernières années une multiplication de facteur 7. Si l'index n'est pas parfait, car il n'est pas en mesure d'exclure le « bruit » (similaire à l'écoblanchiment qu'a expérimenté l'écoconception [Delmas et Burbano, 2011]) relatif au gain de popularité de la thématique, il présente cependant de façon immédiate les tendances suivies par la bio-inspiration. Reste néanmoins que l'index ne considère pas la commercialisation de produits bio-inspirés. Son intégration aurait ainsi, dû au faible nombre de produits commercialisés, impacté l'essor perçu de la bio-inspiration moderne.

2.2.5 Comprendre la biomimétique à travers ses réussites

La technologie n'a jamais été aussi présente dans nos vies, et avec elle, une fuite en avant de challenges toujours plus nombreux et toujours plus complexes à résoudre.

Les définitions des concepts liés à la bio-inspiration, mais aussi de leurs sous-éléments relatifs, ayant été clarifiés, il est dès lors intéressant de passer en revue certains des exemples parmi les plus cités dans la littérature de la bio-inspiration pour essayer de comprendre, du point de vue méthodologique, la portée pratique de ce qu'est la biomimétique. Ces cas d'études emblématiques de la biomimétique ont été catégorisés selon leurs niveaux d'inspiration : structure, processus (e.g. soie d'araignée synthétique, revêtements à « effet lotus ») et modèle d'organisation (zone libellule Suez Environnement).

2.2.5.1 Inspiration de forme : Shinkansen

La série 500 du *Shinkansen*, aussi appelée « *bullet train* » japonais était à sa sortie le train le plus rapide au monde avec ses 300 km/h de vitesse de croisière en zone urbaine. Des changements soudains de pression d'air, combinés à cette vitesse élevée entraînaient une déflagration chaque fois que le train émergeait d'un tunnel. Ce bruit, compte tenu de la proximité des voies de chemin de fer de zones d'habitation, était une problématique majeure à résoudre. Eiji Nakatsu, Directeur Essais et Développement Technique chez *JR-West*, a été désigné comme responsable de la résolution du problème [Benyus, 1997]. Féroce ornithologue, il a rapidement puisé son inspiration de la forme longue et tranchante du bec du martin-pêcheur, capable de plonger pour attraper ses proies dans l'eau sans la moindre éclaboussure [Kobayashi, 2005].



Figure 2.11- De l'inspiration du bec du martin-pêcheur, à son application au Shinkansen.

Martin-pêcheur et *Shinkansen* semblent, à première vue, partager des problématiques très éloignées les unes des autres. À y regarder de plus près, il n'en est rien, toutes deux abordent un changement brusque de densité de milieu. De par sa perte énergétique minimale en passant d'un milieu à faible résistance (i.e. l'air), à un milieu à résistance élevée (i.e. l'eau), le Martin-pêcheur présente des caractéristiques uniques au monde. La modélisation informatique sur laquelle s'est basée la conception du nez du train a révélé que l'agencement des formes du bec du Martin-pêcheur constituait un idéal [Kobayashi, 2005], poussant les ingénieurs de la *JR-West* à étendre leur inspiration jusqu'à positionner les phares en lieu et place des narines de l'oiseau.

Si la forme allongée de l'avant du train reste son innovation la plus emblématique, elle n'en demeure pas moins uniquement l'une des trois innovations inspirées de la nature qui ont pris place dans le développement de cette série 500 du *Shinkansen*.

De la connaissance selon laquelle les strigidés sont les prédateurs volant les plus furtifs du règne animal, c'est plus de quatre années de travail qui auront été nécessaires pour percer le secret de leur plumage, principal responsable de cet avantage. L'ensemble des chouettes ont cette particularité que leurs plumes primaires présentent des protubérances en dents de scie sur leur bord extérieur [Bachmann et Wagner, 2011]. Ces microstructures, appelées dentelures, induisent des microvortices ayant un effet antagoniste aux vortices générés par l'aile lors du vol et à l'origine des perturbations sonores [Choi et al., 2012]. L'application du principe, somme toute simple, aura nécessité un travail de longue haleine avant que ces dentelures, partie intégrante du pantographe (dispositif articulé chargé de transmettre l'énergie des caténaires au matériel roulant), permettent au train de répondre aux normes acoustiques les plus exigeantes [Benyus, 1997]. Cette technologie, appelée « *vortex generator* » s'est répandue et son utilisation va de l'aéronautique, aux casquettes et chaussures des *skaters* professionnels [Hargroves et Smith, 2006].

Afin de majorer l'impact aérodynamique de cette innovation issue de la chouette, la base du pantographe a aussi subi un travail de reconception bio-inspirée. Cette fois-ci l'inspiration a été trouvée du côté des Manchots d'Adélie (*Pygoscelis adeliae*) afin d'optimiser le cadre porteur du pantographe dont la résistance au vent génère un bruit aérodynamique. Les Manchots d'Adélie ont la particularité que leur corps fusiforme et profilé les rend particulièrement adaptés à la nage et la plongée. Une armature porteuse en forme de fuseau, constitue la résultante du travail d'analogie avec le Sphénisciforme.

Tableau 2.2 – Synthèse des innovations biomimétiques du *Shinkansen* série 500

Défi	Inspiration	Application
 <p data-bbox="164 1854 544 1928">Le pantographe vibre et génère du bruit</p>	 <p data-bbox="603 1854 911 1966">Les ailes des strigiformes possèdent des dentelures absorbant les vibrations</p>	



Mauvaise aérodynamique de la base du pantographe



Le corps fusiforme des sphénisciformes réduit les efforts de déplacements sous l'eau



Entraine une déflagration en entrée/sortie de tunnel



La forme du bec du martin pêcheur facilite la pénétration



La combinaison de l'ensemble de ces reconceptions issues d'une démarche de conception bio-inspirée, telle que synthétisée par le Tableau 2.2, a conduit la *West Japan Railway Company* à réduire de 15% la consommation du train, tout en augmentant sa vitesse de fonctionnement de 10% et en respectant les nouvelles normes acoustiques entrées en vigueur.

2.2.5.2 L'adhésif inspiré du gecko

De la soie d'araignée synthétique produite par des organismes génétiquement modifiés [Elices et al., 2011], au film de protection de surface inspirée de la peau de requin [Chung et al., 2007], en passant par les peintures super hydrophobiques reposant sur le principe de l'effet lotus [Koch et Barthlott, 2009], ou encore les surfaces iridescentes sans pigment issu des travaux sur le *Morpho menelaus didius* (papillon morpho) [Silver et al., 2005], les matériaux constituent l'un des sous-ensembles les plus dynamiques de la bio-inspiration. L'attrait pour ce champ d'investigation est tel qu'il possède aujourd'hui plusieurs revues scientifiques à lui être dédié (e.g. *Bioinspired*, *Biomimetic and Nanobiomaterials*, *Biomimetic materials*, *Biointerphases*, *Bioinspired Materials*). L'exemple qui cristallise le plus les travaux de recherche quant aux matériaux inspirés du vivant est probablement celui de l'adhésif inspiré du gecko. Il y a déjà plus de deux millénaires, Aristote s'émerveillait sur les geckos, capables de grimper aux arbres et d'en descendre, même avec la tête en bas. Cette capacité exceptionnelle d'attacher et détacher les structures adhésives de ses pattes en quelques millisecondes, lui permettant de courir sur les surfaces verticales, ou même inversées [Autumn et Gravish, 2008].

Le secret de cette adhésion semble résider dans ces microstructures filamenteuses, appelées setae ou sétules, longues de $110\mu\text{m}$ et présentant un diamètre de $4.2\mu\text{m}$ [Williams et Peterson, 1982]. Chacun de ces poils produit une force minime ($\approx 10-7\text{N}$) par un mécanisme de liaison de Van der Waals, forces responsables de l'attraction entre molécules, et d'interactions capillaires. C'est la multiplication de ces structures (près de cinq cent mille, à raison de cinq mille sétules au mm^2 [Autumn, 2006]) qui permet au gecko de présenter cette adhésion hors du commun ($\approx 10\text{ N cm}^2$). Le gecko va même plus loin en optimisant sa surface de contact : chaque setae se scinde en une centaine de poils de $0.2\mu\text{m}$ de longueur et de largeur, appelés *spatulae* (dû à la forme de leur terminaison en spatule) [Williams et Peterson, 1982]. C'est l'imbrication judicieuse de l'ensemble de ces composés hiérarchiques [Autumn et Gravish, 2008], qui attribue au gecko ses particularités d'adhésion (et notamment sa capacité à se déplacer à la surface d'un plafond de verre).

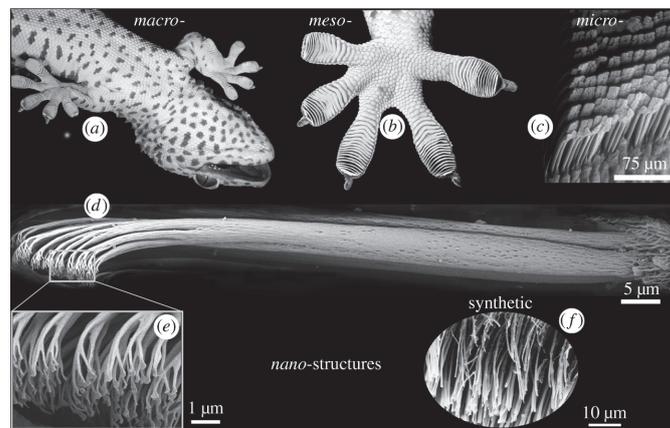


Figure 2.12 - Hiérarchie structurelle du système d'adhésion du gecko. Image de Mark Moffett [Autumn et Gravish, 2008].

La fascination pour le mécanisme d'adhésion du gecko a perduré à travers les âges, jusqu'à la première setae synthétique avec la propriété d'être détachable [Autumn et al., 2000]. Ces travaux portent avec eux les spéculations quant aux technologies qui pourraient être synthétisées, ouvrant la porte d'un nouveau champ de recherche, celui des adhésifs secs réversibles [Sitti et Fearing, 2003]. Les adhésifs inspirés du gecko ont de nombreuses applications potentielles : fixation temporaire dans l'industrie de la construction, marquage temporaire, optimisation des surfaces des équipements sportifs, matériaux et dispositifs biomédicaux, sont parmi tant d'exemples qui vont des milieux subaquatiques aux environnements spatiaux [Boesel et al., 2010].

C'est en 2003 que Geim et son équipe de chercheurs britanniques de Manchester présentent un ruban composé de filaments en polyimide reproduisant les liaisons de Van der Waals des setae du gecko [Geim et al., 2003].



Figure 2.13 - Illustration de l'application du premier l'adhésif inspiré du gecko [Geim et al., 2003]

La contrepartie de ces filaments de polyimide, dans le cadre de ce premier ruban adhésif inspiré du gecko, est leur faible résistance couplée à un fort coefficient d'adhérence. À l'utilisation, l'énergie nécessaire au décollage de l'adhésif entraîne son déchirement, lui conférant une espérance de vie, en cycle collage-décollage, très limité.

L'avancée des biologistes quant à l'étude du fonctionnement des sétules a permis de mettre en lumière deux facteurs impactant le mécanisme d'attachement-détachement des setae du gecko. À un niveau microscopique, les sétules se détachent quand leur axe atteint un angle critique ; au niveau macroscopique, les geckos mettent leurs orteils en hyper extension, lors d'un mouvement ressemblant au décollement d'un ruban adhésif, permettant d'atteindre cet angle critique séquentiellement pour chaque setae [Autumn et al., 2006].

Face à la complexité de ce mécanisme, l'équipe de Ronald Fearing de Berkley a substitué le polyimide par du polypropylène [Lee et al., 2008]. Plus souple de nature, le matériau reproduit en partie le comportement constaté lors de la désadhésion des sétules. La réduction d'énergie nécessaire à l'arrachement de l'adhésif qui en découle permet la découverte d'une nouvelle déconvenue : après un certain nombre de cycles collage-décollage, le ruban s'encrasse et perd inexorablement son pouvoir d'adhésion.

Une nouvelle fois, l'investigation poussée de l'organisme vivant a permis de percer certains de ses secrets. Pour maintenir son pouvoir d'adhésion, il est nécessaire que la patte du gecko demeure propre en toute circonstance. La propriété autonettoyante de ses spatulae est l'une des caractéristiques uniques du gecko, le différenciant de tous les autres animaux grimpants. Alors que les scarabées (*Scarabaeoidea*) et les diptères (*Diptera*) doivent se frotter les pattes, que les fourmis (*Formicidae*), criquets (*Caelifera*) et rainettes (*Hylidae*) sécrètent des fluides pour éliminer les particules adhérentes [Bhushan et Sayer, 2007], le mécanisme d'autonettoyage de la patte du gecko se produit par un déséquilibre énergétique entre les forces d'adhésion attirant une particule de poussière au support et celles attirant la même particule à une ou plusieurs spatulae [Hansen et Autumn, 2005]. Ceci constitue une résultante directe de la faible énergie de surface des spatulae du gecko, qui explique aussi la

propriété empêchant l'autoadhésion des pattes des geckos. Les particules de poussière se détachent des spatulae des geckos en conservant leur adhésion aux surfaces alors que le gecko poursuit son mouvement [Hansen et Autumn, 2005]. Au cours de la dernière année, le concept d'autonettoyage a aussi été appliqué aux structures fibrillaires synthétiques. Cependant, la plupart des approches existantes reposent sur un procédé de traitement humide, jouant sur l'hydrophobicité des surfaces, les rapprochant ainsi plutôt de l'effet Lotus. À ce jour, la propriété autonettoyante n'a pas été émulée en structures synthétiques tout en présentant des caractéristiques similaires à celle de l'organisme vivant [Boesel et al., 2010], empêchant la synthèse d'adhésifs inspirés du gecko suffisamment abouti pour des applications industrielles.

L'angle de rupture des liaisons de Van der Waals et sa propriété autonettoyante ne sont pas les seules fonctionnalités liées aux pattes du gecko. Les recherches en biologie présentent une liste plus étendue que ce qui pouvait être initialement envisagé : le mécanisme d'adhésion est directionnel, ne requiert qu'une précharge minimale, se détache rapidement et facilement, adhère à pratiquement tous les matériaux, s'autonettoie, n'entraîne pas d'autoadhésion et ne colle pas par défaut [Autumn, 2006]. Les principes physico-chimiques en lien avec leurs caractéristiques sont présentés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 - Propriétés, principes et paramètres du système d'adhésion du gecko [Autumn, 2006].

Propriétés	Principes	Paramètres
Attachement anisotrope	Assemblage en porte-à-faux ;	Longueur, rayon, densité de la longueur de l'axe
μ' élevée		Angle de l'axe
Faible force de décollement	Faible rigidité effective.	Faiblesse modulaire de l'axe
Matériau à adhésivité indépendante	Liaisons de Van der Waals ;	Taille des spatules
	Liaisons de type JKR (Johnson, Kendall, Roberts) ;	Forme des spatules
	Nanoréseau.	Densité des spatules
Capacité autonettoyante	Nanoréseau ;	Module de compression des spatules
Anti-autoadhésion	Faible surface de contact ; Spatule non collante ; Hydrophobicité ;	Forme et taille des particules, énergie de surface
Non-collant par défaut	Force de Van der Waals.	Forme et taille des spatules, énergie de surface

La complexité engendrée par l'aspect multifonctionnel du mécanisme du gecko requiert, pour la conception et la fabrication de son alternative synthétique, une approche pluridisciplinaire pour en aborder simultanément ses composantes microélectroniques et micromécaniques. À ce jour, la technologie n'a été en mesure d'aboutir au niveau de

performance atteint par le gecko (i.e adhésion réversible, robustesse et durabilité de la surface, propriétés autonettoyantes) [Boesel et al., 2010].

Il est attendu que la stratégie quant au développement de surfaces d'adhésions artificielles s'adapte et se reformule au gré des découvertes sur le mécanisme d'adhésion du gecko. Les prérequis pour leur transposition en produit restent cependant liés à des propriétés jusqu'à aujourd'hui inexplorées : Comment les surfaces du gecko se comportent-elles lors d'engagement-désengagement répétés ? Comment répondent-elles aux changements de température et d'humidité ? Qu'elle est leur fiabilité à long terme dans des environnements spécifiques ? Et peut-être le plus important, sera-t-on jamais en mesure d'en fabriquer dans des dimensions industrielles à bas-coûts ?

Une fois l'ensemble de ces questionnements adressé, le challenge sera la création d'une surface adhésive stimuli sensible. Alors que l'adhésion « à la demande » a été démontrée pour les adhésifs chimiques conventionnels, la réversibilité moléculaire, telle qu'elle pourrait être rendue possible par des fibrilles à changement d'orientation, n'en est toujours qu'au stage exploratoire [Gillies et al., 2013]. Serons-nous capables de manière répétée de créer des liaisons de Van der Waals entre deux surfaces et de les désactiver ? De telles surfaces peuvent-elles être faites de matériau suffisamment robuste et fiable ? La recherche fondamentale pointe dans cette direction, mais le développement technologique est nécessaire pour démontrer que l'effet d'adhésion tel qu'existant sur les pattes du gecko peut être imité, voir surpassé [Boesel et al., 2010].

2.2.5.3 L'Eastgate Centre (Harare, Zimbabwe)

Bâti en 1996, l'Eastgate Centre d'Harare (Zimbabwe) a été conçu après l'étude pendant plusieurs années des termitières, par son architecte, Mick Pearce. Si la présence de termitières est constatée sous de nombreux climats tropicaux, variant aussi dans leur fonctionnement (e.g. *compass mound* en Australie, *chimney mound* en Éthiopie), Mick Pearce s'est exclusivement concentré sur une espèce présente spécifiquement et uniquement au Zimbabwe : *Odontotermes transvaalensis*.

Le rôle des termitières peut être synthétisé en 3 fonctions principales [Cruz, 2015] :

- La protection de la colonie des éventuels prédateurs et de la lumière du jour.
- Le stockage et élevage du champignon, nourriture de la colonie.
- L'élevage des larves.

Les termitières ont la capacité exceptionnelle de maintenir une température presque constante sur un cycle journalier, malgré une très forte amplitude thermique diurne (oscillant selon des saisons de 15°C à 31°C, avec des températures extérieures oscillant entre 3°C et 42°C). Ces insectes réalisent cette prouesse de façon passive grâce à la capacité thermique du bâtiment (la terre emmagasine l'énergie la journée pour la restituer pendant la nuit), accentuer par un mécanisme de gestion des flux d'air. La thermorégulation passive des termitières a constitué la fonction cible de l'architecte [Turner et Soar, 2008].

- Flux d'air

Les activités liées au fonctionnement de la colonie induisent le besoin du renouvellement de l'air (i.e. rejet du CO_2 et approvisionnement en O_2). C'est pour que ces échanges gazeux puissent avoir lieu que l'édifice des *Odontotermes transvaalensis* présente une cheminée.

Durant l'été, air ambiant et sol présentent une température relativement proche. Dans ce contexte, l'air frais s'engouffre par la partie basse de la termitière. Cet apport d'air est opéré via des canaux de ventilation dont les dimensions changent au gré des besoins. Chauffé par les activités de la colonie, l'air chargé de CO_2 remonte dû au mouvement de convection, happé par la présence de la cheminée [Turner et Soar, 2008]. Au cœur de l'hiver, le mécanisme s'inverse, l'amplitude thermique sol-air est suffisante pour générer la convection, la cheminée n'est plus requise (expliquant les variations de dimensions été/hiver de ces structures)[Turner et Soar, 2008].

- Hygrométrie

La fonction relative à la culture des champignons nécessite, du point de vue physiologique, un maintien du taux d'humidité.

Durant l'été, saison humide, les pluies impactent positivement le niveau des nappes phréatiques. L'eau excédante présente dans le puits central de la termitière est évacuée par évaporation, régulant ainsi l'hygrométrie au sein de la structure [Turner et Soar, 2008]. Pendant l'hiver, saison sèche, les chambres d'élevage des champignons sont raccordées à la nappe phréatique via des conduits qu'elles ajustent continuellement [Cruz, 2015].

La structure biogénique de ces termites repose donc sur un partenariat symbiotique. La capacité thermique du matériau couplée à la gestion du flux d'air par la régulation de l'hygrométrie rendent possible la thermorégulation passive, en équilibre dynamique avec les variations climatiques extérieures, tel qu'illustré par la Figure 2.14

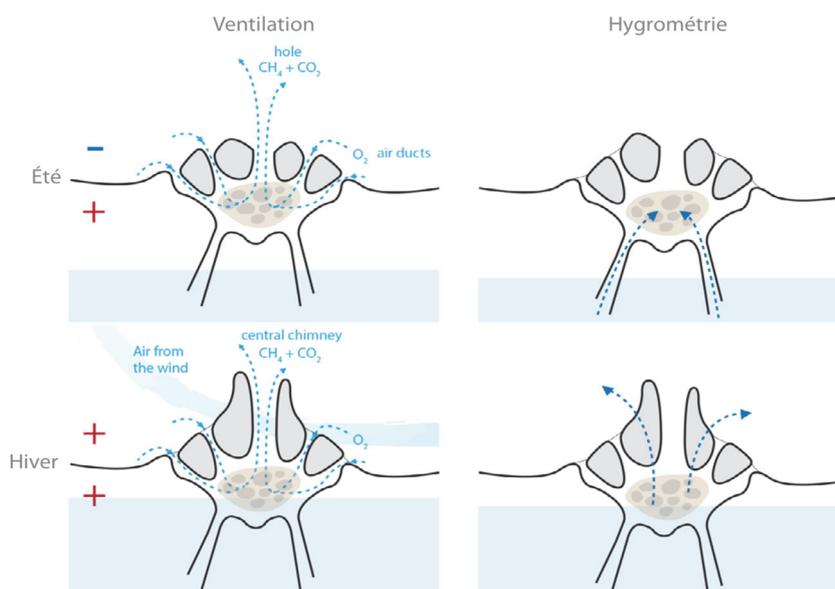


Figure 2.14 - Schéma du fonctionnement d'une termitière (avec cheminée) [Cruz, 2015]

Fort de la compréhension de ce principe de fonctionnement, Mick Pearce et son équipe se sont efforcés de l'appliquer à un bâtiment d'une envergure tout autre, un

immeuble de 55 000m² (dont 600 m² de commerces, 26,000 m² de bureau et un parking de 450 places).

Les matériaux principaux dans la construction du bâtiment sont la brique et le granite. En période estivale, la chaleur est par inertie thermique pendant la journée, puis reléguée durant la nuit, l'excès de chaleur étant évacué par le système de ventilation (régénérant l'air 2 fois par jour et 10 fois par nuit) [Cruz, 2015]. La structure du bâtiment fait donc office à la fois de chauffage et de climatisation. En période hivernale, le système n'est pas suffisamment performant, un chauffage d'appoint est donc ajouté aux bureaux [Cruz, 2015].

La dimension du bâtiment et sa situation engoncée (réduisant l'apport en air) n'ont pas permis d'émuler le système de ventilation de la termitière. L'ajout d'un système mécanique à hélice, à la base du bâtiment afin d'amorcer le flux d'air, a été nécessaire pour que la thermorégulation soit effective [Turner et Soar, 2008]. Une fois le flux initié, l'air se réchauffe au contact de l'activité humaine et est évacué par convection et effet cheminée comme c'est le cas pour la termitière.

Le schéma de fonctionnement de l'Eastgate Centre est présenté en Figure 2.15.

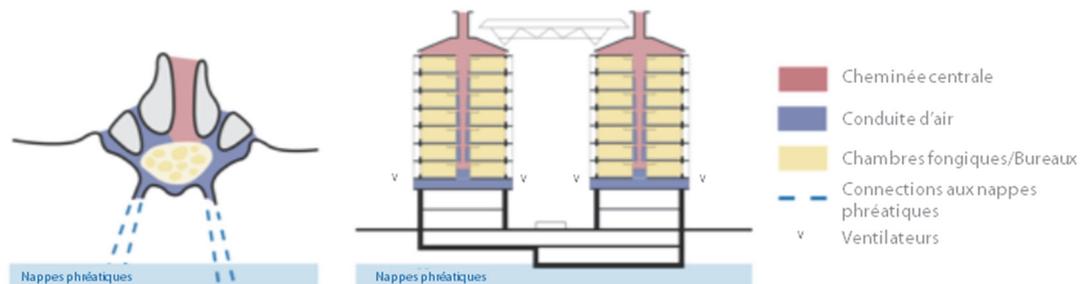


Figure 2.15 - Schéma de fonctionnement de l'Eastgate Centre (Harare) [Cruz, 2015]

La température interne de l'édifice ne pouvant être maintenue constante, le système de ventilation passif de l'Eastgate Centre d'Harare ne fut pas un succès. L'installation de ventilateurs basse vitesse à la base a cependant permis la conception d'un immeuble présentant une consommation énergétique sans précédent : 20 % de celle des immeubles de taille similaire dans le voisinage [Turner et Soar, 2008].

L'immeuble ne pouvant pas réguler sa température de façon passive le projet peut être assimilé à un échec sur le plan théorique. Il est à noter que lors de l'élaboration du bâtiment, Mick Pearce n'a pu s'appuyer sur des études scientifiques préexistantes, son analyse des termites le conduira à penser que la termitière type « open chimney » permettait la régulation de la température intérieure et non le taux d'hygrométrie [Cruz, 2015].

Du point de vue pratique, le projet constitue cependant une réussite : l'Eastgate Centre est un exemple de bâtiment à faible consommation énergétique, les propriétaires de l'immeuble ont économisé 3,5 millions de dollars par le simple fait de ne pas avoir installé de système de climatisation conventionnelle et les habitants louent en moyenne 20 % moins cher leur logement que les habitants des immeubles voisins [Turner et Soar, 2008].

2.2.5.4 Conclusion sur les réalisations bio-inspirées

Un certain nombre de conclusions peuvent être formalisées à partir des cas d'études présentés.

Le *Shinkansen 500* met en exergue une certaine facilité de la mise en œuvre de la démarche dès lors que le modèle biologique identifié est issu du domaine de connaissances interne au praticien (i.e. bonne interaction entre biologie et ingénierie), phénomène ici tendu à l'extrême en la personne d'Eiji Nakatsu.

Le gecko démontre le caractère itératif d'une démarche limitée par la compréhension d'un organisme biologique. Cette compréhension est souvent rendue complexe, comme ici, par l'aspect multifonctionnel des caractères que la technique cherche à émuler. La prise en compte de l'environnement apparaît primordiale dans la poursuite d'un succès commercial.

L'*Eastgate Centre* met en avant un élément important, au sein de la biomimétique, un échec théorique (ici dû à une étape de transfert complexe) peut néanmoins mener à un succès industriel.

La biomimétique, comme il l'a été souligné par les nouvelles définitions proposées (voir section 2.2.3), n'est cependant pas synonyme de durabilité. Les revêtements super hydrophobes inspirés du lotus sont, par exemple, toujours produits à renfort de dérivés du pétrole. La biomimétique peut même se montrer anti-durable, comme c'est le cas dans la synthèse de fibres de soie d'araignée qui fait appel à des mammifères transgéniques.

Enfin, certaines innovations présentées comme biomimétiques ne le sont pas, sans que cela remette en cause leur pertinence ou leur efficacité. C'est le cas de certains produits cosmétiques biomimétiques (e.g gamme Soins Biomimétiques de la marque État Pur) qui ne font pas état d'une étape de transfert (i.e. la peau humaine fait office à la fois de système d'inspiration et de contexte applicatif).

En définitive, il semble possible, à la vue des exemples précités, d'affirmer que la méthodologie est ce qui différencie le produit biomimétique de l'accident bio-inspiré.

2.2.6 Conclusion la bio-inspiration

À défaut d'être une démarche récente, la bio-inspiration constitue un domaine de recherche récent. Sa mise en lumière récente a généré un foisonnement d'appropriations aboutissant en un flou sémantique. Au cours de cet état de l'art sur le sujet, les sous-concepts relatifs à la bio-inspiration (i.e. bionique, biomimétique et biomimétisme) ont été explicités et positionnés les uns par rapport aux autres. Cette même bio-inspiration a aussi su tirer profit de l'intérêt qui lui est accordé depuis le début de ce XXI^e siècle, elle jouit aujourd'hui de structures et de moyens financiers mis à disposition par les gouvernements, de prévisions économiques optimistes, et d'intérêts en constante croissance des communautés scientifiques. Tous ces éléments sont autant de vecteurs favorisant la croissance du domaine.

La bio-inspiration présente néanmoins des difficultés à percer le monde des entreprises. Le nombre de produits développés comparé aux moyens existant, s'il n'est pas anecdotique, demeure faible. Ce faible taux de conversion pourrait être justifié par la latence nécessaire à l'émergence de ce type de produit (i.e. l'approche de la conception bio-inspirée

s'avère complexe et nécessite du temps). Jacobs et al. [2014] identifient comme premier frein à l'obtention de produits biomimétiques le manque méthodologique lié au « know-how », menant à un positionnement non optimal de la bio-inspiration dans l'industrie. Dans le souci de favoriser l'émergence d'innovation bio-inspirées, les présents travaux aborderont ainsi préférentiellement le pendant méthodologique de la bio-inspiration, intitulé « biomimétique ». Afin de le rendre tangible, une analyse de l'ingénierie de la conception et des sciences du vivant, ses deux piliers constitutifs, sera réalisée, en vue d'offrir un aperçu de comment leurs concepts, approches théoriques et processus alimentent la biomimétique.

2.3 INGÉNIERIE DE LA CONCEPTION

La présentation de la bio-inspiration, effectuée en section 2.2, met en avant le besoin de structuration de la biomimétique. Il semble intéressant, face à ce constat, d'effectuer une prise de recul sur le sujet en abordant son sursensemble, l'ingénierie de conception. C'est à travers cette exploration qu'il devrait être possible de déceler comment la conception pourrait être à même de répondre, même partiellement, à ce constat formulé.

Cette section, telle qu'illustrée par la Figure 2.16, explicite le positionnement relatif de la biomimétique et de l'ingénierie de la conception (point 2.3.1 - Concept), détaille les grandes théories composant le domaine (point 2.3.2 – Approches théoriques) et explore les processus mis en œuvre dans le cadre d'implémentation de démarche de conception (point 2.3.3 – Processus), en vue de mettre en exergue les contributions de l'ingénierie à la conception bio-inspirée, que ces dernières soient directes ou latentes.

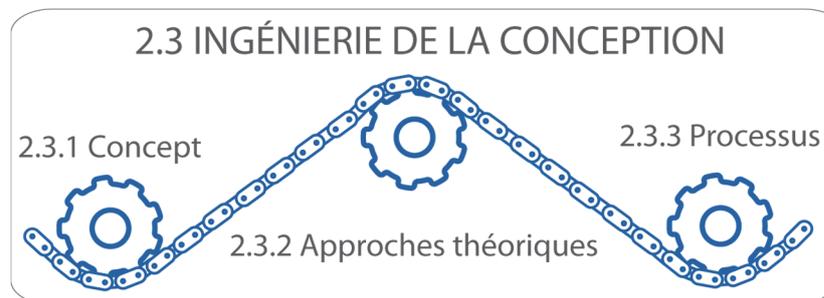


Figure 2.16 – Structure de la section relative à l'ingénierie de la conception

Structurée de cette manière, cette présentation de l'ingénierie de la conception se veut être une entrée en matière quant à ce que l'ingénierie est à même d'apporter à la bio-inspiration, notamment pour les personnes attirées par ce type d'approche et dont les connaissances en conception sont limitées.

2.3.1 Concept de l'ingénierie de la conception

L'objectif des démarches bio-inspirées étant l'obtention d'un nouveau produit, service ou procédé, elles sont intimement liées aux démarches d'ingénierie de la conception. À ce titre, cette section 2.3.1 s'efforce de présenter l'approche scientifique qui existe de façon inhérente à la mise en place d'une démarche de conception ; l'objectif premier de cette section étant de délimiter le cadre relatif à ce champ notionnel au sein duquel est contenue la bio-inspiration.

L'historique brossé au sein de cette section s'efforce de tendre vers un aperçu synthétique permettant la mise en perspective avec la conception bio-inspirée afin d'entrevoir les prémices d'interfaces communes aux deux champs disciplinaires considérés. Après une brève réflexion quant à la nature scientifique de l'ingénierie de la conception et des activités qu'elle met en œuvre, la conception et ses récents développements seront explicités selon l'angle conceptuel.

2.3.1.1 Historique de l'ingénierie de la conception

Si l'outil, une entité façonnée par son dessein, n'est pas le propre de l'homme, il en marque néanmoins les débuts de la conception au sens large. L'ingénierie de la conception, dans son interprétation contemporaine, n'a posé ses fondations qu'au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Malgré ce passif récent, elle a, de décennie en décennie, mué jusqu'à devenir le concept que nous connaissons aujourd'hui. Un historique de l'ingénierie de la conception est ici présenté. Cet historique ambitionne d'offrir un aperçu de l'évolution de la conception, pour, qu'à travers sa mise en perspective avec la biomimétique, il soit possible d'anticiper les futures transformations de cette dernière.

Années 60

Le premier élément de genèse de la conception moderne est l'organisation de la "*Conference on Design Methodology*" de Londres en 1962 [Jones et Thornley, 1963]. Cet évènement pionnier engendrera une seconde itération à Birmingham en 1965, servant de base, en 1966, à la constitution de la *Design Research Society* [Archer, 1999]. Cette organisation, au demeurant toujours active, n'aura dès lors de cesse que de promouvoir « *l'étude et la recherche du processus de la conception dans l'ensemble de ses champs afférents* », précepte que cette société savante interdisciplinaire dispense à travers un ensemble de conférences et la publication quaternaire de bulletin d'information.

Au travers de cette mise en commun des travaux et réflexions, cette même époque voit, selon Cross[1993], l'émergence de techniques de créativité:

- Gordon [1961] propose une approche rationnelle de la créativité et de la résolution de problème. Cette approche appelée *Synectics* repose sur trois hypothèses de départ : le processus créatif peut être formalisé et enseigné ; les processus inventifs artistiques et scientifiques sont analogues et suivent un processus cognitif similaire ; la créativité individuelle et de groupe sont analogues.
- Hall [1962] présente une méthode d'optimisation de conception d'ingénierie système.
- Asimow [1962] développe un ensemble de critères d'aide à la conception.
- Alexander achève la première thèse sur le thème des méthodes de conception, intitulée "*Notes on the Synthesis of Form*" [Alexander, 1964]. L'approche décrite dans ses travaux vise à segmenter les problèmes de conception en schèmes (*patterns*) grâce à l'application de la théorie de l'information. Les interactions entre chaque schème sont formalisées par l'intermédiaire d'une représentation visuelle afin d'opérer une résolution par sous-groupe.

- Archer, alors directeur du *Design Research Unit in the Royal College of Art* publie son livre intitulé *"Systematic Methods for Designers"* [Archer, 1964]. L'ouvrage y dispense des directives quant à la génération de connaissances en vue de la conception de systèmes. Ses travaux s'articulent autour de l'analyse de chemin critique, un modèle de recherche opérationnelle et l'introduction d'exemples issus de la recherche en conception.
- Jones formalise l'un des premiers modèles de conception [Jones, 1963].

Les outils et méthodes présentés sont destinés à promouvoir la créativité et s'organisent selon des modèles de conceptions. Ces premiers modèles de conception sont linéaires [Wynn et Clarkson, 2005] et adoptent une approche commune basée sur la séquence Analyse-Synthèse-Evaluation, telle que formalisée par Jones [1963].

Années 70

Les années 70 sont le théâtre d'une remise en cause, par leurs pères fondateurs, des travaux et modèles établis au cours de la décennie précédente. Christopher Alexander [1971] réfute l'intérêt de l'aspect méthodologique et encourage chacun à oublier l'approche en elle-même [Chamberlain et al., 2007]. Christopher Jones refuse le poste de Professeur en Conception que lui offre l'*Open University* [Bayazit, 2004] et néglige lui aussi l'intérêt des méthodes de conception dans la première édition du journal *"Design Methods and Theories Journal"* [Jones, 1977] désapprouvant le langage machine, le comportementalisme et l'effort constant de n'entrevoir les choses que sous l'angle d'un référentiel logique [Cross, 1993].

Par le désaveu des pionniers du domaine, c'est l'intégralité de la conception en tant que concept scientifique qui est questionnée.

Face à ces critiques, une seconde génération de chercheurs prend le pas et s'approprie la thématique. Les méthodes issues de la première génération avaient pour caractéristiques d'être simplistes, immatures et incapable de répondre aux exigences complexes des problèmes réels et se focalisaient sur une utilisation par des scientifiques et des concepteurs [Cross, 1993]. Bien que critiquables, ces méthodes ont néanmoins constitué le socle de réflexions des travaux de seconde génération.

Les modèles linéaires des années 60 sont ainsi mis à mal, complexifiés, rendus plus flexibles à l'usage et capables d'intégrer des scénarios d'échec [Bayazit, 2004].

L'une des tendances partagées par les travaux générés au cours de cette décennie est qu'ils ne se concentrent non plus sur l'obtention de solutions optimales, mais sur celle de solutions « appropriées » ou « satisfaisantes » [Simon, 1996].

Influencé par le concept de *"wicked problem"* développé par Churchman [1967] et par le principe du philosophe britannique et épistémologiste évolutionnaire Karl Popper [2005] selon lequel « *les solutions à un problème ne sont uniquement des hypothèses offertes à la réfutation* », Horst Rittel [1972] définit les fondements renouvelés des méthodes de conception : l'identification du problème. L'approche proposée par Rittel et Webber [1973] emphase la nécessité de dépasser l'analyse préliminaire du problème, afin de l'appréhender de manière plus pertinente. Les méthodes argumentaires qui en découlent ont pour particularité première de positionner leurs utilisateurs au centre des décisions de

conceptions et de l'identification de leurs objectifs, initiant le concept de la conception participative [Bayazit, 2004].

Simon poussera l'analyse de recherche quant à l'identification du problème en soulignant la nécessité d'identification du besoin et de la redéfinition du problème, en accordance au dit besoin [Simon, 1973].

Années 80

Dès le début des années 80 l'effervescence de la recherche outre-Rhin (i.e. Hubka (1980) [2015], French (1985) [2013], Pahl & Beitz (1986) [2013], Cross (1989) [2008] donne naissance au « Verein Deutscher Ingenieure » abrégé VDI, association des ingénieurs allemands. Afin d'aborder plus spécifiquement l'ingénierie de la conception, le Workshop Design Konstruktion (WDK), société savante informelle hébergée par le VDI est fondée par les pionniers des sciences de la conception européenne que sont les Professeurs Vladimir Hubka, Mogens Myrup Andreasen et Umberto Pighini [Eder, 2012]. C'est ce groupe qui initiera le cycle de conférence ICED, première conférence dédiée à l'ingénierie de la conception, qui naîtra à Rome en 1981, sous l'impulsion du Professeur Umberto Pighini. Cette « *International Conference on Engineering Design* » ambitionne de développer les sciences de la conception dans le but d'établir « *The design method* » (singulier), synthétisant les différentes théories en une approche holistique rationnelle et unique [Cross, 1993]. C'est autour de ce même axe de réflexion qu'Altshuller publiera en 1984 « *Creativity As an Exact Science* » [Altshuller, 1988] formalisant la naissance de Théorie de résolution de problème inventif (TRIZ, voir section 2.3.2.12).

Les chercheurs outre-Atlantique ne sont pas en reste. La traduction en anglais des travaux de Pahl et Beitz par Ken Wallace et l'organisation de la 4e conférence biennale ICED à Boston [Braha et al., 2013] permettent de diffuser dès 1987 l'intérêt croissant des chercheurs européens sur le sol américain. C'est finalement en 1988 que la « *National Science Foundation* » sponsorisera la conférence intitulée « *Design Theory'88: Design Theory and Methodology* » [Newsome et al., 2013]. Le titre de l'évènement sera conservé pour devenir la conférence « *DTM (Design Theory and Methodology)* » portée par l'« *American Society of Mechanical Engineers* », finissant de définir les années 80 comme le théâtre de l'émergence des cycles phares des conférences toujours en activité et traitant des méthodologies de conception. Les objectifs de ce cycle de conférence sont détaillés par John Dixon dans les actes de la conférence *Design Theory* de 1989 comme étant « l'établissement de fondements scientifiques d'une théorie, de principes et de connaissances pour l'ingénierie de la conception » [Dixon, 1989].

En parallèle de ces efforts, l'apparition d'un ensemble de journaux délimite ce champ de recherche émergent que constitue l'ingénierie de la conception. *Design Studies* [Gregory, 1979], *Design Issues* [Margolin, 1984], *Research in Engineering Design* [Dixon et Finger, 1989], *Journal of Engineering Design* [Sheldon, 1990] et le *Journal of design management* [1990] sont autant de publications emblématiques et fondatrices à avoir vu le jour entre 1979 et 1990. Ce renouvellement des canaux de communication sur le sujet.

Années 90

Les années 90 s'inscrivent dans un renouveau de l'intérêt pour les méthodologies de la conception, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle, domaine, où les espoirs relatifs à l'automatisation et la conception d'assistance électronique intelligente sont conséquents [Cross, 1993]

Ce sont sur ces nouveaux espoirs que se fonde ce qui s'apparenterait à une troisième génération de méthodologie de conception, élaborée pour intégrer au sein de la conception, l'aspect « communicatif » de la nature d'un problème et de sa solution [Archer, 1999].

En conséquence, et tel qu'illustré par les travaux d'Aoussat [1990], le développement d'un nouveau produit implique dorénavant l'interaction d'un certain nombre de disciplines incluant nécessairement : l'Ergonomie, la Conception, le management de la Qualité, le Marketing et la gestion de la Fiabilité. Cette multiplication des disciplines est à l'origine de l'émergence de deux nouvelles approches de conception, l'ingénierie concourante et l'ingénierie séquentielle. L'ingénierie (ou conception) concourante est une approche systématique ayant pour but de considérer et mener de front l'ensemble des éléments relatifs au cycle de vie d'un produit (de la définition du concept à la fin de vie en incluant la qualité, les coûts, la planification et les besoins utilisateurs) dès les phases amont de la conception [Prasad, 1996], là où l'ingénierie (ou conception) séquentielle vise à sérialiser l'ensemble des tâches [Prasad, 1996] en les divisant et en les attribuant à des individus spécialisés [Midler, 1996]. Ainsi, bien que distincte dans leurs approches, ces deux démarches offrent aux concepteurs une façon de gérer la complexité croissante des processus de conception mis en œuvre.

Années 2000

L'évolution de la conception au cours du 20^e siècle peut être résumée en trois phases se recouvrant partiellement: Expérientielle, Intellectuelle et Expérimentale [Wallace et Blessing, 2000]. Les modèles de conception développés au cours de cette période sont souvent considérés comme préthéoriques, prépragmatiques [Cantamessa, 2001] ou préhypothétiques [Horvath, 2001] et peu d'entre eux s'avèrent avoir été mis en pratique.

À l'orée du 21^e siècle, les travaux et approches antérieurs sont réévalués et de nouvelles théories sont proposées dans un laps de temps relativement court, définissant une 3^e phase d'évolution de la conception, la phase Théorique [Blessing, 2003]. Ces nouvelles théories s'appuient, dans leur développement, sur l'une des percées majeures de ces années 2000, le recoupement de la conception avec d'autres disciplines. Ces nouveaux travaux ont pour ambition de comprendre comment les concepteurs peuvent aller investiguer d'autres domaines (e.g. les sciences sociales) dans le cadre d'un travail productif puis revenir avec des résultats propices à la facilitation de la pratique de la conception [Buchanan, 2001]. Si ce type d'approche semble diamétralement opposé avec ce qui était jusqu'alors développé, c'est que ces démarches sont formulées pour intégrer un niveau de complexité jusqu'ici inabordable, mais nécessaire à la mise en place d'un processus de conception ; la conception concourante se mue en conception collaborative [Kvan, 2000] et la conception séquentielle en gestion du cycle de vie (Product Life Cycle – PLM) [Saaksvuori et Immonen, 2008].

Le plus emblématique des rapprochements disciplinaires est certainement le croisement de la conception et des sciences de la cognition. L'angle cognitif apporte un regard nouveau sur la conception, que cette dernière soit analysée comme un processus opportuniste sur un microniveau (mais néanmoins guide par une logique d'ensemble et un objectif), comme une approche cognitive sur les différents modes de raisonnements, ou comme un questionnement sur les connaissances [Cross, 2001a].

Les années 2000 sont aussi le théâtre de la formalisation du concept d'Innovation Ouverte. La montée en puissance des nouvelles technologies de l'information et de la communication, couplée à une divergence croissante, qu'elle soit de but ou fonctionnelle, entre les départements de recherche et de développement, permet la formalisation du concept d'Innovation Ouverte [Chesbrough, 2006]. Ce nouveau modèle d'innovation intègre une dimension managériale, économique et sociale afin de permettre l'internalisation et/ou l'externalisation de projet(s), produit(s) ou compétence(s) tout au long du processus de conception [Chesbrough, 2006]. Au-delà de formaliser une approche existante de façon diffuse et/ou tacite (e.g partenariats dans l'industrie pharmaceutique) l'Innovation Ouverte cristallise un changement de paradigme où la connaissance et son transfert se positionne au cœur de l'innovation.

Années 2010

Un fait marquant de cette décennie en cours est la mise en opposition des modèles de conception afin d'en analyser forces et faiblesses, mais aussi d'en identifier des points de complémentarité [Chakrabarti et Blessing, 2014b]. Là où Eckert et Stancey [2014], Buchanan [2004] et Hatchuel et al. [2011] y voient une phase transitoire nécessaire à la compréhension et au développement de ces modèles, Galle [2006] et Vermaas [2014] s'inquiètent du risque d'entrave au développement d'une théorie cohérente, notamment face au manque de moyens existants pour tester et réfuter les théories et modèles de conceptions [Vermaas, 2014].

Nombre d'évènements impactant le développement de l'ingénierie de la conception sont à prévoir dans la période nous séparant du début des années 2020, Chakrabarti et Blessing [2016] ont néanmoins esquissé les tendances des théories et modèles de conception qui sont en train de voir le jour :

- Les théories et modèles de conception actuels ont un potentiel de dissémination accru et acquièrent donc rapidement une forte notoriété.
- Les théories et modèles de conception se construisent et évoluent de façon collective (i.e. les uns à partir des autres), en lieu et place d'un développement individuel.
- Les théories et modèles actuels intègrent un plus grand nombre et une plus grande variété de concepts.
- La validation des théories et modèles de concepts utilisant des données empiriques se positionne aujourd'hui, dans un souci de rigueur, au centre des préoccupations.
- Une attention particulière est apportée au lien entre théorie et pratique.

Synthèse quant à l'historique de l'ingénierie de la conception

Au cours de ce bref historique, ne visant nullement à présenter un résumé exhaustif des faits ayant impactés l'ingénierie de la conception, une analyse de l'évolution du domaine par décennie a été proposée. Cette analyse, permettant une compréhension du positionnement actuel des sciences de l'ingénierie, cadre opérationnel de la bio-inspiration, permet de souligner un certain nombre de constats. Premièrement, le domaine possède une antériorité toute relative ; son ère moderne n'émergeant qu'à la moitié du 20^e siècle, bon nombre de sujets d'étude restent à aborder, d'hypothèses à vérifier et de pratiques à définir. Bien que relativement récent, le domaine a subi de nombreuses mutations, notamment sous l'impulsion de la convergence de connaissances provenant de domaines distants ; la bio-inspiration pourrait donc constituer l'une des ramifications de l'évolution de la conception. Enfin, dans nombre des travaux introduits, le concepteur s'avère souvent être le centre de l'attention, empêchant l'émergence de certitudes et réduisant l'obtention de résultats transposables.

La présentation de la conception de l'ingénierie laisse en suspens un sujet central, celui de sa nature profonde, qu'il semble nécessaire d'aborder dans le but d'obtenir une compréhension globale de l'ingénierie de la conception.

2.3.1.2 Épistémologie de la conception

La question de la nature de l'ingénierie de la conception est loin d'être triviale. Dans son rapprochement avec la biologie dans le cadre de la conception bio-inspirée, son caractère scientifique la mettrait sur un pied d'égalité, définissant par la même occasion un sous-domaine possédant une nature scientifique.

L'historique, présenté en section 2.3.1.1, dépeint une ingénierie de la conception moderne empruntant une démarche scientifique, un distinguo doit cependant être fait. Si les méthodes sont indispensables à la pratique de la science, afin d'en valider les résultats, elles ne le sont pas à la pratique de la conception, où il n'est pas systématiquement requis que les résultats soit répétables, ou tout du moins répétés [Cross, 2001b]. La question du lien entre science et conception se pose donc.

La tendance de fond de l'ingénierie de la conception au cours des années 80, et tel qu'illustré par les objectifs mentionnés de la conférence ICED, repose sur son repositionnement vis-à-vis de la Science. Il n'est dès lors plus question de réaliser des comparaisons simplistes et des distinctions entre science et conception ; le postulat énoncé est que la conception n'aurait pas tant à apprendre des sciences que l'inverse [Cross, 1993]. Trois concepts distincts positionnant la conception vis-à-vis de la science en résultent.

Conception Scientifique (« Scientific Design »)

Le développement des méthodes de conception a été opéré en vue de répondre aux problématiques industrielles modernes, devenues trop complexes pour les méthodes intuitives. Leur naissance, voir section 2.3.1.1, puise son inspiration des méthodes scientifiques [Cross, 2001b].

La conception scientifique s'appuie donc sur les connaissances scientifiques, constituant une réflexion, non controversée, de la pratique de la conception moderne en environnement opérationnel [Cross, 2001a].

Science de la conception (« Design Science »)

La conception en tant que science explore le problème de l'identification et la catégorisation de l'ensemble des phénomènes des systèmes à concevoir, ainsi que de leur processus de conception [Hubka et Eder, 1987]; elle aborde aussi ce qui découle de l'application de connaissances issues des sciences naturelles sous une forme pertinente pour être utilisée par un concepteur [Hubka et Eder, 1987].

Cette définition induit l'usage systématique de la connaissance issue du processus et méthodologie de conception aussi bien que la sous-jacence scientifique ou technologique des artefacts de conception [de Vries et al., 2013]. Cross [2001b] définit ainsi que la conception en tant que science fait référence à une approche de la conception explicitement organisée, rationnelle et entièrement systématique; elle n'est donc pas la simple utilisation d'artefacts de connaissance scientifique, mais la conception, dans une certaine mesure, d'une activité scientifique elle-même.

Science sur la conception (« Science of design »)

Si Grant [1979] réfute la vision d'une «conception en tant que science», ne considérant pas l'acte de conception comme une activité scientifique, il considère tout de même que l'étude de la conception peut s'apparenter à une activité scientifique, considérant donc la conception comme sujet d'investigation scientifique.

Gasparski et Strzalecki [1990] définissent la science sur la conception comme une fédération de sous-disciplines partageant la conception comme sujet d'intérêt cognitif.

C'est à partir de cette interprétation que Cross [2001b] identifie la science sur la conception comme l'étude de la conception, proche du concept des méthodologies de conception, résultant en l'étude des principes, des pratiques et des procédures de conception.

Synthèse quant à l'épistémologie de la conception

Quelle que soit la relation entre Science et Conception considérée, si l'on se réfère aux trois concepts présentés ci-dessus, leur intrication demeure constante :

- La conception scientifique est l'utilisation de la démarche scientifique à la conception.
- La science de la conception est l'élaboration d'un champ scientifique dédié à la conception.
- La science sur la conception implique, et aurait même dans certains cas pour but, le développement d'une science de la conception.

Il est dès lors possible de considérer la conception comme une science, ou d'a minima lui accorder une dimension scientifique. C'est cette compréhension, selon l'angle scientifique de la conception, qui sera employée tout au long du présent document.

2.3.1.3 Sémantique et définitions des constituants de l'ingénierie de la conception

En tant que concept scientifique, la conception est ainsi à même de se parer de théories. L'établissement de ces théories de la conception telle que nous la connaissons aujourd'hui a requis temps et efforts. Elle a, tout au long de son demi-siècle d'existence, lentement mué pour devenir capable d'intégrer des éléments de contexte, contraintes, ou encore recommandations prédictives. Les théories, définissant un niveau de généralité chapeau, sont donc en mesure de s'incarner selon différentes modalités. Tomiyama et al. [1999], cf. Tableau 2.4, proposent une classification de ces modalités en fonction de leur degré d'abstraction.

Tableau 2.4 - Classification des théories et méthodologies de conception, adapté de [Tomiyama et al., 2009]

	Général	Individuel
Abstrait	- Théorie de la conception	- Méthode basée sur les mathématiques
Concret	- Méthodologie de conception	
	- Méthodologie pour atteindre des buts concrets	- Méthodes (outils) de conception
	- Processus	

Au cours de cette section, c'est l'intégralité des concepts énoncés (i.e. conception, théorie, méthodologie, modèles, processus et outils) qui seront abordés.

Conception

Avec plus de 50 ans de recherche, la conception a été décrite de nombreuses manières [Dorst et Dijkhuis, 1995]. Loves [2002] met en avant le dénombrement de plus de 400 textes fournissant une définition propre de la conception. Ce foisonnement peut s'expliquer par la complexité à représenter l'objet ou le concept en lui-même.

Étymologiquement, le terme français *conception* est emprunté du latin *conceptio* « action de contenir, refermé » menant à la *conception* désignant la « création de l'esprit ».

Son équivalent anglo-saxon, *design*, est dérivé du préfix *de-* et du verbe latin *signare*, signifiant marquer d'un signe, faire une marque [Baratin et Moussy, 1999]. Dans cette occurrence, le préfixe *de-* ne semble pas marquer l'opposition ou l'inversion, mais l'établissement, la déduction ou l'interférence. Dans ce contexte, le mot *design* marque l'établissement de quelque chose suggérant la présence ou l'existence d'un fait, d'une condition ou d'une qualité [Terzidis, 2007].

Une autre interprétation du terme *design* est liée à l'étymologie grecque du mot. Dans cette langue son équivalent est *σχεῖδιο* (se prononçant *schedio*), dérivant de la racine *σχεδοῦν* (se prononçant *schedon*), signifiant « proche, presque, autour, approximatif » [Terzidis, 2007]. De par cette racine grecque, le *design* désigne l'incomplétude, l'imprécision, ou l'imperfection, marquant par la même occasion la vraisemblance, l'éventualité, ou la

perspective. Dans son sens le plus générique le *design* ne réfère pas exclusivement au vague, à l'intangible ou l'ambiguïté, mais aussi à l'effort de capturer l'insaisissable [Terzidis, 2007]. Le mot *design* désigne donc à la fois un processus (de par son étymologie grecque) ainsi qu'un résultat de ce processus (de par son étymologie latine). Historiquement, le mot *design* provient du français *dessein*. Le terme *dessein* implique une intention, mais aussi la concrétisation d'un projet (*dessein* signifiant d'abord dessin [Forest, 2005], il peut donc se concrétiser par une esquisse, des motifs, une composition visuelle, etc.), respectant ainsi l'ambivalence précédemment présentée.

La difficulté relative à la représentation du/des concept(s) induit que les définitions existantes de la conception (ou *design*) ne parviennent à mettre en lumière qu'une partie de ce qu'est la conception. Si certaines définitions sont redondantes, aucune ne parvient à offrir un aperçu global du domaine. Choulier [2008] définit qu'il est dès lors primordial que l'usage du terme « conception » ne se définisse exclusivement que selon le périmètre au sein duquel l'auteur l'utilise.

Théorie de la conception

Sa considération en tant que science, induit de la conception qu'elle s'appuie, ou du moins puisse s'appuyer, sur un ensemble de théories.

Étymologiquement, la théorie (du grec du grec *iheôrem* signifiant observer, désigner, examiner) désigne un « ensemble de lois formant un système cohérent et servant de base à une science, ou rendant compte de certains faits » [Bernard, 1847], élaborant une représentation idéale, éloignée des applications.

Selon Chakrabarti et Blessing [2014b], une théorie de la conception :

- Est un corpus de connaissances, généralement un ensemble d'hypothèses, consistant en un ensemble de concepts comprenant leurs relations. Les hypothèses constituant des relations entre les concepts représentant des aspects spécifiques de la conception, de sa mise en œuvre, de ses facettes, et de ses facteurs de réussite.
- Vise à appréhender la conception afin d'en fournir une formalisation, une explicitation ou une prédiction quant à certains aspects de ses phénomènes ou de à sa mise en œuvre.
- Peut-être descriptive [Cross, 2008], correspondant à ce que Tomiyama [2009] appelle "théorie de la conception" ou prescriptive [Cross, 2008], correspondant à ce que Tomiyama [2009] nomme « méthodologie de conception ».
- Possède des limites définies de ce qu'elle formalise, explicite ou prédit, couplées à un degré d'abstraction, ainsi qu'à des hypothèses pouvant être validées ou invalidées.

Modèles de conception

Les modèles, dans le cadre de la conception, peuvent se référer à deux notions distinctes, les modèles au sein de la conception et les modèles de conception.

Pour Goel et Helms [2014] un modèle au sein de la conception doit « contraindre le raisonnement en simplifiant les problèmes complexes et donc suggérer un processus d'analyse » et sert « à la fois d'outil pour spécifier et organiser l'entendement d'un système ainsi que pour utiliser cet entendement à des motifs d'explicitation et de communication ».

Vermaas [2014] présente les modèles scientifiques comme ayant une valeur épistémique, « leurs création, analyse et développement permettant aux scientifiques de comprendre les systèmes cibles et les théories représentées. » Goldschmit [2014] décrit le but d'un modèle de conception comme étant « la facilitation de la disjonction d'une théorie en sous-parties constituantes, ainsi que la formalisation des relations intercomposants, dans un but de pousser l'analyse et/ou la preuve ». De manière similaire et par inversement, un modèle de conception fait état de l'intégration de parties distinctes dans un tout – « *the larger picture* ». Dans la recherche en conception, le but d'un modèle de conception est « d'explicitier le processus de conception ou les éléments le composant d'un ou de plusieurs points de vue spécifiques » [Goldschmidt, 2014].

Outils de conception - méthodes et techniques

Le mot méthode vient du grec ancien μέθοδος (*methodos*) qui signifie la poursuite ou la recherche d'une voie à réaliser quelque chose. Le mot est formé à partir du préfixe *meth-* « après, qui suit » et de *-odos* « chemin, voie, moyen » [Lahonde, 2010].

Le mot technique vient quant à lui du grec ancien τεχνικός (*tekhnikos*) désigne un « art, métier, savoir-faire ». Une technique constitue un ensemble de méthode(s) [Lahonde, 2010].

Ces deux concepts, ici regroupés en tant qu'outils, ont l'objectif d'apporter des procédures rationnelles en phase de conception de produits [Cross, 2008]. Les outils constituent la brique élémentaire d'une méthodologie, permettant d'aboutir à des résultats concrets pouvant être utilisés comme intrant à une autre étape de la méthodologie [Schoefer, 2015].

Synthèse quant à la sémantique et les définitions des constituants de l'ingénierie de la conception

La présentation des différents sous-concepts constituant l'ingénierie de la conception, introduit et différencie théories, modèles et outils de conception. À travers leur différenciation, c'est aussi leur positionnement relatif qui est rendu possible. Certains auteurs relient, en effet, les termes modèles et théories. Dans ce rapprochement, les modèles sont généralement interprétés comme "une simplification et une représentation schématique de l'essence d'une théorie" [Goldschmidt 2014] ou comme "représentant les fonctionnalités d'un système cible au sein du monde ou d'une théorie scientifique" [Vermaas, 2014]. C'est sous leur considération pyramidale des différents concepts afférents

à l'incarnation d'une théorie de la conception, telle que proposée par Lahonde [2010], que les présents travaux s'emploieront à mettre en perspective avec la bio-inspiration.

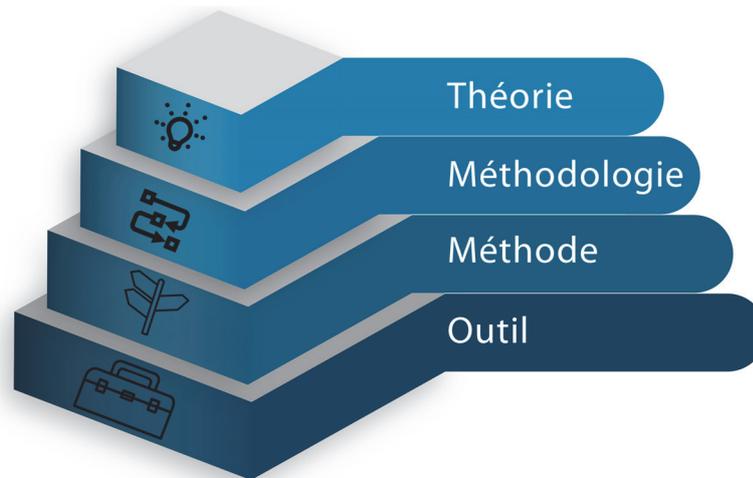


Figure 2.17 - Classification des théories et méthodologies de conception, adapté de [Lahonde, 2010]

À ces quatre niveaux constitutifs de la conception s'ajoute un cinquième, les heuristiques, abordant, de façon transverse, théories, méthodologies, méthodes et outils, à chacun de leur niveau (de façon individuelle ou globale). Les heuristiques sont des principes ou tactiques, sélectionnés sur la base de l'expérience ou du jugement, présentant une probabilité d'aboutir à une solution raisonnable après un temps relativement court de recherche [Newell et Simon, 1972, Silver, 2004].

2.3.1.4 Conclusion sur le champ notionnel de l'ingénierie de la conception

L'ingénierie de la conception, forte de son développement somme toute récent, a su s'armer d'une structure ayant abouti à un champ scientifique cohérent composé d'un ensemble de théories, de modèles et d'outils. C'est selon cette architecture (i.e. théories, modèles et outils) que se devront d'être appréhendés les supports méthodologiques existants pour la facilitation de l'implémentation de démarche de conception bio-inspirée.

L'historique présenté au sein de cette section dépeint une ingénierie de la conception qui a su, au fil de son évolution, se structurer afin de répondre à des problématiques industrielles à la complexité croissante.

L'étude de la bio-inspiration se doit d'être abordée avec les limites du champ notionnel de l'ingénierie de la conception ; leurs compréhensions respectives ne peuvent en aucun cas être décorrélées. Il n'est donc de raison qu'au cours de son développement, la bio-inspiration ne rencontre pas les écueils et ne subisse pas les mêmes changements de paradigmes que ceux rencontrés par l'ingénierie de la conception. La maturité présentée de la biomimétique (section 2.2) est sans commune mesure avec le champ de recherche de la conception. En ce sens, il semble possible de formuler l'hypothèse que c'est vers cette structuration que doit tendre la biomimétique.

La nature profonde de la conception a été détaillée par l'investigation de son épistémologie. En se constituant comme un champ de recherche scientifique, l'ingénierie de la conception a gagné une structure pyramidale dont le sommet se compose de théories.

Ce sont ces théories, relatives à la conception, qu'il convient d'aborder spécifiquement afin de comprendre lesquels de leurs préceptes sont transposables à la biomimétique.

2.3.2 Approches théoriques de l'ingénierie de la conception

L'importance des théories dans le cadre de l'ingénierie de la conception ayant été soulignée, un approfondissement de ces dernières est proposé. Dans leur ouvrage, Chakrabarti et Blessing [2014a] proposent une vue d'ensemble des théories de la conception existante à ce jour (section 2.3.2.1 à 2.3.2.6). À ces théories viennent s'ajouter d'autres théories qui, bien qu'affiliées à la conception, sont de nature plus générale (section 2.3.2.7 à 2.3.2.12).

2.3.2.1 Théorie Générale de la Conception (« General Design Theory » - GDT)

Introduite par Yoshikawa [1981] puis étendue par Tomiyama et Yoshikawa [1986], la Théorie Générale de la Conception est l'une des premières théories de la conception à intégrer le concept de connaissance. Cette théorie est une application d'une approche similaire initialement proposée par Newell [1982] dans le cadre des théories computationnelles, appliquée au domaine de la conception. Cette théorie générale de la conception décrit la conception comme une transposition entre deux espaces (avec fonction et attributs), et discute de la nature de cette transposition en fonction de la disponibilité complète ou incomplète de connaissance [Chakrabarti et Blessing, 2014a].

2.3.2.2 Théorie axiomatique de la conception (« Axiomatic Design »)

Proposée par Suh et al. [1998, 2001], la théorie axiomatique décrit la conception comme une transformation entre fonctions et paramètres. La théorie est basée sur le fait que tout résultat de conception réussie peut voir son processus être décrit selon deux axiomes⁶, celui d'indépendance et celui du contenu d'information. L'axiome d'indépendance présente le processus de conception comme une chaîne d'information entre quatre domaines constituants (voir Figure 2.18) :

- Le domaine client, caractérisé par les besoins ou Attributs Clients qu'un produit ou processus requiert.
- Le domaine fonctionnel, au sein duquel les besoins client sont traduits en Exigences Fonctionnelles et Contraintes.
- Le domaine physique, correspondant au domaine qui contient les Paramètres de Conception définis afin de satisfaire les exigences fonctionnelles.
- Le domaine procédural, au sein duquel les processus nécessaires à la concrétisation du produit ou processus sont définis par des Variables de Processus.

⁶ Un axiome étant un élément conceptuel ne pouvant être remis en cause à l'intérieur d'une théorie afin que cette dernière soit consistante (ex : l'axiome d'Euclide qui affirme que par un point donné passe une unique parallèle à une droite donnée).

En passant d'un domaine à un autre, la généralité des concepts décroît alors que leurs descriptions deviennent de plus en plus détaillées [Albano et Suh, 1994]. Le contenu de chaque domaine est constitué du résultat d'un processus de cartographie entre le domaine actuellement considéré et le précédent [Suh, 2001].

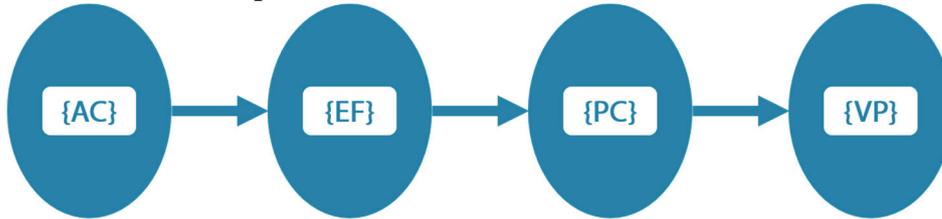


Figure 2.18 - Modèle axiomatique du processus de conception [Suh, 2001] ; avec AC : Attributs Clients, EF : Exigences Fonctionnelles ; PC : Paramètres de Conception ; VP : Variables de Processus.

Quand plusieurs résultats de conception peuvent être formulés selon le premier axiome, le second axiome de la théorie axiomatique de la conception permet l'identification du plus pertinent d'entre eux. Cet axiome relatif à l'information stipule que moins les fonctions sont couplées à un résultat de conception, moins le résultat de conception contiendra d'information et plus efficace sera le processus de conception [Park, 2007].

2.3.2.3 $K_{LD}^{E_0}$

Introduite par Smithers [1998, 2000] cette théorie identifie six types de connaissances nécessaires à la conception :

- La connaissance requise pour la formalisation des spécifications, pour la description des spécifications finales ainsi que pour leur association ;
- La connaissance requise pour la bonne formalisation des problèmes ainsi que pour leur description ;
- La connaissance requise pour la résolution des dits problèmes ainsi que pour la description de leurs solutions ;
- La connaissance requise pour l'analyse et l'évaluation des solutions apportées aux problèmes ainsi que pour la connaissance relative à leur analyse et leur évaluation ;
- La connaissance requise pour la formalisation de la description du concept ;
- La connaissance requise pour la formalisation des présentations relative au concept.

2.3.2.4 Théorie Universelle de la conception (« Universal Design Theory » – UDT)

Proposée par Grabowski et al. [1999], l'UDT ambitionne d'être un support scientifique à la rationalisation du développement de produit dans un contexte interdisciplinaire. Le processus de conception y est décrit comme une transition à travers quatre niveaux d'abstraction : la modélisation des spécifications, la modélisation des fonctions, la modélisation des géométries effectives et la conception de prototype. Une solution conceptuelle y est donc décrite comme un jeu d'information spécifique relatif au niveau de fonctionnel, d'une géométrie effective et d'une incarnation. La théorie s'articule autour de trois axiomes :

- Il existe un nombre fini de niveaux d'abstraction ;

- L'ensemble des éléments basiques connus pour chaque niveau d'abstraction est, à un certain point, fini ;
- Le nombre de transitions possibles entre les différents niveaux d'abstraction est lui aussi fini.

La théorie aboutit à l'hypothèse que « l'invention d'un produit est toujours constituée d'une nouvelle combinaison d'éléments basiques connus », là où la découverte se définit comme « l'identification de nouveaux éléments basiques » [Lossack et Grabowski, 2000].

2.3.2.5 Théorie de la synthèse (« Theory of synthesis »)

Introduite par Takeda et al. [1999], la théorie de la synthèse part du postulat que le processus de conception est un processus itératif logique d'abduction et de déduction appliqué à l'élaboration de solutions.

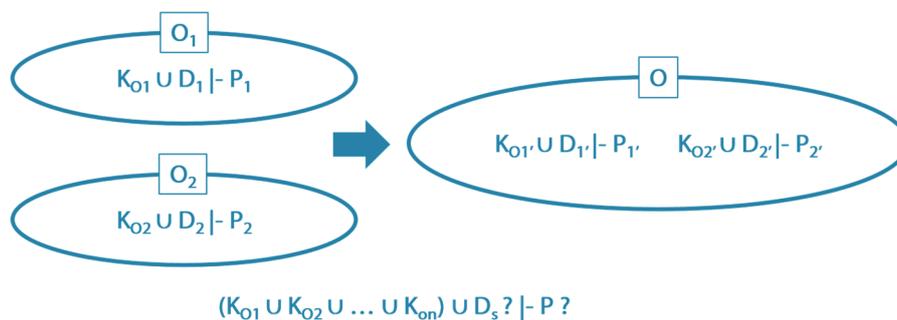


Figure 2.19 - Synthèse du processus d'intégration de l'expérience de conception ; avec O : Objet de conception ; K : Connaissance relative à l'objet ; D : description de l'objet P : propriétés de l'objet [Takeda et al., 1999]

La connaissance pour la synthèse en conception nécessiterait :

- Une matérialité, pour assurer une existence éventuelle ;
- Une dissemblance, pour assurer une originalité ;
- Un attrait, pour assurer une valeur.

2.3.2.6 Conception par Infusion (« Infused Design »)

Proposée par Shai et Reich [2004a, 2004b], la conception par infusion formalise la représentation d'un problème en conception à un niveau mathématique méta, commun aux disciplines composant l'ingénierie. Cette approche à un niveau supérieur permet ainsi de faciliter les collaborations entre concepteurs provenant de sous-champs de l'ingénierie différents. L'une des particularités de la théorie est de démontrer que méthodes et solutions peuvent être systématiquement générées depuis des méthodes et des solutions correspondantes dans des disciplines alternatives.

2.3.2.7 C-K

La théorie C-K, telle qu'introduite par Hatchuel et al. (e.g. [Hatchuel et Weil, 2003, Le Masson et al., 2006]) « définit » le « raisonnement de conception » [Le Masson et al., 2006], permettant une « meilleure compréhension de l'organisation et de la gestion de la conception dans les projets innovants » [Le Masson et al., 2006].

La théorie établit deux espaces distincts, l'espace des Concepts (le C de C-K) et l'espace des Connaissances (Le K pour « Knowledge » de C-K). Selon la théorie, les activités de conceptions peuvent être décrites selon 4 opérateurs [Hatchuel et Weil, 2003] :

- L'opérateur $K \rightarrow C$ qui décrit l'addition ou la soustraction d'éléments de connaissance issus de l'espace K vers l'espace C. Un exemple d'activité illustrant cet opérateur est la génération d'alternatives.
- L'opérateur $C \rightarrow C$ qui consiste en l'expansion de l'espace C par élaboration mathématique des partitions et inclusions, résultant en une organisation des concepts en forme d'arbre. L'expansion horizontale des concepts réfère à la pensée divergente, là où l'expansion verticale résulte des processus de pensée convergente [Le Masson et al., 2006].
- L'opérateur $C \rightarrow K$ décrit les activités prenant usuellement place en phase aval de la conception. Cet opérateur modélise les actions telles que la validation ou l'invalidation de concepts en leur attribuant un statut logique dans l'espace K.
- L'opérateur $K \rightarrow K$ réfère aux activités liées à l'expansion de l'espace K, activités induites par des mécanismes de déduction ou d'expérimentation. Les activités typiques de création de connaissances peuvent dès lors être modélisées par cet opérateur [Le Masson et al., 2006].

Le processus C-K peut être synthétisé tel que présenté par la Figure 2.20.

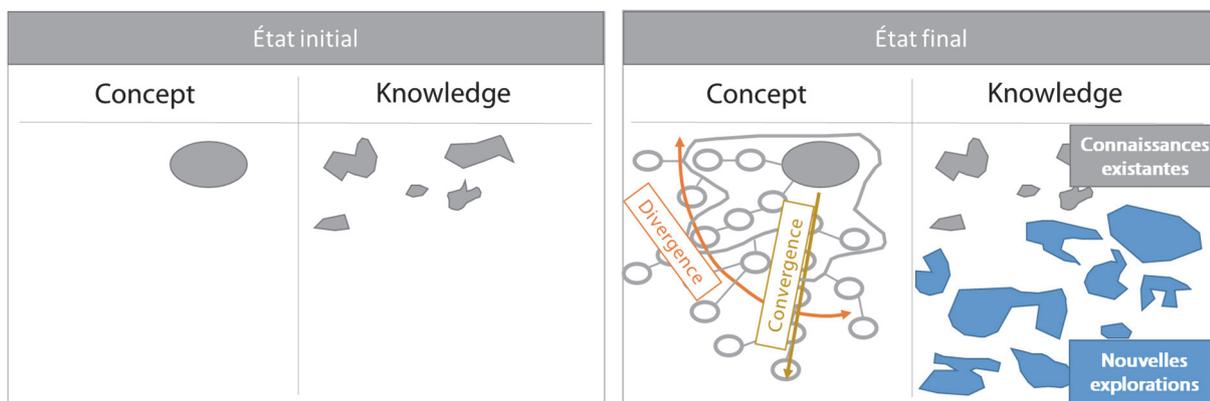


Figure 2.20 - Schéma de synthèse du processus C-K [Hatchuel et Weil, 2003].

2.3.2.8 FBS

Le modèle Fonction-Behavior-Structure (FBS) formalisé par Gero [1990] est l'une des nombreuses formalisations des ontologies dans le design (se référer à [Erden et al., 2008] pour un aperçu). Ce modèle décrit le processus de conception, mais aussi ses résultats, en termes de Fonctions (F), de Comportement (Behavior) (Be (Comportement attendu - « Expected behavior »), Bs (Comportement dérivant de la structure - « Behavioru derived from structure »)), de Structures (S), et de Descriptions (D). Selon Vermaas & Dorst [2007], les Fonctions seraient les dispositions physiques d'un artéfact contribuant à ce pour quoi ledit artéfact a été conçu ; les Comportements seraient les dispositions physiques de l'artéfact ; les Structures seraient les matériaux de l'artéfact, les dimensions et la géométrie

de ces matériaux, ainsi que leurs relations topologiques. La Figure 2.21 illustre le système FBS.

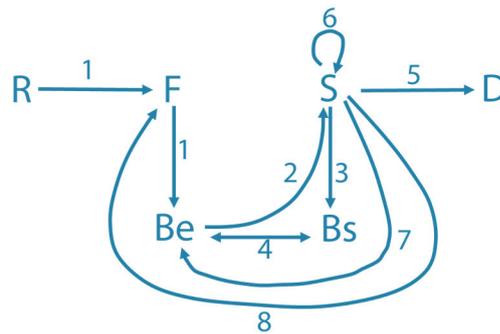


Figure 2.21 - Représentation du processus de conception modélisé par l'ontologie FBS avec 1 : Formulation ; 2 : Synthèse ; 3 : Analyse ; 4 : Évaluation ; 5 : Documentation ; 6,7,8 : Reformulation [Gero, 1990].

Selon le modèle, le processus de conception consiste en une transformation des Fonctions, en Descriptions. Le processus survient par des transformations occasionnelles des fonctions requises sous différentes propositions de Structures. La transformation peut aussi prendre place selon un mécanisme de comparaison entre l'ensemble des Comportements dérivant de la structure (Bs), i.e. les comportements effectifs, et l'ensemble des Comportements Attendus (Be). »

2.3.2.9 Design Thinking

Le Design Thinking, formalisé par Rowe [1991] est une théorie poussant à repenser les cycles créatifs ainsi que le management en entreprise par le *design*. Axé sur le décloisonnement, le dynamisme et les remises en question, le Design Thinking sera mis en lumière dans les années 90 par l'agence de *design* IDEO (pionnière dans l'utilisation et le développement des démarches Design Thinking) fondé par David Kelley. Brown [2008] définit le Design Thinking comme « une approche de l'innovation centrée sur l'humain qui puise dans la boîte à outils du *designer* pour intégrer les besoins des utilisateurs, les possibilités technologiques, et les exigences relatives à la réussite commerciale. »

La démarche du Design Thinking se constitue de cycles successifs permettant que cette dernière s'inscrive dans un questionnement constant, les cycles s'enchaînant jusqu'à l'obtention d'un résultat acceptable [Brown, 2008]. Chaque cycle est constitué de 3 phases [Rowe, 1991]:

- La phase d'inspiration consistant à analyser les besoins utilisateurs par l'observation et le dialogue. Cette phase requiert aussi un état des lieux de ce qui se fait ailleurs.
- La phase d'idéation consistante à une reformulation des constats en vue de l'élaboration d'un concept qui sera incarné par la réalisation d'un prototypage rapide.
- La phase d'itération consistante à l'évaluation du prototype par les usagers. Chaque test permet aux expérimentations successives de tendre vers le résultat final souhaité.

2.3.2.10 Développement de concept nouveau (New Concept Development)

Le modèle de développement de concept nouveau ou DCN (ou encore « New concept development » en anglais), introduit par Koen et al. [2001] fait état des activités réalisées par une équipe de développement de produits ou processus avant que cette dernière n'entame le processus de développement d'un produit ou processus nouveau ou DPPN (New Product or Process Développement). Parmi différents concepts, tels que les facteurs influents ou de motivation, le modèle DCN se concentre essentiellement sur cinq éléments s'influençant mutuellement. Ces éléments, constituant la « Front End of Innovation (FEI) », sont :

- L'Identification d'opportunités, correspondant à la phase durant laquelle les concepteurs identifient les opportunités technologiques et/ou marchés qu'ils souhaitent cibler.
- L'analyse des opportunités, correspondant à l'analyse des opportunités précédemment identifiées ainsi qu'à leur mise en contexte. Durant cette étape, les tendances majeures et les premières estimations de marché sont réalisées afin de déterminer l'attractivité relative aux opportunités.
- La génération des idées, correspondant à la génération ainsi qu'à la maturation par itérations successives des idées visant à répondre aux opportunités précédemment identifiées. Cette phase nécessite d'étroits contacts avec les autres départements de l'entreprise, tout comme l'acquisition de données utilisateurs.
- La sélection des idées, correspondant à la phase durant laquelle les concepteurs décident quelles seront les idées générées amenées à être concrétisées. Selon Koen et al. [2001], la quantité d'information fiable à disposition étant limitée, le processus de sélection se doit d'être moins rigoureux que dans le cadre d'un processus DPPN.

Développement Conceptuel et Technologique, correspondant à la phase durant laquelle la conception d'un business model concret est réalisée. Cette étape est parfois considérée comme la première phase du processus DPPN.

2.3.2.11 Synectique (« Synectics »)

Issue du département de conception du cabinet de consulting Arthur D. Little au cours des années 50, la théorie Synectique part du principe que les individus sont plus créatifs s'il leur est donné la capacité de comprendre comment la créativité fonctionne [Gordon, 1961].

Sa formalisation est issue de l'analyse de l'enregistrement (audio puis vidéo) d'ateliers créatifs visant à formuler une solution créative dont les participants seraient déterminés à implémenter [Nolan, 1989].

La Synectique (venant du grec *synectikos* composé de *syn* signifiant la « mise en corrélation » et de *ektos* faisant référence à « des éléments distants ») repose sur trois hypothèses [Gordon, 1961] :

- Le processus créatif peut être décrit et enseigné.
- Les processus inventifs artistiques et scientifiques sont analogues et sont nourris par les mêmes processus cognitifs

- La créativité individuelle et création en groupe sont, elles aussi, analogues.

La théorie Synectique constitue donc une manière d'approcher la créativité et la résolution de problème de manière rationnelle. Elle transpose de manière consciente un problème depuis son contexte initial à un champ d'application distant afin de favoriser l'intégration de la créativité au sein du processus de réflexion, aboutissant à des solutions originales et inventives.

« Traditionnellement, le processus créatif est considéré apostériori... L'étude Synectique tente d'investir le processus créatif in vivo, pendant sa mise en œuvre. »
[Gordon, 1961]

2.3.2.12 TRIZ et dérivées

La Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs ou TRIZ (abréviation de son nom original russe « теория решения изобретательских задач » explore de nombreux aspects de la conception [Altshuller, 1988, Altshuller, 1996]. Cette théorie empirique s'inspire d'une analyse étendue de brevets d'invention et des modèles descriptifs de développement des systèmes techniques à travers le temps [Schoefer, 2015]. Intégrant à la fois une composante philosophique et des découvertes cognitives, Altshuller, et de nombreux autres auteurs, en sont venus à proposer différents modèles prescriptifs relatifs au processus inventif, s'appliquant de façon non exclusive à la conception de produits et de processus [Savransky, 2000].

Là où les observations empiriques du développement technologique ont permis la genèse des 9 lois d'évolution des systèmes techniques [Altshuller, 1988], le modèle de processus prescriptif de résolution de problème (cf. Figure 4.5) se compose de quatre représentations [Savransky, 2000], tel qu'abordé au Chapitre 4.

Au cours du temps, des adaptations spécifiques de la TRIZ ont été développées, e.g.[Robles et al., 2009], Unified Structured Inventive Thinking [Sickafus, 1997] (USIT), Advanced Systematic Inventive Thinking [Horowitz, 1999] (ASIT). Articulées autour de ces travaux, de nouvelles adaptations du modèle de résolution de problème inventif TRIZ ont été proposées [Nakagawa, 2005]. Nakagawa y étend le modèle initial TRIZ selon deux axes, tel qu'aussi illustré par la Figure 2.22 :

- Ajout de la représentation de la définition du problème détaillé comme second élément du processus
- Mise en exergue du besoin de transformation du modèle de solution en différentes solutions conceptuelles qui seront ensuite développées en solutions spécifiques.

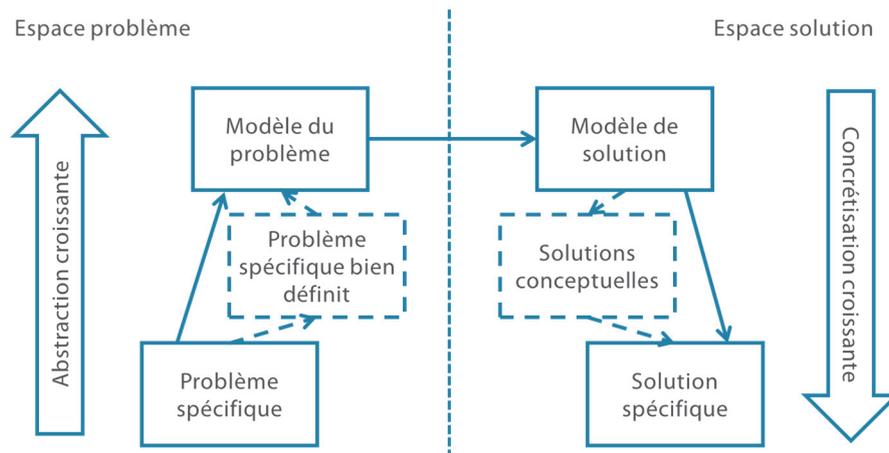


Figure 2.22 – Processus de résolution de problème suggéré par TRIZ [e.g. Savransky, 2000] et ses modifications suggérées [Nakagawa, 2005], adapté de Schöfer [2015].

2.3.2.13 Synthèse quant aux théories relatives à l'ingénierie de la conception

Les théories, selon Koskela et al. [2014] sont, par leur nature, soit descriptives, soit prescriptives. À ces deux variables permettant la discrimination des théories de l'ingénierie de la conception, Vermaas [2014] ajoute une troisième, liée à leur potentiel de démarcation (« demarcating »), soulignant que parmi les théories de la conception, certaines ne relient pas systématiquement « les connaissances issues de l'expérience de la pratique de la conception » et peuvent, dès lors, être appelées théories scientifiques. Les différences entre théories de conception résident dans leurs buts et/ou objectifs :

- Théories descriptives : Leur but inclut la description des activités de conception usuellement considérées. Ces théories ont pour vocation à relier les connaissances relatives à ces pratiques afin d'aboutir à leur compréhension ainsi qu'à leur explication.
- Théories démarquantes : Leur but inclut la délimitation des frontières de ce qui doit être considéré comme des pratiques de la conception.
- Théories prescriptives : Leur but inclut la distinction de pratiques existantes ou nouvelles de la conception, arguant quant aux caractéristiques favorisant ces dites pratiques distinguées.

Selon cette considération et en intégrant les travaux de Schöfer [2015], s'appuyant eux même partiellement sur ceux de Finger & Dixon [1989] et de Cross [2008], une synthèse des modèles et théories de l'ingénierie de la conception est présentée en Tableau 2.5.

Tableau 2.5 - Catégorisation des modèles et théories de conception présentée au cours de la section 2.3.2.

	Processus	Produit
General Design Theory	Descriptif	
Axiomatic Design	Descriptif-Prescriptif	Prescriptif
Systematic Design	Prescriptif	
KLDE0	Démarquant	

Universal Design Theory	Démarquant	
Theory of synthesis	Descriptif	
Infused Design	Démarquant	Prescriptif
C-K Theory	Descriptif	
Design Thinking	Prescriptif	Descriptif
New Concept Development	Descriptif	
Synectics	Démarquant	Descriptif
TRIZ	Prescriptif	Descriptif- Prescriptif

Si la présentation des théories de la conception présentée au sein de cette section n'est nullement exhaustive, leur introduction offre une nouvelle mise en lumière de la biomimétique : à un métaniveau, cette dernière permet aux concepteurs de se soustraire, dans une certaine mesure, du mécanisme d'essais-erreurs, souvent inhérent aux démarches d'ingénieries, par une capitalisation sur les connaissances issues des sciences du vivant. À ce titre, la biomimétique pourrait être appréhendée comme une théorie de la conception à part entière.

Afin d'aller plus loin dans ces théories de la conception, une exploration des modèles de processus les constituants est proposée.

2.3.3 Processus relatifs à l'ingénierie de la conception

La réalisation de travaux visant à apporter une vision globale des modèles de processus de conception ont déjà vu le jour (e.g. [Jonassen, 1997, Howard et al., 2006, Gericke et Blessing, 2011]). Afin d'en proposer un aperçu le plus exhaustif possible, la catégorisation des processus de conception présentée s'articule autour de la classification formalisée par Wynn et Clarkson [2005], basée sur les travaux de Blessing [1994] et de Lawson [1980] classification offrant 3 dimensions d'analyse, telle qu'illustrée en Figure 2.23 : centrée étapes/activités, orientée problème/solution, Abstraite-Procédurale-Analytique.

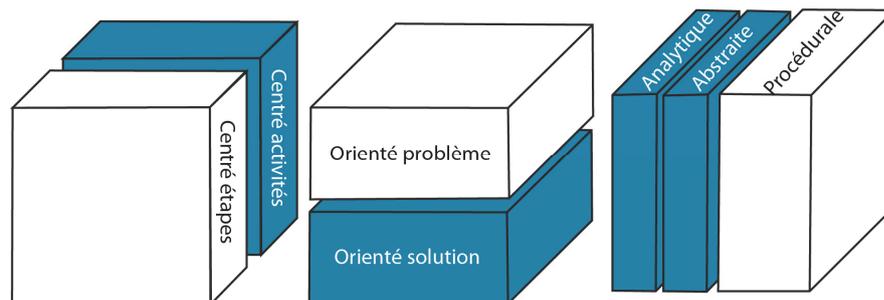


Figure 2.23 - Classification de la littérature des processus de conception [Wynn et Clarkson, 2005]

2.3.3.1 Centrée : Etapes & Activités (« stage-based » & « activity-based »)

Les modèles de processus peuvent être distingués en fonction de leur description de la conception selon un ensemble d'étapes ou d'activités [Blessing, 1994].

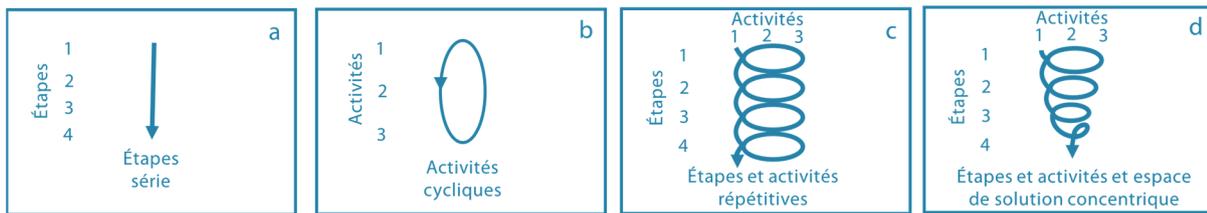


Figure 2.24 - Typologies des modèles de conception [Blessing, 1994].

Si certains modèles décrivent un processus de conception uniquement sous l'angle d'un enchaînement de différentes étapes (Figure 2.24a) ou d'activité (Figure 2.24b), certains modèles combinant les deux approches existent [Blessing, 1994]. Ces modèles hybrides prescrivent des activités structurées et itératives à chaque étape (Figure 2.24c - e.g. [Hubka, 2015]) ou illustrent la convergence de la conception en décrivant progressivement des activités de plus en plus concrètes à mesure de l'avancée dans la conception (Figure 2.24d - e.g. [Evans, 1959])

2.3.3.2 Orientation : Problème & Solution (« Problem-oriented » & « Solution-oriented »)

Lawson [1980] ou Birmingham [1997] catégorise les processus décrits dans la littérature selon leur orientation :

- Les modèles orientés problèmes se concentrent sur l'analyse du problème et sont caractérisés par une ou plusieurs étapes d'abstraction [Lawson, 1980].
- Les modèles orientés solutions (ou produits) mettent l'accent sur l'analyse des idées générées et sont caractérisés par des étapes d'analyse et d'évaluation [Lawson, 1980].

Wynn et Clarkson [2005] constatent que les modèles centrés étapes (section 2.3.3.1) adoptent généralement une orientation problème, là où les modèles centrés activités (section 2.3.3.1) ne présentent pas de préférence entre orientation problème ou solution.

2.3.3.3 Approche : Abstraite, Procédurale & Analytique (« Analytical »-« Abstract »-« Procedural »)

À ces deux axes de catégorisation, Wynn et Clarkson [2005] ajoutent celui de l'approche :

- Les modèles abstraits décrivent le processus de conception avec un haut degré d'abstraction. Ces modèles sont capables de s'adapter à de nombreux contextes de conception, au détriment de directives spécifiques à même de faciliter la mise en œuvre d'une amélioration du processus.
- Les modèles procéduriers sont plus concrets par nature et se concentrent sur l'intégration de l'aspect spécifique de la conception. Ils s'avèrent donc moins génériques, et donc moins polyvalents, que les modèles abstraits, mais savent se montrer plus pertinents lors de leur mise en pratique.

- Les modèles analytiques sont mis à contribution lors de la description de cas particuliers de projets de conception. De tels modèles peuvent être subdivisés en deux sous-catégories : Les représentations décrivant un projet de conception (e.g., matrice de la conception structurelle [Steward, 1981] et les techniques, procédures ou outils informatiques utilisant les susmentionnées représentations pour appréhender ou améliorer le processus de conception [Browning, 2001].

2.3.3.4 Conclusion sur les processus de conception

Basées sur leur classification, Wynn et Clarkson [2005] concluent premièrement qu'au sein des trois axes de catégorisation, certaines occurrences sont mutuellement exclusives. Ainsi, si les modèles de processus centrés activités peuvent être orientés problème ou solution, les modèles de processus centrés étapes sont généralement, par nature, orientés problème ; les modèles orientés solution étant supposés apporter des descriptions plus proches de la réalité du processus cognitif des concepteurs que les modèles orientés problème. Les modèles de processus abstraits sont généralement centrés activités et n'explicitent pas le processus de conception (tout comme il ne propose pas de support aux concepteurs). Les modèles procéduriers sont généralement centrés étapes et souvent orientés problème de par leur nature.

L'aperçu proposé des modèles de processus de conception a pour vocation de constituer une grille de lecture des processus biomimétiques. En les catégorisant (selon leur focus, orientation et approche), il est attendu qu'une meilleure compréhension des modèles de processus biomimétiques soit rendue possible.

2.3.4 Conclusion quant à l'Ingénierie de Conception

La conception bio-inspirée est, comme son nom l'indique, intrinsèquement une démarche d'ingénierie de la conception. La compréhension du potentiel, mais aussi des limites des théories et modèles de processus qui puisent leurs origines dans l'ingénierie de la conception est primordiale dans l'identification des limites de l'approche biomimétique. L'historique présenté dénote d'un développement récent dans la structuration de l'ingénierie de la conception. Apparentée à une discipline scientifique, la conception s'est organisée autour d'un ensemble de théories, méthodologies, méthodes et outils. Les théories sur le sujet recoupent les aspects descriptifs, prescriptifs et démarquants de la conception. Les modèles de processus existants sont, de la même façon, organisés selon un ensemble de préceptes. Dans le constat qui sera à réaliser sur la biomimétique, cette structuration sera à mettre en perspective. Compte tenu du lien souligné entre conception et biomimétique, il semble probable que nombre d'outils de conception soient à même de contribuer à la mise en œuvre de la bio-inspiration.

En se constituant en tant que discipline scientifique, l'ingénierie de la conception, dans le cadre de la conception bio-inspirée, fait jeu égal, à cet égard, avec les sciences du vivant. Si la question de la nature scientifique de la conception se posait, la biomimétique en tant que sous-branchement théorique de la conception semble pencher instinctivement

vers l'ingénierie. L'investigation des sciences du vivant semble donc nécessaire dans l'effort de pouvoir en recenser les contributions indirectes.

2.4 SCIENCES DU VIVANT

La biomimétique se positionne à l'interstice des champs disciplinaires que forment l'ingénierie de la conception et des sciences du vivant. Si les contributions du premier ont été explicitées, force est de constater que les éléments constituant le vivant n'ont pas encore été abordés. Afin de rendre possible la comparaison entre contributions de l'ingénierie de la conception et science du vivant à la biomimétique, les éléments structurant la section décrivant l'ingénierie de la conception ont de nouveau été adoptés en vue d'articuler la présente section ayant attrait à la biologie. Ainsi, tel qu'illustré par la Figure 2.25, cette section relative aux sciences du vivant se compose de trois sous-ensembles le premier détaillant le concept de la biologie, le second décrivant ses approches théoriques et le troisième abordant la thématique sous l'angle de ses processus.



Figure 2.25 – Structure de la section relative aux sciences du vivant

Structurée de cette manière, cette présentation des sciences du vivant, est à même de répondre aux besoins des personnes n'ayant pas ou peu de connaissances en biologie et désireuses de mettre en œuvre des démarches de conception bio-inspirée.

2.4.1 Concept des sciences du vivant

Les Sciences du Vivant constituent le second pendant de la bio-inspiration. Elles forment la base de connaissance exclusive dans laquelle la démarche puise l'inspiration. Il est à ce titre nécessaire de comprendre l'évolution et les sous-concepts ayant attrait à ce champ de connaissances, mais aussi la nature des systèmes biologiques ainsi que du mécanisme d'innovation. C'est par l'examen de l'ensemble de ces points qu'il sera possible de jauger la pertinence de l'utilisation de la biologie comme source d'inspiration pour la conception.

2.4.1.1 Historique des sciences du vivant

La biologie en tant que concept cohérent et unique émerge au cours du 19^e siècle, les sciences du vivant puisent leur racine dans une succession de médecines traditionnelles et d'histoires naturelles, remontant aussi bien à l'Égypte antique qu'aux travaux d'Aristote et Galen du monde Gréco-Romain ancien. Cette section n'envisage nullement d'offrir un résumé exhaustif de plus de trois mille ans de travaux scientifiques, mais ambitionne

simplement de mettre en avant certains faits marquants qui ont permis d'aboutir à l'établissement de la biologie contemporaine.

L'étude de la vie, apparue il y a environ 3.8 millions d'années [Orgel, 1998], a subi, au cours de ces derniers bicentennaires et par l'intermédiaire de différentes révolutions, un certain nombre de tournants majeurs. C'est en soulignant certains de ces événements cruciaux à l'évolution des sciences du vivant que les travaux tentent d'anticiper l'évolution de ce champ de connaissance, unique source d'inspiration de la biomimétique.

La disparition des espèces

La France, par l'établissement d'institutions telles que le Jardin du Roi, a été durant le 18^e siècle le théâtre d'un chamboulement intellectuel. L'enchaînement des travaux du Comte de Buffon (1707–1788), de Georges Cuvier (1769–1832), d'Étienne Geoffroy de Saint Hilaire (1772–1844), et de Jean-Baptiste de Lamarck (1744–1829) pose les bases d'une nouvelle biologie, intégrant comparaisons anatomiques et paléontologie. C'est à partir de ces travaux que naîtra la réforme taxonomique reconnaissant pour la première fois l'extinction de certaines espèces, marquant le début de la remise en question du fixisme (si certaines espèces disparaissent, les formes de vies existantes ne sont dès lors pas persistantes).

Théorie cellulaire

Les avancées en matière d'optique ayant eu lieu durant les années 1830 accroissent drastiquement la puissance de résolution des microscopes et diminuent, voir éradiquent certaines perturbations comme les aberrations chromatiques. En résulte l'identification d'un certain nombre de structures, telle que l'emblématique première observation d'un noyau cellulaire par Robert Brown dans des cellules d'orchidées. De ces observations naîtra la théorie cellulaire, reconnaissant la cellule comme unité fondamentale d'organisation du vivant. En découlera alors l'établissement de deux nouveaux champs disciplinaires, la cytologie (maintenant intégrée à la biologie cellulaire) et l'histologie (l'étude des tissus organiques).

La génétique

Vers la fin du dix-neuvième siècle, la physiologie cellulaire et la cytologie permettent d'aborder la question relative au développement biologique, l'embryologie. L'observation des chromosomes et des cycles de reproductions cellulaires permet l'émergence de la théorie de l'hérédité. Initialement proposée par Walter Sutton (1877–1916) et Theodore Boveri (1862–1915), puis portée par Gregor Mendel (1822–1884), la théorie suggère que les chromosomes sont les supports de l'hérédité. La science de l'hérédité se mue en génétique sous l'impulsion de travaux comme ceux de William Bateson (1861–1926) qui visent à déterminer dans quelle mesure les principes mendéliens sont avérés hors des laboratoires de recherche.

Biologie évolutive

À l'inverse du fixisme, qui stipule que les espèces ont été créées par la main divine et possèdent donc un caractère immuable, le dix-neuvième siècle est le berceau de la théorie de l'évolution des espèces.

L'établissement de cette théorie, selon son entendement contemporain, a requis la mise en place d'une démarche fastidieuse. Les premières intuitions transformistes (allant à l'encontre du fixisme) naissent durant le dix-huitième siècle, donnant lieu aux philosophies naturelles. Benoist de Maillet (1656-1738) envisage une transformation des espèces par modifications héréditaires, un retrait des eaux par évaporation ayant contraint certains organismes à s'accoutumer à la vie terrestre. Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) s'intéresse aux corrélations entre facteurs du milieu et variations des êtres vivants. Denis Diderot (1713-1784) conçoit les espèces comme se transformant au cours du temps. Le comte de Buffon (1707-1788) dessine le concept de "dégénération des animaux". Érasme Darwin (1731-1802), grand-père de Charles, définit un lignage de la vie, animale et végétale, évoluant selon trois axes (i.e. besoins vitaux, transmission héréditaire et hybridation). Pierre Jean Georges Cabanis (1757-1808) postule que, sur de grandes échelles de temps, les espèces se modifient sous l'action d'accidents couplés à des modifications de conditions extérieures.

C'est sous l'impulsion de Jean Baptiste de Lamarck – botaniste, paléontologue, anatomiste des « animaux sans vertèbres » et inventeur du terme « biologie » – que l'ensemble de ces intuitions sont converties en théories. Il établit en 1809 sa théorie de la transmission des caractères acquis, qui repose sur un ensemble de principes généraux [Lamarck, 1809]. Le premier principe est celui de la génération spontanée. Selon ce principe, dès leur création, les êtres vivants tendent à se perfectionner afin de devenir aussi complexes que l'homme, rendant nécessaire la génération d'organisme à la base de l'échelle du vivant. Le deuxième principe est celui du modelage par l'environnement. Dans sa théorie chacune des mutations que subit un organisme est induite par un changement dans son environnement. L'évolution présentée ici est donc dirigée. Le troisième et dernier principe de la théorie de Lamarck est celui de la transmission des caractères acquis. Selon ce principe, les mutations opérées durant la vie d'un organisme peuvent être transmises à sa descendance. Les mutations sont ainsi perpétuées, voir s'amplifient (en fonction des conditions environnementales) au fil des générations.

Bien qu'il adhère aux principes Lamarckistes, Charles Darwin (1809 - 1882) distingue la théorie générale de l'évolution – théorie mettant en cohérence l'ensemble de l'histoire naturelle par l'intégration d'un grand nombre de faits et d'hypothèses – et une hypothèse centrale, celle de la sélection naturelle. Son raisonnement s'appuie sur la constatation que les organismes varient (refus de l'essentialisme du siècle précédent) ; ces variations sont héréditaires et présentent une capacité à être sélectionnées (la théorie inclut donc le concept d'élevage) ; un agent naturel opère la sélection naturelle ; cet agent est le milieu de vie des organismes (il existerait un lien entre évolution et milieu naturel) ; à l'échelle des populations, la sélection naturelle se traduit par la transformation de l'espèce (hérédité de la transformation). En 1859, suite à une collaboration avec Alfred Russel Wallace (1823-1913)

qui travaillait sur les bases d'une théorie avoisinante, Darwin publie sa théorie de l'évolution [Darwin, 2001]. Cette théorie s'articule autour de cinq sous théories [Lecointre et al., 2009] :

- Le fait transformiste. Les espèces ne sont pas constantes, les organismes se modifient au cours du temps, génération après génération.
- L'ascendance commune. La ressemblance, dans le monde vivant, est liée à une ascendance commune. Par extension, tout attribut semblable partagé par des espèces qui ne se croisent pas entre-elles, doit, en première instance, être interprété comme ayant été acquis par un ancêtre commun.
- Le gradualisme. Les changements organiques sont progressifs et donc liés à une apparition graduelle et non brutale.
- L'apparition des espèces par spéciation populationnelle. Une espèce se divise en plusieurs espèces filles, diversifiées. La spéciation ne peut se définir qu'au niveau d'une population d'individus (et non au niveau d'un organisme isolé).
- La sélection naturelle. Idée centrale de la théorie de Darwin et formulée simultanément par Wallace, la sélection naturelle induit que la production de variations des individus est le fruit d'un tri des individus d'une espèce donnée par sélection et éliminations successives.

Il est entendu que la théorie de l'évolution ne s'est pas arrêtée à Lamarck ou Darwin. La théorie a été affinée durant les années 1940-1960 puis a subi de multiples affinages dans les années 1970-1990 [Lecointre et al., 2009]. Si les théories néosélectionnistes contemporaines font preuve de continuité avec la théorie de Darwin, des interprétations alternatives (e.g. théorie évolutive du développement), marquent le retour de concepts jusqu'alors écartés [Laubichler et Maienschein, 2007]. Ce type de développement suggère que des lacunes théoriques substantielles subsistent (e.g. le mécanisme et les raisons relatives à l'apparition d'une espèce ne sont toujours pas explicités), susceptibles d'altérer significativement la compréhension future de la théorie de l'évolution [Sloan et Zalta, 2014]. En réponse à ces manques, des appropriations modernes de la théorie de l'évolution se sont formalisées sous la forme de mouvements se revendiquant du néodarwinisme ou du néolamarckisme (visant à expliciter les mutations épigénétiques, i.e. méthylation de l'ADN, modification de la chromatine et paramutation, ainsi que les mutations culturelles et écologiques, que le darwinisme et le néodarwinisme ne peuvent expliquer).

Biologie Moléculaire

Pour la première fois utilisée par Warren Weaver, la biologie moléculaire, aujourd'hui à la croisée de la génétique, de la biochimie et de la biologie cellulaire, a été constituée comme un idéal des explications physiques et chimiques de la vie [Yaniv et al., 2011]. Issue des travaux de Rosalind Franklin, Maurice Wilkins, James D. Watson et Francis Crick [1953],

la découverte de la structure de l'ADN⁷ a rendu compréhensibles les mécanismes de réplication du matériel génétique. Au-delà de la découverte, l'identification de la structure de l'ADN a constitué une révolution au champ disciplinaire qu'est la biologie [NRC, 2009]. En sus des connaissances théoriques glanées, le potentiel d'application des connaissances découlant de la découverte est immense :

- Expression génétique

Afin de transmettre l'information, l'ADN est converti en ARN⁸ afin que l'information génétique puisse être disséminée dans la cellule. Cette étape, appelée transcription peut engendrer un certain nombre d'anomalies (isolées ou héréditaires) susceptible de provoquer un grand nombre de maladies, dites génétiques, dont la nature est dépendante du ou des gènes affectés [Voet et al., 2016]. L'étude de l'expression génétique, i.e. la machinerie moléculaire requise, les points de passages, les facteurs affectant l'activation ou l'inhibition de la transcription et par conséquent l'expression génétique, constitue donc un champ de recherche à part entière.

- Cellules souches et développement

La biologie du développement porte sur l'étude du mécanisme permettant à une cellule unique de devenir les organismes complexes que nous sommes. La recherche actuelle du domaine vise à expliciter l'éradication ou l'activation de mécanismes génétiques, non seulement pour mieux comprendre les processus clés de spécialisation, mais aussi afin d'identifier les points bloquants, point de départ de nombreuses maladies et malformation [NRC, 2009]. Un autre enjeu constitue celui du maintien de cellules dans un stade non différencié (ou de réussir à déspecialiser des cellules) afin d'obtenir des cellules souches, capables de générer une grande variété de tissus, à même de permettre le développement d'un large choix de pathologies [Yaniv et al., 2011].

- Épigenétique

Si pendant de nombreuses années les chercheurs ont réduit la régulation génétique à l'étude de l'ARN et de certaines protéines, de récentes recherches ont démontré que des facteurs environnementaux, non génétiques, doivent aussi être considérés [Yaniv et al., 2011]. L'étude de ces phénomènes épigénétiques pourrait expliciter les tendances identifiées dans certaines pathologies (i.e. troubles bipolaires, maladies inflammatoires ou intestinales, pathologies sclérosantes) ainsi que l'émergence des cancers [Voet et al., 2016].

⁷ Acide Désoxyribose Nucléique, macromolécule formée de deux brins antiparallèles et composée de bases azotées (i.e. adénine, cytosine, guanine, et thymine) formant une séquence ; liée à un ose (le désoxyribose) ; lui-même lié à un groupe phosphate (H_3PO_4).

⁸ Acide ribonucléique, macromolécule proche de l'ADN, incluant un ribose en guise d'ose étant constitué d'un ribose (en lieu et place d'un désoxyribose dans l'ADN) et l'uracile en guise de base azotée (en lieu et place de la thymine dans l'ADN).

Synthèse quant à l'histoire des Sciences du Vivant

La biologie est un champ de connaissance complexe, subdivisé en de nombreux sous-champs très spécialisés. L'expansion actuelle liée au volume que drague le domaine ainsi que l'accélération constatée des révolutions qu'il subit, laissent présager d'une biomimétique à même de perdurer dans le temps. Cependant, la large palette disciplinaire de la biologie rend difficile sa compréhension globale. Cet élément pousse à mettre l'accent sur les sujets les plus proches ou les plus susceptibles de contribuer à la compréhension de la bio-inspiration en tant que méthode de conception.

2.4.1.2 Définitions relatives aux sciences du vivant

Tel qu'illustré par son historique des sciences du vivant, il existe un nombre incommensurable de sous-disciplines relatives aux sciences du vivant. Biologie moléculaire et Entomologie, par exemple, sont deux disciplines appartenant toutes deux à la biologie, sans qu'elles ne partagent, en apparence, beaucoup de points communs. C'est donc, en contrepartie, un ensemble de concepts relatifs aux sciences du vivant qu'il s'avère nécessaire d'explicitier, eu égard à leur potentielle relation avec la conception bio-inspirée.

Bio-assistance

La bio-assistance correspond à l'utilisation d'une partie ou de l'intégralité d'un organisme vivant, qu'il ait été génétiquement modifié ou non, afin qu'un résultat escompté relatif à une problématique anthropocentrée soit atteint.

Écomimétisme

L'écomimétisme désigne « l'étude des fonctionnements écosystémiques intéressants pour en reproduire les conditions et donc les avantages » [Durand et al., 2012].

La mise en application de son principe consistant à observer puis répliquer le fonctionnement d'un écosystème naturel dans un domaine particulier (e.g. l'agriculture offrant un éventail de possibilités allant de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique), aboutit au concept de la permaculture [Ricard, 2015].

Bio-ingénierie

La bio-ingénierie constitue le regroupement des deux sous-concepts que sont la biotechnologie et la biologie technologique.

- Biotechnologie

La biotechnologie est définie par l'OCDE comme « l'ensemble des technologies qui mettent à profit l'adaptation et la modification des organismes, processus, produits et systèmes biologiques présents dans la nature aux fins de la production de biens et services » [Van Beuzekom, 2001]. Cette définition intègre, de manière non exclusive les thèmes de l'ADN/ARN, les protéines et autres molécules, la culture et l'ingénierie des cellules

et des tissus, les techniques biotechnologiques des procédés, les Vecteurs de gènes et d'ARN, la bio-informatique et la nanobiotechnologie.

- Biologie Technologique

La biologie technologique, concept moins démocratisé que la biotechnologie se définit comme « la compréhension de la nature grâce au soutien de la technologie » [Nachtigall, 2002].

À la lecture de ces définitions, la bio-inspiration et tous ses concepts relatifs diffèrent entièrement de la bio-ingénierie. Le premier favorise l'émergence d'innovations grâce à l'utilisation de connaissances provenant des sciences du vivant, quand le second ambitionne l'opposé, en améliorant un ou plusieurs systèmes biologiques à renfort d'ingénierie. En considérant ces différences de perspectives, ces deux concepts ne peuvent être comparés ou perçus comme relatifs ; dès lors, la bio-ingénierie, et donc la biotechnologie, ne peut être considérée comme partie intégrante de la bio-inspiration (bien que les deux concepts puissent s'alimenter l'un l'autre).

Solutions Basées sur la Nature (Nature-Based Solutions)

Les solutions basées sur la Nature sont des exploitants de « [...] la puissance et la complexité de la nature pour faire de chaque défi environnemental, social et économique une opportunité d'innovation » [Eggermont et al., 2015].

À ce titre, les solutions générées sont inspirées, se servent ou copient la Nature. Les solutions basées sur la Nature constituent donc un concept englobant à la fois la bio-inspiration et la bio-ingénierie.

Synthèse quant aux définitions relatives aux Sciences du Vivant

Les définitions abordées ici permettent, tout comme celles relatives à l'ingénierie de la conception (voir section 2.3.1.3), d'apporter un éclairage sur le périmètre délimitant la conception bio-inspirée. La bio-inspiration s'inscrit dans les « Nature-Based Solutions », mais se différencie de la biotechnologie, elle peut mettre en jeu une démarche de bio-assistance et, quand elle s'inspire d'un écosystème, être assimilée à de l'écomimétisme. Les différentes définitions présentées ne mettent cependant pas en lumière un élément essentiel à ce type de démarche, la nature du lien entre systèmes vivants et techniques.

2.4.1.3 Relation d'évolution entre systèmes biologiques et systèmes techniques

Systèmes biologiques (au sens organique) et techniques n'ont de prime abord que peu en commun. Il est, en conséquence, pertinent de s'interroger sur le bien-fondé du mécanisme régissant la bio-inspiration : l'inspiration du vivant pour faire évoluer un produit, procédé, service ou business model fait-elle sens ? Afin d'y répondre, une mise en corrélation de l'évolution de ces deux types de systèmes est proposée.

Évolution des systèmes biologiques

Le concept d'évolution, tel qu'il a évolué depuis l'hypothèse formulée par Darwin [Darwin, 2001], s'appuie fortement sur le principe de biodiversité. La diversité biologique constitue le résultat du mécanisme d'évolution des systèmes vivants. En s'adaptant aux contraintes qui les entourent, les espèces peuplant notre planète ont adopté des variations biologiques quasiment incommensurables, et cependant articulées autour d'un très petit nombre (i.e. six) de briques élémentaires de cette diversité (i.e. C, H, O, N, P, S) [De Rosnay, 2014]. Afin de comprendre comment le vivant a réussi à développer les solutions dont la bio-inspiration tente d'en émuler les réussites, il semble donc nécessaire de comprendre comment fonctionne cette biodiversité.

- Diversité écosystémique

La biocénose, ensemble des organismes vivants, et le biotope, environnement dans lequel vivent les organismes précités, définissent un écosystème [Chevassus, 2005]. Les interactions de chacune des espèces peuvent être définies de manière fonctionnelle (e.g. production, consommation, décomposition), définissant des typologies de relation (i.e. alimentaires, de coopération, antagonistes) [Chevassus, 2005]. Une analyse détaillée de ces relations permet l'obtention de réseaux trophiques, modélisation fonctionnelle d'un écosystème [Mokross et al., 2014], cf. Figure 2.26.



Figure 2.26 Exemple de réseau trophique, cas du réseau trophique aviaire identifié dans la forêt primaire, une parcelle de 10 ha et la forêt secondaire dans l'Amazonie brésilienne.

- Diversité des espèces

La diversité spécifique d'un écosystème se mesure par le nombre d'espèces le caractérisant. Il est nécessaire, pour ce faire, que chacune de ces espèces soit catégorisée, définissant le concept des arbres taxonomiques, cf. Figure 2.27.

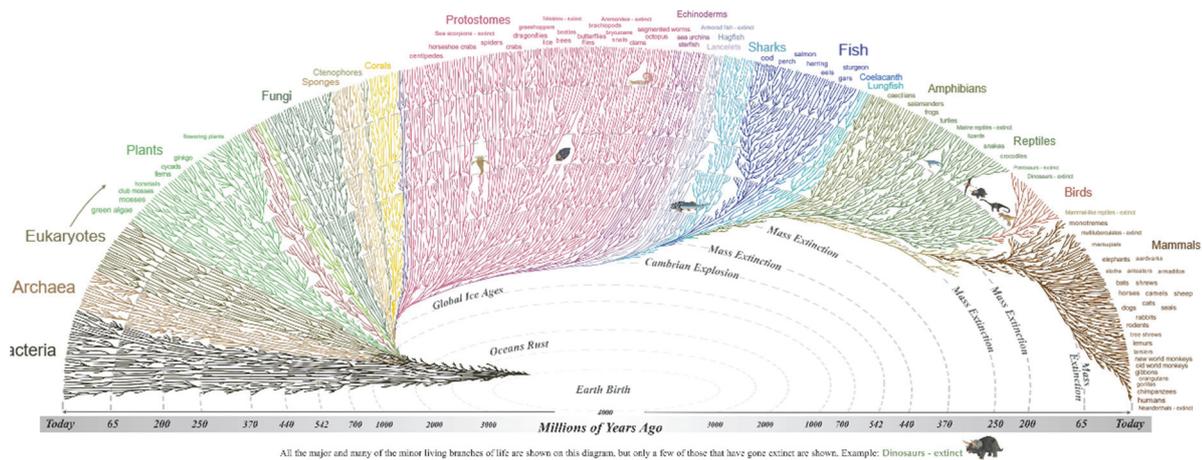


Figure 2.27 - Exemple de taxons ; cladogramme du règne du vivant [Eisenberg, 2008]

Une espèce se définit comme un groupe de populations naturelles au sein duquel les individus peuvent, réellement ou potentiellement, échanger du matériel génétique [Lecointre et al., 2009].

- Diversité génétique

La diversité des allèles (i.e. version d'un gène) au sein des individus composant une même espèce constitue la diversité génétique. La variation constatée au sein de ses allèles est impactée par deux facteurs [Chevassus, 2005] :

- Les mutations : processus constant favorisé par un environnement générant des variations dans le patrimoine héréditaire.
- La sexualité : processus générant un brassage du patrimoine génétique au sein d'une espèce en mélangeant des génotypes (ensemble des gènes d'un individu) différents.

- Sélection naturelle

La biodiversité, ici abordée selon le niveau des gènes, des populations et des environnements est régie par le mécanisme de sélection naturelle, pierre angulaire de l'évolution des espèces.

La sélection naturelle, dans son essence, fait état d'un tri des individus en fonction de leur capacité de survie ou de reproduction (la transmission du patrimoine génétique étant un mécanisme de survie non plus à l'échelle de l'individu, mais de l'espèce), indépendamment des raisons et/ou moyens ayant induit l'apparition de son aptitude particulière. L'introduction d'un trait biologique particulier par sélection naturelle, i.e. une évolution, au sein d'une population, il est nécessaire [Joron, 2000] que :

- Le trait biologique varie d'un individu à l'autre.
- La variation individuelle soit héréditable.
- La variation soit corrélée à celle du succès reproducteur ou de la probabilité de survie des individus.

La sélection naturelle liée à un trait particulier, telle que présentée ci-dessus, peut être catégorisée en fonction de la relation entre la valeur de ce trait (e.g. la taille des individus)

et la valeur sélective d'un phénotype⁹ particulier (e.g. espérance du nombre de descendants d'un individu possédant ce phénotype) [Joron, 2000] :

- Sélection directionnelle (pour des valeurs élevées – ou faibles – du caractère) : la relation est toujours positive – ou toujours négative.
- Sélection stabilisante : la relation passe par un maximum de telle sorte qu'une valeur intermédiaire du caractère maximise la valeur sélective.
- Sélection neutre (polymorphismes du caractère sélectivement neutre) : la relation est nulle.

La présente section aborde les différents mécanismes régissant les poussées sélectives. Il est nécessaire de garder à l'esprit que l'évolution met en jeu des sous-mécanismes complexes (e.g. exaptation¹⁰), que le niveau de granularité adopté par le document ne permet pas de détailler.

Évolution des systèmes techniques

Si les systèmes techniques disposent d'une théorie de l'évolution, les systèmes techniques ne sont pas en reste, TRIZ ayant cherché à les théoriser. Dans son essence, TRIZ repose sur trois axiomes, axiomes à la fois descriptifs et prescriptifs [Cavallucci et Rousselot, 2011].

Le premier de ces axiomes est celui des lois d'évolution. Ces « lois » établissent que l'évolution des systèmes techniques n'est pas aléatoire, mais suit certains schémas ou règles de développement au cours du temps. Trois types de lois coexistent, les lois statiques, cinématiques et dynamiques [Salamatov, 1996]. Les lois statiques, composées de trois lois (i.e. loi d'intégralité des parties d'un système technique, loi de conductivité énergétique et loi de coordination du rythme des parties), régissent l'organisation du système et définissent sa viabilité. Les lois cinématiques, composées de trois lois (i.e. loi d'augmentation du niveau d'idéalité, loi du développement inégal des parties et loi de la transition vers le super-système), guident l'évolution du système indépendamment de ses éléments internes, qu'ils soient techniques ou physiques. Les lois dynamiques, composées de deux lois (i.e. loi de la transition d'un macro-niveau vers un microniveau et loi de l'augmentation de la contrôlabilité et du dynamisme), intègrent les éléments internes du système à son évolution.

Le deuxième axiome, celui relatif aux contradictions, établit que les systèmes techniques évoluent en résolvant des contradictions. Les problèmes innovants partagent la particularité commune qu'ils ne semblent pas solvables. Souvent masquées ou formalisées de manière non adéquate [Altshuller, 1988], les contradictions ont été décrites, avec une

⁹ Les phénotypes étant l'ensemble des caractères observables d'un individu, par opposition au génotype qui caractérise son génome.

¹⁰ L'exaptation est une adaptation sélective où une caractéristique spécifique se voit attribuer, au cours de l'évolution, une fonction différente (e.g. les plumes chez les théropodes dont la fonction initiale, avant d'être mise à contribution dans le vol, était la thermorégulation Ostrom, J. H., "Archaeopteryx and the origin of flight," *Quarterly Review of Biology*, pp. 27-47, 1974.)

même compréhension par Cameron [2010] et Cavallucci [2014], comme pouvant être de trois types:

- Contradictions Administratives. Les Contradictions Administratives se produisent lorsqu'un concepteur connaît le quoi, mais est incapable de déterminer le comment. Dans cette situation le concepteur est dans un angle mort où la solution demeure au sein d'un grand nombre de variants.
- Contradictions Techniques. Les Contradictions Techniques (voir aussi la section 2.5.3.1) se produisent lorsqu'un concepteur a conscience du comment, mais que chaque action envisagée mène à une détérioration de l'une des parties du système (ex: un écran d'ordinateur portable plus lumineux et présentant une consommation moindre). Dans cette situation, le problème est plus clair et la solution est masquée par plusieurs variantes.
- Contradiction Physique. Les Contradictions Physiques se produisent lorsqu'un concepteur a conscience du comment, mais est incapable d'identifier les moyens à mettre en œuvre (ex: un plastique plus résistant, mais également biodégradable). Dans cette situation, le problème est pleinement exprimé avec une solution environnante.

Enfin, le troisième axiome de TRIZ stipule qu'un problème technique, dont la résolution permet l'évolution du système considéré, doit être résolu par la considération des contraintes et conditions spécifiques au problème (i.e. un problème ne peut être résolu en appliquant des principes généraux).

La considération de l'ensemble de ces axiomes fait que l'évolution d'un système technique suit une courbe en S régit par 5 phases, i.e. naissance, croissance, maturité, déclin, mort [Kucharavy et De Guio, 2011]. L'évolution peut ainsi, telle qu'illustrée par la Figure 2.28, se faire de manière incrémentale, en suivant les phases de la courbe en S, ou par rupture, en sautant sur une autre courbe en S [Mann, 1999].

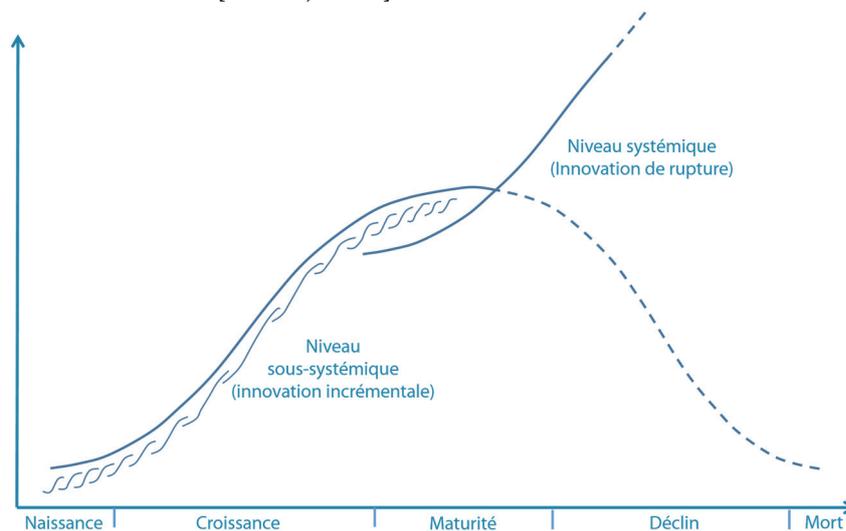


Figure 2.28 – Courbe en S et évolution(s) des systèmes techniques (synthétisé depuis [Mann, 1999] et [Kucharavy et De Guio, 2011])

Comparaison et synthèse quant à la relation d'évolution entre systèmes biologiques et systèmes techniques

L'évolution des systèmes vivants n'est pas déterministe, elle est régie par deux processus stochastiques (la mutation et la dérive génétique). Les individus d'une espèce, sujet à un environnement spécifique, sont régis par une force de maintien organique qui exclue les individus non optimaux de la postérité généalogique et par la diploïdie (si les individus étaient haploïdes¹¹, chaque altération génétique aurait des répercussions somatiques) [Lecointre et al., 2009].

Quelle que soit l'ampleur des changements ou de l'intensité des contraintes architecturales et fonctionnelles internes, le nombre de facteurs influant est tel, qu'une priorisation des forces stabilisatrices est impossible [Lecointre et al., 2009]. Le résultat de l'évolution ne peut donc en aucun cas être prévisible : une même pression de sélection appliquée sur des situations initiales différentes est susceptible de produire des solutions différentes pour un même problème donné. Cette particularité constitue la différence principale dans l'évolution des systèmes biologiques et techniques. Cette différence s'amenuise si, en lieu et place du darwinisme, l'évolution est abordée sous l'angle du lamarckisme (en se gardant bien de ne comparer que la simple hérédité des caractères innés et acquis et non l'intégralité des deux approches). Si chez Darwin, l'organe crée la fonction, c'est la thèse opposée, où la fonction crée l'organe, qui est soutenue chez Lamarck, excluant de ce fait la considération des changements fortuits intrinsèques à l'organisme. En cherchant à satisfaire leurs besoins, les organismes stimulent, ou sous-utilisent certains organes selon leur sollicitation par le milieu, ces organes se développeront ou régresseront. En conséquence, et de manière proche aux systèmes techniques, l'évolution présentée ici est induite par le milieu et centrée fonction.

Le Tableau 2.6 synthétisant les principes d'évolution tels que considérés par la théorie synthétique (Darwin) pour les systèmes biologiques et TRIZ pour les systèmes techniques, met en exergue un certain nombre de similitudes.

Tableau 2.6 - Comparaison des règles régissant, selon l'entendement contemporain, l'évolution des systèmes biologiques et technologiques. Avec la théorie synthétique de l'évolution servant de référence pour les systèmes biologiques et TRIZ servant de référence pour les systèmes techniques

Caractéristique	Systèmes biologiques	Systèmes techniques
Les systèmes tendent vers la perfection	✓	✓
En tendant vers cette perfection les systèmes se complexifient	✓	✓

¹¹ Les cellules haploïdes sont définies par leur noyau ne contenant qu'un seul génome, c'est-à-dire un seul échantillon de chaque chromosome.

Les évolutions apportant un avantage compétitif sont conservées sur des générations successives	✓	✓
L'environnement du système influe sur son évolution	✓	✓
L'évolution peut être anticipée, prévue, car sujette à un but	✗	✓

Bien qu'empiriques, les fondements théoriques prodigués par TRIZ apportent un éclairage des systèmes techniques difficilement réfutable. Avec le succès de la diffusion de TRIZ en guise de garantie et compte tenu des similitudes mises en avant entre des systèmes techniques et biologiques, il semble logique que leurs évolutions possèdent des schémas communs. Il est donc cohérent que l'évolution des systèmes techniques (moins perfectionnés) puisse tirer profit des enseignements issus de celle des systèmes biologiques, validant le concept même de la bio-inspiration. Opérer de la sorte rendrait possible, à grande échelle, la résolution potentielle de nombre de défis techniques, défis que la technologie semble peiner à relever de façon résiliente. La bio-inspiration vise à tirer profit du recul qu'a la nature dans la résolution des problèmes qu'elle a pu rencontrer puis résoudre par un mécanisme d'essais-erreurs. Ce recul n'a été possible que grâce à une ressource qui semble aujourd'hui nous faire défaut, le temps. Sans ce « temps » à disposition, il semble dès lors intéressant d'essayer de comprendre comment opère la nature, dans l'idée que nous pourrions nous affranchir de ce mécanisme d'essais-erreurs.

Bien que capable de s'affranchir du mécanisme d'essais-erreurs, la biomimétique ne peut s'exempter du mécanisme d'inspiration. C'est à ce titre que ce mécanisme charnière de la démarche doit être explicité.

2.4.1.4 Inspiration & Créativité

Les sources d'inspiration (ou déclencheurs ou stimuli) sont constamment utilisées en conception pour générer de nouvelles idées et résoudre des problèmes. Une source peut fonctionner de manière systématique, quand les concepteurs effectuent une recherche active d'inspiration, mais aussi de façon fortuite, quand sa recherche est inconsciente [Goldschmidt et Sever, 2011]. Gonçalves, Cardoso et Badke-Schaub [2014] ont essayé de comprendre quelle méthode de génération d'idées était favorisée par les concepteurs. Chulvi et al. [2013] ont étudié les différences d'impact sur la conception en utilisant différentes méthodologies. Sans qu'elles n'intègrent la bio-inspiration dans leur approche méthodologique, ces études démontrent à la fois l'importance de l'inspiration dans le processus de conception actuel, mais aussi le besoin méthodologique d'aide à l'inspiration, et donc d'une certaine manière de recherche d'analogie, telle que peut le permettre la biomimétique. Il convient dès lors d'aborder l'inspiration selon la perspective de sa nature, un concept cognitif.

De l'information à l'inspiration

L'activité de conception, telle que présentée dans la section 2.3.2, s'initie et est supportée par l'information. À travers chaque projet, les concepteurs sont amenés à faire

face à de nombreux stimuli externes, susceptibles de devenir des sources d'inspiration en influençant leurs activités. Information, stimuli et source d'inspiration peuvent être considérés comme distincts, voir Figure 2.29, ces derniers représentant différentes étapes d'un processus commun [Gonçalves, 2016].

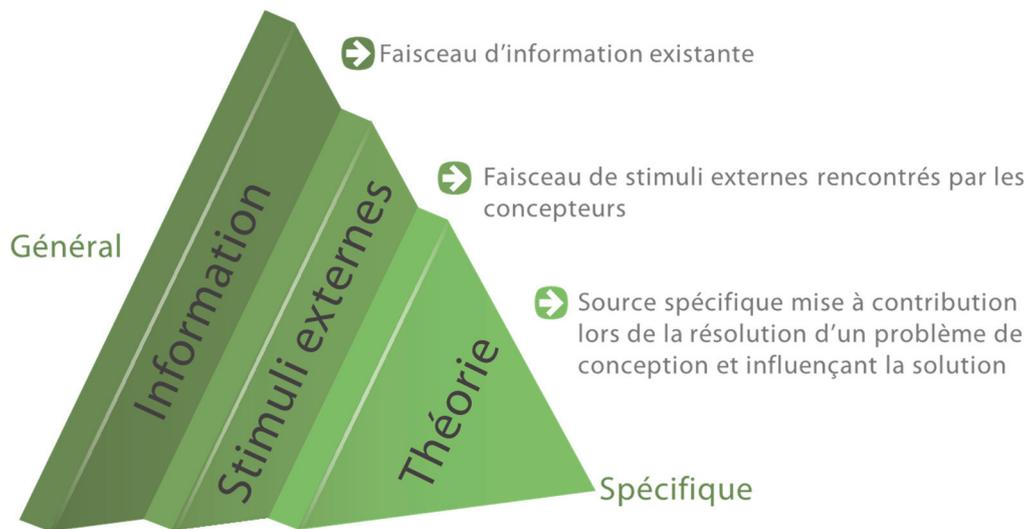


Figure 2.29 - Différenciation entre information, stimuli externes et sources d'inspiration, adapté de [Gonçalves, 2016]

L'information est ici définie comme de la donnée mise en contexte, ce qui, en terme général, réfère à des faits porteurs de sens [Court, 1995, Ahmed et al., 1999, Hicks et al., 2002, Howard, 2008]. L'information peut être de nature subjective ou objective selon le contexte spécifique. Une fois l'information comprise, traitée et agrégée, de la connaissance est créée [Ahmed et al., 1999]. Une fois interprétée, l'information devient un stimulus [Gonçalves, 2016].

Un stimulus est défini par le dictionnaire Oxford comme « un élément suscitant l'activité ou l'énergie de quelqu'un, ou quelque chose; une façon d'aiguillonner, d'inciter » [Oxford, 2016b]. Sarkar et Chakrabarti [2008] partent de ce postulat pour définir le stimulus comme un élément déclencheur, « un agent activant l'exploration et la recherche lors du processus de conception. » Un stimulus devient source d'inspiration une fois perçu, compris par le receveur (e.g. le concepteur) et intégré au modèle mental de génération d'idées et de concepts [Gonçalves, 2016].

Selon cette logique, une source d'inspiration est un stimulus incorporant de l'information spécifique et ayant un impact concret sur la création d'idée. Cette définition introduit une entité perçue de manière consciente et inconsciente, extraite (d'une mémoire individuelle ou collective), interprétée et (mentalement) transformée en matière pour l'inspiration. Il est attendu de ces entités qu'elles impactent, directement ou indirectement, la génération d'idées, influençant en bout de chaîne le résultat du processus de conception [Gonçalves, 2016]. Cette définition de l'inspiration décrit l'utilisation d'entités tangibles (ou d'artéfacts digitaux), mais aussi intangibles [Mougenot et al., 2008, Setchi et Bouchard, 2010].

Définition de l'inspiration

L'inspiration est communément définie comme étant « le processus d'être mentalement stimulé à faire ou ressentir quelque chose, notamment à faire quelque chose de créatif » [Oxford, 2016a]. L'inspiration a longtemps conservé une connotation religieuse, ancrée dans le concept des muses et du souffle divin.

« *Mouvements de l'âme dus à une influence divine* » Psautier Cambridge 17, 15 ds
T.-L. [CNRTL, 2016]

Cette définition a inévitablement évolué au cours des âges pour devenir le concept que nous connaissons aujourd'hui.

Au sein des sciences de la conception, l'inspiration a été définie comme le processus intégrant l'usage d'une entité, de quelque forme que ce soit, élicitant la formalisation de solution créative à un problème donné [Eckert et Stacey, 2000]. L'inspiration peut donc être puisée dans tous types d'artéfacts (e.g. œuvre d'art, documents, phénomènes naturels).

La faible traçabilité du mécanisme d'inspiration induit une absence de certitude quant à l'efficacité d'un stimulus donné dans la génération de résultats fructueux et/ou créatifs. L'usage du mécanisme d'inspiration au sein de l'activité de conception s'avère donc difficile à appréhender, car ne pouvant être supporté par un processus clairement défini [Gonçalves, 2016]. Être inspiré par différents types de stimuli inclut une sélection d'information qui peut être intuitive, systématique, ou même accidentelle [Goldschmidt et Sever, 2011]. Quand bien même les mécanismes de recherche de cette information seraient de nature systématique, l'objectif de la recherche ne peut être invariablement clairement défini [Ware, 2010]. Ainsi, l'inspiration en tant que processus peut impliquer de nombreux types de procédures de recherche [Gonçalves, 2016] :

- Recherche active avec objectif défini

Réfère à la recherche délibérée d'information particulière en vue d'un objectif particulier. La recherche par internet ou par des ouvrages d'une information spécifique en constitue un exemple. La recherche active avec objectif défini inclut aussi la visite intentionnelle de musée dans le but d'observer des œuvres d'art [Eckert et Stacey, 2000].

- Recherche active sans but précis

Réfère à la recherche active sans intention spécifique en vue de résoudre un problème donné. L'objectif de ce type de recherche est de mettre à jour et/ou d'étendre les connaissances d'une personne donnée sur un sujet spécifique [Wilson, 1997]. La recherche active sans but précis fait, par exemple, référence à une mise en place d'un processus de veille qu'un ingénieur peut établir pour se maintenir au courant des avancées technologiques de son domaine de pratique [Eckert et Stacey, 2000].

- Recherche passive

Aussi appelée sérendipité, elle réfère à une mise en contact aléatoire avec une information pertinente, qui sera sciemment incorporée au processus de conception [Keller et al., 2006]. Bien qu'il y ait une volonté consciente de résoudre un problème, le processus de recherche n'est pas délibéré et s'opère involontairement. Même quand une requête n'est

pas pleinement définie, notre cerveau reste alerte à la reconnaissance d'information susceptible d'être relative, par correspondance à une série de critères vaguement définis, au dit problème [Wilson, 1997, Ware, 2010].

- **Attention passive**

Réfère aux moments où une personne fait face à une information sans que cette dernière ne soit pas sciemment intégrée au contexte d'un problème existant. Dans cette situation, le besoin pressant de résoudre un problème n'est pas formalisé et la perception de l'influence potentielle d'un stimulus ne peut être établie [Wilson, 1997].

L'ensemble de ces mécanismes d'inspiration forment des vases communicants. Chaque concepteur demeure dans un état d'attention passive, qui peut rapidement évoluer, au besoin, dans un type de recherche d'information faisant appel à une posture plus alerte ou délibérée [Gonçalves, 2016].

Définition de la créativité

La créativité a été décrite comme l'un des comportements humains les plus complexes ; cette dernière repose en effet sur le développement d'expériences sociales, tout autant qu'éducationnelles [Runco et Sakamoto, 1999]. La créativité constitue un objet difforme, pouvant à la fois faire référence à un processus ou au résultat de ce processus [Rhodes, 1961]. Les travaux de recherche, s'ils sont nombreux, ont pour particularité de présenter peu de zones concomitantes entre eux [Sternberg et Lubart, 1999] compliquant de ce fait l'appréhension globale du sujet. Hennessey et Amabile [2010] qui ont conduit une synthèse des différentes directions de recherche sur le sujet, présentent la créativité comme un champ de recherche à la fragmentation croissante. À ce titre, de nombreuses définitions, liées à des interprétations propres, existent. Une définition consensuelle est cependant envisageable [Runco et Jaeger, 2012], nouveauté et pertinence constituant les deux briques conceptuelles élémentaires quasi constantes au sein de la littérature sur le sujet. Basée sur une analyse de la littérature (e.g., [Stein, 1953, Sternberg, 1988, Lubart, 1994, Amabile, 1996, Boden, 1996, Sarkar et Chakrabarti, 2011, Sawyer, 2011], Gonçalves [2016] propose une définition consensuelle qui présente la créativité comme faisant référence « à la génération d'un travail nouveau » (dans le sens d'être original, unique et surprenant) et « approprié » (eu égard au fait d'être utile, effectif et de répondre aux contraintes du problème).

Une troisième brique conceptuelle est parfois mise en avant par certains auteurs. Gero [1996] propose qu'en plus d'être originale (ou nouvelle) et appropriée, une idée doit être inattendue pour être créative. Ce parti pris est partagé par l'U.S. Patent Office qui défend l'élément de surprise comme nécessaire à la brevetabilité. Proche de l'élément de surprise, Howard, Culley et Dekoninck [2006] ainsi que Lopez-Mesa et Vial [2006] proposent la « non-évidence », comme troisième critère permettant de définir une idée créative.

Types de créativité

Plusieurs types de créativité coexistent et ces dernières peuvent être classifiées. À un premier niveau, il est possible de séparer Créativité et créativité. La créativité (avec un c minuscule) réfère aux actes créatifs du quotidien, où aucune valeur sociale ou pertinence

n'est requise (e.g., trouver un moyen alternatif de prendre des notes en cas de pénurie de papier) [Sawyer, 2011]. La Créativité (avec un c majuscule), telle que définie dans la section définition), répond au minimum au critère de nouveauté et de pertinence. Pour qu'une idée soit considérée comme Créative (avec un c majuscule), Hennessey et Amabile [2010] proposent que l'évènement ou l'artéfact induise un impact significatif.

Une subdivision de la Créativité en deux sous entités (i.e. Créativité P et Créativité H) a été introduite par Boden[1998, 1999, 2004]. La première prend en considération le processus dont est issu le résultat créatif, quand la seconde fait référence au degré de nouveauté du dit résultat. Les individus formulant des idées leur étant nouvelles à un niveau individuel sont considérés comme psychologiquement créatifs, ou faisant usage de la créativité P (P pour psychologique). Les individus produisant des idées nouvelles, non plus sur un plan individuel, mais vis-à-vis de la connaissance globale, sont considérés comme historiquement créatifs, ou faisant usage de la créativité H (H pour historique). La créativité P puise ses racines dans la théorie computationnelle de la créativité [Boden, 1999] et rapproche la créativité combinatoire et créativité exploratoire-transformationnelle. La créativité exploratoire-transformationnelle comprend la génération d'idées par l'exploration de l'espace conceptuel (créativité exploratoire) et/ou par changement ou suppression d'une ou plusieurs contraintes de l'espace conceptuel (créativité transformationnelle). L'espace conceptuel, tel que défini par Boden [1999], étant un ensemble de contraintes rendant possible la génération de structure s'inscrivant dans cet espace.

Une typologie plus poussée de la créativité est proposée par Heinze et al. [2007] qui catégorisent la créativité scientifique en fonction de son résultat (Tableau 2.7).

Tableau 2.7 - Catégorisation de la créativité scientifique, traduit d'Heinze et al. [2007]

Type de créativité liée à une recherche scientifique	Exemple(s)
1 Formulation de nouvelles idées ouvrant un cadre cognitif ou apportant des revendications théoriques sur un nouveau niveau de sophistication.	Théorie de la spécificité relative [Einstein(Physique)]
2 Découverte d'un nouveau phénomène empirique stimulant de nouvelles théorisations.	Biodiversité → Théorie de l'évolution [(Darwin (Biologie)]
3 Développement d'une nouvelle méthodologie, selon laquelle des problématiques théoriques peuvent être testées empiriquement.	Analyse factorielle → Théorie des aptitudes mentales [Spearman (Psychologie)]
4 Invention d'un nouvel instrument ouvrant de nouvelles perspectives de recherche.	Microscopie à effet tunnel → Nanotechnologie [Binnig and Rohrer (Physique)]
5 Néo-synthèse d'idées initialement éparses en lois générales théoriques permettant l'analyse de divers phénomènes au sein d'un cadre cognitif commun.	Théorie générale des systèmes [Bertalanffy, Ashby and Luhman (Biologie, Cybernétique, Sociologie)]

Synthèse quant à l'Inspiration et la Créativité

La créativité, au même titre que l'inspiration, permet d'aborder les mécanismes sous-jacents de la bio-inspiration. Il convient dès lors d'aussi aborder la créativité, non plus en tant que cognition (i.e. sous la forme d'un concept), mais sous la forme d'un processus (voir section 2.4.3), ceci ayant pour but de mieux appréhender les liens existants entre créativité et de bio-inspiration.

2.4.1.5 Conclusion sur le champ notionnel des Sciences du vivant

Ce début de XXI^e siècle est le théâtre d'une convergence des sciences du vivant avec différentes disciplines, que ces dernières soient nouvelles ou plus classiques (e.g. avec la Physique pour former la Biophysique). De nombreuses avancées sont faites dans le domaine de la chimie analytique et l'instrumentation physique, incluant : nouveaux capteurs, optiques, traceurs, instrumentation, traitement des signaux, réseaux, robotique, satellite, capacité de traitement, analyse, modélisation stockage, visualisation et simulation informatique [NRC, 2009]. Ces avancées technologiques permettent à des domaines comme la biochimie moléculaire, la biologie systémique ou encore les sciences des écosystèmes de produire un contenu théorique et expérimental inédit, positionnant les sciences du vivant à un point d'inflexion. Ces années de recherche ont généré une grande quantité d'informations quant au modèle complexe caractérisant le vivant (i.e. gènes, cellules, organismes et écosystèmes), ouvrant une porte vers une meilleure compréhension, à savoir comment ces briques du vivant tendent à s'agencer entre elles [NRC, 2009], alimentant potentiellement les démarches de conception bio-inspirées.

2.4.2 Approches théoriques des sciences du vivant

Tout un éventail de champs scientifiques et d'ingénierie, allant de la nanotechnologie et la chimie aux sciences socio-économiques, alimente l'approche bio-inspirée. Plusieurs tentatives ont été menées afin de décrire et de cataloguer les « technologies » et « recettes » du vivant, reliant solutions biomimétiques et problèmes d'ingénierie [Chiu et Shu, 2007a, Vincent, 2009, Von Gleich et al., 2010]. Dans l'effort fait pour classifier les méthodes d'innovations bio-inspirées, certains auteurs s'appuient sur le champ d'application (génie civil, science des matériaux, etc.) quand d'autres utilisent les fonctions techniques recherchées/obtenues (capteurs, locomotion, adhésion, etc.).

Von Gleich et al. distinguent trois pendants : (1) apprendre des résultats de l'évolution (i.e. principalement liés à l'expérience et la compréhension de la relation forme/fonction) ; (2) apprendre du processus d'évolution (i.e. optimisation des stratégies, algorithmes génétiques, intelligence collective, etc.) ; (3) apprendre des éléments de succès de l'évolution (principes directifs basés sur l'abstraction d'éléments généralisables du succès de l'évolution (énergie solaire, pression ambiante, structuration hiérarchique, chimie en milieu aqueux, etc.) [Von Gleich et al., 2010].

Quel que soit le pendant considéré, la recherche de modèles biologiques est inhérente à la démarche. À ce titre, une compréhension de ce que sont les systèmes vivants, a minima grossière, s'avère nécessaire.

2.4.2.1 Besoin de compréhension des systèmes biologiques pour la bio-inspiration

L'un des écueils récurrents de la bio-inspiration est le suivant : si dans l'ingénierie les problèmes et défis à résoudre sont généralement identifiés, il en va de même dans la biologie, la solution, fruit de l'évolution, est analysée sans compréhension certaine du défi initial. Au cours de l'évolution, les systèmes vivants ont répondu à une multitude de conditions limites dont nous ne pouvons, à priori, avoir conscience. Ces conditions dynamiques pourraient cependant être importantes pour expliquer le développement structural et schématique observé. Cette observation induit le fait que nous pourrions être bloqués si nous nous inspirions, avec un degré de flexibilité nul, d'une solution biologique et donc optimisée selon des conditions et des exigences inconnues [Fratzl, 2007].

La relation entre structures et fonctions semble, d'après les connaissances actuelles, être le cœur de l'approche bio-inspirée [Chakrabarti et al., 2005]. Assez souvent, les inventeurs n'ont pas besoin d'un dispositif spécifique, mais doivent imiter une fonction, le résultat d'une fonction, ou même parfois seulement, l'apparence d'une fonction. L'analyse structure/fonction couplée aux différents niveaux de biomimétique citée en section 2.2.5 (i.e. forme, processus, écosystème), ouvre les portes du développement de formes bio-inspirées et de l'émergence de matériaux bio-inspirés. Ce premier pendant alimente fondamentalement les deux autres et pose un certain nombre de questions : pourquoi et à quel point la structuration hiérarchique semble primordiale ? Comment la multifonctionnalité des structures peut être améliorée ? Comment les matériaux composites peuvent répondre à des besoins contradictoires (i.e. robustesse et flexibilité) ?

Dans l'esprit des pendants biomimétiques de Von Gleish [2010] (i.e. apprendre des résultats de l'évolution, du processus d'évolution, des éléments de succès de l'évolution), certains auteurs, principalement dans la littérature non évaluée par des pairs, différencient trois à cinq types de sources d'inspiration biologique. Zari [2007] distingue : forme, matériau, structure, processus et fonction, dans sa catégorisation principalement développée pour le domaine architectural. Il les imbrique dans trois niveaux hiérarchiques d'organisation : Organisme, Comportement et Écosystème. Biomimicry 3.8, institut fondé par Janine Benyus distingue trois « niveaux » de biomimétisme [Benyus, 1997]: (1) Forme (configuration et structure) ; (2) processus (comment un produit spécifique ou un résultat est obtenu) ; et (3) système (Comment s'intègre un produit dans son environnement ou écosystème).

2.4.2.2 Définition d'un système vivant

L'abstraction hiérarchique est intéressante notamment, car processus et système sont souvent confondus dû au manque de définition précise de l'objet d'analyse et de l'organisation en « poupées russes » des systèmes vivants. Par exemple le mot « système » peut faire référence à l'interaction de l'objet d'étude avec son environnement, mais peut aussi faire référence au réseau de processus au sein même de cet objet d'étude. Pour résoudre ce manque de clarté, nous suggérons de réserver le mot « système » comme référent de l'outil d'analyse lui-même et d'utiliser la théorie générale des systèmes [Von Bertalanffy, 1950] comme compromis pour la biologie et l'ingénierie. La première étape d'abstraction

serait d'appliquer un schéma simple qui conviendrait à chaque système ouvert, biologique ou non.

Structure

Comme pour tout système, les systèmes ouverts présentent nécessairement des intrants, des extrants, et des fonctions transitoires, voir Figure 2.30.

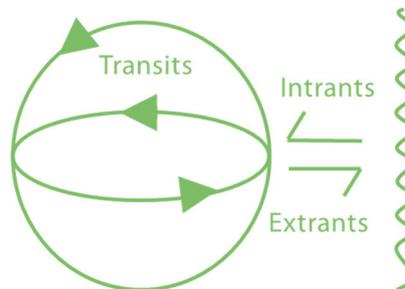


Figure 2.30 - Théorie Générale des Systèmes, Intrants, Extrants et Transits.

Tout système possède aussi une frontière qui peut être d'ordre physique ou symbolique, chaque élément du système pouvant alors être vu comme des sous-systèmes. L'ensemble des éléments du système ainsi que ceux de son environnement peuvent alors définir un super-système. Cette organisation schématique convient à tous les systèmes dynamiques, indépendamment du domaine relation du dit système. Il est possible de généraliser :

- Intrants : matière(s), énergie et information interagissant avec ou entrant dans les limites du système.
- Transits : Processus se déroulant dans le système, qui convertissent ou transforment les intrants provenant de l'environnement en produits utilisables soit par le système lui-même ou par son environnement.
- Extrants : Produits résultant des processus transitoires du système.

Énergie

Les systèmes vivants sont ouverts et non linéaires, ce sont des « structures dissipatives » très éloignées de l'équilibre thermodynamique. Comme démontré par Priogine [1997], ils sont capables de créer et de maintenir, au moins pendant un certain laps de temps, leur intégrité physique et physiologique. Ce maintien d'intégrité s'opère par un échange continu de matière, d'énergie et d'information avec leur environnement [Zari, 2007]. Ils sont orientés vers un objectif de façon à survivre et à se reproduire (ou de maintenir leur résilience à un niveau d'organisation supérieur comme au sein de leur écosystème), au moins au niveau de l'organisme. Un aspect très important des systèmes ouverts, est que certains extrants puissent, directement ou indirectement, aussi servir d'intrants (boucles de rétroaction). Ces boucles de rétroactions sont nécessaires pour induire les changements nécessaires à la survie, à la croissance ou à la reproduction. Ces boucles servent aussi à justifier le fait que la somme, ici le système, est plus que la simple addition des propriétés de ses éléments, ici les sous-systèmes. La particularité de chaque système ouvert (vivant ou non) est qu'il interagit avec d'autres systèmes (par interactions externes). Chaque niveau

dans la hiérarchie super-système, système et sous-systèmes, possède ses propres lois qui ne peuvent dériver des lois du niveau inférieur. Des flux continus de matière, d'énergie et d'information traversent et interagissent avec les frontières du système vivant (membrane cellulaire, peau, frontière écosystémique, structure sociale, etc.) et sont traités au sein du système (transits) au sein de structures, de processus et de réseaux de relations. De cette manière, les systèmes vivants créent de l'ordre (réduisant l'entropie) à l'intérieur et exportent leurs déchets (i.e. ils exportent leur entropie) et extrants dans leur super-système (i.e. leur environnement).

Autopoïèse

Dans les systèmes techniques, il est habituel que le produit (l'extrait) et le système de production (l'organe de transit) soient des aspects différents d'un processus global. Cela n'est pas le cas d'un système vivant : ils sont autopoïétiques. La théorie de l'autopoïèse a été inventée par Matarana et Varela [1991] dans les années 80. Le terme *autopoïèse* provient d'*auto-* (lui-même) et de *-poïèse* (création). La contribution majeure de cet article fut de clarifier le fait que les systèmes vivants consistent en un réseau de processus de production (ainsi que de transformation et de destruction) qui réalisent et régénèrent ce réseau. La vie est ainsi comprise comme ayant une dynamique, avec une organisation cyclique et auto-entretenu.

Cela a de nombreuses implications dès lors qu'il s'agit de comprendre un processus biologique et ses extrants relatifs. Ces interactions ne sont pas simples, car elles sont basées sur des réseaux complexes d'interdépendance, au sein même du système et entre le système et le super-système. Afin de résoudre un problème technologique, il est possible de considérer des sous-parties du complexe systémique comme des « boîtes noires », boîtes capables d'intégrer des intrants et de produire des extrants, sans que nous soyons en mesure d'en expliquer le processus causal. En revanche, s'il est possible d'expliquer le processus interne du système lié à la production de l'artéfact biologique d'intérêt, nous serions en mesure de l'appeler « boîte blanche ».

Un point important serait de définir si notre système d'intérêt est autopoïétique par lui-même ou si c'est le résultat d'un autre super-système qui est autopoïétique. Par exemple, un os spécifique peut presque être considéré comme proche d'un système fermé étant l'extrait d'un super-système « individuel » autopoïétique. Structure et forme des os dérivent d'un processus autopoïétique, dans le cas où elles définiraient le cœur d'une étude, il serait possible d'introduire ce processus dans une « boîte noire » conceptuelle, boîte noire qui ne serait investiguée uniquement si la démarche d'abstraction nous y conduit. Il est cependant important de souligner que cette boîte noire conceptuelle peut renfermer des processus essentiels dans l'explication de caractéristiques clés de certaines formes et structures. Au cours du processus de croissance par exemple, la hiérarchisation des configurations et des microstructures est créée de manière progressive, mais via un processus unique. La construction d'organes complexes se compose souvent de blocs de construction similaires, telles les fibrilles de collagène dans l'os qui sont des unités de quelques centaines de nanomètres de largeur pouvant être assemblées pour composer des os aux fonctions

extrêmement différentes. Un tel processus de croissance est partiellement autopoïétique, sensible à son environnement et peut mener à un produit final différent en fonction des changements d'environnement.

Relations

Maturana et Varela ont défini un système vivant comme une « structure organisée ». Ils définissent une « organisation » comme « une relation existante entre les composants d'un système afin que ce dernier appartienne à une catégorie particulière » [Maturana et Varela, 1991]. Un autre aspect important de la théorie de Santiago développée par Maturana et Varela [1991] est la cognition, équivalent de « système vivant » ou d' « acte ». Capra suggère de redéfinir les structures comme « des configurations matérielles des modes d'organisation d'un système » et de définir mode d'organisation comme « configuration ou relations qui déterminent les caractéristiques essentielles d'un système » [Capra, 1996]. De façon analogue à la définition de Gregory Bateson [1979], le processus de vie est pour Capra « l'activité impliquée dans la formalisation continue des modes d'organisation du système ».

Les deux auteurs font référence à des systèmes vivants et donc autopoïétiques. Lors d'un processus de bio-inspiration, le système analysé est, le plus souvent, non-autopoïétique, mais une représentation de ce qui est, ou était, un super-système autopoïétique (i.e cellule, organisme, groupe, société, écosystème).

2.4.2.3 Conclusion sur les approches théoriques des Sciences du Vivant

La description de la nature des systèmes vivants permet une mise en corrélation entre théorie générale des systèmes (section 2.4.2.2), autopoïèse (section 2.4.2.2) et terminologie TRIZ (section 2.3.2.12 et 2.4.1.3), le présent document s'appuiera sur les définitions suivantes :

- Système : Structure organisée au sein d'une frontière et impliquée dans un réseau de processus visant à atteindre un but particulier (objectif).
- Structure : Éléments organisés dans le temps et l'espace selon une configuration particulière (forme). Si le système est autopoïétique, la structure correspond à l'expression physique des modes d'organisation du système.
- Processus : Activité impliquée dans la poursuite des objectifs du système, au sein du système lui-même (transits) ou avec les éléments de son environnement. Si le système est autopoïétique, il définit l'activité impliquée dans la formalisation continue des modes d'organisation du système.
- Modèle d'organisation : configuration d'un réseau de relations qui détermine les caractéristiques essentielles d'un système au sein de ce dernier, ou implique d'autres éléments dans l'environnement du système.

Ces définitions qui décrivent les différents niveaux de modélisations biologiques (i.e. Structure, Processus et Modèle d'organisation) serviront de niveaux de références pour la biomimétique. L'explicitation de ces niveaux systémiques, si elle permet une meilleure lecture des niveaux d'inspiration, ne dépeint pas les mécanismes cognitifs supportant la

biomimétique et dont la corrélation permet de lever le voile sur les mécanismes sous-tendant la biomimétique.

2.4.3 Processus relatifs aux sciences du vivant

La vie s'articule autour d'un nombre de processus incommensurable œuvrant à différents niveaux (e.g. processus de reproduction, processus digestif, cycle de krebs, synthèse de l'ATP). Bien que ces processus revêtent un intérêt certain dans le cadre d'une démarche bio-inspirée (e.g. s'inspirer d'un processus biologique spécifique pour formaliser un business model circulaire), leur potentiel semble limité dès lors qu'est abordée la bio-inspiration sous l'angle méthodologique (présentant un métaniveau des démarches bio-inspirées). Un processus biologique particulier, celui de la créativité (selon son approche cognitive), constitue une constante de la biomimétique, car présent en filigrane de chaque projet bio-inspiré. Étant fondamental à la démarche, car lui étant inhérent, c'est ce processus créatif qui sera détaillé au sein de cette section.

2.4.3.1 Pensée créative

C'est à partir des années 50 que l'intérêt croissant pour le domaine scientifique que constitue la créativité, voir section 2.3.1.1, a poussé les chercheurs à analyser les pratiques favorisant la génération d'idées nouvelles [Carayannis, 2013]. Un certain nombre d'activités caractérisant le cheminement créatif sont identifiables. Labélisées de différentes manières (e.g. Préparation, Incubation, Illumination, Vérification [Wallas, 1926] ; Identification du problème, Préparation, Génération des réponses, validation des réponses [Amabile, 1983]; Désignation, Cadrage, Intervention, Retours [Nelson, 2003]), ces activités aboutissent à une structuration de la pensée créative, dès lors formalisable sous la forme de modèle de processus.

Mécanismes cognitifs de la créativité

Les opérations cognitives les plus mises à contribution lors du processus créatif sont les suivantes : Combinaison; Association Distance; Visualisation; Récupération; Cartographie Analogique et Abstraction [Smith et Ward, 2012]. Ce type d'opérations implique que le processus sous-jacent à la créativité peut être perçu comme un raisonnement par précedence, au sein duquel les expériences passées et les connaissances actuelles sont extraites et continuellement transformées en vue de générer de nouvelles connaissances [Oxman et Oxman, 1992]. De façon analogue, Sawyer [2011] souligne que le processus de génération de nouvelles idées implique Combinaison, Association, Analogies et métaphores.

Selon ces considérations, les mécanismes cognitifs relatifs à la créativité seraient intimement liés au raisonnement par analogie, la génération de nouvelles connaissances s'appuyant initialement sur des concepts familiers [Murphy, 2004]. Les idées nouvelles s'appuieraient donc, à ce titre, sur des connaissances existantes, menant au consensus selon lequel, toute idée nouvelle ne serait pas entièrement originale [Gonçalves, 2016]. Le raisonnement par analogie implique, en amont, l'identification d'une source. Cette source,

appartenant souvent à un domaine distant, est transférée à un environnement cible, ou problème considéré, et permet au dit problème considéré d'être appréhendé et abordé différemment [Gentner, 1983].

Raisonnement par analogie

Le raisonnement par analogie implique nombre de processus cognitifs. Bien que ces processus aient atteint un certain consensus, leur segmentation tend à différer : si Novick [1988] le décrit selon 5 étapes (i.e. Représentation du problème, Recherche, Récupération, Cartographie, Adaptation de la procédure, d'autres auteurs (e.g. Eastman [2001], Casakin [2004] approche ce processus selon 4 étapes : Identification des relations abstraites entre connaissances existantes et le problème ciblé ; Récupération de l'information du contexte source ; Cartographie des relations entre source d'analogie et problème cible ; Transfert et transformations relationnelles de la source analogue au sein de l'environnement cible.

Quelle que soit l'approche conceptuelle du raisonnement par analogie considérée, la prédominance de l'existence d'un problème central, ainsi que de la vocation du processus à le résoudre, constitue la constante principale [Jonassen, 2000]. Cette constatation pousse à élargir l'analyse de la pensée créative du raisonnement par analogie à la résolution de problème.

2.4.3.2 Processus de résolution de problème

Au niveau d'abstraction le plus élevé, la résolution de problème fait intervenir deux processus cognitifs distincts : la pensée convergente et la pensée divergente [Guilford, 1967]. La pensée divergente, processus visant à la génération d'idées alternatives, constitue un sujet d'étude central de la littérature de la créativité (e.g. [Guilford, 1967, Khandwalla, 1993, Runco, 1993]), au même titre que la pensée convergente, correspondant à l'analyse et la sélection d'une réponse appropriée à une question donnée, dont l'identification, l'analyse et la redéfinition du problème ont fait l'objet de nombreuses études (e.g. [Smilansky, 1984, Runco, 1994, Mumford et al., 1996, Jay et Perkins, 1997, Reiter-Palmon et al., 1997]). L'ensemble de ces travaux a permis le développement de modèles de processus visant à décrire le processus de résolution de problèmes, tel que dépeint dans la Figure 2.31 :

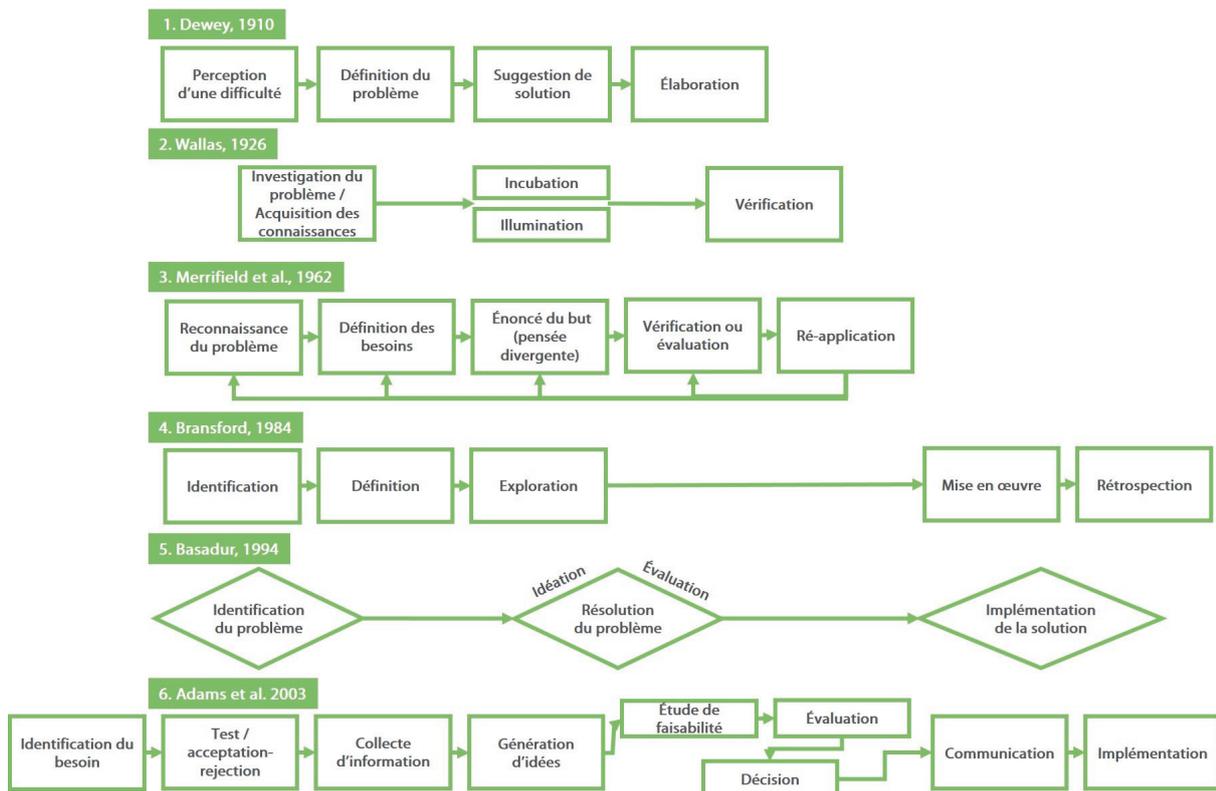


Figure 2.31 - Synthèse non exhaustive des modèles de processus de résolutions de problèmes, basé sur [Mumford et al., 1994] (1, 2, 3, 5) (cité dans [Schoefer, 2015]) et [Bransford et Stein, 1984] (4), Bransford, Isaken, Bardach et Adams

Dans leurs travaux s'appuyant sur une revue de la littérature et visant à formaliser une approche holistique des processus de résolution de problème, Massey & Wallace [1996] proposent un modèle en 5 étapes : Identification du problème, Définition du problème, Génération des alternatives, Sélection de la solution, Implémentation de la solution et essais.

2.4.3.3 Conclusion sur les processus créatifs

Telle que dépeinte au sein de cette section, la résolution de problème est centrale à la créativité. Cette résolution de problème a la particularité de s'appuyer sur un raisonnement par analogie, raisonnement aussi mis en œuvre dans les démarches capitalisant sur l'inspiration, et donc, pertinente pour la bio-inspiration. L'analyse du processus de résolution de problème offre donc une grille de lecture à même d'être complémentaire à celle obtenue par l'analyse des modèles de processus de conception.

2.4.4 Conclusion sur les sciences du vivant

Les sciences du vivant constituent un champ de recherche à la complexité en constante croissante depuis sa formalisation. Le domaine présente actuellement un foisonnement de connaissances ; à la fois en horizontal (variétés des sujets d'étude), mais aussi vertical (niveau de détail de l'information à disposition). La compréhension actuelle des systèmes vivants permet de comprendre leur différence avec les systèmes techniques (e.g. leur particularité autopoïétique). Leurs différences constituent une barrière qu'il est

nécessaire de surmonter lors de l'analogie en considérant différents degrés d'abstraction. C'est cette compréhension plus fine du vivant, couplée à une recherche de transdisciplinarité qui a rendu possible l'émergence contemporaine de la conception bio-inspirée. Bien que différent, et ce même dans leur mécanisme d'évolution, il n'en reste pas moins que des tendances communes fortes illustrent l'intérêt de la démarche bio-inspirée.

Ce phénomène d'émergence de la conception bio-inspirée, accentué par la montée en puissance de la formalisation des processus cognitifs relatifs à l'inspiration et à la créativité (processus mis en œuvre dans le cadre des démarches de bio-inspiration), permet une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu et donc d'une facilitation de mise en place de ce type de démarche.

2.5 BIOMIMÉTIQUE

La biomimétique, le pendant méthodologique de la mise en œuvre de la bio-inspiration, combine l'ingénierie de conception dans l'essence de sa démarche aux sciences du vivant en utilisant ces dernières comme source d'inspiration. Suite à son introduction conceptuelle (voir section 2.2) et l'exploration des contributions de l'ingénierie (voir section 2.3) et de la biologie (voir section 2.4), la présente section investigate la biomimétique. Pour se faire, et afin de poursuivre l'analyse réalisée au sujet des deux disciplines alimentant le concept, l'approfondissement de la biomimétique a été articulé selon trois points, tel qu'illustré par la Figure 2.32. Les approches théoriques (section 2.5.1) investiguent séquentiellement les deux versants du sujet existant à ce jour (i.e. approche *solution-based* et *problem-driven*) ; les processus (section 2.5.2) explorent les modèles de processus décrits dans la littérature permettant de guider l'implémentation de ce type et démarche ; les outils (section 2.5.3) rassemblent les méthodes opérationnelles ayant vu le jour et facilitant la mise en œuvre des processus précités.

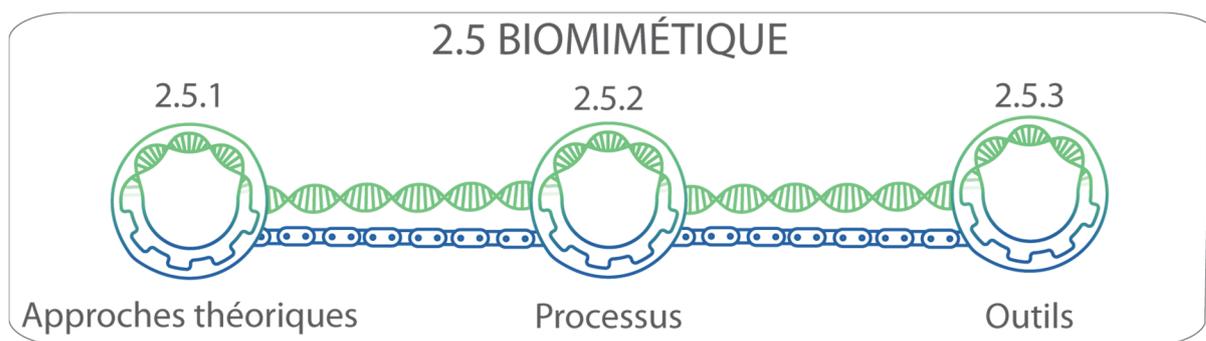


Figure 2.32 - Structure de la section relative à la biomimétique

2.5.1 Approches théoriques de la biomimétique

De manière générale, la bio-inspiration peut être menée soit selon une approche dite *solution-based* (identifiée dans la littérature comme *solution-based* [Badarnah et Kadri, 2015], *solution-driven* [Vattam et al., 2007, Helms et al., 2009], *biology to design* [Baumeister et al., 2013], *biology push* [ISO/TC266, 2015b], *bottom-up* [Speck et al., 2006], *biomimetics by induction* [Gebeshuber et Drack, 2008]) ou *problem-driven* (identifiée dans la littérature comme *problem-based* [Badarnah et Kadri, 2015], *problem-driven* [Vattam et al., 2007,

Helms et al., 2009], challenge to biology [Baumeister et al., 2013], technology pull [ISO/TC266, 2015b], top down [Speck et al., 2006], biomimetics by analogy [Gebeshuber et Drack, 2008]). Ces deux approches, *solution-based* et *problem-driven* présentent une disparité dans leur point de départ et leurs caractéristiques de processus de conception [Goel et al., 2014].

2.5.1.1 Solution-based

L'approche *solution-based* décrit le processus de développement biomimétique au sein duquel la connaissance relative à un système biologique d'intérêt est le point de départ de la conception technologique. Ce système biologique réalise une fonction possédant des propriétés spécifiques présentant un avantage potentiel si émulé dans le domaine technologique. Il est nécessaire que le fonctionnement du système biologique soit analysé en détail et finement compris pour que les principes sous-jacents responsables de la fonction identifiée puissent être extraits afin de traiter une problématique ou un domaine technologique. La connaissance relative à ces principes est généralement liée à une démarche de recherche fondamentale. L'approche *solution-based* se rapproche, de par son essence, d'une démarche de transfert de technologie, tel qu'il peut être opéré d'une organisation scientifique à une organisation industrielle (e.g. approche mise en œuvre par les bureaux de transfert technologique (Technology Transfer Office, ou TTO): Découverte scientifique, Divulgence d'invention, Évaluation de la brevetabilité, Dépôt de brevet, Marketing technologique, Négociation d'octroi de licence, Concession de licence) [Siegel et al., 2004].

Pour que la circulation de connaissances soit effective, l'implication de deux entités est nécessaire; la première, à l'origine de la création du savoir (e.g. une découverte scientifique) ainsi qu'à l'initiation du partage, la seconde à l'initiative de l'intégration (i.e. acquisition et application) [Majchrzak et al., 2004]. Rapportée à un environnement industriel, l'initiation d'une approche *solution-based* par une entité industrielle permet d'envisager deux scénarios. Le premier serait celui d'une entreprise internalisant un principe de solution issue du vivant identifié, grâce à un travail de recherche fondamentale, par une autre structure. Dans ce scénario, l'entreprise prise en considération n'intègre, en définitive, aucune composante liée aux sciences du vivant, l'intégration de connaissance s'effectuant en aval de l'analyse et de l'extraction des connaissances biologiques pour les adapter à un contexte industriel. Un exemple concret de ce scénario serait celui de l'entreprise Sharklet™ qui s'est appuyé sur plus de 30 années de recherche existante sur la topographie de la peau des requins et son effet de limitation des frottements pour développer son film réduisant le développement de la flore microbienne. Dans cet exemple, l'organisme d'inspiration, la fonction d'intérêt et les caractéristiques menant à cette fonction sont déjà formalisés. Bien que le produit final soit indiscutablement bio-inspiré, son aspect biomimétique est discutable : l'approche *solution-based* repose sur les structures de recherche successives qui ont établi les liens entre observation d'une propriété et analyse de l'organisme ayant mené à la caractérisation de la fonction.

Un deuxième scénario, ne prenant en compte qu'une entité cette fois, serait celui d'une entreprise qui réaliserait des travaux de recherche fondamentale sur des organismes biologiques, sans lien apparent avec son domaine d'activité où l'une de ses problématiques en cours, dans l'espoir qu'une découverte issue de ces travaux s'avère pertinente ultérieurement. L'aspect hautement hypothétique d'une telle démarche semble peu compatible avec l'environnement et les pressions actuelles exercées sur une organisation industrielle.

En conclusion, il n'y a pas à proprement parler de produits biomimétiques issus d'une approche *solution-based* puisant leur origine dans l'industrie.

2.5.1.2 Problem-driven

En parallèle de l'approche *solution-based*, l'approche *problem-driven* cherche à résoudre un problème d'ordre pratique, avec comme point de départ de son processus, un problème identifié appartenant au domaine technologique [Goel et al., 2014, ISO/TC266, 2015b]. Des fonctions nouvelles ou plus performantes sont appliquées par l'identification d'un système biologique réalisant une certaine fonction ou mécanisme, puis par l'abstraction et le transfert des principes sous-jacents au domaine technologique. L'approche *problem-driven* peut dès lors être rapprochée d'une démarche de résolution de problème.

L'approche *problem-driven* peut se formaliser selon différentes voies ou méthodologies, chacune présentant des spécificités diverses.

Méthodologie "Design Spiral"

La Méthodologie Design Spiral constitue la trame méthodologique globale réunissant l'ensemble des outils développés par Biomimicry 3.8. Son idée directrice en tant qu'approche est de se concentrer sur la philosophie qu'elle dispense lors de son utilisation ; la méthodologie Design Spiral se veut avant tout un outil de promotion du biomimétisme, mettant en avant les valeurs soutenables de la pratique et des avantages qui peuvent lui être liés.

La démarche est scindée en trois étapes majeures : *ethos*, *(re)connection* et *emulate* [Baumeister et al., 2013] :

- L'*ethos* définit l'essence de l'éthique, de l'intention et de la philosophie latente du pourquoi du biomimétisme. L'étape est centrée autour de 6 principes vitaux permettant une mesure ainsi qu'une validation de la démarche entreprise.
- L'étape *(re)connect* est celle où le praticien se doit d'être « connecté » à la nature, en prenant du recul sur sa condition et en la replaçant dans une perspective d'interdépendance avec les autres espèces environnantes.
- L'étape *emulate* définie par quatre sous-étapes (*Scoping, Discovering, Creating, Evaluating*) correspond à l'étape permettant la transposition d'une solution issue du vivant à un problème technique.

Méthodologie BioTRIZ

Basé sur la « Théorie de résolution de problèmes inventifs » d'Altshuller, le groupe de travail sur le biomimétisme de l'Université de Bath (créé en 2001) a développé, en 2008, une approche méthodologique appelée BioTRIZ.

Une analyse TRIZ des solutions prodiguées par la nature a montré une profonde différence entre la “conception naturelle” et la “conception technique” : là où la technologie résout les problèmes principalement par l'usage d'énergie, la nature utilise l'information et la structure de la matière [Vincent et al., 2006]. L'idée de la démarche BioTRIZ est de créer un parallèle entre systèmes techniques et systèmes biologiques par l'intermédiaire d'outils issus de TRIZ [Altshuller, 1996], comme, entre autres, les principes inventifs [Altshuller, 1997].

L'approche est composée de deux démarches TRIZ distinctes. La première s'efforce d'appréhender le problème technique rencontré et de le résoudre au sein du domaine technologique. En cas d'échec, la seconde démarche intervient et se concentre sur l'implémentation d'une solution inspirée du vivant afin de résoudre le problème technique identifié.

Modélisation fonctionnelle

Tinsley et al. [2007] ont mis en avant qu'une manière efficace de convertir de la connaissance biologique, et particulièrement des solutions de conception, en contribution utile pour l'ingénierie de problème est de les modéliser par l'intermédiaire d'un langage fonctionnel. À partir de cet élément Nagel et al. [2010a] ont proposé des directives générales permettant la représentation fonctionnelle d'un système biologique, intégrant sa catégorie d'inspiration et son échelle.

Les modèles fonctionnels biologiques sont sujets à être implémentés sous forme de base de données, les concepteurs seraient alors en mesure de rechercher et identifier des modèles biologiques analogues à leurs systèmes issus de l'ingénierie. Cette approche s'emploie à mettre en lumière les modèles biologiques potentiellement pertinents, que des concepteurs sans ou avec peu de connaissance en biologie seraient capables d'identifier sans autre support. Chakrabarti et al. [2005] ont développé IDEA-INSPIRE, un logiciel utilisant le concept SAPPPhIRE, basé sur l'ontologie FBS (voir section 2.3.2.8), afin d'identifier différents niveaux d'abstraction représentant des données biologiques. Avec une approche similaire, Vattam et al. [2010, 2011a] ont développé un système de connaissance pour la conception assistée par ordinateur appelée DANE (Design by Analogy to Nature Engine). Ces deux approches sont conçues autour de l'élaboration de bases de données dédiées et sont donc dépendantes de l'ajout de représentations, qu'elles soient liées à l'ingénierie ou la biologie, nécessitant dès lors, temps et effort. Le niveau de détail requis pour analyser à la fois des systèmes issus de l'ingénierie et de la biologie s'avère constituer une charge de travail conséquente. La richesse de l'information quant aux organismes biologiques, notamment celle relative aux espèces encore inconnues suggère que ces bases de données ne soient en mesure de ne contenir qu'une portion congrue des connaissances envisageables.

Approche du langage naturel

Une approche alternative s'appuyant sur une analyse lexicale a été proposée par Vakali et al. [2007]. Le but recherché est d'associer sémantiquement et statistiquement des fonctions ou processus désirés et issus de l'ingénierie à des mots clés dans la littérature biologique librement accessible via l'usage d'algorithmes de recherche. Chiu et Shu [2007a] ont par la suite incorporé la base de données lexicale Wordnet, permettant de distinguer homonyme et d'intégrer un arbre troponymique, aux travaux précédemment cités afin de réduire le montant élevé d'occurrences non pertinentes. Des itérations successives basées sur ces travaux ont rendu possible l'obtention de mots clés cohérents avec, parfois, plus d'occurrences qu'avec le mot clé équivalent issu de l'ingénierie seule [Chiu et Shu, 2007a, Cheong et al., 2011]. À la vue du niveau de performance présentée, de telles approches nécessitent, et ce même dans l'hypothèse de recherche semi-automatique, un filtrage manuel des résultats, activité ambitieuse et potentiellement chronophage pour qui ne possède pas de connaissance en biologie.

2.5.1.3 Conclusion sur les approches et méthodologies de conception bio-inspirée

Jacobs et al. [2014] ont analysé l'ampleur de la biomimétique en recensant les cas de conception biomimétique mis sur un marché par des industriels. L'étude a abouti à la constitution d'une base de données de 380 cas de conception bio-inspirée (dont 66 ont été analysés vis-à-vis de leur processus de conception). De manière intéressante, la base de données fait état de 62% (41 sur 66) de cas issus d'une démarche *solution-based*, alors que seuls 38% (25 sur 66) sont le résultat d'une approche *problem-driven*. Ceci souligne, tout du moins à ce jour, que le processus de conception biomimétique suit principalement une approche *solution-based*, approche reposant sur des individus au fait de cette démarche ou sur la sérendipité [Von Gleich et al., 2010, Jacobs et al., 2014]; limitant de ce fait le caractère systématique et donc l'ampleur de la bio-inspiration [Jacobs et al., 2014]. La bio-inspiration semble donc s'inscrire majoritairement, à ce jour, dans une démarche où recherche fondamentale serait à la charge de laboratoire de recherche en biologie et recherche appliquée à la charge des structures industrielles.

Considération faite des différences intrinsèques entre les approches *problem-driven* et *solution-based*, leur exploration simultanée serait susceptible de freiner leur compréhension profonde. L'approche *problem-driven* semble de prime abord plus appropriée pour être initiée par une entreprise (i.e. le processus démarre dans le domaine technique) tout en étant moins représenté au sein des produits biomimétiques. Cette approche spécifique semble donc renfermer un potentiel plus élevé dans un cadre industriel, que l'approche *solution-based*. L'objectif de recherche étant de faciliter la diffusion de la biomimétique dans les sphères industrielles, les présents travaux se concentreront sur l'approche *problem-driven* de la biomimétique, en explorant séquentiellement modèles de processus et outils la composant.

2.5.2 Processus biomimétiques

Le développement d'une approche générale de la biomimétique a déjà été abordé [Vincent et al., 2006], mais l'éventualité de définir un processus applicable générique reste controversée [ISO/TC266, 2015b]. Des recherches significatives ont cependant été menées afin de faciliter le transfert systématique de connaissances biologiques vers la technologie, de formaliser des méthodes, de générer des techniques et de créer des outils pour faciliter le processus de conception biomimétique [Nagel et al., 2010a]. Les deux approches de la bio-inspiration étant différentes, comme présentées dans les sections 2.5.1.1 et 2.5.1.2, autant dans leurs spécificités que leur proposition, elles sont menées selon différents types de processus de conception. De par le contexte des travaux présenté ici (visant à facilitation de la dissémination de l'approche bio-inspirée dans le secteur industriel) et son potentiel plus grand, compte tenu des connaissances biologiques non encore exploitées, le choix a été fait de se concentrer sur les modèles de processus *problem-driven*.

2.5.2.1 The procedural model of doing bionics – Lindemann and Gramann

Lindemann and Gramann [2004] ont investigué 6 cas d'étude réalisés avec l'aide de leurs étudiants, afin d'en extraire une approche bio-inspirée. Ces cas d'étude abordent à la fois l'approche *problem-driven*, sous l'angle de l'amélioration d'un produit existant, et l'approche *solution-based*, par l'extrapolation et l'exploration de nouvelles possibilités de transfert d'un phénomène naturel identifié. Un modèle de procédure a été extrait de l'analyse des cas d'étude. Sous l'essor de l'attrait pour la bio-inspiration, un grand nombre d'innovations ont été faussement étiquetées comme bionique. L'objectif premier du modèle présenté est de limiter la croissance de ces innovations mal étiquetées. La seconde contribution vise à rendre l'implémentation d'une démarche de conception bio-inspirée accessible à un plus grand nombre de concepteurs.

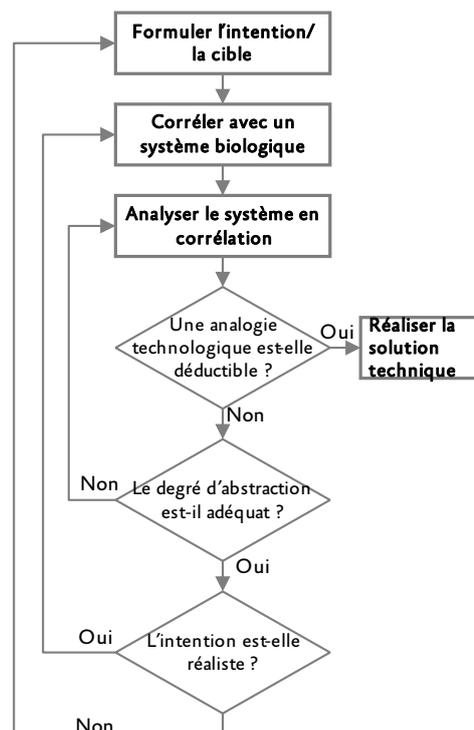


Figure 2.33 – Procedural model of doing bionics in the field of product development (adapté de [Lindemann et Gramann, 2004])

Il se présente sous la forme d'un processus en 5 étapes (formulation de l'intention/de l'objectif ; mise en corrélation avec des systèmes biologiques ; analyse des systèmes corrélés ; déduction d'une analogie technologique ; réalisation de la solution technique). La 4e étape du modèle, i.e. déduction d'une analogie technologique, est le point de départ d'un arbre de décision à 3 niveaux permettant aux concepteurs de réinitialiser leur procédure à l'étape appropriée si nécessaire.

Le modèle contribue à mettre en avant un processus concis et facilement compréhensible par les concepteurs désireux de mettre en place une démarche bio-inspirée. Cette accessibilité apparente est néanmoins empreinte de confusion potentielle, le processus ne faisant état d'aucune indication quant à ses intrants et extrants ou de la démarche supposée des concepteurs en vue de satisfaire chacune des étapes mentionnées, nécessaire à l'implémentation adéquate d'une démarche bio-inspirée respectant le modèle procédural.

Ce modèle de procédure de l'implémentation de la bionique constitue un processus descriptif, centré activités, orienté problème et empruntant une approche analytique (tel qu'illustré par la Figure 2.34). Ce modèle de processus, en favorisant la sélection du premier transfert pertinent au détriment du plus approprié, priorise la vitesse d'implémentation.

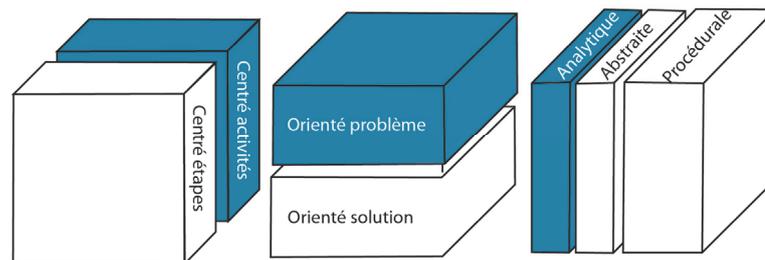


Figure 2.34 – Le procedural model selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.2 Processus Idea-Inspire – Chakrabarti *et al.*

Chakrabarti *et al.* [2005] et Sarkar *et al.* [2016] ont proposé un modèle de processus visant à ce que l'inspiration à la fois du monde naturel, mais aussi du monde artificiel puisse être utilisé systématiquement afin d'aider les concepteurs à développer de nouveau produit et/ou d'idée analogiques pour la résolution de problèmes de conception. Ce processus, dont le focus principal est la structuration de l'information au sein d'une base de données de systèmes naturels et artificiels, est articulé autour de l'ontologie Function-Behavior-Structure (FBS), décrite en section 2.3.2.8.

Base de données et modèle de processus sont tous deux implémentés au sein d'un logiciel, intitulé « Idea Inspire », permettant l'automatisation de la recherche analogique d'idée depuis la base de données en vue de résoudre un problème donné.



Figure 2.35 – Processus Idea-Inspire (traduit de [Chakrabarti et al., 2005])

Le modèle de processus Idea-Inspire, illustré par la Figure 2.35, est initié par la description du problème. Cette description est réalisée sous la forme d'un triplet d'adverbes/verbe-nom-adjectif (e.g. V = consommer, N = solide, A = lentement) pouvant lui-même être décomposé en sous-problèmes (e.g. (V = prendre, N = solide, A = rapidement) + (N = Avaler, N = solide, A = lentement)). Modélisées ainsi, les « actions » peuvent être utilisées comme intrant au logiciel Idea-Inspire qui effectue la recherche selon trois types d'analogies : solutions exactes (correspondance parfaite, potentielle solution au problème), solutions partielles (correspondance partielle, potentielle partie de solution au problème) et solution pour l'inspiration (correspondance parfaite ou partielle, solution servant de déclencheur à l'inspiration). Ces occurrences sont obtenues séquentiellement par traduction du triplet en descriptions analogiques (intégrant un système de pondération entre correspondance parfaite, synonymie et absence de correspondance pour chacun des composants du triplet) et par caractéristiques similaires (en recherchant d'autres composants d'un modèle SAPPhIRE aboutissant à une action similaire).

Formalisé ainsi, le modèle de processus Idea-Inspire est un processus prescriptif, centré activités, orienté solution et mettant en œuvre une approche procédurale (tel qu'illustré par la Figure 2.38).

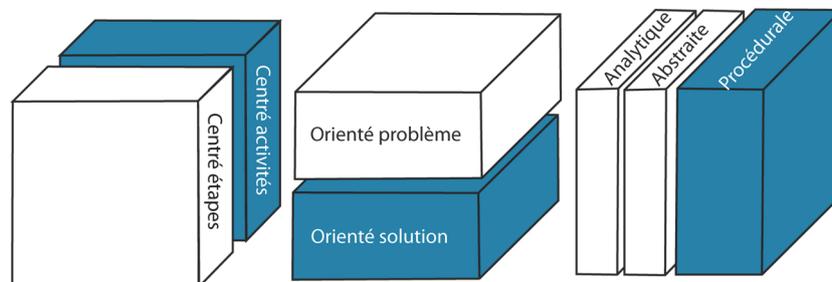
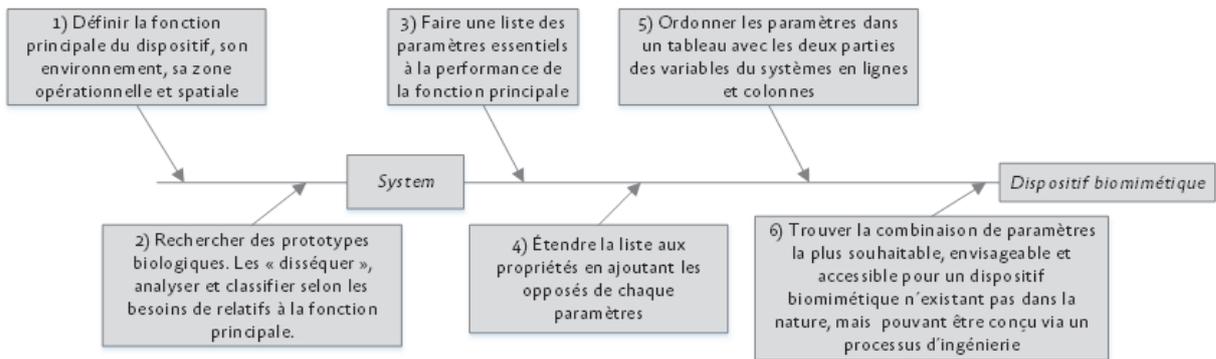


Figure 2.36 – Le processus Idea-Inspire selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.3 Approche biomimétique de l'ingénierie – Bogatyrev and Vincent

Dans un effort de mettre en avant le besoin d'une bio-inspiration basée sur une analyse fonctionnelle-morphologique du monde biologique, Bogatyrev et Vincent [2008] suggèrent un modèle de conception bio-inspirée en six étapes, cf. Figure 2.37.

Figure 2.37 – The biomimetic approach to engineering, illustration à partir de [Bogatyrev et



Vincent, 2008]

Ainsi détaillé, le modèle vise à l'implémentation d'une biomimétique ayant pour objectif d'explorer de nouvelles opportunités dans le domaine de l'ingénierie en se focalisant sur la façon de mettre en adéquation un besoin technologique avec une fonction clé issue de modèles biologiques. Cette approche biomimétique de l'ingénierie [Bogatyrev et Vincent, 2008] constitue un modèle de processus prescriptif centré activités, orienté solution et empruntant une approche abstraite (tel qu'illustré par la Figure 2.38).

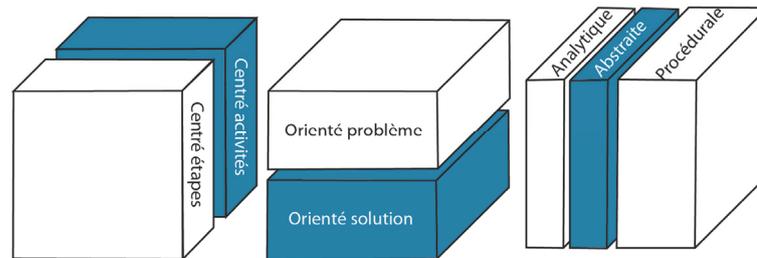


Figure 2.38 – L'approche biomimétique de l'ingénierie selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.4 Top-down process – Speck & Speck

À partir des travaux de Milwich et al. [2006], Speck et Speck [2008] ont proposé le modèle de processus biomimétique « Top-Down », tel qu'illustré par la Figure 2.39.

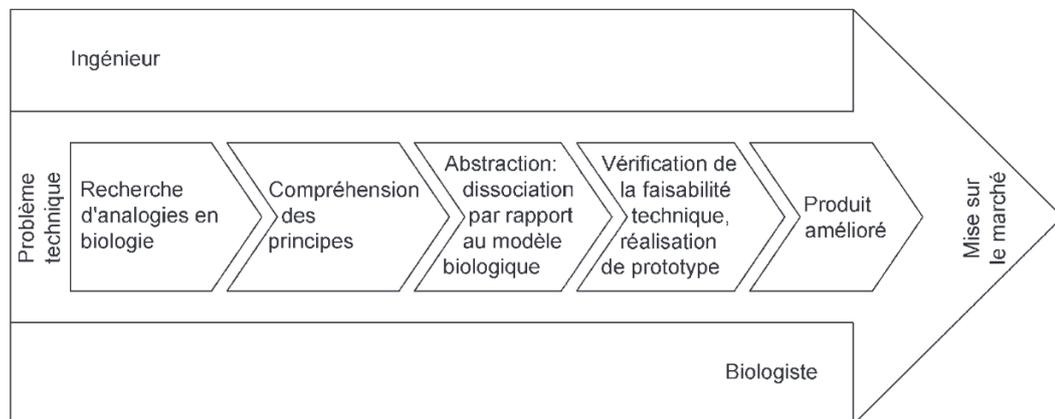


Figure 2.39 - Processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique (technology pull) [ISO/TC266, 2015b]

Ce modèle vise à formaliser le processus de développement depuis un « template » biologique jusqu'à l'élaboration d'un produit biomimétique commercialisable.

Ce modèle biomimétique « Top-Down » est un processus prescriptif, centré activités, orienté solution et présente une approche abstraite, tel qu'illustré par la Figure 2.40.

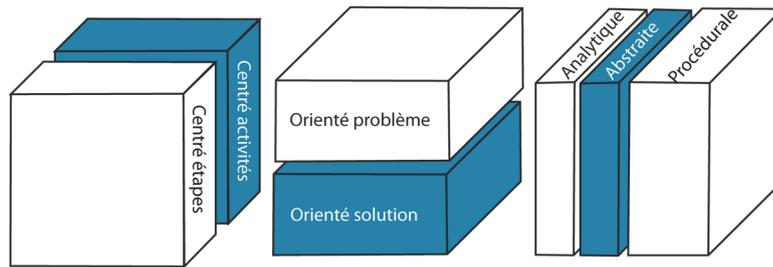


Figure 2.40 - Processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.5 Méthodologie de conception biomimétique – Lenau

S'appuyant sur des travaux antérieurs, menés conjointement avec le groupe de biomimétique de l'université de Toronto [Shu et al., 2003, Lenau et al., 2008], Lenau [2009] propose une méthodologie de conception biomimétique en six étapes ayant pour cœur de cible les étudiants en ingénierie. Suite à une expérimentation impliquant 12 étudiants en ingénierie, chargés de résoudre 7 problématiques différentes, la méthodologie de conception biomimétique a été mise à jour sous sa forme actuelle [Lenau, 2013], comme illustré par la Figure 2.41.

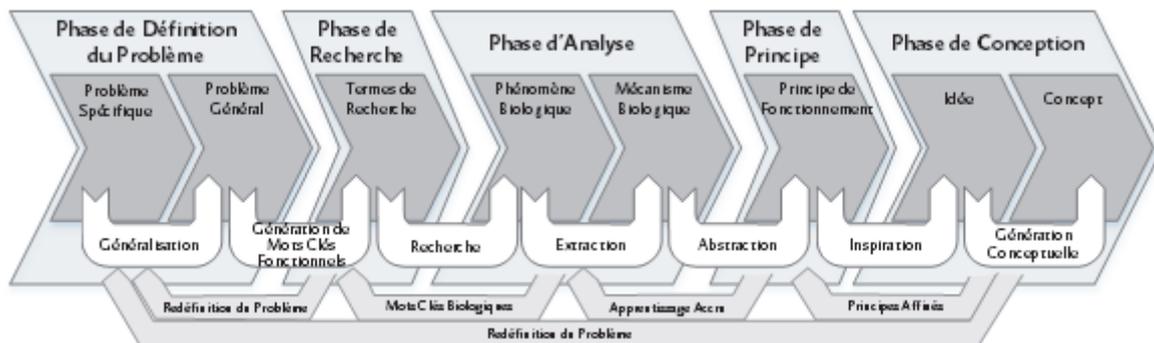


Figure 2.41 - La méthodologie de conception biomimétique [Lenau, 2013]

La méthodologie est composée de 5 phases subdivisées sous un ensemble de 7 étapes. La phase de Définition du Problème, qui mène à la génération d'une version abstraite du challenge initialement identifié (1ère étape), constitue la première phase du processus. Le problème générique est alors traduit sous forme de mots clés fonctionnels (2e étape). Cette transposition des termes est ce qui permet aux concepteurs d'accomplir l'étape suivante qui consiste à initier la requête (3e phase - Phase de Recherche). Les résultats de la recherche sont alors formalisés en phénomènes biologiques, constituant une liste à partir de laquelle les mécanismes biologiques sont extraits (4e étape). Grâce à une seconde phase d'abstraction (5e étape), le principe de fonctionnement (5e phase - Phase des Principes) d'un mécanisme biologique donné est alors identifié. Ce principe mène à la 6e et dernière phase, celle de la Conception, grâce à son utilisation comme source d'inspiration pour générer des idées (6e étape) qui pourront par la suite être développées sous forme de concepts (7e étape).

De manière globale, la méthodologie emphase la complexité que constituent la définition de mots clés pertinents et l'identification d'équivalents biologiques à des termes issus de l'ingénierie. Ce modèle de processus descriptif de la méthodologie de conception biomimétique [Lenau, 2009], décrit un processus centré étape, orienté problème et empruntant une approche analytique, tel qu'illustré par la Figure 2.42.

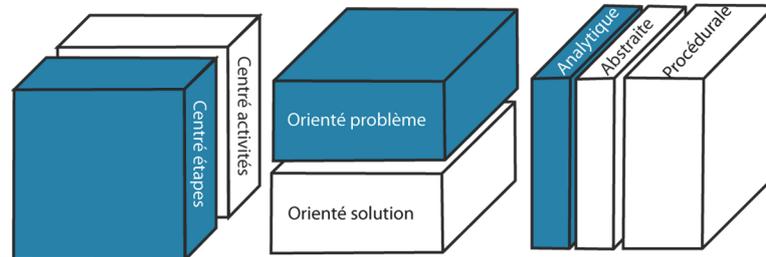


Figure 2.42 – La méthodologie de conception biomimétique selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.6 Processus de Conception Bio-inspiré Problem-Driven – Helms, Vattam, Goels

Helms, Vattam et Goel, par l'intermédiaire de leur école en « informatique interactive » enseignent la conception bio-inspirée dans le cadre d'un cours interdisciplinaire dispensé en premier cycle universitaire à l'Institut Technologique de Géorgie. C'est par l'intermédiaire de ce cours qu'ils ont pu analyser comment les étudiants construisaient leur approche de conception bio-inspirée à mesure que progressait leur projet relatif à l'enseignement [Helms et al., 2009]. L'expérimentation comprenait 45 élèves présentant des profils divers (e.g. biologistes, ingénieurs biomédicaux, ingénieurs mécaniques, ingénieurs industriels). Sur les 45 étudiants, 41 possédaient un profil « sénior ». Les équipes étaient composées de 4 à 5 concepteurs avec un projet assigné en adéquation avec les compétences et l'intérêt de l'équipe. L'analyse de ces projets de conception bio-inspirée a été synthétisée sous la forme d'un processus de 6 étapes, comme illustrée par la Figure 2.43.

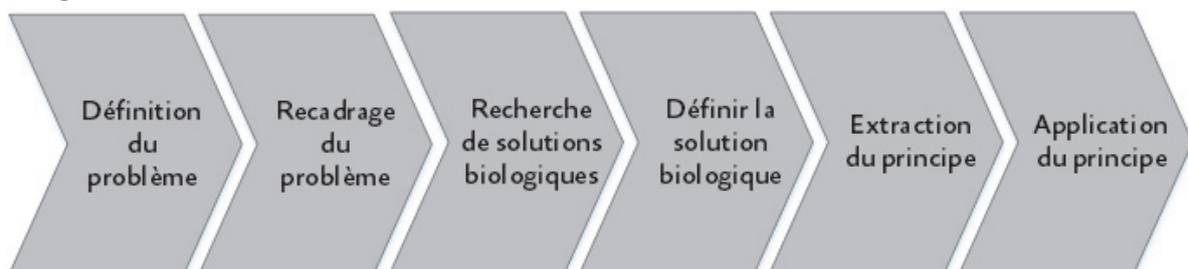


Figure 2.43 – Problem-Driven Biologically Inspired Design Process [Helms et al., 2009]

L'analyse a été effectuée sous l'angle de la perception cognitive, les auteurs intégrant l'espace de travail afin de documenter l'évolution de l'approche conceptuelle à mesure de l'avancement du projet. Aucune mention du temps global à disposition pour effectuer le projet ou de la répartition temporelle de l'expérimentation (e.g. projets s'effectuant en continu ou par une succession de séances de travail) n'est faite. Cet aspect est potentiellement crucial pour la compréhension de la façon qu'auront eue les étudiants d'aborder leur projet, ses différentes tâches et les outils à utiliser.

Le modèle de processus de conception bio-inspiré problem-driven [Helms et al., 2009], est descriptif, centré étapes, orienté problème et présente une approche analytique, tel qu'illustré par la Figure 2.44.

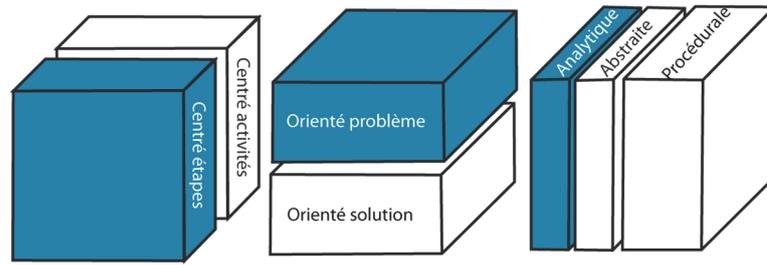


Figure 2.44 – Le processus de conception bio-inspiré problem-driven selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.7 Seconde approche pour la génération de concepts bio-inspirés – Nagel et al.

Dans leur effort de mettre à disposition des concepteurs des moyens de modélisation des systèmes biologiques, Nagel et al. [2010a] en sont venus à proposer une méthodologie biomimétique tirant profit d'une base de données compilant ces différents résultats de modélisations. Ce modèle de processus, composé de six étapes, tel qu'illustré en Figure 2.45, s'appuie sur la méthode génération automatisée de concepts tel que définie par Bryant et al. [2005].

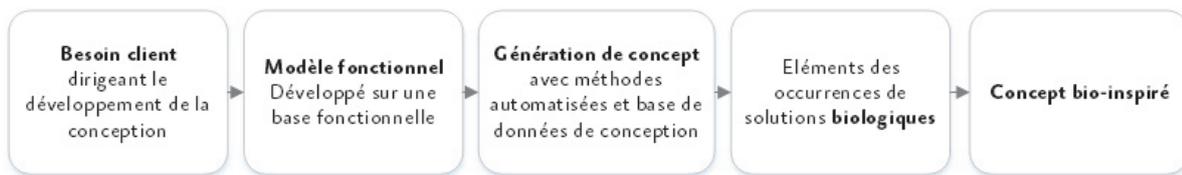
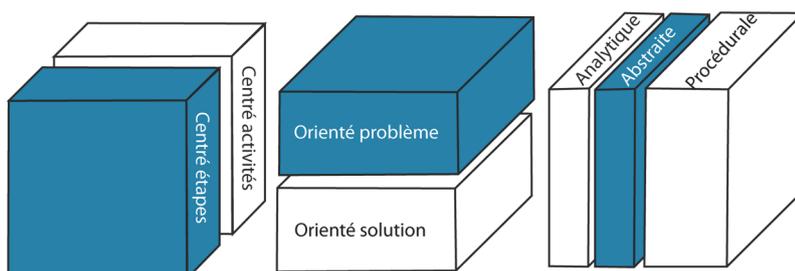


Figure 2.45 – Modèle de processus de l'approche de génération de concepts bio-inspirés, adapté de [Nagel et al., 2010a]

Le point d'entrée de la méthode est l'analyse de l'entretien d'un utilisateur potentiel, dont les besoins identifiés sont convertis en fonctionnalités que le système doit générer. Un modèle "boite noire" et un modèle fonctionnel sont alors développés et utilisés afin d'aborder une base de données/une archive contenant du contenu biologique, lui aussi modélisé fonctionnellement. Si deux fonctionnalités s'avèrent compatibles, le choix est laissé au concepteur d'utiliser ou d'ignorer cette information dans la poursuite de la génération de concept.

Ce modèle de processus prescriptif centré étapes, orienté problème et présentant une approche abstraite (illustré par la Figure 2.46), relie fortement l'outil de modélisation de



systèmes biologiques conjointement proposés par Nagel et al. [2014], positionnés en place centrale, à l'implémentation du modèle.

Figure 2.46 – La seconde approche pour la génération de concepts bio-inspirés selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.8 Directives standards du processus de conception biomimétique – Sartori et al.

De par leur analyse de la littérature incluant des modèles de processus, qu'elle soit orientée biomimétique (e.g. Gramann [2004], Vincent et al. [2006], ou transfert par analogie au sens large (e.g. [Schild, 2005]), Sartori et al.[2010] ont été en mesure d'identifier des tendances communes. Ces étapes communes dans la génération de concept ont été synthétisées en directives, telles que présentées en Figure 2.47.

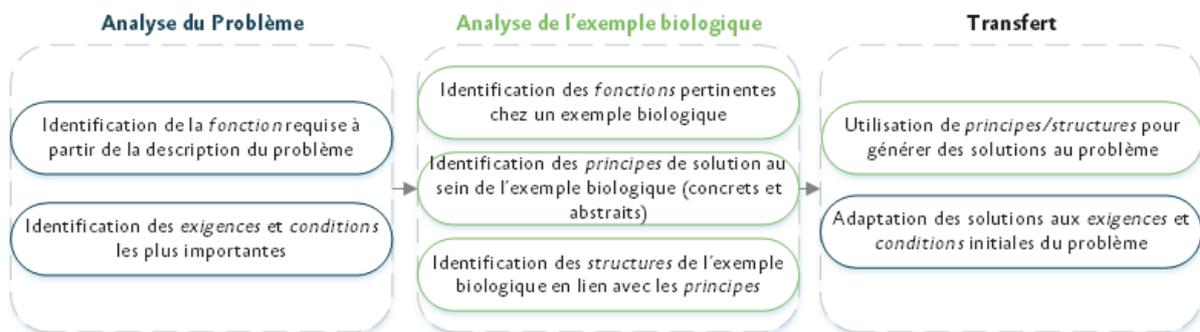


Figure 2.47 – Les directives standards du processus de conception biomimétique, adapté de [Sartori et al., 2010]

Ces directives générales qui existent aussi avec leur interprétation selon la représentation SAPPiRE [Sartori et al., 2010], s'articulent en 3 grandes phases : *Analyse du problème* (prenant place) dans la technosphère, *Analyse de l'exemple biologique* (prenant place dans la biosphère) et *Transfert* (se positionnant à la fois dans la biosphère et la technosphère).

Ce modèle de processus prescriptif est centré étapes, orienté solution et présente une approche procédurale, tel qu'illustré par la Figure 2.48.

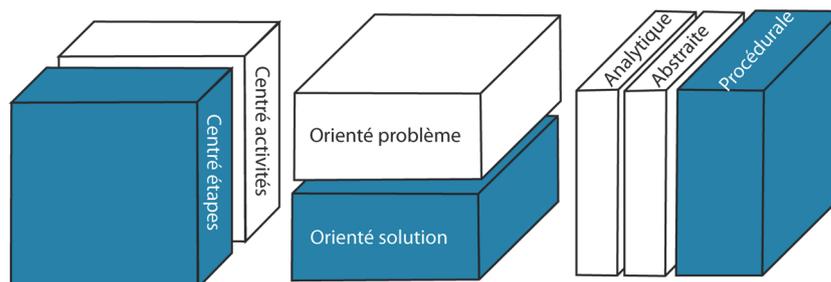


Figure 2.48 – Les directives standards du processus de conception biomimétique selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.9 Algorithme de traduction des mots clés biologiques pertinents –

Cheong et al.

L'approche développée par Cheong et al. [2011], implémente un algorithme précédemment développé [Chiu et Shu, 2007a] afin d'inscrire ce dernier au sein d'une démarche de conception. Basé sur la recherche directe d'information biologique disponible en langage naturel (e.g. textes, articles), le processus vise à l'identification de mots clés issus de l'ingénierie, puis à leur transposition dans le domaine biologique.

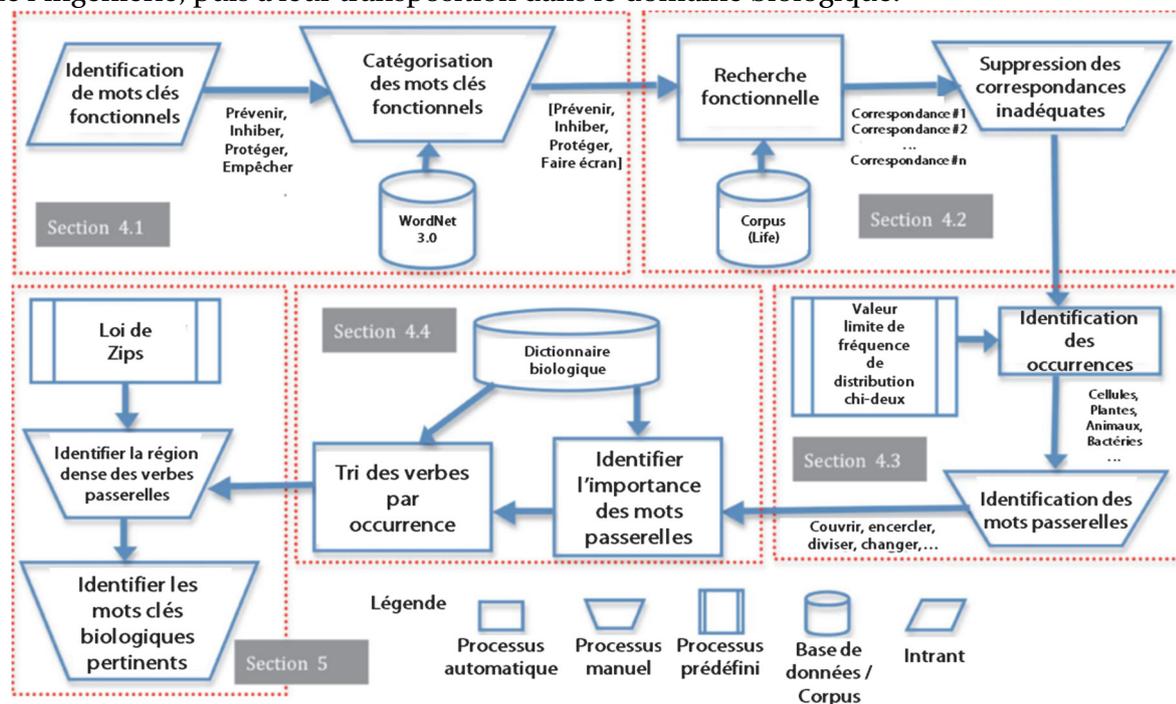


Figure 2.49 – Algorithme de traduction des mots clés biologiques pertinents (adapté de [Cheong et al., 2011])

Le processus aborde cinq phases principales, tel qu'illustré par la Figure 2.49. La première, intitulée « Identification de mots clés fonctionnels » identifie les référents fonctionnels décrivant le problème technique. La seconde, intitulée « Analyse des résultats de recherche » vise à exclure les résultats dont la pertinence peut être remise en cause. La troisième phase du processus, intitulée, « Identification des mots passerelles » ambitionne d'identifier les mots qui, par leur nombre élevé d'occurrences, s'avère être significativement représentatif de la fonction recherchée dans le biologique. La quatrième et avant dernière phase, intitulée « Catégorisation de la liste des mots passerelles », distingue les mots biologiques significatifs (i.e. quand un mot ou l'une de ses formes grammaticales est défini par le dictionnaire) des mots biologiques connotatifs (i.e. quand un mot est utilisé au sein de la définition d'un autre terme par le dictionnaire). La dernière phase, la cinquième, intitulée « Identification des mots clés biologiques pertinents », analyse les relations sémantiques existantes entre les mots clés biologiques ayant le plus d'occurrences. Ces relations sont synonymiques (e.g. [...] ces informations sont *converties* ou *traduites* [...]), implicitement synonymiques (e.g. [...] l'information est *conduite* à travers le réseau, *transportant* l'influx nerveux à travers l'organisme), spécifiantes (e.g. la *mutation* d'un des gènes homéotiques implique des *transforme* la structure de l'organisme), ou causales (e.g. le corps humain *absorbe* les acides aminés en *dégradant* les protéines alimentaires).

Ce processus prescriptif, est centré activités, orienté solution et présente une approche procédurale, tel qu'illustré par la Figure 2.50.

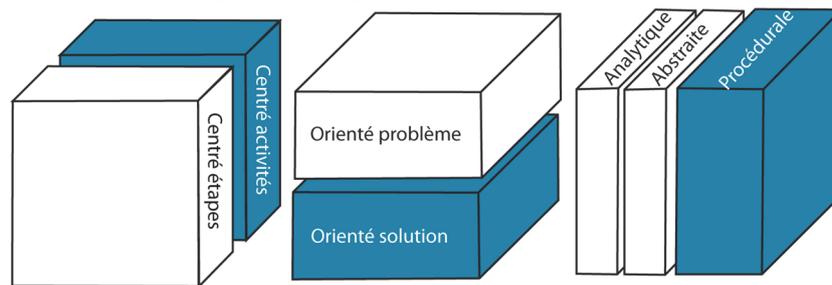


Figure 2.50 - L'algorithme de traduction des mots clés biologiques pertinents selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.10 Biomimicry Thinking – Baumeister et al.

La méthodologie formalisée par Baumeister et al. [2013], constitue un cadre de travail visant à permettre à chacun d'implémenter la pensée liée au biomimétisme au sein de n'importe quel projet de conception. Son approche spécifique problem-driven, appelée « du défi à la biologie » (« Challenge to Biology » et abrégée d2b), illustrée en Figure 2.51, a été élaborée pour ceux à la recherche d'information d'ordre biologique lors de la définition d'une solution à un problème donné.

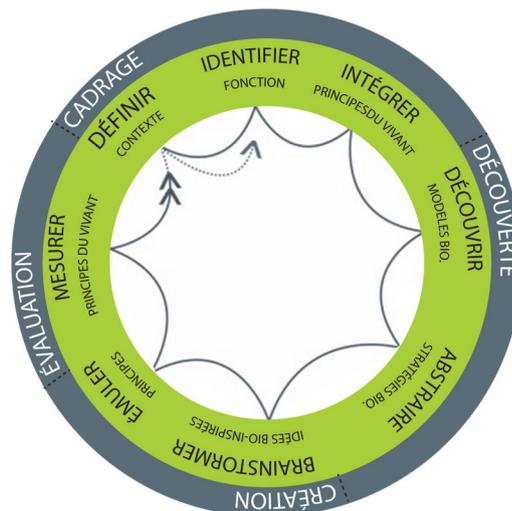


Figure 2.51 - L'approche d2b du biomimétisme selon (traduit de [Baumeister et al., 2013])

Les différentes étapes du processus de conception sont subdivisées en quatre thème (i.e. cadrage, exploration, création, et évaluation). C'est à travers la complétion de chacune des différentes étapes qu'est assurée l'intégration réussie des stratégies du vivant au sein de la conception humaine. La démarche se veut itérative, revendiquant une amélioration du résultat à chaque complétion de cycle [Baumeister et al., 2013]. Le modèle de la pensée du biomimétisme (Biomimicry Thinking) est un processus prescriptif, centré activités, orienté solution et présentant une approche abstraite, tel qu'illustré par la Figure 2.52.

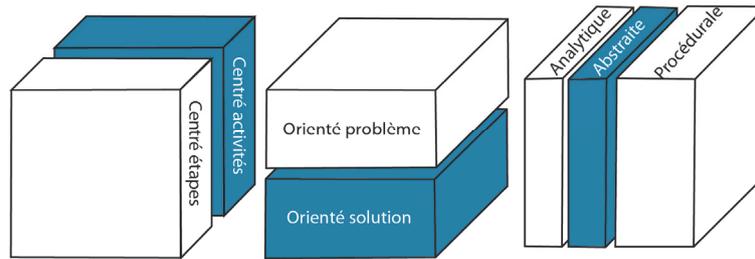


Figure 2.52 - L'approche d2b du biomimétisme selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.11 Processus d'analogie Problem-driven – Goel et al.

C'est à partir de l'observation empirique de la pratique de la conception bio-inspirée par les étudiants au court introductif du sujet de Georgia Tech (i.e. ME/ISyE/MSE/BME/BIOL 4740) qu'a été défini le processus d'analogie problem-driven [Goel et al., 2014]. L'observation des étudiants couplée à une analyse des tâches a conduit à l'émergence de cinq conclusions principales quant aux fondamentaux des processus de conception bio-inspirée : La conception bio-inspirée induit, par définition, l'analogie interdomaine (1). Les problèmes et solutions co-évoluent au cours du processus de conception bio-inspirée (2). La décomposition du problème est un processus fondamental de la conception bio-inspirée (3). La conception bio-inspirée implique souvent l'analogie composée, induisant une interaction complexe entre les processus de décomposition de problèmes et l'extraction d'analogies depuis la mémoire (4). La conception bio-inspirée engendre deux distincts, mais connexes, processus : l'analogie *problem-driven* et l'analogie *solution-based*.

C'est à partir de ces éléments marquants que le modèle de processus, illustré par la Figure 2.53, a été constitué.

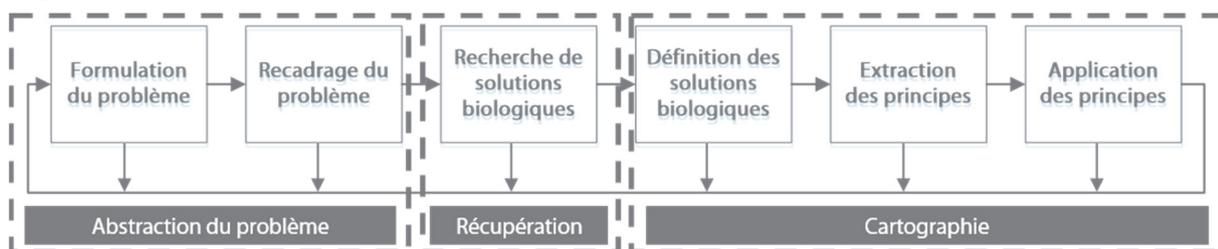
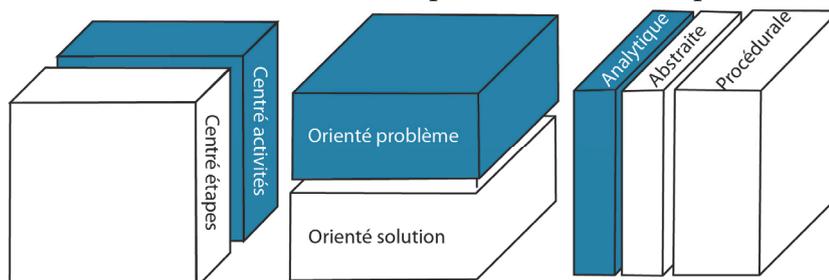


Figure 2.53 - Processus d'analogie Problem-driven (adapté de [Goel et al., 2014])

Le modèle présenté suggère que la conception bio-inspirée diffère des autres modes de conception par son usage des analogies interdomaines, ainsi que par l'usage d'analogies composées [Goel et al., 2014]. Ce modèle de processus de conception bio-inspirée centré

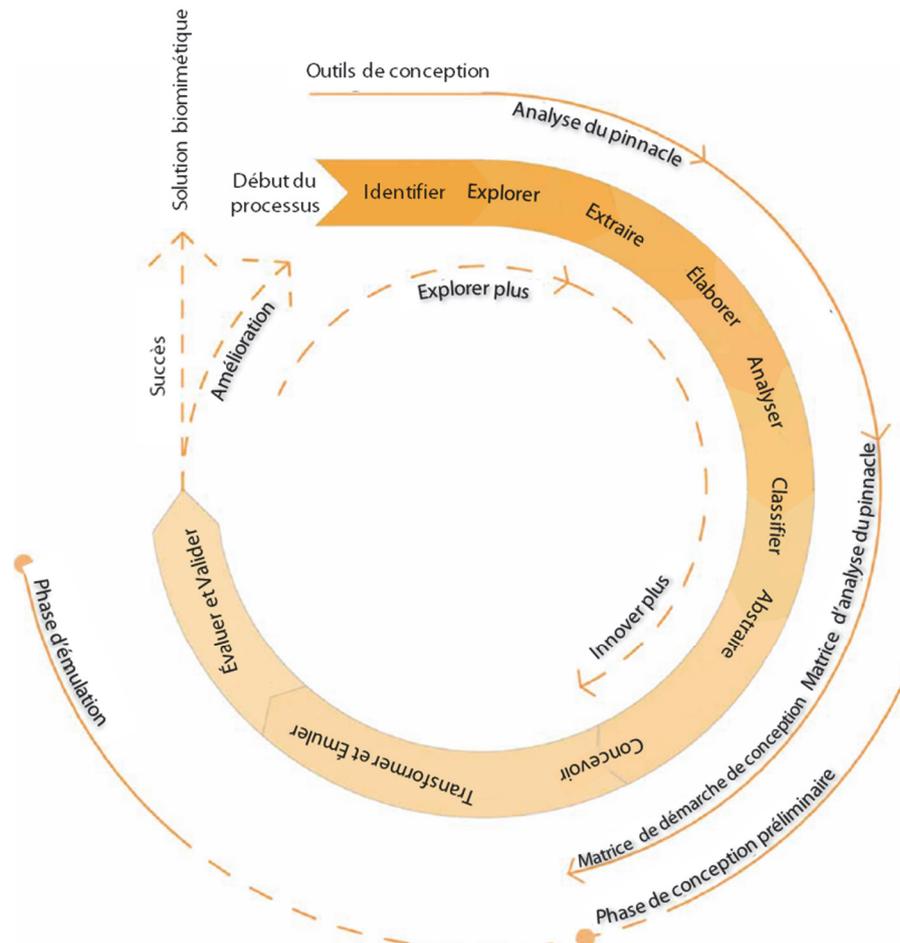


activités, orienté problème et présentant une approche analytique, tel qu'illustré par la Figure 2.54, est une description théorique de la conception bio-inspirée. Sur le plan éducatif, cette description a influencé de manière significative l'enseignement de la discipline aux étudiants de Georgia Tech [Yen et al., 2011, Yen et al., 2014].

Figure 2.54 – La processus d'analogie Problem-driven selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.12 BioGen – Badarnah and Kadri

Dans leur effort de formaliser un processus de conception bio-inspirée, Badarnah et Kadri [2015] ont comparé les stratégies issues de cinq groupes de recherche (i.e. Biomimicry



3.8, BioTriz, Biomimetics for Innovation and Design Laboratory (Université de Toronto), Design & Intelligence Laboratory (Georgia Tech), Plants Biomechanics Group (Université de Fribourg). Le modèle de processus BioGen, illustré en Figure 2.55, issu de cette analyse, présente un processus de conception bio-inspirée dédié aux architectes et conçu à partir du cas spécifique de conception d'une enveloppe de bâtiment permettant la collecte d'eau [Badarnah et Kadri, 2015].

Figure 2.55 – BioGen (adapté de [Badarnah et Kadri, 2015])

Cette description du processus de conception bio-inspirée introduit le concept de « pinnacle », défini comme un organisme ou un système naturel représentatif d'une stratégie d'adaptation particulière mettant en avant son importance et son caractère unique

[Badarnah, 2012]. Le modèle de processus est subdivisé en trois phases distinctes : une phase d'investigation générale biophysique (i.e. exploration des modèles), une phase d'investigation spécifique au système considéré (i.e. l'analyse du « pinnacle »), et une phase d'abstraction (i.e. matrice d'analyse du « pinnacle » et de la matrice de démarche de conception) [Badarnah, 2012]. Les architectes étant familiarisés de la phase d'émulation (généralement basée sur des stratégies et des codes conventionnels), correspondant à l'application de la stratégie abstraite du vivant, cette dernière a été exclue du modèle de processus [Badarnah et Kadri, 2015].

Ce processus prescriptif, est centré activités, orienté solution et présente une approche abstraite, tel qu'illustré par la Figure 2.56.

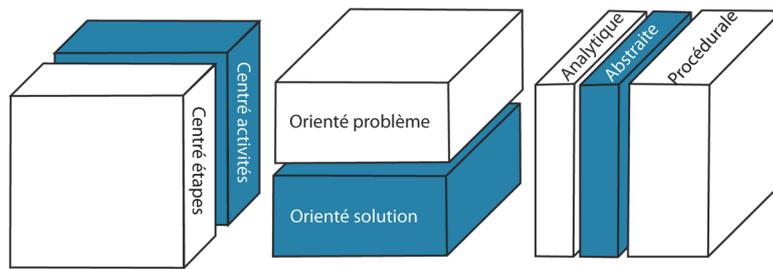


Figure 2.56 – Le modèle de processus BioGen selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.13 Processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique – ISO/TC 266

Les travaux visant à la normalisation de la biomimétique, voir section 2.2.4.3, se sont efforcés d'offrir une meilleure compréhension des méthodes de travail employées en biomimétique [ISO/TC266, 2015b]. Articulé autour de la réflexion issue des travaux de Speck et Speck [2008] et de Müller et al [2013], le Comité Technique 266 a proposé un modèle de processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique, tel qu'illustré par la Figure 2.57.

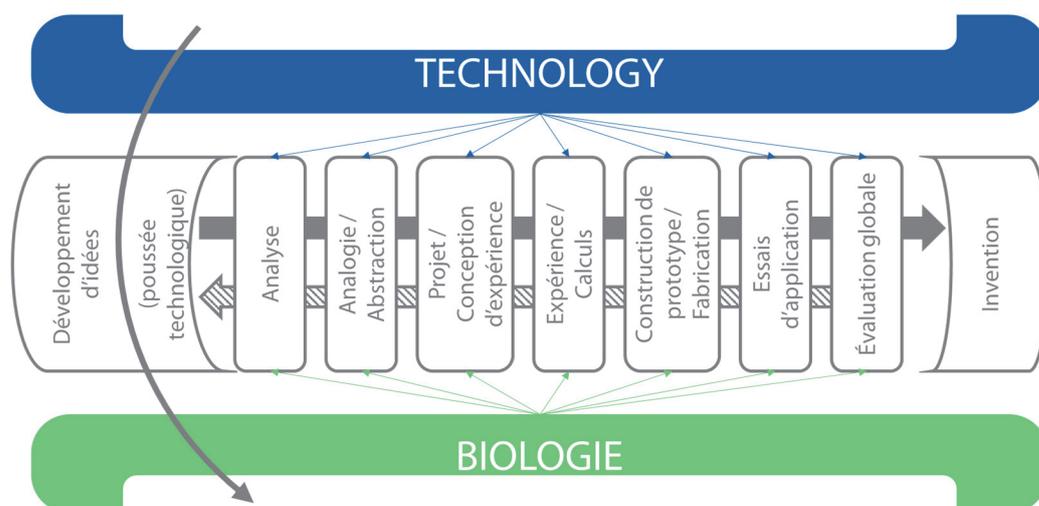


Figure 2.57 – Le processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique

[ISO/TC266, 2015b]

Cette compréhension vise à une appréciation du potentiel de la biomimétique dans le développement d'innovations techniques, à une réduction des attentes inappropriées relatives au sujet et à une explicitation de la longueur parfois occasionnée par la mise en place de projets biomimétiques [ISO/TC266, 2015b].

L'ISO met ainsi à disposition des concepteurs une démarche présentant une structure linéaire et séquentielle. La structure simpliste du modèle représente un cas d'application idéal, intégré à la chaîne de valeur, dont l'implémentation concrète engendrera généralement une complexification par la récursivité et la mise en parallèle des étapes présentées.

Ce processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique est descriptif, centré étapes, orienté problème et présente une approche abstraite, tel qu'illustré par la Figure 2.58.

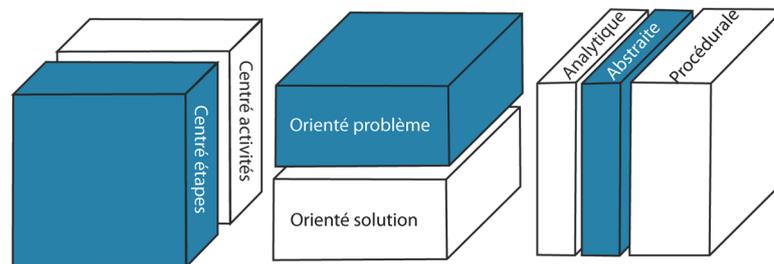
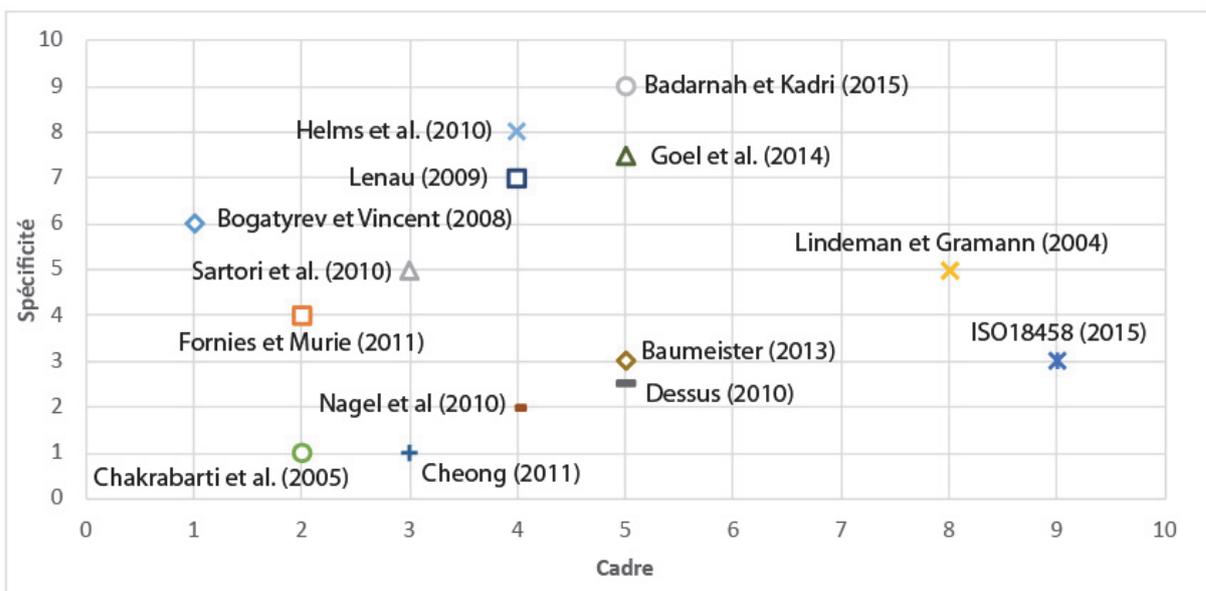


Figure 2.58 - Processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique selon l'analyse des processus de Wynn & Clarkson [2005]

2.5.2.14 Conclusion quant aux processus biomimétiques (problem-driven)

Comme démontré par la présente section, la biomimétique regorge de modèles de processus mis à disposition des concepteurs. Cette richesse méthodologique, si elle est nécessaire pour répondre au plus grand nombre de spécificités de conceptions possibles, crée une barrière d'entrée. Il semble en effet peu probable qu'un concepteur novice en biomimétique ne soit à même d'appréhender la subtilité de ces différents processus et des



éléments qui les différencient. Le cadre et la spécificité constituent les deux principaux éléments différenciant, constituant la grille de lecture des processus biomimétiques, tel qu'illustré par la Figure 2.59. La granularité des modèles peut être utilisée comme le troisième élément discriminant les modèles de processus biomimétiques.

Figure 2.59 – Positionnement respectif des modèles de processus biomimétiques

Afin de comprendre comment ces processus s'incarnent concrètement lors de l'implémentation de démarches biomimétiques, une analyse des outils, brique élémentaire des processus, est proposée.

2.5.3 Outils biomimétiques

Au cours des dernières décennies, les outils biomimétiques n'ont eu de cesse d'être développés. Si la Figure 2.60 ne fait état de la nature du travail considéré (i.e. pouvant aller de développement ex nihilo à une mise à jour d'un outil), la tendance de fond demeure, à défaut d'être une croissance forte, une constante progression du nombre d'outils biomimétiques à voir le jour. Un accroissement inexorable de la banque d'outils à disposition des concepteurs intéressés par la démarche bio-inspirée est dès lors à prendre en considération.

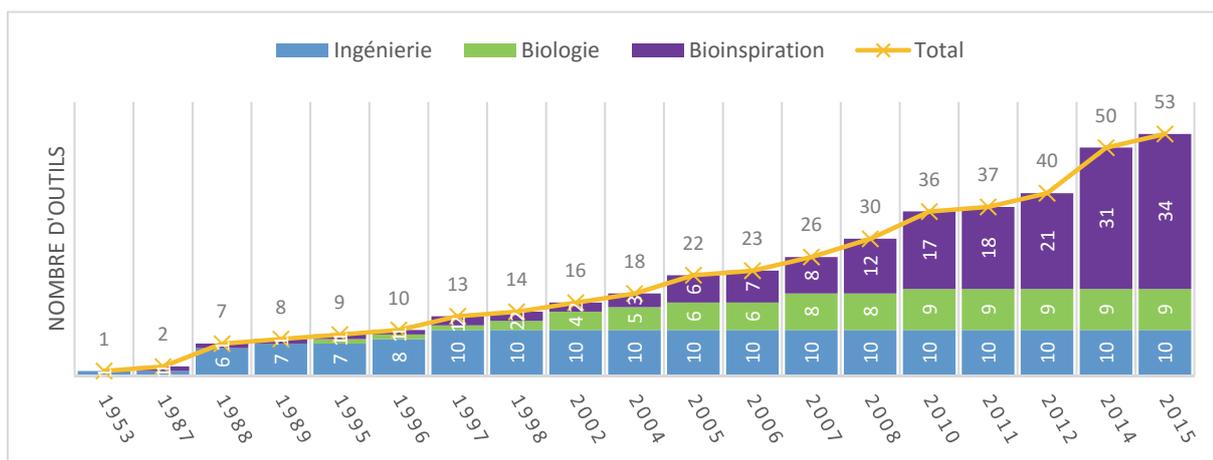


Figure 2.60 - Apparition des outils biomimétiques, classés par années

Il est assumé que les outils les plus récents intègrent les connaissances relatives à la biomimétique la plus récente (et donc une quantité de savoir plus extensif). Avec un pic de près de 3 000 publications par an en 2013 [Lepora et al., 2013]. L'influence de cette connaissance sur le développement d'outils facilitant le processus biomimétique demeure cependant un sujet de débat.

Au cours de cet état de l'art, a été considéré comme outil biomimétique, tout outil susceptible de faciliter la mise en œuvre d'une démarche biomimétique. À ce titre la boîte à outils biomimétique se divise en trois grandes catégories : les outils issus des sciences de la conception, ayant été mis à contribution dans le cadre d'un projet biomimétique, les outils issus des sciences du vivant, ayant suivi le même dessein et les outils de conception, ayant été développés dans le but de faciliter spécifiquement la démarche biomimétique.

Si la sélection de ces outils se veut exhaustive, elle demeure cependant limitée par l'accessibilité des informations qui leur sont relatives. Il est ainsi fort probable que certains

outils (e.g. Analyse Fonctionnelle) auraient tout leur sens dans le cadre de ce type de démarche, mais aucune étude de cas publiée à ce jour n'ayant été identifiée comme démontrant leur implémentation, ces outils n'ont pas été considérés.

2.5.3.1 Outils issus de l'ingénierie de la conception

Les outils biomimétiques issus de l'ingénierie de la conception sont les outils appartenant à l'ingénierie dite « classique » et ayant été mis à contribution lors d'un cas d'étude/développement de produit via une démarche de conception bio-inspirée. L'apparition de ces outils a été subdivisée en deux périodes, avant et après 1990.

Brainstorming - 1953

Le « brainstorming » [Osborn, 1953] est une activité de groupe aujourd'hui bien connue. Elle offre le bénéfice de générer démocratiquement de nombreuses idées rapidement, en nécessitant peu de ressources matérielles, tout en émulant l'interaction sociale.

5-Whys - 1988

Les 5-Whys sont un outil basé sur un processus itératif permettant l'identification des causes profondes d'un problème. La technique explore la chaîne allant de la cause à l'effet en interrogeant à plusieurs reprises (i.e cinq fois) l'utilisateur quant aux causes du problème [Ōno, 1988].

Contradictions Techniques (« Technical Contradictions ») - 1988

Les contradictions techniques apparaissent lorsque l'amélioration d'une caractéristique technique d'un système occasionne la détérioration d'une autre caractéristique. La non-résolution d'une contradiction technique mène dès lors à des solutions architecturées autour du compromis. Les contradictions techniques sont souvent initialement masquées ou formulées vaguement [Altshuller, 1988] ; considérées en tant qu'outil, les Contradictions Techniques visent à identifier et définir de tels conflits.

Analyse Courbe en S (« S-Curve Analysis ») - 1988

L'un des axiomes, sur lequel TRIZ a été construite, sont les Lois d'Évolutions selon lesquelles se développent les systèmes techniques [Cavallucci et Weill, 2001]. Ces lois, quantifiées au nombre de huit, catégorisées en lois Statiques, Cinématiques et Dynamiques, établissent les possibles voies de développement et ses schèmes relatifs d'un système technique [Altshuller, 1988]. Sur ce principe, une analyse « Courbe en S » a été développée pour identifier à quelle étape de son cycle de vie un produit se situe et offre des recommandations facilitant le passage d'une étape à la suivante [Terninko et al., 1998].

Diagramme Multi-Écrans (« Multi-Screen Diagram » - System-Thinking Operator ») - 1988

Le Diagramme Multi-Écrans, aussi appelé 9- Écrans, est un exercice mental segmentant un système technique selon un ensemble de cases, à partir d'une case centrale

représentant le système considéré sous sa forme actuelle, et variant selon deux axes : temps et niveaux systémiques [Altshuller, 1988]. En créant une représentation dynamique du système, le Diagramme Multi-Écrans permet aux concepteurs de conserver à l'esprit que chaque division d'un système technique en sous-systèmes est arbitraire et qu'en conséquence il est possible de faciliter une transition graduelle entre deux sous-systèmes ou état technologique [Savransky, 2000].

Analyse des Ressources (« Resources Analysis ») - 1988

L'outil de résolution appelé Analyse des Ressources se concentre sur l'analyse d'un système ou de son environnement par l'angle des ressources qui lui sont relatives. L'objectif est qu'en mettant à disposition une base de données des ressources, les concepteurs seraient en mesure de considérer des éléments qu'ils ne considéreraient pas habituellement en tant que ressource susceptible de les aider à résoudre un problème. Une fois les ressources identifiées, l'outil met à contribution des heuristiques afin d'aider les concepteurs à naviguer parmi ces dernières [Savransky, 2000], avec pour but ultime de convertir des éléments inopportuns ou nocifs en ressources utiles.

Task Analysis - 1989

La *Task Analysis* (Analyse de Tâche), aussi appelée « Domino » est un questionnaire en quatre étapes développé par Vincent Nolan [1989], partie intégrante de Synectics. La méthode se concentre sur le recadrage d'un problème donné par l'identification des responsabilités, des problèmes potentiels à venir ainsi que par l'analyse de la racine du problème. [Nolan, 1989].

Résultat Final Idéal (« Ideal Final Result ») - 1996

Le Résultat Final Idéal permet la définition de la représentation idéale qu'acquiert un système en dépassant ces limites technologiques actuelles. Selon Altshuller [1988] tout système technique tend à atteindre son état idéal. L'idéalité, ou degré d'idéalité, peut être décrite en termes mathématiques :

$$I = \frac{\sum Fu}{\sum Fh + \sum Fc} \quad (2) \quad [Cavallucci et Weill, 2001]$$

Selon cette équation (1), un système, afin d'atteindre son état idéal, peut accroître son numérateur (amélioration de ses fonction(s) utile(s) (Fu)) en tirant profit de ressources jusque-là non utilisées, prodiguant des fonctionnalités additionnelles utiles. Une autre façon pour un système de tendre vers son état idéal est de réduire son dénominateur (réduction des coûts (Fc) par élimination de ressource(s) non utilisée(s) ou par l'utilisation de ressource(s) moins onéreuse(s) et/ou par la réduction des effets néfastes (Fn)).

L'identification du Résultat Final Idéal peut être facilitée par des méthodes telles que le « Innovation Situation Questionnaire », questionnaire de réflexion structuré [Terninko et al., 1998].

Closed World Approach (« Monde Clos ») - 1997

Le Closed World puise ses origines de la théorie *Systematic Inventive Thinking* (SIT), une dérivée de TRIZ [Altshuller, 1988, Altshuller, 1996]. L'outil met à disposition une analyse du problème via la description fonctionnelle des interactions entre les objets d'un système donné selon leur effet escompté (i.e. fonction utile et fonction néfaste) ainsi que de leurs attributs [Sickafus, 1997].

Principes inventifs (« Inventive Principles ») - 1997

Le travail d'Altshuller's [Altshuller, 1997] a démontré qu'uniquement 40 principes sont utilisés par les auteurs de brevets pour résoudre leurs problèmes initiaux. Ces Principes Inventifs ont été formalisés pour dépasser la conception de solution par compromis. La connaissance de ces heuristiques est importante, mais savoir quel(s) principe(s) mettre en œuvre afin de résoudre un problème donné est tout aussi indispensable. Pour ce faire, Altshuller et al. [1997] ont synthétisé les objectifs typiques de conception au sein d'une matrice de 39 paramètres génériques. Cette matrice, appelée Matrice des Contradictions, permet aux concepteurs de corrélérer, pour un problème technique formalisé donné, contradictions techniques et principe(s) inventif(s) d'intérêt(s) afin de résoudre la contradiction technique initiale et donc, le problème.

Conclusion sur les outils issus de l'ingénierie de la conception

Les outils d'ingénierie de la conception identifiés et développés avant 1990 sont soit des outils de créativité pure applicables à la biomimétique, ceci étant dû à leur caractère générique (i.e. Brainstorming et 5-Whys) soit des outils issus de la théorie TRIZ.

La période post-1990 voit la création d'outils TRIZ, ou de sa dérivée USIT, venant supporter ceux développés lors de la décennie précédente.

2.5.3.2 Outils provenant des sciences du vivant

Corrélativement aux outils issus de l'ingénierie de la conception dite « classique », certains outils puisent leur origine dans l'autre versant de la biomimétique, la biologie.

Les 16 concepts du Vivant (« 16 patterns of Nature ») - 1995

En tentant d'analyser une forme d'analyse fonctionnelle de la vie, Hoagland [1995] identifie et liste 16 concepts ou grands principes régissant les règles de conception dans le vivant. L'application de ces principes a pour ambition de permettre l'obtention de solutions technologiques respectant les règles Naturelles.

Catalogues des principes biologiques (« Katalog biologischer Konstruktionen ») - 1998

Ce catalogue s'efforce de recenser un ensemble de principes biologiques dans le but d'offrir un aperçu de comment la Nature se bâtit [Hill, 1998].

Les dix principes fondamentaux des systèmes vivants (« Die zehn Grundprinzipien biologischer Systeme ») - 2002

Cette liste compile dix caractéristiques des systèmes biologiques, offrant une porte d'entrée vers la connaissance biologique et permettant la comparaison biologie-technologie en vue d'en transposer les principes mis en avant [Nachtigall, 2002].

Matrice des similarités bioanalogiques « Bioanaloge Ähnlichkeitsmatrix » - 2002

Cette matrice compare systèmes biologiques et technologiques en vue d'en estimer l'applicabilité [Küppers et Tributsch, 2009].

Checklist de transfert pour l'association biologique (« Assoziationsliste ») - 2004

Cette checklist divulguée simultanément au « procedural model of bionics » [Lindemann et Gramann, 2004], connecte des mots issus de l'ingénierie (e.g. sublimer, vaporiser) à leurs équivalents biologiques (e.g. transpiration, blanc de baleine)[Gramann, 2004]. La checklist fournit à la fois des principes biologiques (e.g. traitement hydrophobique des lipides) et des organismes spécifiques/génériques (e.g. plantes désertiques, coléoptère bombardier) afin de guider les ingénieurs à identifier du contenu biologique pertinent[Lindemann et Gramann, 2004].

Catalogue systématique pour la conception biomimétique (« Systematischer Katalog für bionisches Gestalten ») - 2005

Ce catalogue des systèmes biologiques, dont l'origine s'appuie sur « dix principes fondamentaux des systèmes vivants », permet de faciliter le transfert de connaissance de la biologie à la technologie [Nachtigall, 2006].

Modélisation fonctionnelle - 2007

Méthode développée par Tinsley et al. [2007] permettant de modéliser fonctionnellement des modèles biologiques. Les modèles générés peuvent ensuite être compilés dans un référentiel de conception biomimétique afin de les rendre disponibles au plus grand nombre.

Rétro-ingénierie systématique des systèmes biologiques – 2007

Méthode systématique facilitant l'ingénierie inverse de systèmes biologiques. Cette approche inclut une étape d'identification des dits modèles biologiques [Wilson et Rosen, 2007].

Modélisation fonctionnelle ; Catégorie et échelle - 2010

Méthode s'appuyant sur les travaux de Tinsley et al., y intégrant une dimension de catégorisation des fonctions (i.e. physiologie, morphologie, comportementale, stratégique) et une dimension d'échelle (i.e. atomique, moléculaire, complexe moléculaire, sous-cellulaire, cellulaire, multicellulaire, tissu, organe, multiorganes, organisme, population, comportementale)[Nagel et al., 2010a].

Conclusion sur les outils issus des sciences du vivant

Les outils biologiques pertinents pour la biomimétique émergent à la fin du XX^e siècle et se concentrent principalement sur la compréhension du vivant. Entre 2001 et 2005, le focus des outils change, nombre d'entre eux se concentrent désormais sur le lien d'analogies pouvant exister entre biologie et ingénierie. À partir de 2006, les outils biologiques tendent à se complexifier afin d'aborder le vivant de façon plus précise que les outils développés au siècle précédent.

2.5.3.3 Outils conçus pour la conception bio-inspirée

Les outils de cette catégorie sont ceux ayant été développés avec pour objectif de faciliter spécifiquement l'implémentation d'une démarche biomimétique.

Les sept étapes de la bionique (« Die sieben Denkschritte der Bionik ») - 1987

« Les sept étapes de la bionique » est un outil effectuant la comparaison entre fonction, contraintes et critères de performance biologique et technologique. L'objectif final de l'outil est de permettre la comparaison de solutions selon l'angle de l'applicabilité [Zerbst, 1987].

Principes du Vivant - 1997

La collecte des schèmes de conception des espèces peuplant actuellement notre planète constitue les Principes du Vivant [Benyus, 1997]. Ces principes du vivant peuvent dès lors être utilisés comme un instrument de mesure et/ou des principes de conception, permettant aux concepteurs d'identifier de nouvelles voies d'amélioration de leur objet d'étude tout en intégrant une dimension soutenable [Baumeister et al., 2013].

Outil de recherche BID-Lab - 2004

Cet outil informatique d'analyse du langage naturel pour la biomimétique se fonde sur la base de données lexicale WordNet pour effectuer de la recherche de texte au sein d'un corpus biologique pour identifier des analogies biologiques à des problématiques techniques [Chiu et Shu, 2004].

SAPPhIRE-model (State-Action-Part-Phenomenon-Input-oRgan-Effect) - 2005

Le « State change, Action, Part, Phenomenon, Input, oRgan and Effect » modèle (SAPPhIRE) est un langage causal développé pour décrire structurellement et fonctionnellement à la fois des systèmes naturels et techniques [Chakrabarti et al., 2005]. Cette modélisation s'appuie sur le modèle « Function, Behaviour, Structure » (FBS) proposé par Gero [1990] et met en avant les phénomènes physiques sur lesquels se fondent les fonctions décrites.

IDEA-INSPIRE - 2005

Logiciel permettant la consultation d'une base de données de systèmes biologiques et techniques modélisés selon la représentation SAPPhIRE. IDEA-INSPIRE intègre différents

niveaux d'abstraction de représentation d'information afin de fournir un support d'inspiration à la résolution de problème [Chakrabarti et al., 2005].

BIONIQUITY (Biology – Technology – Creativity) - 2005

Bioniquity© recense 42 principes génériques issus des modèles biologiques. Ces principes peuvent être utilisés pour générer des idées via un cheminement créatif présentant un niveau d'abstraction élevé [Dell, 2006].

Matrice BIOTRIZ - 2006

Cette matrice est une adaptation « biomimétique » de la matrice TRIZ permettant de faire le lien entre contradictions techniques et principes inventifs [Vincent et al., 2006]. La répartition des éléments la constituant y est ici réagencée et des exemples issus du vivant sont prodigués.

Analyse de langage naturel - 2007

Méthode de génération et d'indexation de mots clés biologiques afin de rapprocher biologie et ingénierie [Chiu et Shu, 2007b, Chiu et Shu, 2007a].

Mots clés biologiques pertinents (« Biologically meaningful keywords ») - 2008

Outil définissant les mots clés équivalents biologiques pertinents à des termes issus de l'ingénierie sur une base fonctionnelle [Cheong et al., 2008, Cheong et al., 2011].

Ontologie pour la conception bio-inspirée - 2008

Cette ontologie développée par Yim et al. [2008], facilite la capture, l'extraction et la réutilisation de solutions bio-inspirées. Son fonctionnement se base sur l'association d'architectures physiques, de comportements, de fonctions et de stratégies. Les éléments récoltés par son usage sont par la suite susceptibles d'être intégrés au sein d'une base de données dédiée.

Taxonomie du biomimétisme - 2008

Développée par Biomimicry 3.8 [Baumeister et al., 2013], cette taxonomie constitue une ontologie fonctionnelle organisant le vivant selon un ensemble de fonctions et de principes fonctionnels génériques.

AskNature - 2008

AskNature est réputée pour être la plus grande base de données relative à la bio-inspiration. S'articulant autour de la même ontologie que la Taxonomie, la base de données publiquement accessible, a pour but d'identifier et de fournir de la connaissance sur un phénomène biologique spécifique, en lien avec des experts identifiés et des idées/applications de concepts potentiels [Baumeister et al., 2013].

Catégorisation des mots clés issus du langage naturel - 2010

Méthode, développée par Ke et al. [Ke et al., 2010], catégorisant un ensemble de mots clés afin d'améliorer l'efficacité de l'identification de phénomène biologique pertinent.

Principes de Conception Bio-Inspirée (« Nature Inspired Design Principles ») - 2010

Introduit au sein du « Nature Inspire Design Handbook » [Tempelman et al., 2015], cet outil intègre les principes de l'approche « cradle-to-cradle » aux Principes du Vivant.

Thesaurus Ingenierie vers Biologie - 2010

Ce thésaurus corrèle, basé sur le lexique « Functional Basis », des termes biologiques à leur équivalent dans l'ingénierie [Nagel et al., 2010b].

BIOPS – BIOlogically inspired Problem Solving - 2010

Développé par l'institut Fraunhofer et accessible en ligne dans sa version de démonstration, BIOPS est un thésaurus mettant en adéquation recherche fonctionnelle technologique et modèles biologiques avec leurs liens vers les bases de données brevets [Fraunhofer].

DANE - Design by Analogy to Nature Engine - 2010

Outil interactif, DANE [Vattam et al., 2011a] s'appuie sur la Représentation Fonctionnelle [Vattam et al., 2011b] et donc dans une certaine mesure sur la modélisation FBS (voir section 2.3.2.8) pour supporter la conception bio-inspirée. Les fonctions sont ici modélisées à travers des états transitoires, interconnectés par des justifications causales de comportements, accompagnées par des diagrammes de boîtes structurales. L'ensemble de représentations générées est intégré à l'outil informatique sous la forme d'une base de données.

Biologue – 2011

Système d'information en ligne pour l'annotation sémantique collaborative d'articles biologiques. L'usage de l'outil mène l'alimentation d'un référentiel interne, interrogeable par un moteur de recherche spécifique [Vattam, 2010, Vattam et Goel, 2011].

Extraction automatique des relations causales pour la conception biomimétique - 2012

Cet outil ambitionne de faciliter le processus biomimétique en assistant les ingénieurs à identifier et extraire automatiquement les schèmes linguistiques pertinents au sein de textes biologiques [Cheong et Shu, 2012].

Conception Bio-Inspirée Extensible et Systématique (« Scalable Systematic Biologically-Inspired Design ») - 2012

Méthode de renseignement automatique de la Taxonomie et de classification des analogies biologiques afin de supporter la structuration et la sélection de modèles biologiques [Vandevenne et al., 2012, Vandevenne et al., 2013].

Approche computationnelle de la conception bio-inspirée – 2012

Algorithme pour la génération de concepts d'inspiration biologique [Nagel et Stone, 2012].

Ontologie de la biomimétique – 2014

Ontologie en cours de développement par Vincent [2014b] s'appuyant sur les principes inventifs (présentés en section 2.5.3.1) pour l'analyse d'un corpus de textes biologiques avec à terme l'identification d'organismes d'intérêt dans le cadre d'une démarche biomimétique.

Bionic Inspiration - 2014

Site web d'inspiration présentant des cas d'études et catégories « bionique » relatives aux « effets physiques TRIZ » [Sattler, 2014].

Ontology Explorer - 2014

En partie développé dans le cadre des travaux du groupe de travail numéro quatre du comité technique ISO 266, l'outil permet l'identification de modèles biologiques par l'exploration d'une base de données biomimétique organisée selon une ontologie du vivant spécifique [Kozaki, 2014, Kozaki et Mizoguchi, 2014].

UNified Ontology for causal-function modeling in Biologically Inspired Design (UNO-BID) - 2014

Uno-BID cherche à combiner les modèles fonction-causatifs existant au sein d'une même approche [Rosa et al., 2014]. L'outil hybride la description détaillée de la structure interne d'un système proposé par la représentation SAPPhIRE [Chakrabarti et al., 2005] à l'approche de modélisation fournie par DANE [Vattam et al., 2011a].

Four-Box Method - 2014

La méthode « Four-Box » [Helms et Goel, 2014] consiste en une matrice deux par deux facilitant la description du problème selon son Environnement Opérationnel, sa Fonction, ses Spécifications et ses Critères de Performance.

T-Chart - 2014

L'outil « T-Chart » [Helms et Goel, 2014] permet la comparaison de deux représentations 4-Box (une pour la description du problème et l'autre pour le modèle biologique analogue identifié, les deux tels que présentés en par le paragraphe introduisant la méthode « Four-Box »), fournissant aux concepteurs une évaluation de l'analogie.

BioScrabble - 2014

BioScrabble est un outil de support pour les concepteurs souhaitant extraire des analogies biologiques de la littérature scientifique (i.e. PubMed). Au cours de son utilisation, l'ingénieur est conseillé sur les termes de recherche décrivant au mieux son problème de

départ, une fois la recherche effectuée par l'outil, ce dernier facilite la gestion des occurrences par l'utilisation de représentation graphique de la recherche [Kaiser et al., 2014].

BioP-C (« The Biology Phenomenon Categorizer ») - 2014

Le catégoriseur de phénomène biologique est un serious-game collectant l'information relative aux phénomènes biologiques. Une fois recensé, chaque phénomène y est analysé selon sa qualité puis comparé à son équivalent potentiel au sein d' AskNature, DANE, Idea-Inspire et des outils de recherche en langage naturel [Arlitt et al., 2014].

Cadre de biotransférabilité (« Biotransferability framework ») - 2014

Cet outil combine l'analyse stochastique multicritères d'acceptabilité (SMAA) avec des critères de conception bio-inspirée afin d'évaluer l'utilité potentielle des analogies biologiques et les risques encourus lors de leur transfert de la biologie à l'ingénierie [Williams et al., 2014].

Structure-Function-Patterns - 2014

La table biologique des Structure-Fonction- « Patterns » offre un ensemble de mots clés pour la recherche de contenu biologique au sein de bases de données. L'outil facilite, de ce fait, l'analyse de texte scientifique avec un degré d'abstraction plus élevé, permettant une identification plus aisée de modèles biologiques, nécessaire à la génération d'idées utiles [Cohen et al., 2014].

Principes du vivant (version KARIM) - 2015

Le projet européen « Knowledge Acceleration and Responsible Innovation Meta network » (KARIM) a développé, en complément du manuel d'Innovation Responsable KARIM, une version alternative aux Principes du Vivant (présentés en section 2.5.3.3). Cette version présente les mêmes principes combinés à des questions types, des avantages relatifs et des exemples biologiques et technologiques [Michka Mélo, 2015].

Librairie des études de cas de conception - 2015

Outil hébergé en ligne, cette librairie digitale recense les études de cas de conception bio-inspirée. Son moteur de recherche intégré permet le support de l'apprentissage par analogie [Goel et al., 2015].

Cartes de conception résiliente - 2015

Basées sur les principes de conception identifiable par l'observation de la Nature, ces cartes de jeu s'utilisent dans le cadre d'une méthodologie visant au développement d'innovations soutenables [ResilientWeb, 2015].

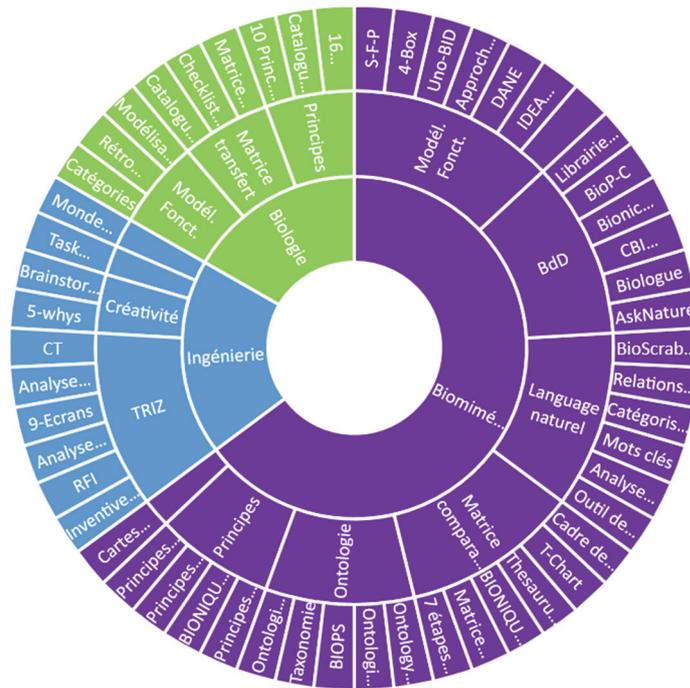
Conclusion sur les outils conçus pour la conception bio-inspirée

Les outils biomimétiques ante-2005 sont divers, abordant principes biologiques, modélisation et structuration de la démarche. L'axe de développement principal des outils entre 2006 et 2010 s'articule principalement autour du langage naturel et des différences

pouvant exister entre biologie et ingénierie. Les outils biomimétiques développés après 2011, véritable foisonnement, sont les premiers à voir l'intégration massive de l'approche computationnelle. L'apport de l'informatique leur permet de présenter une puissance de calcul inédite ainsi qu'un potentiel de collaboration nouveau.

2.5.3.4 Conclusion quant aux outils biomimétiques

La boîte à outils biomimétique regorge d'outils à disposition, cf. Figure 2.61. Cette myriade d'outils recensés (i.e. cinquante-trois) fait état d'un développement épars de la bio-inspiration : les équipes de recherche et/ou biomiméticiens experts investissent le sujet en



silos, indépendamment de l'état de l'art existant susceptible de compiler les travaux déjà réalisés.

Figure 2.61 – Représentation synthétique des outils biomimétique

Il est à noter que la recherche des outils 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

2.5.4 Conclusion quant à la biomimétique

La bio-inspiration, et tout particulièrement la biomimétique, offre une possibilité unique, celle de fournir des méthodes, des directives et des outils qui s'appuient sur plus de 3,8 milliards d'années d'antériorité de résolution de problèmes *via* la sélection naturelle. Dans de nombreux domaines, les organismes vivants surclassent toujours grandement nos solutions technologiques. Les solutions biomimétiques sont intéressantes, non pas seulement pour leur ingéniosité, mais aussi pour leur potentiel de résilience écologique.

Au cours de cette section, une trame générale permettant de comprendre ce qu'est la biomimétique a été décrite. Couplés à cela, les différents outils biomimétiques existants sont présentés. Ces outils incarnent et/ou assistent l'implémentation des différents processus biomimétiques détaillés. Au regard des différentes étapes constituant, ces processus, l'intrication de la technologie et de la biologie s'avère prépondérante et ce, tout au long de la démarche. Les réponses actuelles quant aux difficultés liées à l'interdisciplinarité des chercheurs « biomiméticiens », comme les bases de données, se concentrent sur la réduction de ce besoin de collaboration plutôt que de le faciliter. Ces bases de données se concentrent sur l'agrégation et la formalisation de connaissances biologiques et constituent donc, pour ce type de démarche, un apport dont il est difficile de se passer, sans cependant être une fin en soi.

La complexité de ce type de démarche est un enjeu difficile à cerner. À l'heure actuelle, face à cette complexité, l'industrie a tendance à utiliser la biomimétique comme un pourvoyeur d'innovation de rupture (à ce jour toujours en phase de recherche et développement). À la question de savoir si cela constitue sa vocation unique, seule la diffusion de ce type de démarche au sein de l'industrie sera en mesure de nous apporter une réponse. La biomimétique, dans son essence, est capable de proposer plus que la « simple » innovation de rupture. Elle atteint sa pleine mesure quand l'approche est couplée avec celle du biomimétisme. La nature, de façon indéniable, possède des stratégies d'optimisation de ressource encore inégalées par nos technologies actuelles, aussi modernes soient-elles. Ainsi, si la biomimétique est déjà pertinente par elle-même, c'est lorsqu'elle vise à prodiguer des innovations soutenables qu'elle atteint son plein potentiel. Elle peut alors devenir un outil d'innovation extrêmement efficace, couplé à un moyen de remettre en question, de façon pertinente, nos besoins et notre façon de concevoir pour y répondre.

2.6 SYNTHÈSE RELATIVE À L'ÉTAT DE L'ART

La biomimétique, processus créatif s'appuyant sur la biologie en vue de résoudre un problème technique (dans son approche *problem-driven*), présente un potentiel certain pour les sujets d'innovation dans notre économie globale. Ce sont les entreprises, au cœur du processus d'innovation, qui possèdent ce rôle central concrétisant le potentiel identifié. Ce rôle n'est à ce jour pas rempli, une vaste majorité d'individus du domaine professionnel, incluant notamment les entreprises leaders sur leur marché et les responsables politiques ne sont pas encore familiers avec l'idée de se tourner vers la nature pour résoudre les challenges anthropocentrés [Smith, 2015]. Ainsi, malgré son exposition récente, la biomimétique peine à se développer dans l'industrie. Ce manquement applicatif est aujourd'hui grandement imputable à un manque de structuration.

Dans la recherche, si une tendance générale favorable est identifiable, les inventaires n'ont qu'une valeur indicative. Le développement d'Hub géographique a laissé place à une multitude de centres de recherches et d'incubateurs dispersés à travers le monde. Ce modèle décentralisé ne sera à même de réussir sans communication et collaborations au sein de ces cercles d'activités disparates [FBEI, 2013]. Le nombre de collaborations restant limitées et la

transdisciplinarité, nécessaire à l'approche, insuffisamment couverte, la recherche française est dynamique, mais déstructurée [Ricard, 2015].

Dans l'industrie, la biomimétique demeure confidentielle. De manière contradictoire, malgré de nombreuses *success-stories*, la biomimétique peine à générer un nombre de produits substantiels. Tant que la biomimétique ne sera pas assimilable à un processus robuste et répétable, tel que prérequis par l'industrie, son processus d'implémentation demeurera inexorablement aléatoire. Ceci implique que les échecs dus aux manques de connaissances sont susceptibles d'aboutir, à long terme, à de la frustration, limitant d'autant le potentiel de la biomimétique à générer des innovations, au risque de perdre l'élan dont elle profite à ce jour.

Si la bio-inspiration est une approche ancienne, la biomimétique demeure un domaine encore jeune. Dû à cette jeunesse, les outils qu'elle dispense aujourd'hui, bien que foisonnant, n'ont qu'une maturité relative. Sans être parfaites, du fait de leur manque de formalisme, les approches méthodologiques permettent déjà cependant la mise en œuvre d'approches de conception bio-inspirées. Tout un éventail de champs scientifiques et d'ingénierie, allant de la nanotechnologie et la chimie aux sciences socio-économiques, alimente ces approches. Un élément inhérent aux démarches bio-inspirées demeure, par l'intermédiaire de la recherche d'inspiration dans le vivant, prépondérant : la recherche de modèles biologiques. Ainsi, quelle que soit l'avancée des outils biomimétiques, l'intégration de biologistes au sein même des cycles de conceptions biomimétiques restera un prérequis indispensable. Loin d'être anecdotique, ce prérequis entraîne un changement radical dans la façon de concevoir.

Les travaux étant portés vers l'industrie ils tendent naturellement à faire la part belle à l'ingénierie, mais comme ce chapitre le démontre, la bio-inspiration est tout autant intrinsèquement liée aux sciences du vivant. Il convient donc d'être vigilant à conserver une place de choix à la biologie au sein des approches de conception bio-inspirée, tout en capitalisant sur les concepts et approches existant au sein de l'ingénierie de la conception.

Chapitre 3

– Problématique & Hypothèses

Adéquation de la recherche aux enjeux identifiés

L'état de l'art fait état du besoin de développement de moyens assistant les concepteurs dans leur mise en place de démarches biomimétiques. Répondre à ce besoin permettra, d'un point de vue scientifique, de comprendre plus finement les enjeux relatifs à l'implémentation de ce type de démarche. Selon la perspective industrielle, élément central des présents travaux de recherche, faciliter l'implémentation des démarches biomimétiques permettra de tendre à une plus grande diffusion de ce type d'approche.

Il est à noter que le périmètre de recherche se cantonne aux aspects créatifs ainsi qu'à l'inventivité, excluant de ce fait d'autres aspects d'importance comme l'application de solutions créatives à un marché (afin que ces dernières deviennent des innovations).

«The troubles of modern life come from being divorced from nature. »

(Tous les ennuis que nous vaut la vie moderne sont dus à ce qu'il y a de divorce entre la nature et nous)

Isaac Asimov (Les Cavernes d'acier - 1953)

Photographie de Lisa Davis

3.1 CONSTATS ISSUS DE L'ÉTAT DE L'ART

L'état de l'art présenté en Chapitre 2, permet d'aboutir à un certain nombre de constats. Ces constats abordent les manquements méthodologiques constaté dans la littérature selon une approche conceptuelle en trois phases imbriquées. Cette approche est découpée en niveau macroscopique, mésoscopique et microscopique.

La phase macroscopique représente le niveau d'abstraction méthodologique le plus élevé, à savoir, les démarches biomimétiques. La phase mésoscopique aborde les processus biomimétiques, processus nécessaires à l'implémentation des démarches biomimétiques susmentionnées. La phase microscopique, aborde les outils biomimétique, cheville ouvrière des processus. Cette troisième et dernière phase, constitue ainsi le degré d'abstraction méthodologique le moins élevé.

L'ensemble des constats est synthétisé par la Figure 3.1.

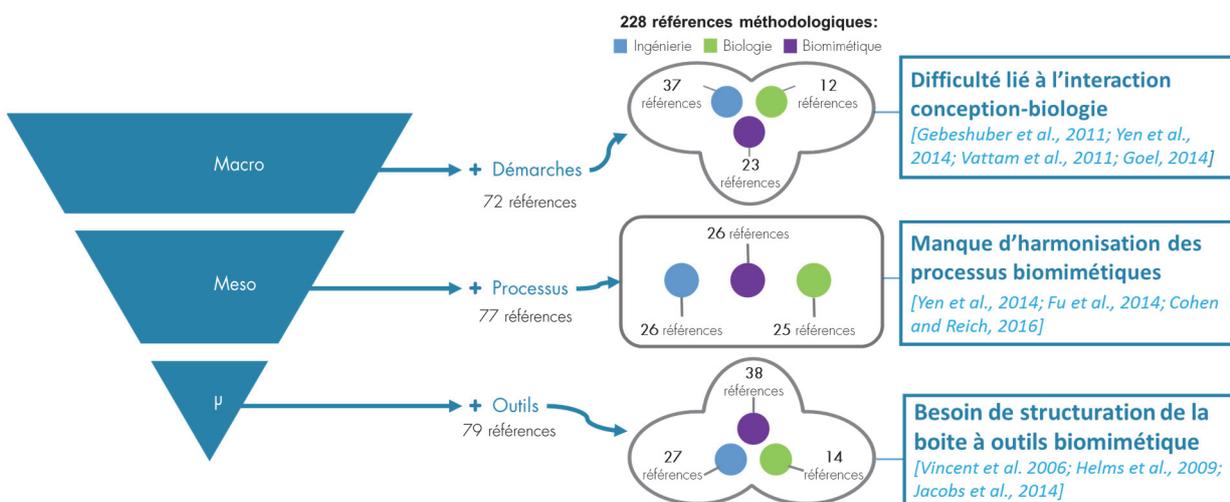


Figure 3.1 – Constats et niveaux d'analyse de l'approche méthodologique de la conception bio-inspirée

3.1.1 Niveau macroscopique

Au niveau macroscopique, dix freins quant à l'implémentation de l'approche problem-driven sont recensés dans la littérature [Vincent et al., 2006, Helms et al., 2009, Yen et al., 2014, Wanieck, 2016]. Sur ces dix freins, sept d'entre eux (i.e. accès aux connaissances biologiques, identification de modèles biologiques, compréhension des modèles biologiques, adéquation de l'analogie, abstraction des systèmes biologiques, transfert de connaissances, évaluation des modèles biologiques) sont liés au caractère interdisciplinaire de l'approche.

Lever les freins à la collaboration entre concepteurs et biologistes semble donc constituer un levier pertinent afin de réduire la complexité de l'implémentation de l'approche biomimétique problem-driven.

3.1.2 Niveau mésoscopique

La Figure 2.59, synthétisant les processus biomimétiques problem-driven existant, met en avant l'existence d'une grande disparité au sein de ces derniers. Cette disparité, si elle est pertinente afin que l'approche biomimétique problem-driven dispense des moyens de mettre en adéquation spécificités de conception et processus existants, rend difficile, en contrepartie la compréhension globale de l'existant, complexifiant la sélection, par les concepteurs, du processus le plus pertinent vis-à-vis des spécificités et contraintes de conception susmentionnées.

Harmoniser ces processus constituerait donc une voie de recherche d'intérêt dans l'idée de rendre ces différents processus plus accessibles aux concepteurs.

3.1.3 Niveau microscopique

Avec un rythme moyen de production d'environ deux outils par an, il existe aujourd'hui plus de cinquante-trois outils facilitant l'implémentation de la conception bio-inspirée (voir section 2.5.3). Les outils produits se déversent aujourd'hui au sein de cette boîte à outil biomimétique de manière non-structurée, générant pour cette dernière une organisation complexe (cf. Figure 2.61). Cette complexité apparente tend à rendre difficile pour tout concepteur biomiméticien d'être capable d'identifier le bon outil à utiliser au bon moment, sans ce que ce dernier n'ait une connaissance fine de l'ensemble de ces outils.

Une simplification, par la proposition d'une méthode facilitant la sélection des outils, serait donc à même, en structurant la boîte à outils biomimétique, de faciliter l'implémentation des approches biomimétiques problèmes-driven et donc de favoriser l'essor de la thématique.

3.1.4 Synthèse des constats issus de l'état de l'art

3.2 FORMULATION DE LA PROBLÉMATIQUE

Les constats tirés de l'analyse de l'état de l'art initial se subdivisent en deux volets principaux, l'un portant sur l'ensemble des supports méthodologiques (i.e. processus et outils biomimétiques), l'autre sur le défi inhérent d'interface entre domaines de connaissance distante, à savoir, dans le contexte de la recherche, l'ingénierie et la biologie.

3.2.1 Premier volet

Compte tenu du caractère unique de chaque projet de conception, la nécessité de sélectionner sa démarche de conception en fonction de spécificités du projet est centrale. Face à la diversité des processus biomimétiques ainsi que des outils biomimétiques, l'enjeu quant à leur sélection est prépondérant dans la génération de gains ou de pertes relatifs à leur usage. Malgré des travaux portant sur l'angle méthodologique de la conception bio-inspirée, il n'existe aujourd'hui pas de réponse adaptée permettant une facilitation de la sélection de méthodes dans le cadre de l'implémentation de démarches biomimétiques.

3.2.2 Deuxième volet

Les présentations faites de l'ingénierie de la conception (voir section 2.2) et des sciences du vivant (voir section 2.4) dénotent de différences significatives. Dans les faits, ces différences transitent au niveau individuel : ingénieurs et biologistes ne possèdent pas le même langage, ne partagent pas la même compréhension d'un système, n'ont pas le même entendement d'une démarche industrielle, etc. Bien que centrale et inhérente à la biomimétique, l'interface Ingénierie-Biologie ne possède à ce jour, que peu de moyens visant à la faciliter, aussi bien de façon structurée que structurante.

3.2.3 Intitulé de la problématique

De par les deux volets abordés, les présents travaux tendent à distancier la biomimétique de l'art de la créativité, et l'idée « démiurgique » de la bio-inspiration.

La problématique abordée par les travaux de recherche est formalisée de la façon suivante : « *Comment s'approprier les méthodes biomimétiques et faciliter leur déploiement pour la conception de produits innovants ?* »

Elle tend donc à analyser comment le **processus** de recherche, d'analyse et d'intégration de **connaissances** liées à la mise en place d'une démarche de **conception bio-inspirée** peut être supporté par l'intermédiaire d'**outils/méthodes**.

3.3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'empreinte des méthodologies sur l'innovation a déjà été abordée à plusieurs reprises. Franke et al. [2009], par exemple ont démontré que succès d'innovation et structuration des processus étaient corrélés positivement ; Schöfer [2015] a identifié l'impact des méthodes sur processus de résolution de problème ainsi que sur la génération des idées.

Les méthodes, en structurant et formalisant le processus de conception et donc de l'innovation, constituent un indicateur de maturité, maturité faisant aujourd'hui défaut au domaine que forme la biomimétique. Les méthodes sont donc à même d'être un facteur clé dans l'implémentation de la biomimétique, comme abordé par Herrera-Hernandez et al. [2009] pour la conception générale. Il semble donc justifié, compte tenu du positionnement des travaux de recherche, que ces derniers se concentrent sur les fondements et moyens méthodologiques favorisant l'essor de la biomimétique dans l'industrie.

3.4 HYPOTHÈSES

Suite à la formalisation de la problématique de recherche, un certain nombre de problèmes constituant cette question de recherche ont pu être identifiés. Ces problèmes abordent différents angles de la biomimétique et sont investigués par les présents travaux selon deux hypothèses. La première hypothèse revêt un intérêt particulier pour l'incarnation de la démarche biomimétique (processus et outil). La deuxième hypothèse aborde une étape spécifique du processus, celle de l'interface entre ingénierie et biologie.

3.4.1 Première Hypothèse

3.4.1.1 Formulation de la première hypothèse

La première hypothèse est relative à la difficulté pour les concepteurs biomimétiques novices à aborder la conception bio-inspirée, aboutissant à la formulation suivante :

H1 : « L'établissement d'un référentiel des outils biomimétiques à partir d'une analyse pratique de ces derniers est possible. »

Formulée ainsi, cette hypothèse tend à répondre aux constats de niveaux meso et microscopiques, aboutissant met en lumière un enjeu scientifique en lien avec la recherche : l'obtention de données objectives sur les méthodes de conception biomimétique. À ce jour, les différentes publications ne font que très peu état des difficultés inhérentes à l'implémentation de méthodes de conception, préférant une mise en avant de leurs facteurs de succès. Il est donc probable que la génération du référentiel nécessite une collecte d'information spécifique dans le cadre de la mise en œuvre de la recherche afin que ces dernières puissent être jugées comme fiables quant aux méthodes considérées, intégrant de ce fait, l'analyse pratique des outils biomimétiques.

3.4.1.2 Description de la première hypothèse

Le constat de la profusion de processus, méthodes et outils biomimétiques amène à penser cette approche est aujourd'hui capable de couvrir la majorité des demandes industrielles. Loin de constituer une acmé méthodologique, cette abondance rend difficile le choix éclairé de démarche méthodologique par les novices du domaine. Cette difficulté rencontrée, constituant un potentiel facteur limitant dans la diffusion de la biomimétique, n'est pas exclusive à la conception bio-inspirée, López-Mensa [2003] et Braun et Linderman [2003] stipulant que la sélection des méthodes est souvent jugée comme difficile pour les concepteurs.

Bien que délicate, cette sélection méthodologique a été identifiée comme d'importance au cours de l'état de l'art (voir section 2.2.6), différenciant potentiellement les processus de conception et d'innovation du succès de l'échec [Cattam, 2004]. La sélection de méthodes inadaptées peut être génératrice de sous-qualités (e.g. concept ne répondant pas aux exigences de conception) ou de surqualité (e.g. développement compliqué, formation méthodologique des équipes contraignantes), toutes deux problématiques dans le cadre d'une démarche industrielle. Comme mentionné par Lahonde [2010], une méthode n'est dans son essence, ni bonne, ni mauvaise, mais le sera toujours dans un contexte spécifique, contexte dont une démarche de conception ne peut se détacher.

Dans ce foisonnement des moyens à disposition pour la biomimétique, les manques de cohérence, à la fois général et spécifique, sont autant d'éléments que cette partie des travaux tente de traiter par la formalisation d'un moyen de guider les concepteurs, à la fois à travers le processus biomimétique, mais aussi dans la sélection des outils de conception.

3.4.2 Seconde Hypothèse

3.4.2.1 Formulation de la seconde hypothèse

La seconde hypothèse se positionne ainsi à l'interface entre Science du vivant et Ingénierie de la conception et peut être formalisée comme suit :

H2 : « Il est possible de favoriser l'interaction entre les acteurs par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie »

Ainsi formalisée, cette hypothèse vise à aborder deux points distincts. Premièrement, elle formule une sous-hypothèse (H2a) considérant que c'est par l'intermédiaire de la modélisation des systèmes vivants, qu'il serait possible d'apporter les connaissances biologiques nécessaires à la bonne interaction entre concepteurs et biologistes experts, et par ce fait, à la bonne implémentation d'un processus biomimétique. Deuxièmement, elle présente une seconde sous-hypothèse (H2b) s'articulant autour du principe selon lequel cette modélisation des systèmes vivants serait en mesure d'être effective sans que les acteurs de l'implémentation des démarches biomimétiques (*problem-driven*) ne possèdent de prérequis de connaissance relatifs aux sciences du vivant. C'est bel et bien l'exploration conjointe de ces deux sous-hypothèses (i.e. H2a et H2b) qui rendent possible la considération de cette seconde hypothèse.

3.4.2.2 Description de la seconde hypothèse

La seconde hypothèse est relative à l'aspect interdisciplinaire et par cela à la diversité d'origine des connaissances relatives à la mise en œuvre d'une démarche biomimétique. Dans le contexte de ces recherches, le concept de multidisciplinarité réfère au besoin d'interaction, a minima, entre Science du Vivant et Ingénierie. Dans ce contexte, la présente recherche diffère des autres travaux, où l'interaction abordée traite des relations entre différentes sous-disciplines du domaine de l'ingénierie de la conception. La biomimétique, de par ses enjeux intrinsèques, se positionne à l'intersection de l'ingénierie de la conception et des sciences du vivant, faisant collaborer des individus qui ne seraient pas naturellement amenés à collaborer. Sans antécédents et référentiels communs, ce travail collaboratif s'avère complexe [Snell-Rood, 2016]. Les difficultés du travail interdisciplinaire dans le cadre de la biomimétique et la complexité de la biologie à servir de modèle ont été mises en exergue à différentes reprises [Helms et al., 2009, Jacobs et al., 2014, Yen et al., 2014]. La réduction de la complexité du processus biomimétique doit ainsi aussi s'incarner à travers le support quant à la collaboration interdisciplinaire.

3.5 SYNTHÈSE RELATIVE À LA PROBLÉMATIQUE ET AUX HYPOTHÈSES

De par son positionnement, la première hypothèse des travaux vise à structurer la boîte à outils biomimétique, afin de mettre à disposition du plus grand nombre les outils et méthodes biomimétiques. La seconde hypothèse de recherche ambitionne, quant à elle, le

développement d'un outil favorisant la collaboration ingénieurs-biologistes via sa simplification. Ainsi, bien que différentes, les deux hypothèses tendent vers le but commun formalisé par la problématique de recherche, celui de l'appropriation et la facilitation du déploiement de la biomimétique (problématique). La première hypothèse poursuit cette quête d'accessibilité en explorant cette dernière par la prescription par les règles grâce à la description du contexte et des méthodes par l'observation de leur mise en œuvre (hypothèse H1). La seconde hypothèse envisage l'accessibilité selon l'angle de l'accélération de la démarche en réduisant les tensions d'interface (hypothèse H2) par un apport de connaissances spécifiques (sous-hypothèse H2a), et ce, au plus grand nombre (sous-hypothèse H2b).

En vue de valider ou d'invalider chacune de ces hypothèses, un ensemble d'expérimentations, illustré en Figure 3.2, a été établi. La première expérimentation, considérant la première hypothèse, intègre des éléments communs à la collaboration établi avec l'Institut Technologique de Deggendorf visant à combiner analyses théoriques et pratiques des outils biomimétiques. La seconde expérimentation, s'attaquant à la seconde hypothèse, explore de concert les sous-hypothèses H2a et H2b.

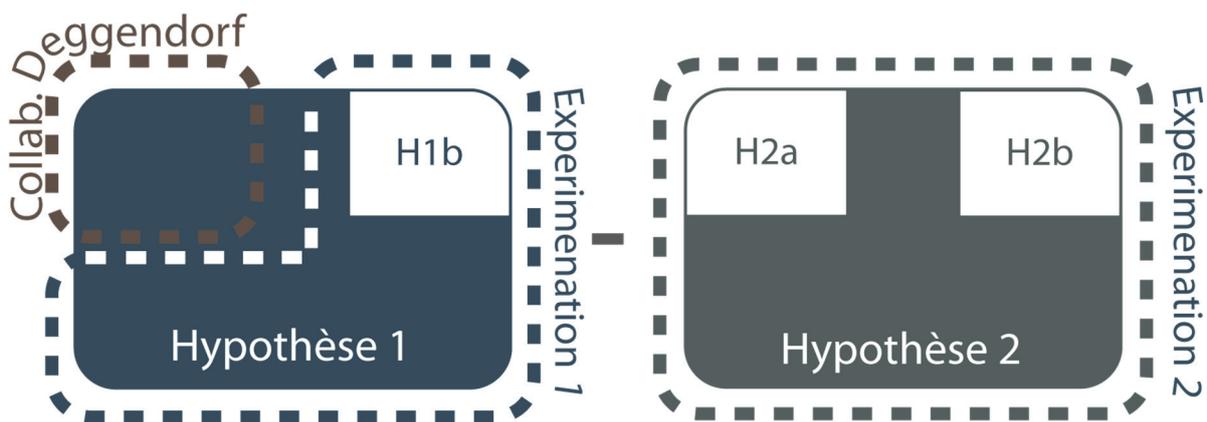


Figure 3.2 – Positionnement relatif des expérimentations et des hypothèses



Chapitre 4

Première Expérimentation

Vers un cadre de référence pour la biomimétique

Afin de faciliter sa mise en œuvre, la biomimétique met à disposition des concepteurs un ensemble d'outils provenant des sciences de l'ingénierie, des sciences du vivant, ou ayant été développés selon ses contraintes et spécificités propres. Le contrepoint de cette profusion d'outils est qu'il devient difficile, pour un concepteur, d'identifier les outils les plus pertinents vis-à-vis des spécificités de son contexte de conception. Ce chapitre présente comment, à partir de l'évaluation théorique puis pratique des outils biomimétiques, un premier référentiel de l'approche méthodologique de la conception-biomimétique a pu être constitué.

Ce référentiel, ici appelé BiomimeTree, s'appuie sur l'uniformisation du processus biomimétique problem-driven et permet la reconstitution du processus précité par la facilitation de la sélection des outils biomimétiques. Ce modèle structurant les méthodes biomimétiques guide ses utilisateurs dans l'implémentation de la démarche de conception bio-inspirée, répondant de ce fait à la première hypothèse formulée (H1 : « L'établissement d'un référentiel des outils biomimétiques à partir d'une analyse pratique de ces derniers est possible. »)

« La nature est la source de toute vraie connaissance. Elle a sa propre logique, ses propres lois, elle n'a pas d'effet sans cause, ni d'invention sans nécessité. »

Leonardo da Vinci

Photographie de Radosław Kulupa

4.1 PRÉREQUIS EXPÉRIMENTAL : HARMONISATION DU PROCESSUS BIOMIMÉTIQUE

Avant d'aborder l'analyse des outils, tel qu'énoncé par la 1^{ere} hypothèse, il est nécessaire que le problème de disparité des processus biomimétiques identifiée au court de l'état de l'art soit levé. L'harmonisation du processus biomimétique *problem-driven* devrait rendre possible la mise en adéquation des outils existants avec le processus biomimétique et de ce fait, l'émergence d'un référentiel des outils biomimétique. Afin d'atteindre cette harmonisation, une analyse de ces modèles est proposée. La réalisation de ce travail permet la génération d'un modèle offrant une représentativité et une lecture globale des modèles présentés.

4.1.1 Analyser les modèles de processus biomimétiques

Afin d'en présenter un aperçu global, la Figure 4.1 propose un aperçu des 14 modèles de processus biomimétique *problem-driven* les plus représentatifs (i.e. les plus repris dans la littérature et présentés en section 2.5.2) mis en perspective avec le métamodèle de processus de résolution de problème [Massey et Wallace, 1996].

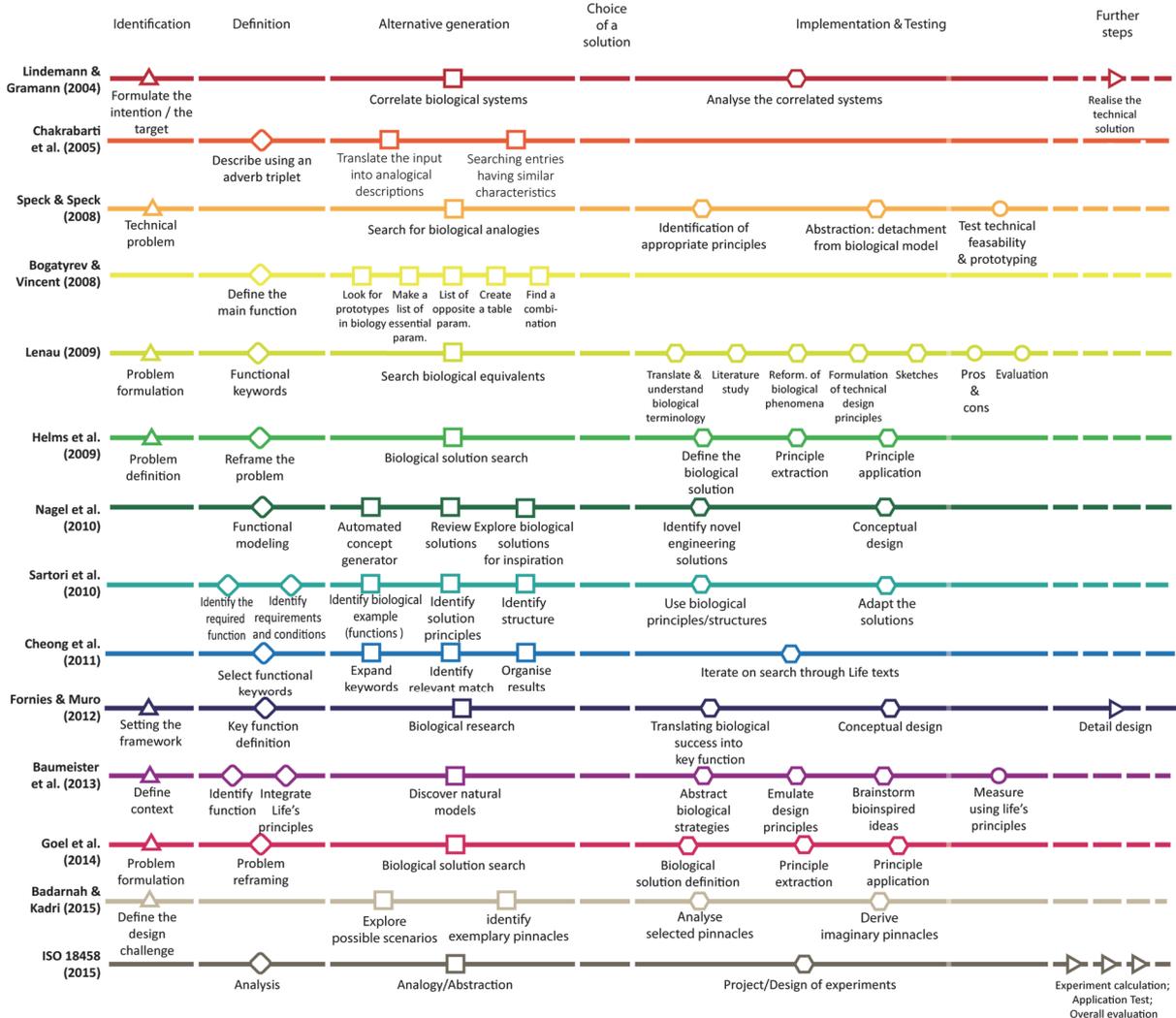


Figure 4.1 - Les modèles de processus biomimétique *problem-driven* mis en adéquation avec le processus de résolution de problème.

L'analyse préliminaire introduite en section 2.5.2.14, soulignait trois divergences récurrentes aux modèles de processus identifiés : le cadre, la granularité et la spécificité. Ces trois divergences constituent les verrous qu'il est nécessaire de lever pour l'obtention d'un modèle de processus unique.

4.1.1.1 Harmonisation du cadre

La résolution de problème, voir section 2.4.3.2, possède un cadre dont la définition atteint un certain degré de consensus. Son périmètre s'étend ainsi, tel qu'illustré par la Figure 2.31, de l'identification du problème à l'implémentation ou l'évaluation du concept généré solutionnant ledit problème. Considérant que le mécanisme de résolution de problème peut être perçu comme itératif, l'implémentation du concept généré a été retenue comme borne finale de la démarche. Ce choix confère à la phase d'évaluation, existante dans certain modèle de processus, un rôle d'initiation d'une nouvelle itération dans résolution d'un problème, cette dernière permettant l'identification d'un nouveau problème.

Tableau 4.1 - Comparaison des premières et dernières étapes des modèles de processus de résolution de problème.

	Identification du problème	Implémentation/Évaluation du concept généré
[Dewey, 1910]	Difficulté perçue (<i>Perceived difficulty</i>)	Test et validation (<i>Testing and acceptance/rejection</i>)
[Wallas, 1926]	Investigation du problème (<i>Problem investigation</i>)	Vérification (<i>Verification</i>)
[Merrifield et al., 1962]	Constatation d'un problème (<i>Problem recognition</i>)	Évaluation – Réplication (<i>Evaluation – Reapplication</i>)
[Bransford et Stein, 1984]	Identification (<i>Identifying</i>)	Évaluation (<i>Looking back</i>)
[Isaksen et Treffinger, 1985]	Quel est le problème ? (<i>What is the problem ?</i>)	Implémentation (<i>Implementation</i>)
[Basadur, 1991]	Identification d'un problème (<i>Problem finding</i>)	Implémentation de la solution (<i>Solution implementation</i>)
[Adams et al., 2003]	Identification du besoin (<i>Identify need</i>)	Implémentation (<i>Implementation</i>)
[Bardach, 2011]	Définition du problème (<i>Define the problem</i>)	Décision (<i>Decide</i>)

En prenant en considération ces deux bornes, il est possible d'analyser les disparités de cadre des modèles de processus *problem-driven* biomimétique, cf. Figure 4.2.

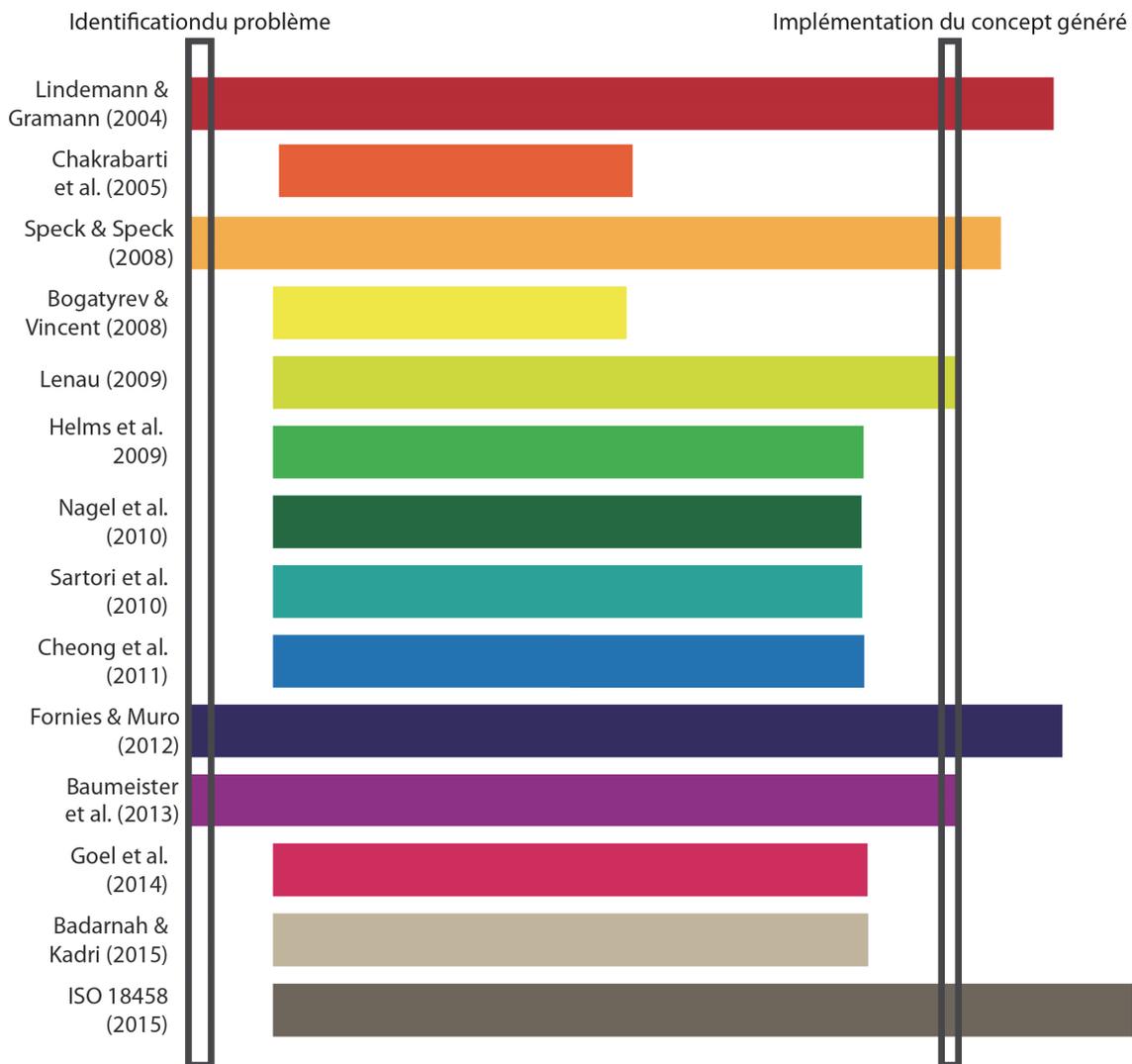


Figure 4.2 - Comparaison du cadre des modèles de processus biomimétiques avec les bornes du processus de résolution de problème.

La Figure 4.2 met bien en avant des disparités de cadre: certains modèles n'intègrent pas une ou plusieurs étapes amonts (e.g. [Lenau, 2009]), d'autres n'abordent pas certaines étapes permettant d'aboutir à l'implémentation du concept généré (e.g. [Bogatyrev et Vincent, 2008]) et enfin, certains modèles ajoutent des étapes avales n'appartenant pas au processus de résolution de problème (e.g. [ISO/TC266, 2015b]). Il est à noter qu'aucun des modèles identifiés n'ajoute d'étapes amont au processus de résolution de problème, tous débutants soit à l'étape d'identification du problème ou après.

Les problématiques de cadre sont susceptibles d'occasionner des problèmes d'interfaces avec le processus de conception préexistant au sein d'une entreprise. Si certaines étapes sont manquantes/ajoutées, une fois le modèle appliqué au sein d'une démarche de conception par une entreprise, ces gaps/redondances compliquent la tâche des concepteurs. Le modèle de processus biomimétique *problem-driven* unifié se doit être en mesure d'offrir une solution à ces différences de cadrage, chose réalisable si ce dernier se concentre sur les étapes bornées par l'identification du problème et l'implémentation du concept généré.

4.1.1.2 Harmonisation de la spécificité

Certaines descriptions ont été formalisées de façon générique pour couvrir à la fois l'approche *problem-driven* et *solution-based* (e.g. [ISO/TC266, 2015b]), impactant leur clarté une fois abordées sous l'angle unique *problem-driven*, comme ici. À l'opposé, certains processus [Chakrabarti et al., 2005, Cheong et al., 2011] sont intrinsèquement liés à l'utilisation d'outils spécifiques pour leur complétion, empêchant leur application directe si l'accès aux outils mentionnés n'est pas possible. Harmoniser ce critère nécessite donc d'identifier une spécificité médiane permettant à chacune des étapes d'offrir une bonne lisibilité sans être attaché à une démarche particulière.

4.1.1.3 Harmonisation de la granularité

La granularité considérée ici porte sur le nombre d'étapes considérées (Tableau 4.2 à Tableau 4.5) ainsi que sur le niveau de détail qui leur est accordé (i.e. nombre de sous-étapes).

La première étape, celle de l'identification, correspond, tel qu'illustré par le Tableau 4.2, au processus selon lequel un contexte initial est analysé permettant l'identification et la définition du problème.

Tableau 4.2 - L'étape d'identification [Massey et Wallace, 1996] telle que formalisée par les modèles de processus biomimétique

Identification	Étape(s)	Synthèse
[Lindemann et Gramann, 2004]	Formulation de l'intention/de la cible	Définition du problème
[Speck et al., 2008]	Problème technique	Identification du problème
[Lenau, 2009]	Formulation du problème	Définition du problème
[Helms et al., 2009]	Définition du problème	Définition du problème
[Forniés et Muro, 2012]	Instauration du cadre	Définition du problème
[Baumeister et al., 2013]	Définition du contexte	Identification du problème
[Goel et al., 2014]	Formulation du problème	Définition du problème
[Badarnah et Kadri, 2015]	Définition du challenge de conception	Identification du problème

Les deux sous-étapes identifiables (i.e. identification du problème et définition du problème) peuvent être combinées et labélisées sous l'intitulé « Analyse du problème ».

La deuxième étape, celle de la définition, correspond à une étape de modélisation par assemblage des constituants du problème et de leurs relations à partir des stimuli ayant permis la reconnaissance du problème à traiter, tel qu'illustré par le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 - L'étape de définition [Massey et Wallace, 1996] telle que formalisée par les modèles de processus biomimétique

Définition	Étape(s)
[Chakrabarti et al., 2005]	Décrire en utilisant une triplette d'adverbe
[Bogatyrev et Vincent, 2008]	Définir la fonction principale
[Lenau, 2009]	Mots clés fonctionnels

<i>[Helms et al., 2009]</i>	Recadrage du problème
<i>[Nagel et al., 2010a]</i>	Modélisation fonctionnelle
<i>[Sartori et al., 2010]</i>	Identification de la fonction requise Identification des spécifications et conditions
<i>[Cheong et al., 2011]</i>	Sélection des mots clés fonctionnels
<i>[Forniés et Muro, 2012]</i>	Définition de la fonction clé
<i>[Baumeister et al., 2013]</i>	Identification de la fonction Intégration des principes du vivant
<i>[Goel et al., 2014]</i>	Recadrage du problème
<i>[Badarnah et Kadri, 2015]</i>	Définition du challenge de conception

Cette étape de définition inclut, dans les modèles de processus considérés, des démarches de définition de mots clés, de recadrage du problème ou encore de modélisation. De manière synthétique, cette étape correspond au processus selon lequel un problème est analysé afin d'en identifier les causes possibles, les causes profondes ou encore les causes principales.

L'étape suivante, celle de la génération d'alternatives correspond à la démarche permettant à des solutions uniques ou des groupes de solution d'être générés en vue de résoudre les causes identifiées.

Tableau 4.4 - L'étape de génération d'alternative(s) [Massey et Wallace, 1996] telle que formalisée par les modèles de processus biomimétique

Génération d'alternative(s)	Étape(s)
<i>[Lindemann et Gramann, 2004]</i>	Mise en corrélation avec des systèmes biologiques
<i>[Chakrabarti et al., 2005]</i>	Traduction de l'input en descriptions analogiques / Recherche d'occurrences dans le logiciel
<i>[Speck et al., 2008]</i>	Recherche d'analogies biologiques
<i>[Bogatyrev et Vincent, 2008]</i>	Recherche de prototypes biologiques / Liste des paramètres essentiels / liste des paramètres opposés / Création d'une table / Identification d'une combinaison
<i>[Lenau, 2009]</i>	Recherche d'équivalents biologiques
<i>[Helms et al., 2009]</i>	Recherche de solution biologique
<i>[Nagel et al., 2010a]</i>	Génération conceptuelle automatisée / Audit des solutions / Exploration biologique
<i>[Sartori et al., 2010]</i>	Identification d'exemples biologiques / Identification des principes de solution / Identification de structure
<i>[Cheong et al., 2011]</i>	Élargissement des mots clés / Identification de correspondances / Organisation des résultats
<i>[Forniés et Muro, 2012]</i>	Recherche biologique
<i>[Baumeister et al., 2013]</i>	Découverte de modèles naturels
<i>[Goel et al., 2014]</i>	Recherche de solution biologique
<i>[Badarnah et Kadri, 2015]</i>	Exploration de scénarios / Identification de pinacles
<i>[ISO/TC266, 2015b]</i>	Analogie-Abstraction

Que cette étape soit considérée selon 1 ou x sous-étapes, l'étape de génération d'alternatives correspond au sein des modèles de processus biomimétique à la phase de recherche d'organismes biologiques potentiellement pertinents.

L'étape de choix de la solution n'est abordée par aucun des modèles de processus biomimétiques considérés. L'explicitation de cette étape aboutissant à la sélection parmi les idées générées en vue de résoudre le problème initial constitue donc un point d'amélioration envisageable.

L'étape suivante, celle d'implémentation et de test, correspond à l'intégration des idées sélectionnées au sein du contexte initial en vue de résoudre le problème par leur application. En fin d'étape, une évaluation de la solution permet aux concepteurs de s'assurer que les résultats atteints correspondent aux attentes.

Tableau 4.5 - L'étape d'implémentation et de test [Massey et Wallace, 1996] telle que formalisée par les modèles de processus biomimétique

Implémentation & test	Nombre d'étapes	Synthèse
[Lindemann et Gramann, 2004]	1	Abstraction
[Chakrabarti et al., 2005]	0	-
[Speck et al., 2008]	3	Abstraction, Application
[Bogatyrev et Vincent, 2008]	0	-
[Lenau, 2009]	7	Transposition, Abstraction, Application
[Helms et al., 2009]	3	Abstraction, Application
[Nagel et al., 2010a]	2	Transposition, Application
[Sartori et al., 2010]	2	Abstraction, Application
[Cheong et al., 2011]	1	Application
[Forniés et Muro, 2012]	2	Transposition, Application
[Baumeister et al., 2013]	4	Abstraction, Transposition, Application
[Goel et al., 2014]	3	Abstraction, Application
[Badarnah et Kadri, 2015]	2	Abstraction, Application
[ISO/TC266, 2015b]	1	Application

Cette étape, appliquée aux modèles de processus biomimétiques présente une grande divergence dans son nombre de sous-étapes (de 0 à 7). Afin d'harmoniser ces sous-étapes, les actions à mettre en œuvre ont été catégorisées en trois types de sous-étapes : abstraction, transposition et application.

4.1.2 Élaboration du modèle de processus biomimétique problem-driven unifié

Comprendre la démarche biomimétique est un élément essentiel pour un biomiméticien. Cette compréhension a été rendue difficile par la profusion des descriptions de processus existant dans la littérature. Afin d'en simplifier l'approche, l'ensemble des modèles de processus identifiés ont été combinés sous la forme d'un modèle de processus biomimétique *problem-driven* unifié. L'intérêt d'un modèle unique est de permettre une avancée à la fois sur le plan expérientiel, intellectuel et expérimental, abordant simultanément les trois domaines sur lesquels les processus sont amenés à évoluer [Wallace et Blessing, 2000].

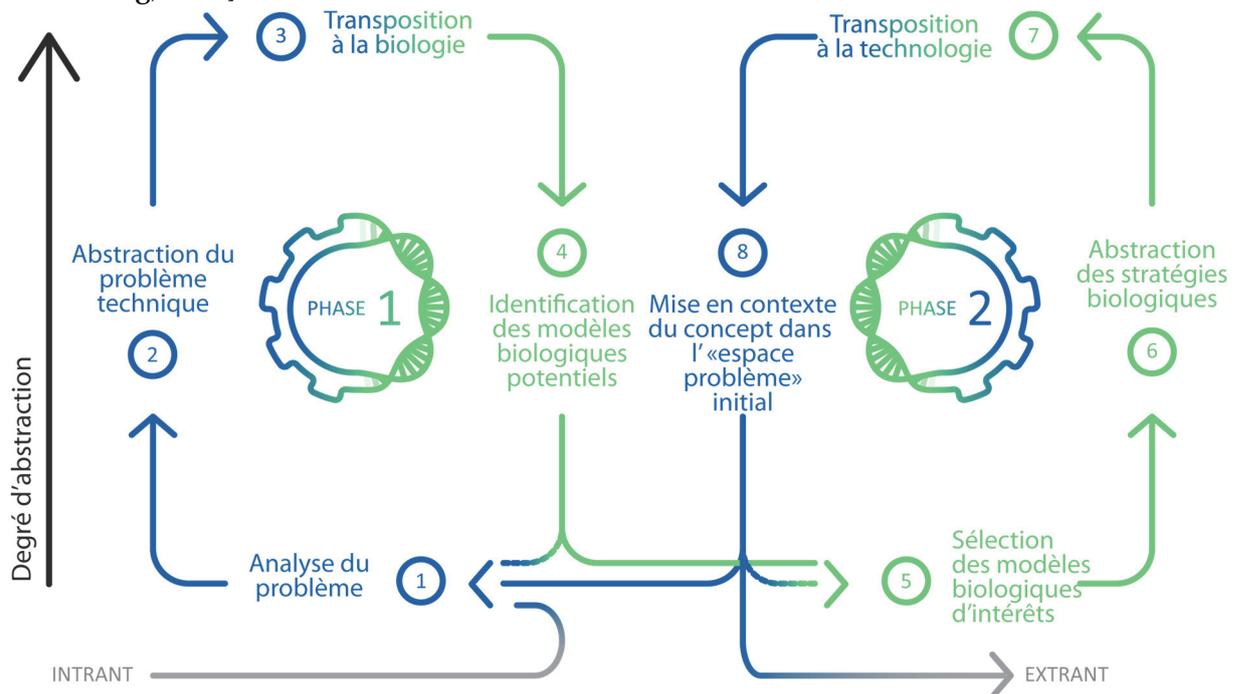


Figure 4.3 - Modèle de processus biomimétique *problem-driven* unifié

La Figure 4.3 présente le modèle de processus biomimétique *problem-driven* unifié, constitué de 8 étapes. Le processus décrit au sein du modèle se subdivise en deux phases, conçues comme un double cycle symétrique d'abstraction-spécification. La première phase (de l'étape 1 à l'étape 4) se concentre sur la transition de la technologie à la biologie, là où la seconde phase (de l'étape 5 à 8) en aborde la démarche inverse, allant de la biologie vers la technologie. Le domaine de connaissance considéré par chacune des étapes est indiqué par la couleur du marquage, vert pour la biologie, bleu pour la technologie.

Analyse du problème

Le point d'entrée du modèle est l'analyse du problème (étape 1). Cette première étape comprend l'évaluation de la situation et/ou la description du problème.

Dans le premier scénario, un problème spécifique à considérer n'a pas encore été identifié. L'étape considérée vise alors à l'identification d'un axe d'amélioration pour le système technique d'intérêt et se concentre donc sur l'optimisation du système. Dans le second scénario, celui ou un problème a déjà été identifié, c'est la description du dit

problème qui est au cœur des préoccupations. Cette description a pour but de générer une formalisation appropriée afin d'éviter les complications liées aux problèmes mal définis.

Abstraction du problème technique

L'abstraction du problème technique (étape 2) conduit à l'obtention d'un modèle fonctionnel prenant en compte le contexte tout autant que les contraintes relatives au problème ; en outre, le modèle clarifie la fonction à atteindre.

Transposition à la biologie

La génération d'un modèle générique combiné à l'identification de la ou des fonctions envisagées rend possible la transposition du problème et de son environnement à la biologie (étape 3). À cette étape, une question posée à la nature est usuellement formulée. Cette question a pour but de permettre l'exploration de comment la nature est parvenue à atteindre une ou plusieurs fonctions spécifiques. Cette troisième étape est importante, car les résultats seront grandement impactés par la formulation de la requête.

Identification des modèles biologiques potentiels

La transposition de la question rend possible l'identification de modèles biologiques (étape 4) par recherche dans la littérature, que cette dernière utilise des moteurs de recherche ou des bases de données, ou par collecte des connaissances existantes. À la suite de cette quatrième étape, une première itération est possible. L'identification de modèles biologiques peut mener à une compréhension plus profonde du problème initial, nécessitant une reformulation du problème et de son analogie biologique (étapes 1 à 3).

Sélection du ou des modèles biologiques d'intérêts

Cette étape de sélection implique une prise de recul vis-à-vis de l'étape amont. Une fois un pool de possibilités constitué, il convient de mettre l'ensemble des occurrences identifiées en perspective avec la problématique technique de départ (étape 5). Cette comparaison a pour but de filtrer les organismes biologiques selon leur pertinence afin d'en réduire la quantité pour constituer une charge de travail cohérente pour la suite du processus.

Abstraction des stratégies biologiques

Les stratégies mises en œuvre par les modèles biologiques doivent être finement comprises puis abstraites (étape 6). Cette abstraction des stratégies biologique est cruciale, une correspondance biologie-technologie parfaite n'étant, dans une très grande majorité des cas, pas réalisable. Généralement, l'abstraction mène à un modèle fonctionnel du système biologique.

Transposition à la technologie

La transposition de ou des stratégies biologiques est l'étape suivante (étape 7). Cette étape s'appuie sur la phase précédente d'abstraction des stratégies biologiques et se formalise généralement sous la forme d'une description détaillée des principes sous-jacents

(e.g. principes de conception [Baumeister et al., 2013]), ou d'un modèle fonctionnel (e.g.[Helms et al., 2009]) du système biologique considéré, qui pourra dès lors être émulé technologiquement.

Mise en contexte du concept dans l'espace problème initial

Une fois un procédé d'émulation technologique conceptualisé, l'étape suivante et finale consiste à l'implémenter dans le contexte initial ainsi qu'à l'évaluer (étape 8). À ce stade, le cycle peut être achevé avec succès sous la forme d'un résultat de conception biomimétique. Si le résultat ne correspondant pas aux attentes de conception, le processus peut soit être ré-initié intégralement ou proposer une itération de la seconde phase en sélectionnant un ou plusieurs nouveaux modèles d'intérêts.

4.1.3 Conclusion quant à l'harmonisation du processus

L'analyse de la littérature a permis l'élaboration d'un modèle de processus biomimétique *problem-driven* unifié harmonisant les différentes descriptions ayant été identifiées. Ce modèle n'ambitionne aucunement de constituer un nouveau modèle de processus en soi, mais doit plutôt être perçu comme un instrument à même de faire converger les modèles de processus biomimétiques.

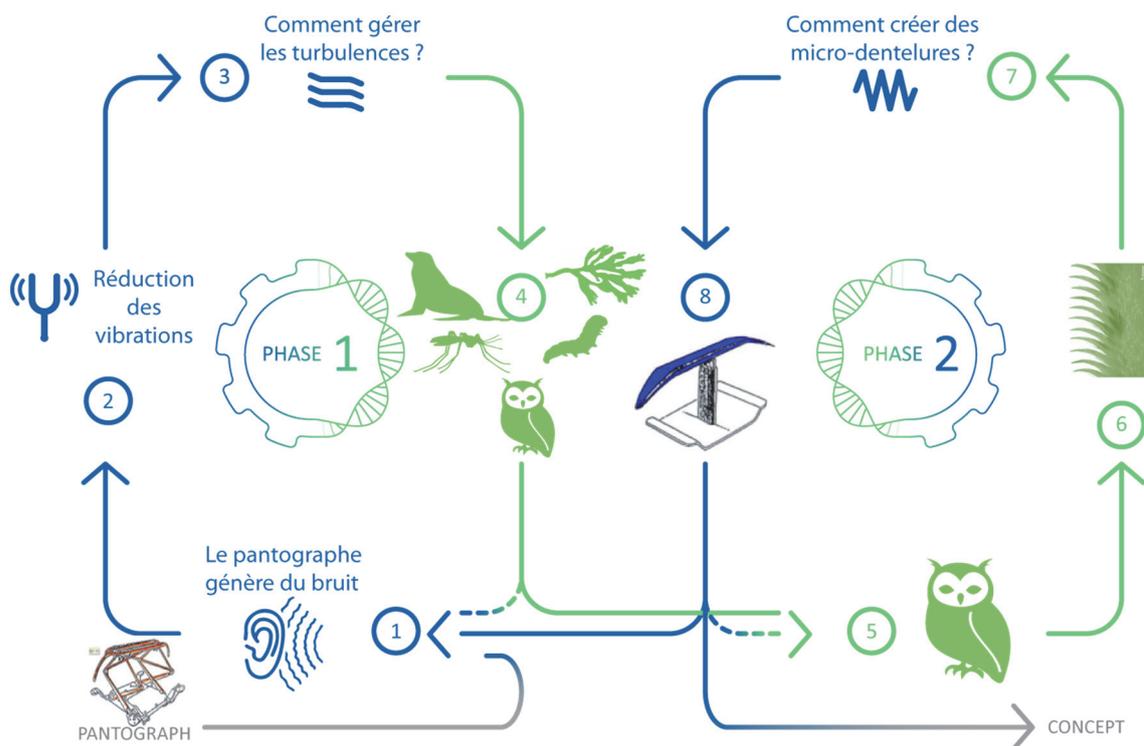


Figure 4.4 - Le processus unifié appliqué au shinkansen

Le processus, ici présenté, a été formalisé conformément aux cinq étapes de résolution de problème dite classique [Massey et Wallace, 1996]. Cette interconnexion entre résolution de problème classique et biomimétique est primordiale dans la compréhension de comment les outils issus des sciences de l'ingénierie de la conception peuvent contribuer à la biomimétique. En mettant en parallèle le mécanisme cognitif lié à l'implémentation

d'une démarche TRIZ, le processus biomimétique *problem-driven* apparaît comme un double cycle TRIZ, tel qu'illustré par la Figure 4.5, corroborant l'approche SBID (Systematic Bio-Inspired Design) développée par Vandevienne et al. [2015]. Structurée ainsi, cette formalisation, qui pourrait sembler abstraite aux « biomiméticiens » issus du monde de la biologie, a le mérite de rapprocher biomimétique et conception innovante, donnant la pleine mesure du cœur du challenge d'une telle démarche aux ingénieurs/gestionnaires de l'innovation.

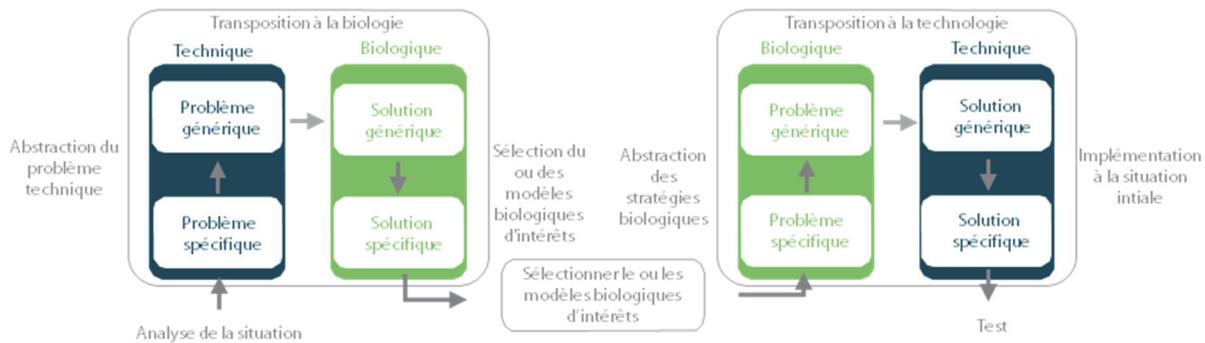


Figure 4.5 - Le processus biomimétique *problem-driven* selon la perspective de la démarche TRIZ.

L'interconnexion entre la résolution de problème et la biomimétique met aussi en exergue une étape jusqu'alors laissée pour compte par les précédentes descriptions : le choix de la solution ou la sélection du ou des modèles biologiques d'intérêt (cinquième étape). Cette étape semble cruciale, car point d'entrée et donc support de toute l'approche allant de la biologie vers la technologie. Le choix d'un modèle d'inspiration fait prendre en considération les équivalences de contraintes biologiques et technologiques et assure l'efficacité du produit final.

De manière globale, le modèle de processus biomimétique *problem-driven* souligné au sein de cette section constitue un instrument susceptible d'aider les ingénieurs et les biologistes à coopérer dès l'établissement du processus à mettre en œuvre. Cette approche leur permet de créer le consensus sur les enjeux et les ressources à mettre en œuvre pour répondre aux besoins. Afin de rendre le modèle présenté encore plus applicable aux concepteurs, les outils biomimétiques peuvent être mis à contribution pour faciliter l'accomplissement de chacune des étapes décrites, aboutissant à un potentiel essor de la biomimétique.

4.2 MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Si l'aperçu des outils, présenté en section 2.5.3 est à même d'assister les concepteurs en prodiguant une vue d'ensemble de la boîte à outils biomimétiques, il ne leur permet cependant pas de résoudre les problématiques liées à leur choix. Une solution pourrait être, pour le praticien, d'acquérir des connaissances quant à l'usage de chacun d'entre eux. L'apprentissage d'outils et de méthodes de conception s'avérant souvent chronophage [Thiebaud, 2003], il est difficile, dans le contexte industriel actuel, qu'une entreprise y dédie un ou plusieurs de ses employés. Il semble dès lors intéressant de n'avoir à acquérir les connaissances, eu égard au contexte de conception, relatives aux méthodes appropriées.

Atteindre cet objectif implique l'établissement d'un référentiel des outils biomimétiques afin d'être en mesure de positionner les différents outils en fonction de leur pertinence vis-à-vis des besoins et/ou spécificités d'un contexte industriel donné.

Pour y répondre une étude sur comment ces outils sont perçus par leurs utilisateurs a été considérée. Cette étude devrait aboutir à l'identification des forces et faiblesses des outils considérés, tout en permettant une validation de leur distribution faite au regard du modèle de processus biomimétique *problem-driven*.

4.2.1 Sélection des outils biomimétiques

Parmi les 53 outils biomimétiques identifiés, tous ne présentent pas le même degré de maturité ; certains, encore au stade du développement, ne sont, en l'état, pas encore suffisamment aboutis pour que leur utilisation dans le cadre d'un développement de projet industriel soit pertinente (e.g. DANE [Vattam et al., 2011a], IDEA-INSPIRE [Chakrabarti et al., 2005] dont les bases de données s'avèrent trop restreintes pour que ces outils accomplissent ce pour quoi ils ont été conçus).

Ainsi, au sein des travaux présentés, un sous-ensemble d'outils pertinent pour l'analyse a été sélectionné avec les critères suivants :

- Implémentation biomimétique : L'outil/la méthode a-t-il/elle été documenté(e) comme ayant été utilisé(e) dans le cadre d'un projet biomimétique ?
- Description théorique : L'outil/la méthode et son développement a-t-il/elle été décrit(e) et discuté(e) dans la littérature scientifique ?
- Cas d'étude illustratif : L'outil/la méthode a-t-il/elle été divulgué(e) dans un environnement pratique ?
- Recommandations d'usage : Les auteurs ont-ils fourni des documents facilitant la bonne utilisation de leur outil/méthode ?

Ces paramètres ont été définis afin d'identifier les outils les plus à même de présenter un degré de maturité suffisant pour être implémenté industriellement. Vingt-deux outils ont ainsi été sélectionnés comme illustré par le Tableau 4.6.

Tableau 4.6 - La boîte à outils biomimétique et sa correspondance avec les étapes du processus biomimétique « *problem-driven* » unifié.

	Outils considérés
Étape 1	S-Curve, Task Analysis, LP, KLP
Étape 2	MSD, Uno-BID, TC, IFR, CW, DANE, SAPPhIRE, 4-Box, 5-Whys
Étape 3	IP, Resources, Taxonomy, BIOPS
Étape 4	BIOPS, Bioniquity, AskNature, Brainstorming
Étape 5	T-chart
Étape 6	Uno-BID, DANE, SAPPhIRE, BioM, 4-Box
Étape 7	IP, Resources
Étape 8	-

Les outils issus de TRIZ ont été distribués, basés sur le travail de Schöfer et al. [2013] s'appuyant sur les travaux de Savransky [2000] et de Nakagawa [2003]. Les autres outils ont été assignés selon l'analyse de la littérature présentée en section 4.1.1.

4.2.2 Catégorisation des outils biomimétiques

Tout comme il ne ferait sens de comparer une Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) à une Chromatographie sur Couche Mince (CCM) (ces outils ne partageant ni les mêmes objectifs, ni les mêmes besoins de mise en œuvre), les outils biomimétiques ont été segmentés en quatre catégories, comme illustré en Tableau 4.7

La catégorisation a été effectuée selon les types d'activités créatives mis en œuvre durant un processus de résolution de problème [Wallas, 1926, Amabile, 1983, Nelson, 2003]. Par souci de consistance, les catégories sélectionnées ont été alignées avec la définition de la biomimétique (section 2.2.3) qui stipule qu'un problème initial est résolu par l'analyse, l'abstraction, le transfert et l'application de connaissance issue de modèles biologiques à un domaine technique. Ainsi, les quatre catégories considérées pour les outils biomimétiques sont : abstraction (préparation [Wallas, 1926]; identification de la tâche ou du problème [Amabile, 1983]; désignation [Nelson, 2003]), transfert (incubation [Wallas, 1926]; préparation [Amabile, 1983]; cadrage [Nelson, 2003]), application (illumination [Wallas, 1926]; génération d'une réponse [Amabile, 1983]; intervention [Nelson, 2003]) et analyse (vérification [Wallas, 1926]; validation de la réponse [Amabile, 1983]; retours [Nelson, 2003]).

Tableau 4.7 - Types d'outils biomimétiques et leur correspondance avec le processus biomimétique *problem-driven unifié*

Étape 1 - Analyse du problème	Outils d' analyse
Étape 2 - Abstraction du problème technique	Outils d' abstraction
Étape 3 - Transposition à la biologie	Outils de transfert
Étape 4 - Identification des modèles biologiques potentiels	Outils d' application
Étape 5 - Sélection du/des modèle(s) pertinent(s)	Outils d'analyse
Étape 6 - Abstraction des stratégies biologiques	Outils d' abstraction
Étape 7 - Transposition à la technologie	Outils de transfert
Étape 8 - Implémentation et test dans le contexte initial	Outils d' application

4.2.3 Évaluer un outil biomimétique

Afin de rendre possible l'identification des forces et faiblesses de chaque outil biomimétique considéré, en accord avec leur typologie, il convient de définir l'ensemble de critères d'évaluation sur lequel s'appuiera cette première expérimentation.

4.2.3.1 Critère évaluant les aspects pratiques

La comparaison des méthodes créatives ou de résolution de problèmes et de leurs outils a déjà été abordée à plusieurs reprises (e.g. [Alford et al., 1998, Cavallucci et Lutz, 2000, Shah et al., 2000, Chakrabarti, 2003, Thiebaud, 2003, Shneiderman et Plaisant, 2006, Glier et al., 2011, Sarkar et Chakrabarti, 2011, Reich et al., 2012]). Ces références tendent à s'accorder sur un ensemble de critères d'évaluation. Ces critères ayant suscité le consensus sont la rapidité (*swiftness*) (e.g. [Glier et al., 2011]), la simplicité (*simplicity*) (e.g. [Thiebaud, 2003,

Shneiderman et Plaisant, 2006, Glier et al., 2011]), l'autonomie (*capacity to be used stand-alone*) (e.g. [Thiebaud, 2003]), l'adaptabilité au champ d'application (*field adaptability*) (e.g. [Thiebaud, 2003, Shneiderman et Plaisant, 2006]), l'adaptabilité au groupe (*group adaptability*) (e.g. [Thiebaud, 2003, Shneiderman et Plaisant, 2006]) et la précédence (*capacity to ease the following design stage*) (e.g. [Glier et al., 2011]). Ces critères, évaluant les conditions opératoires d'un outil donné afin que ce dernier puisse dispenser ce pour quoi il a été conçu, définissent les critères d'aspects pratiques qui seront utilisés pour évaluer les outils biomimétiques de manière transverse comme suit :

- **Rapidité** : Temps nécessaire à l'implémentation de l'outil. Un faible score de rapidité constitue, par exemple, le cas d'un outil nécessitant un long temps d'implémentation ; un score élevé de rapidité constitue, par exemple, le cas d'un outil nécessitant un temps d'implémentation très court (la durée étant relative au contexte).
- **Simplicité** : Degré de complexité de l'outil. Le prérequis de séances de formation afin qu'un utilisateur soit à même d'utiliser un outil s'avère chronophage et implique des coûts substantiels pour les entreprises. Idéalement, un outil devrait donc être en mesure de fournir l'intégralité de son potentiel théorique sans nécessiter une quelconque formation au préalable (i.e. être pleinement utilisable intuitivement). Un faible score de simplicité constitue, par exemple, le cas d'un outil nécessitant une formation dédiée avant qu'un utilisateur puisse convenablement l'implémenter ; un score élevé de simplicité constitue, par exemple, le cas d'un outil pouvant être instinctivement utilisé à son plein potentiel.
- **Autonomie** : Capacité de l'outil à constituer un bloc méthodologique. Ce critère réfère à l'indépendance d'un outil. Si un outil requiert d'être combiné à un pendant méthodologique, en amont ou en aval, cela implique que son potentiel théorique est intimement lié à l'usage combiné des outils. Un faible score d'autonomie constitue, par exemple, le cas d'un outil ne pouvant être utilisé qu'au sein d'une méthodologie globale ; un score élevé d'autonomie constitue, par exemple, le cas d'un outil utilisé de façon unique.
- **Adaptabilité au champ d'application** : Aptitude de l'outil à s'adapter à différents domaines d'application. Certains outils, ou certaines parties, sont dédiés à un domaine spécifique (e.g. Principe Inventif de TRIZ n°29 : Pneumatique et hydraulique qui ne semble pertinents que dans le contexte de l'ingénierie mécanique). Idéalement, un outil devrait être suffisamment générique pour pouvoir s'appliquer à chaque domaine d'application, mais aussi suffisamment spécifique pour être source de valeur ajoutée. Un faible score d'autonomie constitue, par exemple, le cas d'un outil spécifique à un domaine spécifique unique ; un score élevé d'autonomie constitue, par exemple, le cas d'un outil complètement adaptable à n'importe quel domaine d'application.
- **Adaptabilité au groupe** : Aptitude de l'outil à s'adapter à la composition d'un groupe. Le processus biomimétique requiert à la fois l'utilisation de connaissances liées à l'ingénierie et à la biologie, généralement couvertes par différentes personnes. L'interdisciplinarité est dès lors au cœur de ce processus et les outils biomimétiques

doivent, en conséquence, faciliter l'interaction. Considérant qu'un outil soit capable d'apporter sa valeur indépendamment de la composition du groupe signifie qu'il facilite cet échange de connaissance en aidant ses utilisateurs à structurer leurs pensées. Un faible score d'adaptabilité au groupe constitue, par exemple, le cas d'un outil qui pour être convenablement utilisé doit nécessairement l'être ou par un utilisateur individuel ou par un groupe d'utilisateur ; un score élevé d'adaptabilité au groupe constitue, par exemple, le cas d'un outil pouvant être utilisé par un utilisateur individuel ou un groupe sans que cela n'impacte son efficacité.

- **Précédence** : Facilitation de l'étape de conception subséquente. Considéré individuellement, chaque outil, utilisé pour reconstituer le processus biomimétique possède un (ou plusieurs) intrant(s) et génère un (ou plusieurs) extrant(s). Le critère de précédence s'efforce de souligner le niveau d'adéquation entre deux outils (l'extrait du premier constitue-t-il un intrant pertinent pour le second ?), facilitant de ce fait la compréhension et l'utilisation de l'outil subséquent. Un faible score de précédence constitue, par exemple, le cas d'un outil générant un extrait non adapté à la tâche de conception suivante ; un score élevé de précédence constitue, par exemple, le cas d'un outil générant un point d'entrée en parfaite adéquation avec l'un des outils à mettre en œuvre lors de l'étape suivante.

4.2.3.2 Les critères évaluant les aspects théoriques

Pour chaque catégorie d'outils biomimétiques, un certain nombre de critères spécifiques à leur typologie ont été définis. Ces critères, évaluant comment un outil délivre ce pour quoi il a été conçu, définissent les critères d'aspects théoriques qui seront utilisés pour évaluer les outils biomimétiques selon leur catégorie.

Outils d'analyse

Les outils d'analyse ont pour objectifs de définir l'espace-problème [Newell et Simon, 1972] par une évaluation précise et exhaustive de la situation. Ces mêmes outils peuvent aussi définir l'espace-solution [Newell et Simon, 1972] par la description d'une situation idéale où le problème n'existerait plus. Il leur est enfin possible d'offrir un moyen de prioriser les problèmes sous-jacents, priorisation requise pour atteindre cet espace de solution [Jonassen, 1997]. Ainsi, les critères d'évaluation des outils d'analyse, tel que défini au sein de ces travaux sont la Complétude (*analysis completeness*) et la précision (*analysis accuracy*) de l'analyse, l'identification de l'idéalité (*identification of ideality*) et la priorisation (*priorization*). Ils seront utilisés pour évaluer les outils biomimétiques d'analyse comme suit et tel qu'illustré en Figure 4.6:

- **Complétude de l'analyse.** Capacité de l'outil à analyser de manière exhaustive une situation.
- **Précision de l'analyse.** Capacité à proposer une analyse fine de la situation.
- **Idéalité.** Capacité à identifier un maximum théorique (une situation idéale), définissant une série d'objectifs à atteindre pour les concepteurs.

- **Priorisation.** Un problème soulève souvent un certain nombre de manques et/ou de sous-problèmes au sein du système d'étude. Leur priorisation permet au concepteur d'identifier les chemins, menant à l'Innovation, les plus pertinents.

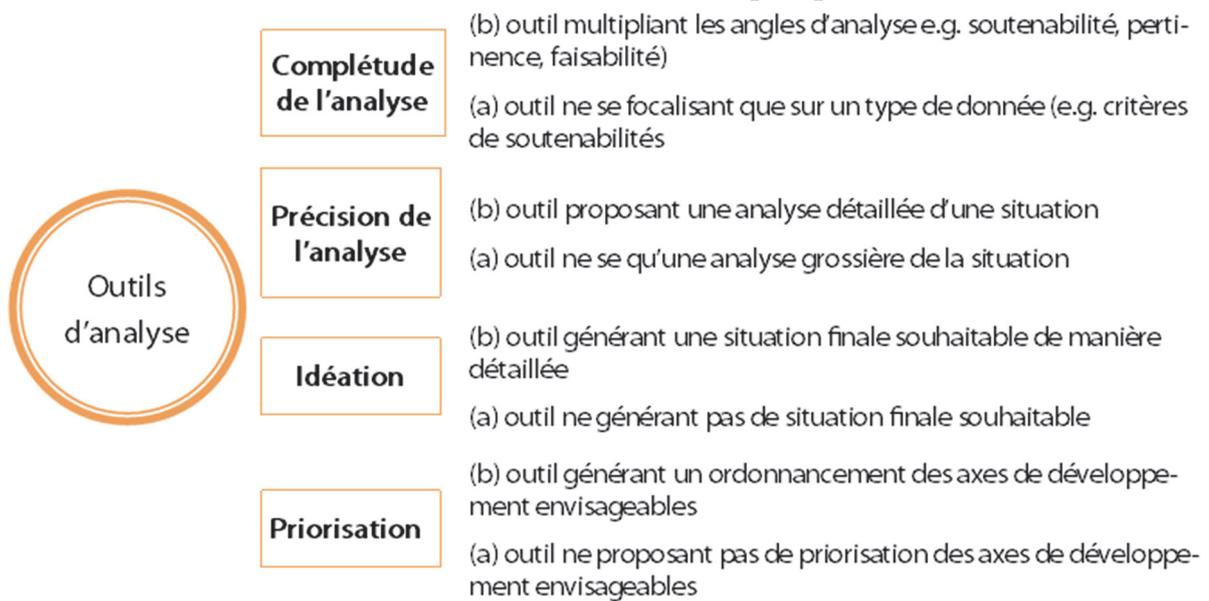


Figure 4.6 - Critères théoriques des outils d'analyse avec (a) : exemple illustrant un score faible pour le critère considéré et (b) : exemple illustrant un score élevé pour le critère considéré

Outils d'abstraction

Les outils d'abstraction se concentrent sur la génération de modèles à différents niveaux systémiques. Le but de ces modèles générés, dans le contexte de la biomimétique, est de faciliter la comparaison par analogie entre technologie et biologie, par augmentation du degré d'abstraction [Chi et al., 1981, Nagel et al., 2010a] ainsi que par réduction de la quantité d'information à prendre en compte [Chi et al., 1981] tout en conservant, autant que faire se peut, les contraintes contextuelles. Les critères d'évaluation des outils biomimétiques d'abstraction sont donc la capacité de modélisation (*modelling capacity*), la capacité d'intégrer plusieurs niveaux systémiques (*systemic levels integration*), la capacité de généralisation (*generalization capacity*), la capacité de filtrer l'information (*information filtering*) et la préservation des contraintes (*constraints preservation*). Ils seront utilisés pour évaluer les outils biomimétiques d'abstraction comme suit et tel qu'illustré en Figure 4.7 :

- **Capacité de généralisation.** Capacité de l'outil à établir un accès au problème de manière générique. Ce critère réfère au pouvoir d'abstraction dispensé par l'outil, qui, dans un second temps, permettra de connecter le problème à des connaissances distantes.
- **Filtrage de l'information.** Capacité de l'outil à réduire la quantité d'information dispensée en fonction de son importance pour la résolution du problème. En lien avec le pouvoir de généralisation, l'abstraction doit être suffisamment précise pour présenter une bonne quantité d'information, trop ou trop peu d'information étant compromettant pour la résolution du problème.

- Préservation des contraintes. Capacité de l'outil à conserver les contraintes spécifiques nécessaires à la résolution du problème dans le cadre de la génération d'un modèle du problème. Un système technique accomplit une action impactant son environnement ; l'intégration de cet environnement et de contraintes relatives à ses interfaces est donc d'importance dans l'abstraction du problème initial.
- Capacité de modélisation (Cm). Capacité de l'outil à modéliser des problèmes complexes. Ce critère s'efforce de différencier les outils dédiés à la résolution de problèmes simples de ceux capables d'aborder ceux avec des degrés de complexités variables.
- Intégration des niveaux systémiques (Ins). Capacité de l'outil à intégrer des sous et/ou super-systèmes. Les problèmes, et ce généralement avec l'accroissement de leur complexité, tendent à pouvoir être perçus comme un ensemble de sous-problèmes, offrant plusieurs voies de résolution. Réaliser une analyse multi-niveaux garantit aux concepteurs un cadrage de leurs problèmes selon une granularité pertinente.

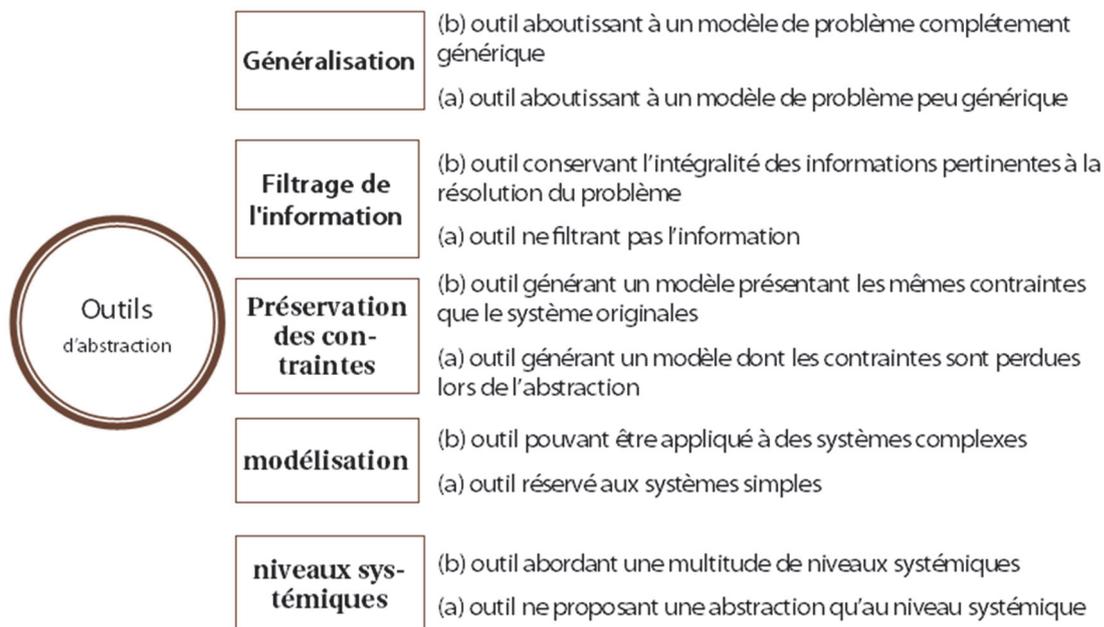


Figure 4.7 - Critères théoriques des outils d'abstraction avec (a) : exemple illustrant un score faible pour le critère considéré et (b) : exemple illustrant un score élevé pour le critère considéré

Outils de transfert

L'un des challenges inhérents aux démarches biomimétiques est la difficulté de communication entre ingénieurs et biologistes [Helms et al., 2009, Nagel et al., 2010a]. 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]. Les outils de transfert ont pour rôle de transposer précisément les concepts de la biologie à la technologie et vice-versa. Ces outils peuvent être amenés à gérer différents types de requêtes et génèrent des résultats plus ou moins distants du concept initial. Les critères d'évaluation des outils biomimétiques de transfert sont donc le sens de transposition (*direction*), l'adéquation (*transposition precision*), la polyvalence vis-à-vis des

requêtes (*query versatility*) et la constance (*consistency*). Ils seront utilisés pour évaluer les outils biomimétiques de transfert comme suit et tel qu'illustré en Figure 4.8 :

- Sens de transposition. Le processus biomimétique implique deux étapes de transposition. Ce critère identifie si ces étapes peuvent être abordées par un seul et unique outil. Ce critère évalue donc la capacité d'un outil à transposer de la biologie à la technologie et de la technologie à la biologie.
- Adéquation. Ce critère fait état de la précision de la "traduction" générée et donc de la capacité d'un outil à convenablement transposer un concept d'un domaine à un autre.
- Polyvalence vis-à-vis des requêtes. Au cours du processus biomimétique, une phase d'abstraction prend place avant d'entamer celle de transposition. Le résultat de cette abstraction peut se présenter selon différents formalismes. Ce critère de polyvalence vise à identifier si l'intrant d'un outil de transfert doit être spécifique ou si ledit outil est capable, à l'inverse, de s'adapter à l'intrant. Ce critère évalue donc si un outil de transfert est capable de transposer différents types de requêtes.
- Constance. Ce critère s'assure que le processus de transposition n'interfère pas avec celui d'abstraction ayant eu lieu précédemment. Ce critère évalue la capacité d'un outil de transfert à transposer un concept avec un degré d'abstraction identique.

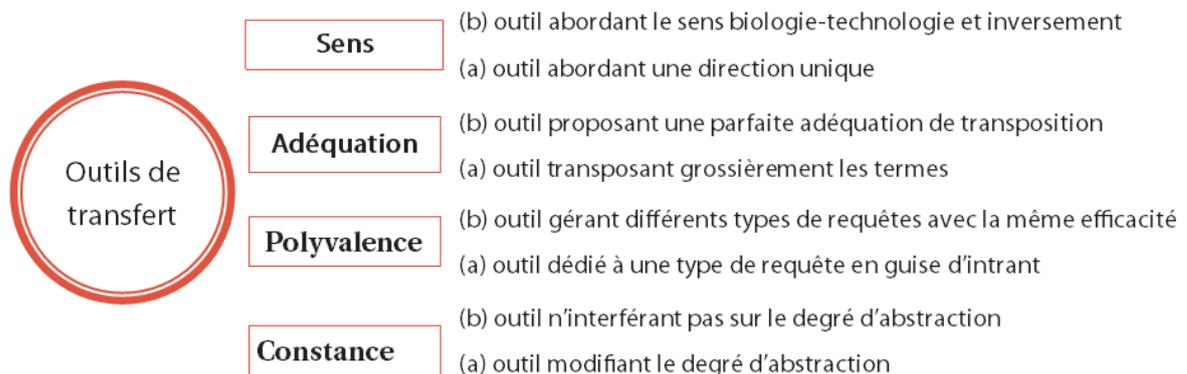


Figure 4.8 - Critères théoriques des outils de transfert avec (a) : exemple illustrant un score faible pour le critère considéré et (b) : exemple illustrant un score élevé pour le critère considéré

Outils d'application

Les outils d'application visent à la concrétisation. Ce sont les outils qui ont pour but de recontextualiser les modèles initialement transposés. Il est attendu de leur part qu'ils aboutissent à l'identification d'un faible nombre de solutions hautement inventives [Savransky, 2000] susceptibles de résoudre le problème initial, soit par de manière individuelle ou combinée [Henderson et Clark, 1990]. Les critères d'évaluation des outils biomimétiques d'application sont donc l'unicité de la solution (*uniqueness of solution*), l'expansion des connaissances (*knowledge enlargement*), l'inventivité (*inventiveness*) et la modularité (*modularization*). Ils seront utilisés pour évaluer les outils biomimétiques d'application comme suit et tel qu'illustré en Figure 4.9 :

- Unicité de la solution. Identifier la (ou les si l'on dégrade l'idéalité) meilleure solution possible à un problème facilite la tâche des concepteurs. Le critère d'unicité mesure donc la capacité d'un outil à pointer vers une solution unique, mesurant aussi la

quantité de bruit généré par l'outil (plus de bruit implique plus de solutions non adaptées prodiguées).

- Expansion des connaissances. La biomimétique pousse à l'acquisition de connaissances. Suivre le processus biomimétique selon une approche structurée implique que les concepteurs n'ont initialement pas des connaissances requises pour résoudre leurs problèmes (sans quoi le processus pourrait être implicite). Les outils d'application sont dès lors requis pour élargir les connaissances des dits concepteurs, ce que le critère d'expansion vise à mesurer.
- Modularisation. Si un problème peut être la concaténation de sous-problèmes relatifs, il peut en être de même pour les solutions. Les outils d'application doivent donc être en mesure de générer ou d'identifier des sous-ensembles de solution(s) (sans que l'intégralité d'un concept de solution ne soit générée/identifiée) ou d'hybrider différentes solution(s) partielle(s).
- Inventivité. Les innovations présentant un degré de rupture sont généralement perçues comme présentant une plus forte valeur ajoutée. Ce critère vise donc à évaluer le degré d'inventivité des solutions générées par un outil.

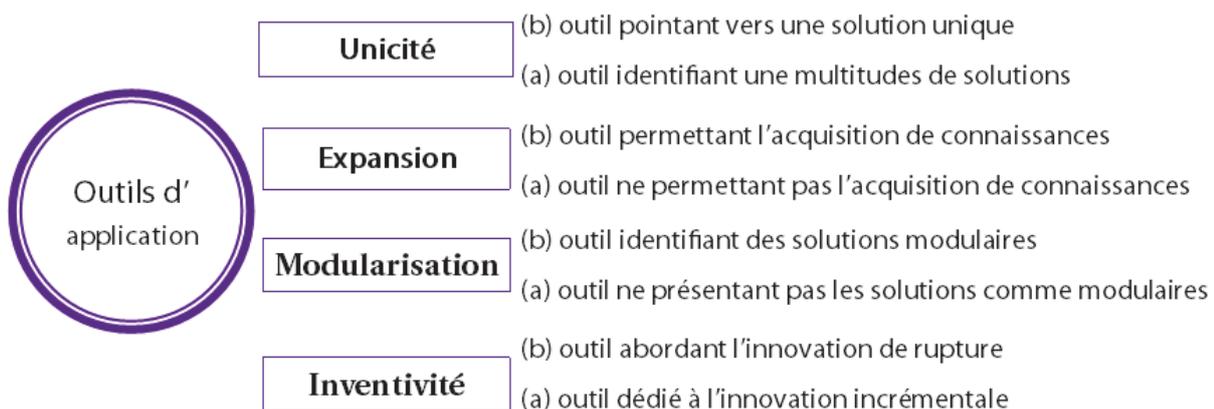


Figure 4.9 - Critères théoriques des outils d'application avec (a) : exemple illustrant un score faible pour le critère considéré et (b) : exemple illustrant un score élevé pour le critère considéré

Tout au long de l'expérimentation, la combinaison des critères d'ordre pratique avec ceux théoriques (spécifiques aux types d'outils) servira à l'évaluation des outils biomimétiques considérés, tel qu'illustré par le Tableau 4.8.

Tableau 4.8 - Résumé des critères d'évaluation des outils biomimétiques

	<i>Outils d'Analyse</i>	<i>Outils d'Abstraction</i>	<i>Outils de Transfert</i>	<i>Outils d'Application</i>
<i>Critères théoriques</i>	Complétude de l'analyse	Généralisation	Sens	Unicité

	Précision de l'analyse	Filtrage de l'information	Adéquation	Expansion des connaissances
	Idéalité	Préservation des contraintes	Polyvalence	Modularisation
	Priorisation	Modélisation	Constance	Inventivité
	Niveaux systémiques			
<i>Critères pratiques</i>	Rapidité			
	Simplicité			
	Autonomie			
	Adaptabilité au champ d'application			
	Adaptabilité au groupe			
	Précédence			

4.3 PREMIÈRE ÉTUDE – LES ATELIERS

Les outils de conception sont conçus pour être implémentés selon certaines conditions opérationnelles. Compte tenu de la portée industrielle de la recherche, l'évaluation des outils biomimétiques s'est voulue comme étant la plus proche possible des conditions d'implémentation industrielle d'une démarche biomimétique. Pour entrer en adéquation avec ces conditions, une série d'ateliers a été organisée.

4.3.1 Protocole

Au cours de l'expérimentation, différentes populations ont été amenées à structurer leurs avis relatifs aux différents outils biomimétiques. Ces populations sont constituées d'individus d'horizon divers, dont les retours sur le modèle de processus ainsi que sur l'usage des différents outils considérés ont été documentés et évalués.

4.3.1.1 Contexte

Les ateliers impliquent un nombre restreint de participants (i.e. cinq) et sont menés sur une durée d'une à deux journées de travail complètes. Les premiers types de participants sont les représentants industriels. Ces participants jouent le rôle de porteurs de problème et fixent le contexte industriel d'un atelier donné. Chaque atelier est censé comprendre un représentant industriel. Les deux autres types de participants sont les ingénieurs et les biologistes. Les ingénieurs impliqués sont à la fois des chercheurs en méthodologie de la conception et consultants en innovation, tous experts en résolution de problème et processus de conception. Les biologistes impliqués sont à la fois des conférenciers de la biomimétique/du biomimétisme renommés et des figures emblématiques de leur organisation nationale traitant de la bio-inspiration. Chaque atelier fait intervenir deux biologistes et deux ingénieurs.

Eu égard à la rareté de la population ciblée et à la durée des ateliers, seuls trois d'entre eux ont été implémentés : deux incluant un partenaire industriel, le troisième ayant été

accompli sur un cas d'étude théorique. En prenant compte de la participation redondante de certains, le nombre total de participants a été de huit.

La facilitation des deux premiers ateliers a été prise en charge par l'équipe encadrant les travaux de recherche, le troisième ayant été conjointement mené avec Kristina Wanieck, doctorante au Deggendorf Institute of Technology (DIT) en partenariat avec le laboratoire *Biogene Polymere* de l'Université Technique de Munich, aussi versée à l'organisation d'ateliers dans un contexte industriel dans le cadre de ses activités pour le réseau *Bayonik* où elle officie en tant que scientifique associée.

4.3.1.2 Premier atelier

Le premier atelier a été réalisé en collaboration avec une PME française travaillant dans le domaine de l'hébergement temporaire (i.e. écotourisme et événements uniques). L'étude considérée porte sur structures sphériques faites de film plastique, alimentées par un flux d'air continu généré par un compresseur. L'objectif de l'étude était d'identifier un moyen de réduire l'impact environnemental relatif à l'intégration de ces solutions d'hébergement temporaire. La formulation du problème traité a été formulée comme suit : « Comment gérer dynamiquement les flux d'énergies » ?

Cet atelier a permis l'évaluation, étalée sur une journée, de 6 différents outils, tel que détaillé dans la section 4.2.3.

Tableau 4.9 - Outils biomimétiques évalués lors du premier atelier et adéquation de ces derniers avec les étapes du modèle de processus biomimétique problem-driven.

Étape 1 - Analyse du problème	Outils d' analyse	Life's Principle (section 2.5.3.2)
Étape 2 - Abstraction du problème technique	Outils d' abstraction	5Whys (section 2.5.3.1) MSD (section 2.5.3.1)
Étape 3 - Transposition à la biologie	Outils de transfert	Taxonomy (section 2.5.3.2)
Étape 4 - Identification des modèles biologiques potentiels	Outils d' application	Brainstorming (section 2.5.3.1) AskNature (section 2.5.3.2)

Au terme de l'atelier, 12 pistes de solutions ont été identifiées, dont 4 jugées « sérieuses » par le représentant industriel.

4.3.1.3 Deuxième atelier

Le deuxième atelier a pris place dans une PME spécialisée dans la conception et fabrication rapide de pièces prototypes fonctionnelles et dans la production de petites séries. Le sujet d'étude a été « Comment réduire la quantité de matière utilisée, dans le cadre du développement d'une pièce exploitant les technologies de fabrication additives, sans impacter sa résistance structurelle » ?

Cet atelier a permis l'évaluation, étalée sur une journée, de 7 différents outils, tel que détaillé dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.10 - Outils biomimétiques évalués lors du deuxième atelier et adéquation de ces

derniers avec les étapes du modèle de processus biomimétique problem-driven.

Étape 1 - Analyse du problème	Outils d' analyse	KLP S-Curve TA
Étape 2 - Abstraction du problème technique	Outils d' abstraction	CW
Étape 3 - Transposition à la biologie	Outils de transfert	Taxonomy
Étape 4 - Identification des modèles biologiques potentiels	Outils d' application	AskNature

Au terme de l'atelier, 17 pistes de solutions ont été identifiées, dont 6 jugées « sérieuses » par le représentant industriel.

4.3.1.4 Troisième atelier

Le dernier atelier, extrapolé des travaux d'Azad et al.'s [Azad et al., 2015] et de Malik et al. [Malik et al., 2014] s'est concentré sur la « Conception d'une bouteille d'eau permettant la récolte d'eau atmosphérique saine et non salée pour un usage journalier ». Pour ce troisième workshop, aucun représentant industriel n'a été impliqué, en conséquence, l'un des auteurs à jouer le rôle de suppléant pour égaliser le nombre de participants avec les autres ateliers.

Cet atelier a permis l'évaluation, étalée sur une journée, de 11 différents outils, tel que détaillé dans le Tableau 4.11.

Tableau 4.11 - Outils biomimétiques évalués lors du deuxième atelier et adéquation de ces derniers avec les étapes du modèle de processus biomimétique problem-driven.

Étape 1 - Analyse du problème	Outils d' analyse	KLP S-Curve TA
Étape 2 - Abstraction du problème technique	Outils d' abstraction	DANE construct SAPPhIRE Uno-BID BioM 4-Box
Étape 3 - Transposition à la biologie	Outils de transfert	BIOPS
Étape 4 - Identification des modèles biologiques potentiels	Outils d' application	BIOPS Bioniquity
Étape 5 - Sélection du/des modèle(s) pertinent(s)	Outils d' analyse	T-Chart
Étape 6 - Abstraction des stratégies biologiques	Outils d' abstraction	DANE construct SAPPhIRE Uno-BID BioM 4-Box

Au terme de l'atelier une fiche concept, détaillant un concept final a été générée.

4.3.1.5 Méthode expérimentale

Chaque participant a reçu une formation méthodologique dont la durée a varié selon la complexité de l'outil considéré et du niveau de connaissance des participants. La durée moyenne de formation par outil a été approximativement d'une à deux heures par outil, conformément aux instructions, si elles existent, générées par leurs développeurs. Les séances de formation ont été dispensées selon la procédure suivante :

- Introduction générale sur les fondements théoriques à l'origine de l'outil ;
- Introduction sur les prérequis et objectifs de l'outil ;
- Cas d'étude illustratif, présenté par l'animateur de l'atelier ;
- Cas d'étude pédagogique, réalisé par les participants ;

La réalisation du cas d'étude pédagogique permet de s'assurer de la capacité des participants à utiliser un outil donné. À la fin de la formation, les outils ont été mis en application sur le cas d'étude réel de l'atelier, introduit par le représentant industriel. Des instructions (e.g. patrons, recommandations) pour chacun des outils ont été fournies aux participants. Chaque outil a été introduit individuellement à travers leur formation spécifique puis leur application au cas d'étude. Les outils ont été implémentés de façon séquentielle, selon le processus unifié présenté en Figure 4.3.

Suite à l'implémentation de l'outil sur un cas concret, des fiches d'évaluation combinant des critères théoriques et pratiques définis à partir de la catégorisation des outils (dont un exemple, celui relatif aux outils d'abstraction, est illustré en Figure 4.10), ont été distribuées aux participants afin qu'ils puissent évaluer les outils.

Outil d'abstraction	Niveau d'expertise relative à l'outil considéré ? Très faible <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Très élevé
	Degré d'expertise avec le système d'étude ? Inexpérimenté <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Expert
Aspects théoriques	
Capacité de modélisation : Capacité de l'outil à modéliser des systèmes complexes ? Pas du tout <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Complètement	
Niveau systémique : Capacité de l'outil à intégrer des supers/sous-systèmes ? Très faible <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Très forte	
Filtrage de l'information : Capacité de l'outil à filtrer l'information en fonction de son importance pour la compréhension du système ? Très faible <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Très forte	
Capacité de généralisation : Capacité de l'outil à établir un accès au système de manière générique ? Très faible <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Très forte	
Préservation des contraintes : Capacité de l'outil à maintenir des contraintes spécifiques en respect du système générique généré ? Pas du tout <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Complètement	
Aspects pratiques	
Rapidité : Temps nécessaire à l'implémentation de l'outil ? Très long <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Très court	
Simplicité : Degré de complexité de l'outil ? Requiert une formation spécifique <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Peut être utilisé instinctivement	
Autonomie : Capacité de l'outil à constituer un bloc méthodologique ? Doit être utilisé dans une méthode globale <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Peut être utilisé seul	
Adaptabilité au champ d'application : Aptitude de l'outil à s'adapter à différents domaines d'applications ? Spécifique à un domaine <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Complètement adaptatif	
Adaptabilité au groupe : Aptitude de l'outil à s'adapter à la composition d'un groupe ? La typologie d'utilisation (i.e. seul ou en groupe) est figée <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> La composition du groupe n'impacte pas le rendu	
Précédence : Capacité de l'outil à faciliter l'étape de subséquente ? Pas du tout <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Fournit l'intrant adéquat à l'outil à venir	

Figure 4.10 – Exemple de fiche d'évaluation (outil d'abstraction) utilisée durant les ateliers

4.3.2 Résultats

Bien que les workshops abordent des sujets différents, les conditions expérimentales demeurent similaires. À ce titre, les résultats des différents workshops ont été combinés. L'analyse des résultats a été effectuée par l'utilisation du test de Wilcoxon.

Les mesures montrent un degré de fiabilité élevé (coefficient alpha de Cronbach variant de .0703 à .970), à l'exception de deux outils (i.e. Dane et Task Analysis) qui obtiennent une corrélation discutable (α Cronbach_{DANE} = .540 et α Cronbach_{TaskAnalysis} = .491).

4.3.2.1 Outils d'analyse

Les principes du vivant (*Life's Principles*) (LP) ont été évalués durant le premier atelier, leur version modifiée par le projet Européen KARIM (KLP), l'analyse de courbe en S (S-Curve) et l'Analyse de Tâche (TA) ont été évaluées durant le second et le T-Chart l'a été durant le troisième. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.12.

Tableau 4.12 - Résultats relatifs aux outils d'analyse évalués durant les ateliers.

Outils d'analyse (α)	Ca (SD)	Pa (SD)	Id (SD)	Pr (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
LP (.866)	0.8 (0.4)	0.8 (0.4)	1.2 (0.4)	0.4 (0.5)	1.2 (0.4)	1.8 (0.4)	1.4 (0.5)	1.6 (0.5)	2.2 (0.4)	1.8 (0.4)
KLP (.833)	1 (0)	0.8 (0.4)	1.6 (0.5)	0.4 (0.5)	2.4 (0.5)	2 (0)	0.6 (1.2)	2.6 (0.5)	1 (0.6)	1.6 (0.5)
S-Curve (.703)	2.4 (0.5)	1 (0.6)	2.4 (0.5)	1.2 (1)	1.8 (0.7)	1.6 (0.5)	2 (0.6)	2.6 (0.5)	2.4 (0.8)	2.6 (0.5)
TaskAnalysis (.491)	1.2 (0.7)	2.6 (0.5)	2 (0.9)	2 (0.9)	2.25 (0.4)	2.6 (0.5)	2.2 (0.4)	2.8 (0.4)	2 (1.1)	1.8 (0.7)
T-Chart (.951)	1.6 (0.5)	0.8 (0.4)	0.2 (0.4)	0.3 (0.4)	2.8 (0.4)	2.8 (0.4)	0.4 (0.5)	2 (0.6)	2.8 (0.4)	1.2 (0.4)

Avec pour critères théoriques Ca : Complétude de l'analyse ; Pa : Précision de l'analyse ; Id : Idéalité ; Pr : Priorisation ; et pour critères pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Living Principles et KARIM's Living Principles

LP et KLP présentent des résultats théoriques faibles avec seule l'Idéalité (Id) possédant un score supérieur à 1. Un test de Wilcoxon (*Signed-Ranks Test*) indique que le score d'adaptabilité aux groupes des LP, $Mdn_{(5)} = 2$ est significativement statistiquement supérieur à celui des KLP, $Mdn_{(5)} = 1$, $Z = 2.02$, $p < 0.43$. KLP apparaît, à la vue des résultats, pertinent pour de nombreux domaines ($M_{\text{adaptabilité}(\text{domaine})} = 2.6$) et obtient un score de Rapidité, $Mdn_{(1)} = 2$ statistiquement significativement plus élevé que celui des LP, $Mdn_{(1)} = 1$, $Z = 2.02$, $p < 0.43$. LP et KLP prodiguent néanmoins un élément qu'aucun des autres outils d'analyse considérés ne semblent en mesure d'apporter : la prise en considération de la soutenabilité au cours de l'analyse.

S-Curve Analysis

La S-Curve démontre une capacité à prodiguer une bonne exhaustivité d'analyse ($M_{Ca} = 2.4$) d'une situation donnée, couplée à l'identification d'une vision idéale ($M_{Id} = 2.4$). La couverture de ces deux critères semble permettre aux concepteurs de passer sereinement à l'étape suivante du processus biomimétique ($M_{(6)} = 2.6$).

Task Analysis

À l'inverse des LP, KLP ou encore S-Curve qui se concentrent sur l'identification d'un ou plusieurs axes stratégiques pour aboutir à l'élaboration d'une innovation, la TA montre des résultats très différents, laissant penser que l'outil diffère par ses objectifs. Son impact théorique a été identifié comme élevé, que ce soit sur la précision de sa mesure ($M_{Pa} = 2.6$) ou sa capacité de priorisation ($M_{Pr} = 2$) souligne l'accent porté par l'outil sur la description

du problème. La considération de sa Simplicité ($M_{(2)} = 2.25$), de sa Rapidité ($M_{(1)} = 2.6$) et de son Autonomie ($M_{(3)} = 2.8$), semble faire de la TA un outils à considérer pour qui attente à la formulation appropriée d'un problème.

T-Chart

Le T-Chart, présente des scores théoriques allant de faibles à intermédiaires. L'outil score cependant de façon élevée sur les critères d'ordre pratique, son Autonomie ($M_{(3)} = 0.4$) étant le seul critère pratique comparativement faible (i.e. inférieur à 1); les concepteurs sont donc invités à sélectionner l'outil précédent et/ou suivant en concordance de l'usage du T-Chart.

4.3.2.2 Outils d'abstraction

Les 5-Whys et le *Multi-Screen Diagram* (MSD) ont été évalués durant le premier atelier, le *Closed World* (CW), durant le second et le *DANE construct* (DANE), *SAPPhIRE representation* (SAPPhIRE), l'*UNified Ontology for causal-function modeling in Biologically Inspired Design* (Uno-BID), *Biological Modeling* (BioM) durant le troisième. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.13.

Tableau 4.13 - Résultats relatifs aux outils d'abstraction évalués durant les ateliers.

Outils d'abstraction (α)	Cm (SD)	Ins (SD)	Fi (SD)	Cg (SD)	Pc (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
5-Whys (.860)	0 (0)	2 (0.6)	0.6 (0.5)	0 (0)	0 (0)	3 (0)	2.4 (0.5)	1 (0.6)	1.6 (0.8)	1.2 (0.4)	0.4 (0.5)
MSD (.964)	2.4 (0.5)	2.6 (0.5)	1.4 (0.5)	2.6 (0.5)	1.6 (0.8)	1.6 (0.5)	1.6 (0.5)	0.6 (0.8)	3 (0)	2.2 (0.7)	3 (0)
CW (.774)	2.2 (0.4)	1.6 (0.8)	1 (0.6)	2.6 (0.5)	2.4 (0.5)	1.3 (0.5)	1.7 (0.5)	2 (0.8)	2.3 (0.5)	1.7 (0.5)	2.2 (0.8)
SAPPhIRE (.540)	1 (0)	1.4 (0.5)	1.6 (0.5)	2.2 (0.4)	1.2 (0.4)	1.4 (0.5)	1 (0)	2 (0.6)	2 (0.6)	2.4 (0.8)	2 (0.6)
DANE (.838)	2 (0.6)	2 (0.6)	1.2 (0.7)	2.2 (0.4)	1.8 (0.4)	1.4 (0.5)	1.4 (0.8)	2 (1.1)	2.4 (0.5)	2.6 (0.5)	2.4 (0.5)
Uno-BID (.877)	2.2 (0.4)	2 (0.6)	1.6 (0.8)	2.6 (0.5)	2 (0)	0.8 (0.4)	0.4 (0.5)	2.6 (0.5)	2.6 (0.5)	2.6 (0.8)	2.4 (0.5)
BioM (.857)	2 (0.6)	1.8 (0.4)	1 (0)	1.2 (0.4)	0.8 (0.4)	1.2 (0.4)	1 (0.6)	1.2 (0.4)	1.2 (0.4)	2.8 (0.4)	1.8 (0.4)
4-Box (.958)	0.8 (0.4)	0.8 (0.4)	0.4 (0.8)	0.8 (0.4)	1 (0)	3 (0)	2.8 (0.4)	0.8 (0.4)	2.2 (0.4)	2.8 (0.4)	1.2 (0.4)

Avec pour critères théoriques Cm : Capacité de modélisation ; Ins : Intégration des niveaux systémiques ; Fi : Filtrage de l'information ; Cg : Capacité de généralisation ; Pc : Préservation des contraintes ; et pour critères pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

5-Whys

Les 5-Whys font preuve de scores faibles sur les critères théoriques ($M_{\text{Critères théoriques hors Ins}}$ varient de 0 à 0.6), avec pour seule valeur supérieure à 1, l'Intégration des niveaux systémiques ($M_{\text{Ins}} = 2$). Les scores élevés de l'outil sur les critères de Rapidité ($M_{(1)} = 3$) et de

Simplicité ($M_{(2)} = 2.4$) compensent difficilement, dans le cadre des ateliers, le manque d'efficacité théorique.

Multi-Screen Diagram

MSD présente une forte capacité à gérer les niveaux super et sous-systémiques ($M_{(Ins)} = 2.6$). Son score le plus faible (i.e. $M_{(Fi)} = 1.4$) demeure parmi les scores les plus élevés des outils d'abstraction ($M_{(Fi)}$ variant de 0.8 à 2.6). L'outil obtient un score parfait sur les critères d'Adaptabilité au domaine ($M_{(4)} = 3$) et de Précédence ($M_{(6)} = 3$). En revanche, MSD ne semble être un outil autonome ($M_{(3)} = 0.6$) et semble, dès lors, requérir l'usage combiné d'un ou d'autres outils combinés pour délivrer son plein potentiel, en faisant un outil relativement complexe à l'usage ($M_{(2)} = 1.6$) et long à l'implémentation ($M_{(1)} = 1.6$).

Closed World

CW s'illustre par un score théorique élevé quant à ses capacités d'abstraction, à l'exception de sa capacité de filtrage de l'information ($M_{(Fi)} = 1$). Les points forts du CW sont sa capacité à maintenir les contraintes ($M_{(Pc)} = 2.4$) et à généraliser ($M_{(Cg)} = 2.6$). Son usage semble cependant requérir une certaine typologie de groupe pour être effectif ($M_{(5)} = 1.7$)

SAPPhIRE representation, Design Analogy to Nature Engine construct, UNified Ontology for causal-function modeling in Biologically Inspired Design

Les outils issus de la théorie *Function-Behavior-Structure* (FBS) scorent tous de manière élevée sur les critères théoriques. Les participants ont exprimé leurs difficultés à modéliser des systèmes requérant plusieurs sous-étapes temporelles avec la représentation SAPPhIRE, quand ils étaient à même de l'achever sans mal avec DANE qui intègre les changements d'état séquentiels dans son modèle de représentation. Les participants ont néanmoins souligné la capacité de la représentation SAPPhIRE à mettre en avant les relations causales au sein d'un système, aboutissant à une modélisation présentant un niveau d'abstraction potentiel plus élevé. À la vue des résultats, Uno-BID semble parvenir à combiner les avantages de la représentation SAPPhIRE et DANE (i.e. car présentant un score supérieur ou égal aux représentations DANE et SAPPhIRE pour chacun des critères théoriques), au prix d'une difficulté d'usage accrue ($M_{(2)} = 0.4$) et un plus long temps de mise en œuvre ($M_{(1)} = 0.8$).

BioM

Selon un test de Wilcoxon (*Signed-Ranks Test*) les résultats du BioM, relatifs à sa capacité de modélisation ($Mdn_{(Cm)} = 2$) et à sa capacité de généralisation ($Mdn_{(Cg)} = 1$) sont significativement statistiquement supérieurs aux résultats des 5-Whys ($Mdn_{(Cm)} = 0$) et $Mdn_{(Cg)} = 0$) tous les deux avec $Z = 2.022$, $p < .043$). BioM semble donc surclasser les 5-Whys dès qu'il s'agit des critères théoriques. Comparativement aux outils liés à la théorie FBS, les scores relatifs aux critères théoriques et pratiques du BioM ne se différencient pas statistiquement, à l'exception de sa capacité de généralisation ($Mdn_{(Cg)} = 1$) qu'un test de Wilcoxon (*Signed-Ranks Test*) indique comme significativement statistiquement inférieure à

Uno-Bid ($Mdn_{(Cg)} = 3$), SAPPPhIRE ($Mdn_{(Cg)} = 2$) et DANE ($Mdn_{(Cg)} = 2$) avec $Z = 2.022, p < .043$. BioM devrait donc être préféré selon des prérequis spécifiques (e.g. éviter la courbe d'apprentissage relativement longue des modélisations FBS).

4-Box

Les 4-Box présentent des scores théoriques intermédiaires ($M_{\text{Critères théoriques}}$ variant de 0.8 à 1), laissant entendre que d'autres outils d'abstraction devraient leur être préférés lors de la génération de modèles. Un test de Wilcoxon (*Signed-Ranks Test*) indique cependant que la Simplicité des 4-Box ($Mdn_{(2)} = 3$) est significativement statistiquement supérieure aux (MSD ($Mdn_{(2)} = 2$), CW ($Mdn_{(2)} = 1$), DANE ($Mdn_{(2)} = 1$), SAPPPhIRE ($Mdn_{(2)} = 1$), Uno-BID ($Mdn_{(2)} = 0$) et BioM ($Mdn_{(2)} = 1$) avec $Z = 2.022, p < .043$). Le même test indique que la Rapidité d'implémentation des 4-Box ($Mdn_{(1)} = 3$) est aussi significativement statistiquement supérieure aux MSD ($Mdn_{(1)} = 2$), CW ($Mdn_{(1)} = 1$), Dane ($Mdn_{(1)} = 1$), SAPPPhIRE ($Mdn_{(1)} = 1$), Uno-BID ($Mdn_{(1)} = 1$) et BioM ($Mdn_{(1)} = 1$) avec $Z = 2.022, p < .043$). Ces deux scores font qu'à l'issue des ateliers, les 4-Box constituent l'outil d'abstraction, en excluant les 5-Whys, le plus rapide et facile d'utilisation. Compte tenu de la haute interdépendance entre 4-Box et T-Chart (avec des scores d'autonomie respectifs de 0.8 et 0.4), l'usage antérieur des 4-Box est recommandé à chaque fois que l'implémentation du T-Chart est souhaitée.

4.3.2.3 Outils de transfert

La *Taxonomy* a été évaluée durant le premier atelier ainsi que le deuxième atelier, le *BIOlogically inspired Problem Solving* (BIOPS) durant le troisième. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.14.

Tableau 4.14 - Résultats relatifs aux outils de transfert évalués durant les ateliers.

Outils de transfert (α)	St (SD)	Ad (SD)	Po (SD)	Co (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
Taxonomy (.963)	1.3 (0.8)	0.8 (0.4)	0.7 (0.6)	1.7 (0.4)	2.5 (0.6)	2.4 (0.5)	0.4 (0.9)	1.3 (0.9)	2.4 (0.9)	2.9 (0.9)
BIOPS (.970)	0.8 (0.4)	0.2 (0.4)	0.2 (0.4)	0.8 (0.4)	3 (0)	2.6 (0.5)	1.5 (0.5)	2 (0)	2.8 (0.4)	1 (0)

Avec pour critères théoriques St : Sens de transposition ; Ad : Adéquation ; Po : Polyvalence (vis-à-vis des requêtes) ; Co : Constance ; et pour critères pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Taxonomy

La *Taxonomy* score de manière faible à intermédiaire sur les critères théoriques ($M_{\text{Critères théoriques}}$ variant de 0.7 à 1.7). Sa capacité à gérer différents types de requêtes a été jugée comme limitée ($M_{(Po)} = 0.7$), impliquant la nécessité d'un intrant formulé spécifiquement afin que l'outil puisse le transposer dans le domaine biologique (les participants ont mis en avant l'incapacité de la *Taxonomy* de transposer de la biologie vers la technologie). Ce besoin de spécificité, couplé à sa faible autonomie ($M_{(3)} = 0.4$), souligne le besoin de l'utilisation d'un outil spécifique pour que BIOPS puisse constituer une valeur ajoutée. Comparativement, la *Taxonomy* présente une Précédence ($Mdn_{(6)} = 3$)

significativement statistiquement supérieure à celle du BIOPS ($Mdn_{(3)} = 1$) avec $Z = 2.022$, $p < .043$.

BIOlogically inspired Problem Solving

BIOPS obtient des notes très faibles sur les critères théoriques ($M_{\text{Critères théoriques}}$ variant de 0.2 à 0.8) et des résultats intermédiaires à bons sur les critères pratiques ($M_{\text{Critères pratiques}}$ variant de 1 à 3). Ces résultats dénotent d'une implémentation tout au moins délicate au sein d'un contexte industriel lors de la phase de transposition ; il semble recommandé que son usage soit cantonné à des conditions opérationnelles spécifiques ou à des besoins en lien avec l'une de ses caractéristiques (e.g. les participants ont souligné sa particularité de permettre d'effectuer des recherches dans des bases de données sur les brevets). Comparativement, BIOPS présente une Autonomie ($Mdn_{(3)} = 1.5$) significativement statistiquement supérieure à celle de la Taxonomy ($Mdn_{(3)} = 0$) avec $Z = 2.022$, $p < .043$.

4.3.2.4 Outils d'application

AskNature a été évalué à la fois au cours du premier et du deuxième atelier, le *Brainstorming* durant le premier atelier uniquement et le *BIOlogically inspired Problem Solving* (BIOPS) ainsi que *Bioniquity* ont été évalués au cours du troisième atelier. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.15.

Tableau 4.15 - Résultats relatifs aux outils d'application évalués durant les ateliers.

Outils d'application (α)	Us (SD)	Ec (SD)	Pc (SD)	In (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
Brainstorming (.941)	0.8 (0.4)	1 (0.6)	0.4 (0.5)	0.8 (0.4)	2.2 (0.4)	2.4 (0.5)	2.2 (0.4)	2.6 (0.5)	0.4 (0.5)	0.2 (0.5)
AskNature (.897)	0.7 (0.6)	1.6 (0.8)	0.7 (0.5)	1.7 (0.6)	1.9 (0.5)	2.6 (0.5)	1.3 (0.6)	1.8 (0.6)	2.2 (0.7)	0.9 (0.7)
BIOPS (.950)	0.2 (0.4)	1 (0)	0 (0)	0.2 (0.4)	1.8 (0.4)	1.4 (0.8)	0.2 (0.4)	1.2 (0.4)	2.6 (0.5)	0.8 (0.4)
Bioniquity (.941)	0.4 (0.5)	1.4 (0.5)	0.8 (0.4)	2.2 (0.4)	2.2 (0.4)	2.8 (0.4)	2.8 (0.4)	2.8 (0.4)	2.4 (0.5)	1.8 (0.4)

Avec pour critères théoriques Us : Unicité de la solution ; Ec : Expansion des connaissances ; Pc : Modularisation ; In : Inventivité ; et pour critères pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Brainstorming

De par ses fondamentaux, le Brainstorming ne peut que difficilement obtenir des notes élevées sur les critères théoriques. Cet outil a été conçu pour générer une grande quantité de concepts (limitant le score relatif à l'Unicité de la solution) à partir des connaissances existantes (limitant le score relatif à l'Expansion des connaissances) d'un regroupement de participants (requérant la constitution d'un groupe, i.e. limitant le score relatif à l'Adaptabilité (groupe)). Le Brainstorming obtient, comme escompté, des scores faibles sur l'ensemble des critères cités (avec des notes variant de 0.4 à 1), tout comme pour le reste des critères théoriques ($M_{(Pc)} = 0.4$ et $M_{(In)} = 0.8$). Contrairement aux critères théoriques, le brainstorming obtient des notes élevées sur la plupart des critères pratiques.

Un test de Wilcoxon (*Signed-Ranks Test*) indique son Adaptabilité (groupe) ($Mdn_{(5)} = 0$) comme étant significativement statistiquement inférieur aux autres outils d'application, i.e. BIOPS ($Mdn_{(5)} = 3$), Bioniquity ($Mdn_{(5)} = 2$) et AskNature ($Mdn_{(5)} = 2$), avec $Z = 2.022$, $p < .043$.

AskNature

AskNature a su faire preuve d'une bonne capacité d'élargissement des connaissances des concepteurs ($M_{(Ec)} = 1.6$) tout en demeurant un outil accessible ($M_{(1)} = 1.9$ et $M_{(2)} = 2.6$). L'usage antérieur de la Taxonomie pour que l'outil délivre son potentiel a néanmoins été souligné par les participants (couplé à une note d'Autonomie moyenne, i.e. $M_{(3)} = 1.6$) ; sa Précédence ($M_{(6)} = 0.9$) indique qu'un travail supplémentaire semble nécessaire pour compléter l'étape d'application pour laquelle il a été conçu (i.e. identification des systèmes biologiques potentiellement pertinents), ce qui corrobore les commentaires émis par les participants quant au laborieux travail de tri parmi les occurrences.

BIOPS

BIOPS obtient dans son ensemble des notes limitées avec une Inventivité ($Mdn_{(In)} = 0$) significativement statistiquement inférieure à celle du Brainstorming ($Mdn_{(In)} = 1$), avec $Z = 2.022$, $p < .043$; et une Adaptabilité (domaine) ($Mdn_{(4)} = 1$) significativement statistiquement inférieure à celle du Brainstorming ($Mdn_{(4)} = 3$), et de Bioniquity, ($Mdn_{(4)} = 3$) avec $Z = 2.022$, $p < .043$.

Bioniquity

L'Inventivité de Bioniquity ($Mdn_{(In)} = 3$) a été perçue comme significativement statistiquement supérieure à celle du Brainstorming ($Mdn_{(In)} = 2$) ou de BIOPS ($Mdn_{(In)} = 0$) avec $Z = 2.022$, $p < .043$. D'autres différences statistiques significatives sont la Précédence ($Mdn_{(6)} = 2$) et l'Autonomie ($Mdn_{(3)} = 3$), avec une Précédence notée supérieure à celle du Brainstorming ($Mdn_{(6)} = 1$) et une Précédence et une Autonomie notées supérieures à celles de BIOPS ($Mdn_{(6)} = 0$ et $Mdn_{(3)} = 0$) avec $Z = 2.022$, $p < .043$. Bioniquity peut être considéré, à la vue des résultats des ateliers, comme un outil permettant une génération rapide et aisée d'analogies présentant un bon potentiel de rupture.

4.3.3 Conclusion sur les ateliers

Le nombre réduit, à la fois d'ateliers et de participants, constitue une limitation. Le manque de données statistiques ne permet ainsi pas l'établissement de conclusions définitives. Un certain nombre de tendances ont cependant pu être soulignées.

Les outils d'abstraction obtiennent généralement des notes élevées, tout du moins plus élevées que les autres catégories d'outils évaluées, sur les critères théoriques. Cette tendance à prodiguer convenablement ce pour quoi ces outils ont été conçus, semble corrélée à une accessibilité plus limitée (i.e. Simplicité et Rapidité). Ces observations ne semblent cependant pas avérées pour les 5-Whys et 4-Box. Ces deux outils sont à l'exact opposé du reste des outils d'abstraction, présentant de bons scores de Simplicité et de

Rapidité couplés à des notes faibles sur leurs critères théoriques (les scores théoriques combinés mènent à $M_{5\text{-whys}} = 0.52$, $SD_{5\text{-whys}} = 0.8$ et $M_{4\text{-Box}} = 0.76$, $SD_{4\text{-Box}} = 0.5$).

La tendance principale identifiée à partir des ateliers au sein des outils de transfert est leur faible capacité à transposer à la fois de la technologie à la biologie et de la biologie à la technologie (Pour le Sens de transposition $M_{\text{Taxo,BIOPS}} < 1$). Les principes fondamentaux de ces outils démontrent qu'ils ont principalement été pensés pour transposer des connaissances de la technologie vers la biologie. Cette observation constitue une menace, car l'absence de moyen de transposition de la biologie vers la technologie pourrait potentiellement mener à un goulet d'étranglement lorsque l'on considère le processus entier. Les résultats montrent que les outils de transfert présentent des capacités faibles à intermédiaires d'Autonomie ($M_{\text{Taxo}} = 0.4$, $M_{\text{BIOPS}} = 1.5$). La Taxonomie a été conjointement développée avec AskNature et BIOPS est à la fois un outil de transfert et d'application subdivisé en deux sous-entités. Ces scores limités d'autonomie indiquent que Taxonomy et BIOPS nécessitent leur contrepartie applicative pour être correctement considérés. C'est donc un ensemble d'outils Transfert-Application qu'il est nécessaire de sélectionner pour la « Transposition à la biologie » et l'« Identification des potentiels modèles biologiques » en lieu et place de deux outils subséquents.

Afin de renforcer les résultats des ateliers, l'évaluation profiterait d'être mise à l'épreuve sur une audience plus large.

4.4 DEUXIÈME ÉTUDE – ÉTUDE TERRAIN

L'évaluation de la boîte à outils biomimétique considérée sur une audience plus large implique des modifications des conditions opératoires. Les résultats de cette seconde étude ne devraient ainsi pas permettre une comparaison directe, mais démontrer, dans une certaine mesure, si les tendances identifiées durant les ateliers sont confirmées ou discréditées par un échantillon de population plus vaste.

4.4.1 Protocole

Plusieurs outils issus de TRIZ ont été présentés comme d'intérêt pour la biomimétique [Vincent et Mann, 2002]. L'évaluation de ces outils a été réalisée durant la conférence TRIZ Future 2013. Eu égard au contexte, formations et implémentation d'un cas d'étude réel n'ont pu être possibles. Les participants ont ainsi évalué les outils à partir de leur expérience, à partir de questionnaire reprenant la liste des critères utilisés durant les ateliers (voir section 4.2.3). Le critère de Précédence requérant la présence d'au moins un outil appartenant à la catégorie subséquente de l'outil considéré, le Brainstorming a été ajouté à l'étude. 86 participants, 51 praticiens industriels et 35 chercheurs scientifiques ont répondu au questionnaire. Le nombre d'années moyennes d'expérience en TRIZ au sein des participants était de 7.05 (variant de 1 à 16, ÉT = 4.52). L'expérience ne suivait pas une distribution normale avec une skewness de 0.41 (ES = 0.26) et un kurtosis de -0.76 (ES = 0.51). La moyenne quant à l'expertise subjective des participants vis-à-vis de TRIZ était de 2.97 (ÉT = 1.26) sur 5 avec une skewness de -0.11 (ES = 0.26) et un kurtosis de -0.46 (ES = 0.51). L'expertise subjective des participants vis-à-vis de chaque outil est présentée par le

Tableau 4.16.

<i>Tools</i>	<i>Mean</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>Skewness</i>	<i>Kurtosis</i>
<i>TC</i>	3.44	1.14	-.327	-.718
<i>IFR</i>	3.88	1.27	-.797	-.560
<i>MSD</i>	3.69	1.44	-.733	-.864
<i>IP</i>	3.46	1.12	-.323	-.788
<i>Resources</i>	3.47	1.35	-.528	-.967
<i>Brainstorming</i>	3.58	0.98	-.452	.143

Tableau 4.16 - Expertise subjective des participants quant aux outils évalués

4.4.2 Résultats

Le test de Shapiro-Wilk a été mis à contribution pour évaluer la normalité de chacune des variables. La majorité des observations a été identifiée comme ne suivant pas une distribution normale. Le test de Wilcoxon (Signed-Ranks Test) a dès lors été utilisé en tant que test non paramétrique pour données ordinales. Les alphas de Cronbach (variant de .815 à .971) font état d'une cohérence des mesures allant de bonnes à excellentes.

4.4.2.1 Outil(s) d'abstraction

Les résultats de l'évaluation des outils d'abstraction sont présentés par le Tableau 4.17.

Tableau 4.17 - Résultats relatifs aux outils d'abstraction évalués durant l'étude terrain.

Outils d'abstraction (α)	Cm (SD)	Ins (SD)	Fi (SD)	Cg (SD)	Pc (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
TC (.686)	2.1 (0.7)	1.7 (1)	1.8 (0.8)	2.6 (0.5)	2.2 (0.8)	1.6 (0.8)	1.1 (0.8)	2.2 (0.8)	2.7 (0.5)	2.2 (0.9)	2.5 (0.5)
IFR (.914)	1.8 (0.9)	2.3 (0.6)	2.2 (1)	2.5 (0.6)	1.5 (1)	0.9 (0.5)	1.2 (0.8)	1.4 (1)	2.8 (0.4)	2.5 (0.6)	2.3 (0.7)
MSD (.815)	2.7 (0.5)	2.8 (0.4)	2.2 (0.7)	2 (0.7)	2.1 (0.7)	1.6 (0.6)	1.3 (1)	1.6 (0.8)	2.8 (0.4)	2.1 (0.9)	2.3 (0.7)

Avec pour critères théoriques Cm : Capacité de modélisation ; Ins : Intégration des niveaux systémiques ; Fi : Filtrage de l'information ; Cg : Capacité de généralisation ; Pc : Préservation des contraintes ; et pour critère pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Contradictions Techniques

Les TC ont été évaluées comme offrant une plus grande Autonomie comparés au MSD et IFR ((3) : $Mdn_{TC} = 3$, $Mdn_{MSD} = 2$ et $Mdn_{IFR} = 2$, avec respectivement $Z = 5.024$, $p = .000$ et $Z = 2.401$, $p < .016$).

Ideal Final Result

IFR, comparé au TC et MSD, apparaît comme statistiquement plus performant à conserver les contraintes (Pc : $Mdn_{IFR} = 2$, $Mdn_{TC} = 2$ et $Mdn_{MSD} = 2$, avec respectivement $Z = 3.641$, $p = .000$ et $Z = 3.638$, $p = .000$), combinée à une Adaptabilité (groupe) statistiquement supérieure ((5) : $Mdn_{IFR} = 3$, $Mdn_{TC} = 2$ et $Mdn_{MSD} = 2$ avec respectivement $Z = 2.029$, $p = .042$ et $Z = 3.244$, $p < .001$). En contrepartie, IFR semble nécessiter plus de temps à l'implémentation que les deux autres outils considérés ((1) : $Mdn_{IFR} = 1$, $Mdn_{TC} = 2$ et $Mdn_{MSD} = 2$ avec respectivement $Z = 4.870$, $p = .000$ et $Z = 5.841$, $p = .000$).

Multi-Screen Diagram

Au regard des outils évalués, MSD est statistiquement l'outil le plus à même de modéliser les systèmes (Cm : $Mdn_{MSD} = 3$, $Mdn_{TC} = 2$ et $Mdn_{IFR} = 2$, avec respectivement $Z = 4.721$, $p = .000$ and $Z = 5.312$, $p = .000$), combinés à une capacité d'intégration des sous et super-systèmes statistiquement supérieurs (Ins : $Mdn_{MSD} = 3$, $Mdn_{TC} = 2$ et $Mdn_{IFR} = 2$ avec respectivement $Z = 5.811$, $p = .000$ et $Z = 3.032$, $p < .002$). En contrepartie, MSD prodigue un degré d'abstraction statistiquement plus faible comparé aux autres outils de la même catégorie ((Cg) : $Mdn_{MSD} = 2$, $Mdn_{TC} = 3$ et $Mdn_{IFR} = 3$ avec respectivement $Z = 4.400$, $p = .000$ et $Z = 4.402$, $p = .000$).

4.4.2.2 Outil(s) de transfert

Les résultats de l'évaluation des outils de transfert sont présentés par le Tableau 4.18.

Tableau 4.18 - Résultats relatifs aux outils de transfert évalués durant l'étude terrain.

Outils de transfert (α)	Ad (SD)	St (SD)	Po (SD)	Co (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
IP (.871)	1.5 (0.5)	0.9 (0.5)	0.2 (0.4)	1.1 (0.6)	1.7 (1)	1.7 (0.9)	1.1 (1)	1.7 (0.9)	2.2 (0.8)	0.7 (0.6)
Resources (.957)	0.5 (0.6)	2.7 (0.4)	0.2 (0.4)	2.5 (0.6)	1.8 (0.8)	1.6 (0.8)	1.5 (0.7)	1.8 (0.9)	2.9 (0.4)	0.7 (0.7)

Avec pour critères théoriques St : Sens de transposition ; Ad : Adéquation ; Po : Polyvalence (vis-à-vis des requêtes) ; Co : Constance ; et pour critères pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Inventive Principles

Les résultats des IP dénotent une plus grande adéquation de transposition ((Ad) ; $Mdn_{IP} = 2$) que la Resources Analysis ((Ad) : $Mdn_{Res} = 1$ and $Z = 6.846$, $p = .000$) mais une plus faible autonomie ((3) $Mdn_{IP} = 1$ and $Mdn_{Res} = 2$ avec $Z = 6.846$, $p = .000$). Les Inventive Principles étant généralement combinés aux Technical Contradictions, les résultats quant à leur autonomie semblent confirmer la nécessité de les combiner.

Ressources

Bien qu'offrant une Adéquation de transposition moindre, les Resources obtiennent un score statistiquement supérieur aux TC quant au sens de la transposition ((St) : $Mdn_{Res} = 3$ et $Mdn_{IP} = 1$ avec $Z = 7.574$, $p = .000$), la Constance ((Co) : $Mdn_{Res} = 3$ et $Mdn_{IP} = 1$ avec $Z = 7.167$, $p = .000$) et l'Adaptabilité (groupe) ((5) : $Mdn_{Res} = 3$ et $Mdn_{IP} = 2$ avec $Z = 5.006$, $p = .000$).

4.4.2.3 Outil(s) d'application

Les résultats de l'évaluation du Brainstorming sont présentés par le Tableau 4.19.

Tableau 4.19 - Résultats relatifs aux outils d'application évalués durant l'étude terrain.

Outils d'application (α)	Us (SD)	Ec (SD)	Pc (SD)	In (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
Brainstorming (.949)	0.2 (0.4)	0.9 (0.8)	1.1 (0.9)	0.7 (0.6)	2.5 (0.7)	2 (0.9)	1.5 (1)	2.9 (0.3)	0.1 (0.3)	0.8 (0.7)

Avec pour critères théoriques Us : Unicité de la solution ; Ec : Expansion des connaissances ; Pc : Modularisation ; In : Inventivité ; et pour critères pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Étant le seul outil de cette catégorie à avoir été évalué, aucune comparaison directe n'est permise. Le Brainstorming score faiblement sur les critères théoriques tout en présentant des notes intermédiaires à élever sur les critères pratiques, excepté pour l'Adaptabilité (groupe).

4.4.3 Conclusion quant à l'étude terrain

L'étude a été menée avec un groupe cible très spécifique ; l'audience de la conférence internationale TRIZ Future est constituée d'individus ayant au minimum été introduits à la TRIZ, quand ils n'y ont pas été proprement formés. Pour cette raison, certains des critères d'ordre pratique doivent être considérés avec précaution, notamment celui relatif à la Simplicité.

Bien que certains des outils (i.e. MSD et Brainstorming) aient été évalués à la fois durant les ateliers et l'étude terrain, leurs résultats ne peuvent être directement mis en comparaison. Les conclusions issues des ateliers demeurent néanmoins identifiables au sein des résultats de l'étude terrain. MSD partage le même profil général (scores élevés sur les critères théoriques, faible note d'Autonomie) et les observations faites à l'égard du Brainstorming semblent avérées (un outil facile et rapide à implémenter avec une capacité théorique faible). Il est dès lors possible d'assumer que les ateliers mis en place présentent une certaine représentativité. Cette représentativité constatée initie la possibilité de l'ouverture de l'expérimentation du profil des participants, permettant l'intégration de participants moins experts en biomimétique lors de l'implémentation de prochains ateliers.

4.5 BIOMIMETREE- ARBRE DE CLASSIFICATION BIOMIMÉTIQUE (PROBLEM-DRIVEN)

L'expérimentation a généré un grand nombre de conclusions, que ces dernières soient partielles ou plus générales, au point qu'en avoir une vue exhaustive s'avère difficile. Afin de faciliter la compréhension de l'ensemble des conclusions et tendances issues des évaluations, une représentation visuelle des résultats est proposée.

4.5.1 Démarche de construction de l'arbre de classification biomimétique

Pour rendre la compréhension des résultats expérimentaux plus accessible, un support visuel, synthétisant les résultats expérimentaux (section 4.3.2 et 4.4.2) et leur analyse statistique, a été généré pour chacun des types d'outils selon leur cas d'étude.

4.5.1.1 Représentations des résultats issus des ateliers

Les outils d'analyse, schématisés par la Figure 4.11, font état d'une répartition nette avec deux outils se démarquant selon des critères théoriques différents (i.e. S-Curve et Task Analysis), deux outils intégrant la soutenabilité à leur analyse (i.e. KLP et LP) et un outil mettant en avant une simplicité et rapidité d'usage (i.e. T-Chart).

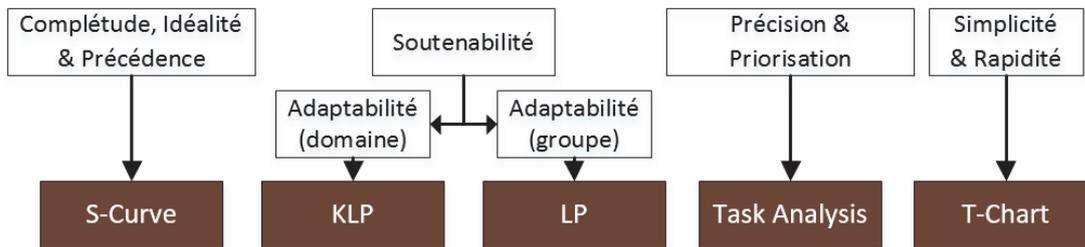


Figure 4.11 – Synthèse schématique des résultats relatifs aux outils d'analyse évalués durant les ateliers

Les outils d'abstraction, schématisés par la Figure 4.12, nécessitent une lecture plus fine des résultats pour pouvoir les différencier. 4-Box et 5-whys constituent une première catégorie d'outils d'abstraction dont l'usage est simple et rapide. Une seconde catégorie, intégrant les critères d'évaluation intégrant les aspects théoriques regroupe le reste des outils d'abstraction. Départager les outils de cette catégorie requiert, en dehors de SAPPPhIRE et d'UNO-BID de considérer conjointement deux critères, qu'ils soient tous deux théoriques (i.e. CW, DANE, et BioM) ou théoriques et pratiques (i.e. MSD).

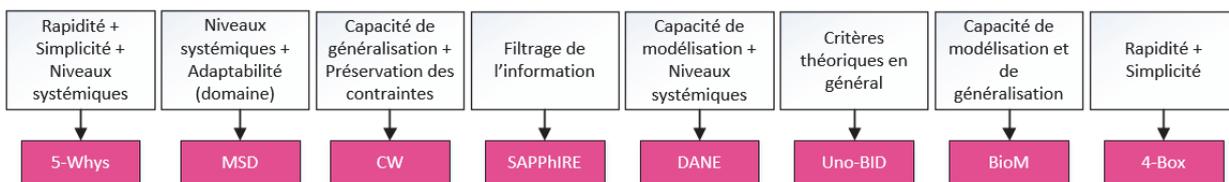


Figure 4.12 – Synthèse schématique des résultats relatifs aux outils d'abstraction évalués durant les ateliers

Les deux outils de transfert se différencient selon trois critères, tels que synthétisés par la Figure 4.13.

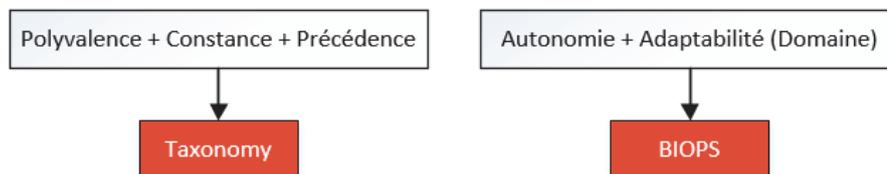


Figure 4.13 – Synthèse schématique des résultats relatifs aux outils d'abstraction évalués durant les ateliers

Les outils d'application, synthétisés par la Figure 4.14, usent de critères différenciant spécifiques, outre Bioniquity et Asknature. Si l'inventivité constitue le premier critère de choix d'un outil, les concepteurs sont invités à utiliser Bioniquity l'adaptabilité (à la fois

domaine et groupe) est un critère important et AskNature si l'autonomie et la précedence prédominent.

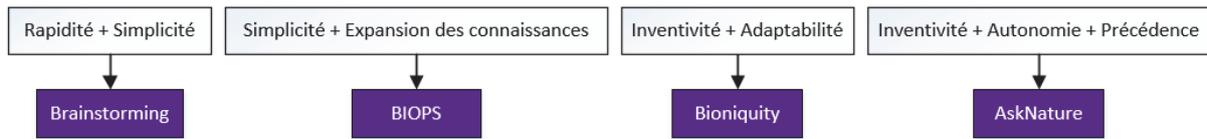


Figure 4.14 - Synthèse schématique des résultats relatifs aux outils d'application évalués durant les ateliers

4.5.1.2 Représentation des résultats issus de l'étude terrain

Les outils d'abstraction, schématisés par la Figure 4.12, semblent nettement se différencier les uns des autres. L'autonomie favorise l'utilisation des Contradictions Techniques, l'adaptabilité (groupe) celle de l'IFR et la capacité de modélisation ou l'intégration de niveaux systémiques celles du Multi-Screen Diagram.

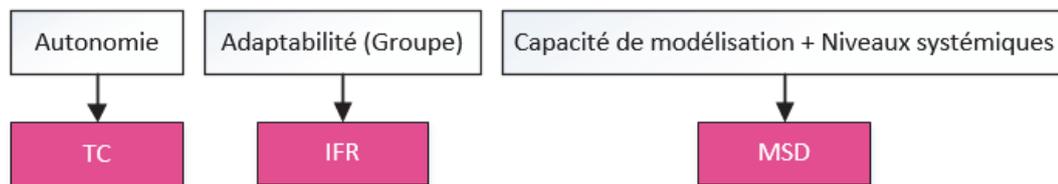


Figure 4.15 - Synthèse schématique des résultats relatifs aux outils d'abstraction évalués durant l'étude terrain.

Les outils de transfert, schématisés par la Figure 4.16, se différencient l'un de l'autre à la fois selon des critères théoriques (adéquation pour IP, sens et constance pour Ressources) et des critères pratiques (Autonomie pour IP, Adaptabilité (groupe) pour Ressources).

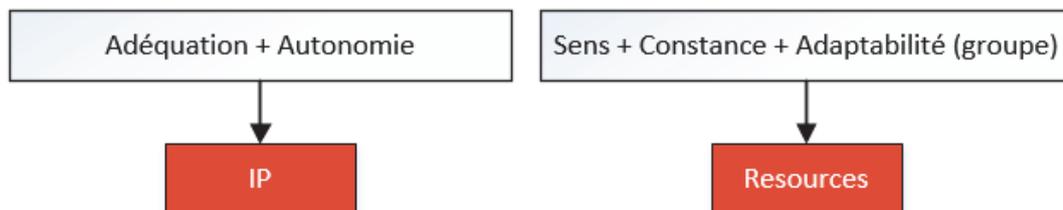


Figure 4.16 - Synthèse schématique des résultats relatifs aux outils de transfert évalués durant l'étude terrain.

Le Brainstorming ayant été le seul outil d'application considéré lors de l'étude terrain, il n'est dès lors pas possible de réaliser cette analyse pour ce type d'outils.

4.5.1.3 Génération de l'arbre de classification

Chaque schéma représentant les critères de différenciation relatifs à la sélection d'outils considérés par l'expérimentation, ont été alignés avec le processus biomimétique *problem-driven* unifié (Figure 4.3).

Cet arbre de classification, présenté en Figure 4.17, combine donc à la fois le modèle de processus biomimétique (Figure 4.3), typologie d'outils (Tableau 4.7), et résultats expérimentaux (Figure 4.11 à Figure 4.16).

BiomimeTree:

L'arbre de classification des outils biomimétiques

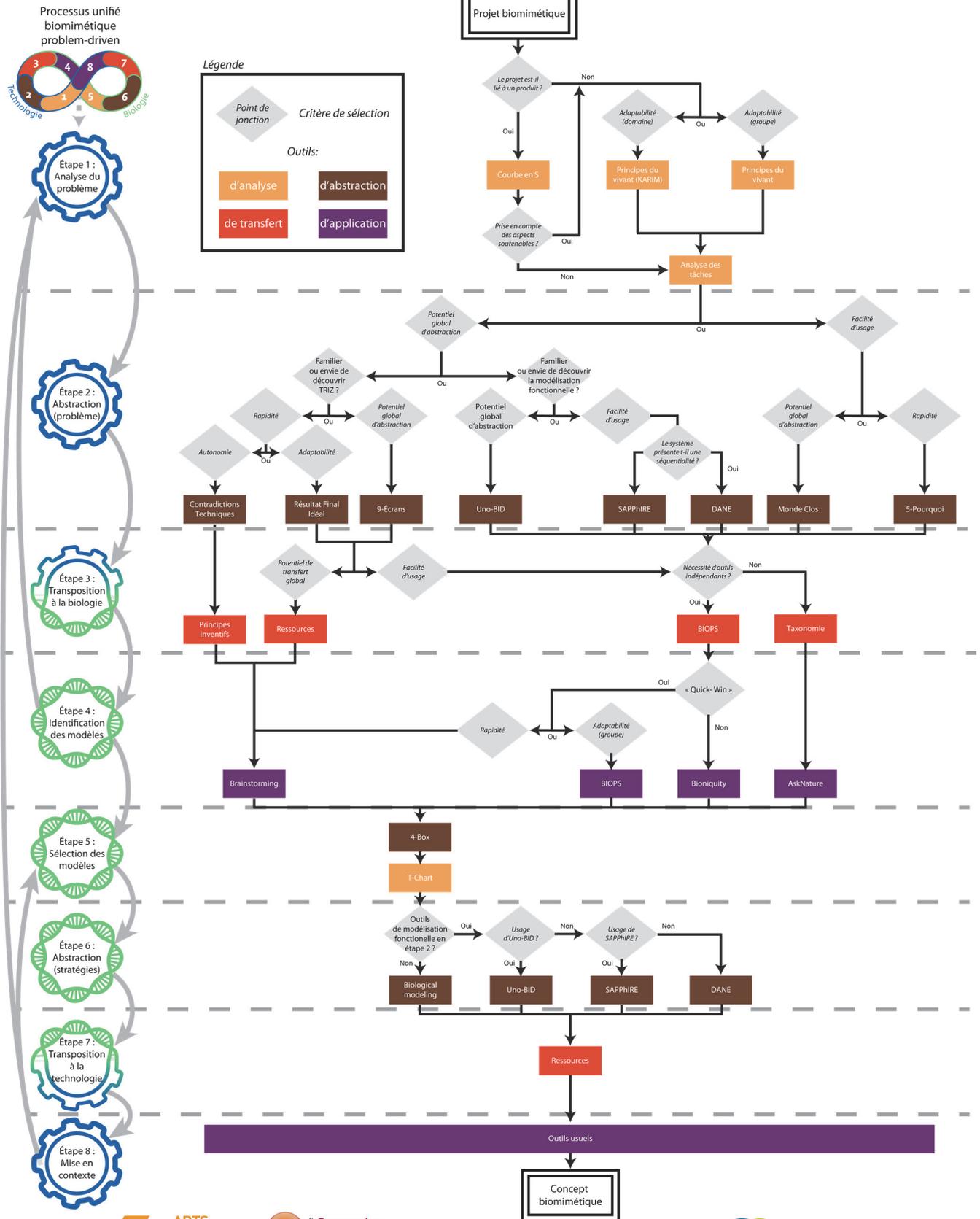


Figure 4.17 - L'Arbre de classification biomimétique (Problem-driven) - BiomimeTree

4.5.2 Présentation de l'arbre de classification biomimétique

Chaque point de jonction de l'arbre est soit défini par l'un des critères d'évaluation utilisés durant l'une des études, soit une caractéristique du projet, soit lié à l'expérience et/ou les préférences des utilisateurs. Les outils sont discriminés selon les résultats expérimentaux (i.e. note obtenue pour chaque critère considéré, élément mis en avant par les participants durant l'expérimentation).

Le but d'un tel arbre de classification, appelé BiomimeTree, est de guider le praticien à travers le modèle de processus biomimétique et des outils qui peuvent le composer. Il est demandé aux praticiens de répondre aux questions précisées aux points de jonction afin qu'un outil leur soit recommandé. De cette manière les utilisateurs sont à même de pouvoir composer leur propre processus biomimétique, basé sur les résultats expérimentaux actuels. L'usage de l'arbre peut ainsi être adapté aux différents besoins et contraintes relatifs à un projet. Il est nécessaire de mentionner qu'aucune des étapes ou des outils listés ne sont obligatoires ; les utilisateurs peuvent entrer et/ou sortir de l'arbre à n'importe quel point de jonction. L'arbre de classification peut être adapté à des besoins propres, chaque problème ou tâche de conception possédant ses spécificités. Après avoir choisi un chemin à travers l'arbre, il est nécessaire que les praticiens soient familiers avec le jeu d'outils considéré par la démarche définie.

La complétion de l'intégralité de l'arbre de classification biomimétique aboutit à un concept bio-inspiré, base d'un produit biomimétique répondant au critère de la norme ISO TC 266 Biomimetics [ISO/TC266, 2015b]. Tel que mentionné précédemment, le modèle de processus biomimétique *problem-driven* unifié requiert l'intégration de connaissances provenant de la biologie et de l'ingénierie. Il en va de même pour l'arbre de classification, l'apport de connaissance biologique étant nécessaire à plusieurs étapes, tout particulièrement lorsque l'outil considéré ne développe pas une compréhension approfondie des concepts biologiques. L'arbre de classification constituant plus un cadre stratégique qu'une démarche à suivre à la lettre (bien que cette dernière soit conseillée pour les praticiens novices), les utilisateurs peuvent être amenés à décider individuellement du moment où l'apport d'expertise externe est judicieux.

4.6 CONCLUSION DE LA PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION

L'évolution de la biomimétique, même dans un futur proche, nécessite de nombreux efforts de recherche pour que cette dernière devienne effective. Le travail présenté au sein de ce chapitre peut constituer le point de départ d'un développement systématique des processus biomimétiques, particulièrement selon un angle industriel.

L'évaluation des outils biomimétiques a conduit aux prémices d'un arbre de classification, permettant aux praticiens d'implémenter une démarche biomimétique dans leur contexte spécifique.

L'approche présentée au sein de ces travaux constitue une première tentative de développer un processus méthodologique qui faisait jusqu'alors défaut ; elle se concentre sur l'application de la biomimétique en tant que processus et donne un aperçu à ses utilisateurs potentiels du « comment » il est possible d'implémenter concrètement la

biomimétique. Au cours de l'expérimentation, aucun outil n'a été perçu comme mal catégorisé, validant leur positionnement effectué en amont. Le suivi du modèle de processus unifié a été exprimé comme « fluide », « autosuffisant » et « intuitif » par les participants, aboutissant à une discrimination fine des outils évalués.

La complétion de l'analyse pratique des outils biomimétiques a belle et bien permis leur organisation sous la forme d'un référentiel (cf section 4.5). Il est donc possible de valider la sous-hypothèse H1 selon laquelle « l'analyse pratique des outils biomimétiques serait à même de permettre l'élaboration d'un référentiel. »

L'établissement de cette première itération de l'arbre de classification offre une architecture basique susceptible d'être renforcée par l'addition de données expérimentales issues de nouvelles études faisant intervenir une plus large palette de participants (avec des profils moins experts). La mise en place de ce nouveau set d'atelier d'évaluation, constituant un travail en cours, permettra aussi le maintien à jour de l'arbre, par ajout de nouveaux outils dès lors qu'ils respectent les conditions initiales de sélection (i.e. implémentation biomimétique, description théorique, cas d'étude illustratif, recommandations d'usage).

Un travail collaboratif mener avec le Deggendorf Institute of Technology (DIT), en la personne de Kristina Wanieck et de Cordt Zollfrank, ainsi que Shoshana Jacobs du département de biologie intégrative de l'Université de Guelph, vise à corroborer les enseignements issus de l'expérimentation présentée avec la mise en œuvre d'une analyse théorique de la boîte à outils biomimétique. Cette analyse, dite « objective », à travers leur type, leur(s) approche(s) (i.e. *problem-based* et/ou *solution driven*), leur(s) étape(s), leur disponibilité, leur accessibilité, leur(s) domaine(s) de connaissance(s), leur dimension, leur intégration de la soutenabilité ou encore leur existence d'une preuve de concept, a permis une première classification des outils considérés. C'est à travers cette collaboration que lors de l'ajout futur de nouveaux outils biomimétiques à l'arbre de classification (dès lors que de nouveaux outils seront identifiés comme répondant aux prérequis de maturité), pourra être combiné à cette future analyse théorique. À travers cette combinaison il devrait alors être possible de pré-positionner les outils considérés au sein de l'arbre, ouvrant la voie à un modèle de classification hybride, intégrant catégorisation théorique et pratiques des outils biomimétiques.

Chapitre 5

Seconde Expérimentation

Babele – Passerelle entre ingénierie de la conception et Sciences du vivant

Au cours du processus de transfert de connaissances, il est nécessaire de lever de nombreuses barrières. Parmi ces barrières peuvent être citées : le manque de compréhension mutuelle (que cette dernière soit liée à la culture, le contexte, les contraintes ou les objectifs), l'insuffisance du système de récompense [Siegel et al., 2004], ou la compréhension mutuelle du processus et de ses résultats [Bruneel et al., 2010]. Afin de surmonter ces difficultés, il a été développé, principalement au cours de cette dernière décennie, des outils et des méthodologies réduisant le besoin de biologistes et/ou facilitant l'implémentation des connaissances biologiques au sein du processus de conception bio-inspiré. Vandevenne et al. [2013], Vattam et al. [2011b], Vincent [2014b], Nagel [2014], Shu et Cheong [2014] sont ainsi autant de chercheurs à avoir proposé des approches, basées sur différents fondements théoriques (e.g. traitement de l'information, langage naturel, approche fonctionnelle, TRIZ), quant à la phase d'identification d'organismes potentiellement pertinent en vue de résoudre une problématique technique de départ. L'étape subséquente, celle de la sélection du ou des modèles biologiques pertinents, de l'ensemble de ces approches semble cependant quasiment dénuée de méthodologie ou d'outils.

« Everything you can imagine, nature has already created »

(Chaque chose que l'on peut imaginer, la nature l'a déjà créé)

Albert Einstein

Illustration issue de sketch-and-doodle

5.1 MODÈLE EXPÉRIMENTAL

Face aux manquements méthodologiques relatifs à l'étape de sélection des organismes biologiques pertinents pour une problématique technologique donnée, les présents travaux de recherche s'efforcent d'apporter une réponse spécifique, en validant ou invalidant la seconde hypothèse intitulée : « la facilitation de l'interaction entre biologistes et ingénieurs est possible par le biais de la modélisation des systèmes biologiques, sans que cette dernière ne demande de prérequis de connaissance en biologie ».

5.1.1 Introduction

Le modèle de processus biomimétique problem-driven unifié (voir section 4.1.3 et plus particulièrement Figure 4.3) emphase le besoin de connaissances biologiques, si ce n'est au cours de l'intégralité du processus, a minima à deux séquences spécifiques. La première séquence prend place lors de la première phase, celle traitant de la transition du domaine technologique au domaine biologique. Les connaissances biologiques mises explicitement à contribution ici sont nécessaires à la transposition du modèle technique abstrait au domaine biologique, afin d'ensuite rendre possible l'identification des systèmes vivants susceptible d'apporter une réponse pertinente à la problématique initiale. Lors de cette étape, le besoin en connaissances biologiques identifiées est relatif aux biologistes horizontaux (i.e. biologistes ayant une connaissance biologique transdisciplinaire), capables d'ériger des passerelles entre domaine technique et biologique, démontrant une capacité d'identifier un ensemble critique de systèmes vivants pertinents. Le deuxième besoin explicite en connaissances biologiques émerge dans la seconde phase du processus, celui traitant de la réintégration des connaissances biologiques dans le contexte technologique de départ. Lors de cette phase, le besoin en biologie identifié est relatif aux biologistes verticaux (i.e. biologistes ayant une expertise biologique spécifique), suffisamment experts dans le système biologique considéré pour certifier la pertinence de l'analogie escomptée, afin d'ensuite le transposer en modèle abstrait pour l'implémenter dans la situation problématique initiale (la quantité de biologistes verticaux requis étant relative au nombre de systèmes biologiques identifiés comme potentiellement pertinents lors de la phase précédente).

La mise en œuvre de la démarche biomimétique fait ainsi intervenir les biologistes dès les phases amont du processus. La population des biologistes à même de jouer le rôle de biologiste horizontal, comprenant et maîtrisant le langage à la fois des sciences du vivant et celui relatif aux complications technologiques est somme toute réduite. Il est illusoire d'imaginer que la masse critique de ce type de profil pourrait être suffisante, de surcroît dans un avenir proche, pour répondre au besoin généré par le récent intérêt pour la conception bio-inspirée. L'on pouvait croire de prime abord que les experts biologiques, ici appelés biologistes verticaux, seraient moteurs dans leur intégration à la démarche biomimétique (leur permettant ainsi de valoriser d'une nouvelle manière leurs travaux et d'accéder à de

nouvelles sources pour le financement de leur recherche), il n'en est cependant rien dans les faits. Cummings et Kiesler [2005] ont souligné le fait que la spécialisation dans un domaine menait à des problèmes de communication dès lors que le partage de connaissances entre spécialistes et non-spécialistes est concerné. Le processus de mobilisation des biologistes verticaux s'est révélé être fastidieux et chronophage.

À la lumière de ces constatations, la diffusion de la conception bio-inspirée semble requérir une considération minutieuse sur son processus de transfert de connaissances ainsi que de l'implication des biologistes, tous deux susceptibles d'être facilités dans leur essence par l'approche méthodologique.

5.1.2 Objectifs

Tel qu'illustré par le processus biomimétique dépeint en section 4.1.2, un ensemble de systèmes biologiques répondant potentiellement à une problématique technique donnée est initialement défini. Chacun de ces potentiels « systèmes solutions » doit être investigué avec le support d'un biologiste vertical, cf. Figure 5.1 . Pour chaque système biologique identifié, il est nécessaire qu'un nombre identique de biologistes verticaux soit identifié, contacté, initié à l'approche et motivé tout au long de la démarche. Ces éléments constituent une charge de travail conséquente, charge pouvant difficilement s'intégrer dans le programme de travail des entreprises modernes (cf. contexte), où le temps constitue l'une des ressources les plus limitées, notamment pour les PME [Hudson et al., 2001].

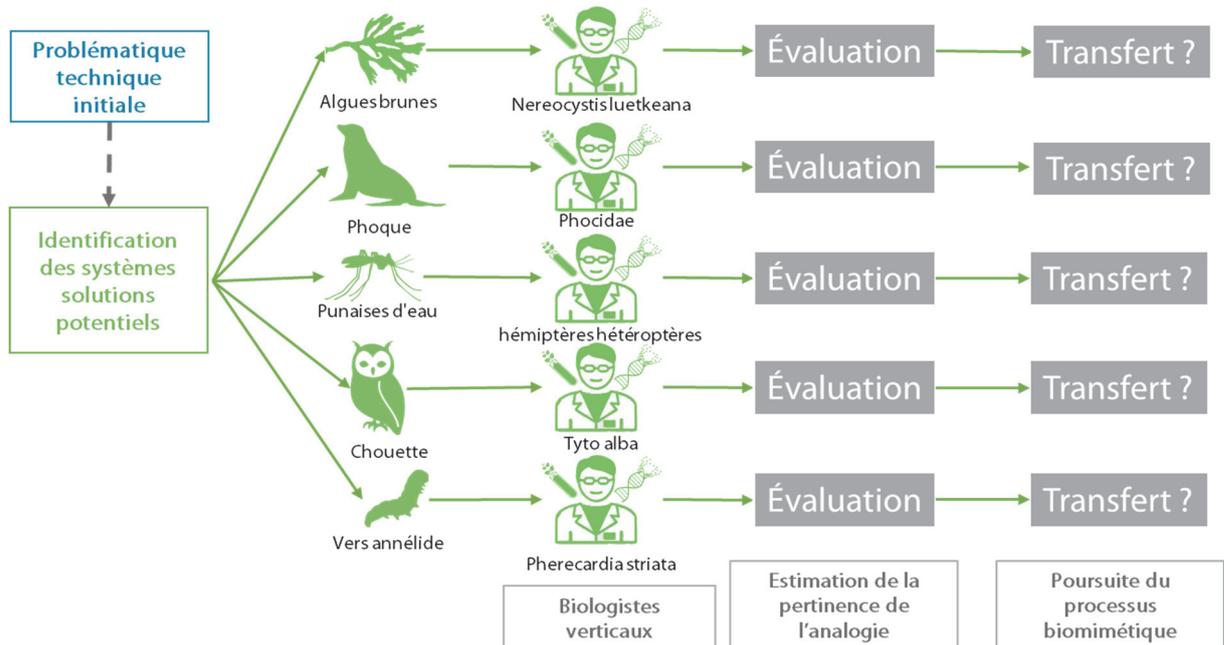


Figure 5.1 – Focus sur la sélection des modèles d'inspirations biologiques ; exemple appliqué au pantographe du Shinkansen (5 organismes pour 28 « occurrences gérant les turbulences »)

Pour répondre à ces enjeux, un modèle permettant aux concepteurs, sans connaissances initiales spécifiques en biologie, d'interagir avec les biologistes verticaux semble d'intérêt. C'est par la modélisation des systèmes biologiques que le modèle ambitionne à alléger la charge de travail relative à la tâche de sélection des modèles d'inspirations biologiques.

5.1.3 Modélisation des systèmes biologiques

La modélisation des systèmes vivants est une tâche relativement complexe. Comparativement aux systèmes techniques, les systèmes biologiques peuvent difficilement être abordés comme des sous-ensembles (e.g. ensemble de pièces) associés à des fonctions. Au cours de leur processus d'évolution, les systèmes vivants ont répondu à une multitude de conditions limites, dont nous avons rarement à priori connaissance, susceptibles d'être primordiales dans la compréhension du développement des structures et *schèmes* observés. Ceci implique que les systèmes biologiques ont été optimisés selon des conditions particulières et des exigences inconnues, rendant difficile la compréhension du pourquoi un système vivant est organisé tel qu'il se présente à nous. Une fonction prodiguée ne devrait ainsi pas constituer le point de départ de l'identification et de la sélection d'une possible analogie et, par répercussion, de la phase d'abstraction biologique. Ce qui semblerait plus approprié, dans le cadre des démarches biomimétiques, serait que l'analogie soit initiée par la comparaison puis la mise en adéquation des caractéristiques environnementales des systèmes techniques et biologiques.

5.1.3.1 Approches existantes

Différentes tentatives quant à la modélisation des systèmes biologiques au sein d'un processus de conception bio-inspirée sont identifiables dans la littérature.

Le modèle SAPPPhIRE [Chakrabarti et al., 2005] (voir section 2.5.3.3) a été développé pour modéliser des systèmes couplés à leur environnement avec un haut degré d'abstraction. Il prodigue une représentation permettant aux concepteurs d'identifier différents niveaux d'abstraction de représentation de l'information biologique [Chakrabarti, 2014].

Nagel [2011] a modélisé les systèmes biologiques selon les trois procédés instinctifs les plus basiques (i.e. protection, reproduction, maintien) en guise de point de départ.

Vattam [2011b] a développé un système de conception assistée par ordinateur intitulé DANE (*Design by Analogy to Nature Engine*). L'approche DANE se concentre sur la description détaillée des structures internes et des fonctions d'un système.

Basé à la fois sur SAPPPhIRE et DANE, Rosa et al. [2014] ont proposé un modèle intégré, combinant à la fois les aspects fonctionnels et causaux des approches précitées, mettant en corrélation les éléments constitutifs d'un système à ses paramètres [Baldussu, 2014].

L'objectif principal des différentes approches citées est de générer des modèles fonctionnels et/ou causaux et systèmes vivants, permettant ainsi aux concepteurs de faciliter le transfert de connaissances biologiques aux domaines techniques. Cet objectif diffère de celui visé par le présent chapitre, ce dernier ne se concentrant pas sur l'étape de transfert, mais celle qui la précède : la sélection des analogies. Compte tenu de cette différence fondamentale, les modèles introduits sont susceptibles de faire preuve de lacunes dans leur adéquation avec le but de la recherche présentée. En fournissant une explication causale de comment un système accomplit une fonction, ces modèles présentent une analyse centrée solution. Cette spécificité mène à la comparaison de la description d'un problème (i.e. les modélisations des problèmes identifiés au sein d'un système technique) à la description

d'une solution (i.e. les modélisations de systèmes biologiques). Cette mise en adéquation d'éléments de réponse (i.e. fonctions identifiées dans le vivant) à un contexte (i.e. le problème technique de départ) sans avoir conscience des caractéristiques contextuelles qui ont abouti à la formulation de ladite réponse (cf. section 2.4.1.3) est préjudiciable dans le sens qu'elle crée un biais par son manque de rigueur méthodologique. Cette faiblesse méthodologique réduit d'autant l'aspect exhaustif des éléments pris en considération dans le choix de la solution, empêchant les concepteurs d'être assurés que le ou les organismes sélectionnés sont bel et bien les plus pertinents pour le développement de leur solution finale, introduisant du doute dans la démarche.

5.1.3.2 Proposition

Afin de modéliser des systèmes biologiques de façon à pouvoir les comparer à des systèmes techniques, un nouveau modèle est proposé. Ce modèle, basé sur la Théorie des systèmes vivants (*Living System Theory*¹²) [Miller, 1978]. La base de modélisation développée par Miller offre un cadre décrivant comment les systèmes vivants peuvent être décrits selon une organisation en deux axes : matière-énergie et information. L'analyse de Miller s'étend sur sept niveaux systémiques (i.e. cellule, organe, organisme, groupe, organisation, société, supranationale), identifiant dix-neuf invariants d'échelle, sous-ensembles constituant le vivant cf. Tableau 5.1.

Tableau 5.1 - Les dix-neuf invariants d'échelle appliqués au myocarde humain [Miller, 1978]

Sous-systèmes traitant à la fois la matière et l'énergie ainsi que l'information	
Reproducteur : Noyau Frontière : Membrane cellulaire	
Sous-systèmes traitants la matière et l'énergie	Sous-systèmes traitants l'informant
Intégrateur : Membrane cellulaire Distributeur : Réticulum endoplasmique Convertisseur : Enzymes (mitochondrie) Producteur : Acides nucléiques (ribosomes) Emmagasineur : Grains de glycogène Extrudeur : Membrane cellulaire Moteur : Myofibrilles Soutien : Myofibrilles	Transducteur d'entrée : Régions sub-synaptiques Transducteur interne : Enzymes et répresseurs Réseau : Réticulum sarcoplasmique Décodeur : Régions sub-synaptiques Connecteur : - Mémoire : - Décisionnaire : Gènes (noyaux) Encodeur : Producteurs de transmetteurs Transducteur de sortie : Régions préjonctionnelles

La finalité initiale de la théorie est l'identification, par une analyse systématique multi-niveaux d'hypothèses pouvant être mise à l'épreuve par le modèle (e.g. comment une

¹² Sous-ensemble de la *Théorie Générale des Systèmes* (Von Bertalanffy, L., "The history and status of general systems theory," *Academy of Management Journal*, vol. 15, pp. 407-426, 1972.) dédié aux systèmes vivants.

cellule réagirait et résoudrait une surcharge d'information entrante). La théorie est dans le cadre de ces recherches, et tel qu'illustré au sein du Tableau 5.1, utilisée à travers ses dix-neuf invariants d'échelle, comme un moyen de formaliser un modèle abstrait des systèmes biologiques. Ce modèle abstrait se rapproche, selon une perspective philosophique, de la loi d'intégralité des parties d'un système technique [Salamatov, 1996] introduite par TRIZ.

Définitions des invariants d'échelle

De par la divergence de finalité du modèle avec le but poursuivi par les présentes recherches les travaux de Miller ont été adaptés au contexte de la conception bio-inspirée. Le nombre d'invariants d'échelle a ainsi été réduit à quinze, ces derniers étant appréhendés selon les définitions suivantes, définissant le modèle Babele (*Biomimetics Analyser of Biologically Expertised Literature for Engineers*) :

- Sous-systèmes traitant à la fois la matière et l'énergie ainsi que l'information :
 - **Frontière** : Sous-système au périmètre d'un système générant la cohésion des composants constituant le système, les protégeant des stress environnementaux et empêchant ou permettant l'entrée de différents matériaux, intrants énergétiques ou intrants informationnels. La frontière constitue le sous-système délimitant le système considéré.
- Sous-systèmes traitants la matière et l'énergie :
 - **Intégrateur** : Sous-système apportant énergie et matière à travers la frontière du système depuis l'environnement. L'intégrateur constitue le sous-système d'interface d'entrée du système considéré.
 - **Extrudeur** : Sous-système transmettant matière et énergie à l'extérieur du système sous la forme de produits et/ou de déchets. L'extrudeur constitue le sous-système d'interface de sortie du système considéré.
 - **Soutien** : Sous-système maintenant les relations spatiales entre les composants du système afin que ces derniers puissent interagir sans qu'ils ne s'accablent ou s'encombrent de manière stérique les uns les autres. Le soutien constitue le sous-système permettant l'intégrité et le maintien physique du système considéré.
 - **Distributeur** : Sous-système transmettant les intrants provenant de l'extérieur du système ou les extrants provenant d'autres sous-systèmes au sein du système à tous ses composants. Le distributeur constitue le sous-système distribuant matière et énergie aux autres sous-systèmes du système considérés.
 - **Convertisseur** : Sous-système transformant certains intrants du système en composés plus utiles aux processus spécifiques de ce système particulier. Le convertisseur est le sous-système rendant énergie et matière disponible et utilisable par le système considéré.
 - **Emmagasineur** : Sous-système conservant, pour des durées différentes, des dépôts de différents types d'énergie et de matière. L'emmagasineur stocke l'énergie et la matière du système considéré.

- **Moteur** : Sous-système mettant en mouvement le système ou certaines de ses parties en relation avec l'ensemble ou certaines parties de son environnement. Le moteur est le sous-système qui consomme l'énergie et/ou la matière du système considéré.
- **Producteur** : Sous-système formant des associations stables endurent pendant un temps significatif des entrées de matière et/ou d'énergie dans le système ou des extrants depuis ses convertisseurs, le matériau synthétisé étant mis à profit pour la croissance, la réparation de dommage ou le remplacement de composants du système, ou afin de fournir de l'énergie pour le mouvement ou la constitution d'extrants du système (i.e. produits ou marqueurs d'informations diffusés dans le super-système). Le producteur est le sous-système qui permet le maintien, au travers de ses processus, du système considéré dans le temps.
- Sous-systèmes traitants l'information
 - **Transducteur d'entrée** : Sous-système sensoriel intégrant les marqueurs porteurs de l'information au sein du système, les transformant en composés matériel ou énergétique appropriés à leur transmission au sein de ce dernier. Le transducteur d'entrée constitue le sous-système intégrant l'information provenant de l'environnement au sein du système considéré.
 - **Transducteur interne** : Sous-système sensoriel recevant, depuis les sous-systèmes ou les composants du système, les marqueurs porteurs de l'information relative aux altérations significatives desdits sous-systèmes ou composés, les transformant en d'autres composés matériel ou énergétique pouvant être transmis au sein du système. Le transducteur interne constitue le sous-système intégrant l'information provenant des autres sous-systèmes du système considéré.
 - **Décodeur** : Sous-système altérant le code des données ayant traversé le transducteur d'entrée en code « privé » pouvant être utilisé de manière interne au système. Le décodeur constitue le sous-système traduisant l'information pour son usage spécifique au sein du système considéré.
 - **Réseau** : Sous-système composé d'une route unique ou de multiples routes interconnectées dans un espace physique, par lesquelles les marqueurs portant l'information sont transmis à l'ensemble des parties du système. Le réseau constitue le sous-système permettant la diffusion de l'information dans l'intégralité du système considéré.
 - **Décisionnaire** : Sous-système exécutif recevant l'information entrante depuis l'ensemble des autres sous-systèmes et transmettant l'information sortante nécessaire au contrôle du système global. Le décisionnaire constitue le sous-système régulant l'activité du système considéré.
 - **Encodeur** : Sous-système altérant le code relatif à l'information entrante, provenant des autres sous-systèmes traitant de l'information, d'un code « privé » utilisé en interne par le système, en code « public » pouvant être interprété par d'autres systèmes au sein de son environnement. L'encodeur constitue le sous-système traduisant l'information générée par le système considéré pour son environnement.

- **Transducteur de sortie** : Sous-système émettant les marqueurs portant l'information du système. Le transducteur de sortie constitue le sous-système transmettant l'information du système vers son environnement.

Représentation graphique

Afin de faciliter la compréhension du modèle, une représentation graphique reprenant l'ensemble des invariants d'échelle considérés est proposée, tel qu'illustré en Figure 5.2.

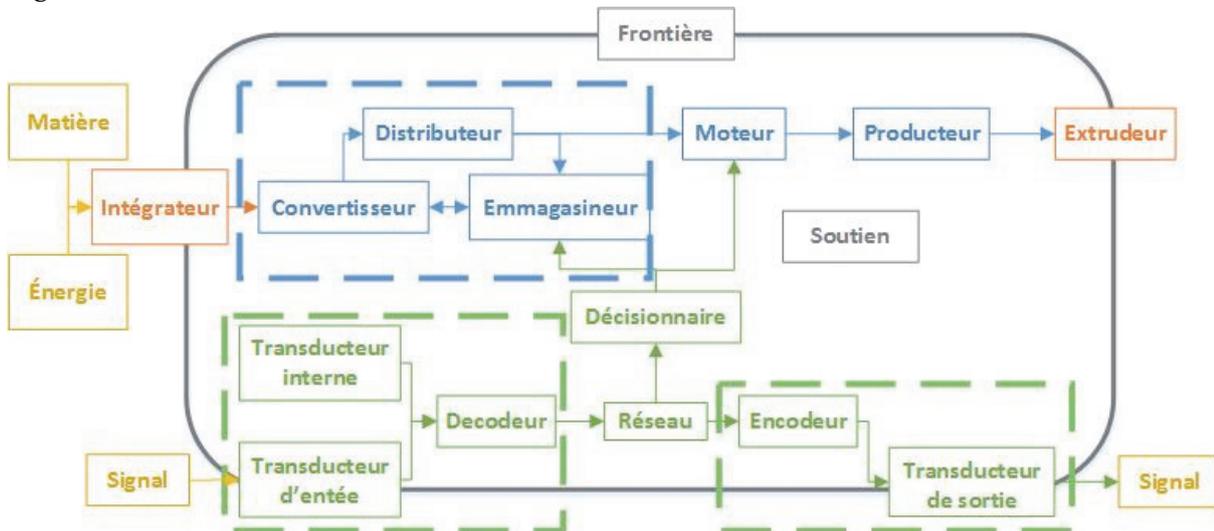


Figure 5.2 - Représentation graphique du modèle Babel

5.2 PROTOCOLE DE LA SECONDE EXPÉRIMENTATION

Afin d'évaluer la viabilité de la modélisation biologique présentée, le modèle a été vérifié par l'intermédiaire d'une expérimentation. L'hypothèse que l'expérience tente de valider ou d'invalider est la suivante :

H2 : Il est possible de favoriser l'interaction entre les acteurs par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie

Les paramètres élémentaires de l'expérimentation sont présentés au sein de cette section.

5.2.1 Niveaux systémiques

Afin de s'assurer que le modèle soit suffisamment polyvalent, l'expérimentation aborde deux niveaux systémiques biomimétiques différents (voir section 2.4.2.3). Les deux systèmes considérés sont le manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*) pour le niveau « système » (niveau macro - organisme) et l'ovulation (libération d'un ovocyte par un ovaire humain) pour le niveau « processus » (niveau micro - cellulaire).

5.2.2 Participants

L'expérimentation fait intervenir différentes typologies de participants.

Les premiers sont les biologistes verticaux (biologistes possédant une expertise de pointe sur un organisme donnée), à raison d'un par système considéré (i.e. deux). Leur rôle

au sein de l'expérimentation est de définir le témoin positif initial, à savoir, la modélisation du système biologique appartenant à leur expertise. Les biologistes verticaux ont aussi la charge de définir un corpus de textes contenant, selon leur avis, l'information suffisante nécessaire aux autres types de participants pour modéliser le système considéré.

L'expérimentation fait aussi intervenir des participants dont la charge est de reconstituer une modélisation des systèmes considérés s'approchant le plus possible du témoin positif (la modélisation de l'expert). Ces participants ont été catégorisés selon les profils suivants :

- Les biologistes horizontaux (biologistes possédant une connaissance transverse des sciences du vivant). Leur nombre s'élève à dix (six femmes et quatre hommes) avec des spécialisations différentes (e.g. biologie cellulaire, écologie, agroalimentaire, microbiologie). Chaque biologiste horizontal a modélisé les deux différents systèmes.
- Les ingénieurs. Leur nombre s'élève à dix (trois femmes et sept hommes). Chaque ingénieur a modélisé les deux différents systèmes.
- Les étudiants en biologie. Leur nombre s'élève à trente-deux (vingt-neuf femmes et trois hommes), tous élèves en dernière année de l'École de Biologie Industrielle (EBI) de Cergy. Seize étudiants ont travaillé sur la modélisation du manchot empereur et seize autres étudiants ont travaillé sur la modélisation de l'ovulation.
- Les étudiants en ingénierie. Leur nombre s'élève à vingt-six (sept femmes et dix-neuf hommes), tous élèves ingénieurs en dernière année à l'école Arts & Métiers Paristech (ENSAM). Onze étudiants ont travaillé sur la modélisation du manchot empereur et quinze autres étudiants ont travaillé sur la modélisation de l'ovulation.

Pour chaque profil de participant, hors biologistes verticaux, un participant supplémentaire a été mis à contribution pour définir un témoin négatif, à savoir, une modélisation du système biologique considéré sans l'application du modèle proposé. Le nombre de participants total à l'expérimentation est ainsi porté à quatre-vingt-huit.

5.2.3 Formation méthodologique

Chaque participant a reçu une formation en amont de l'expérimentation. Afin que chaque participant comprenne le contexte de l'étude, la formation a été initiée par une introduction générale d'une demi-heure sur la bio-inspiration, puis plus spécifiquement sur le processus biomimétique. Une introduction du modèle a ensuite été dispensée aux participants. Cette partie de la formation, d'une durée elle aussi d'une demi-heure, permet d'explicitier les tenants et aboutissants des besoins de modélisations des systèmes biologiques dans le cadre d'une démarche biomimétique, d'introduire le concept des invariants d'échelle, de détailler les différents sous-systèmes composant un système biologique, d'aborder les définitions de chacun de ces invariants d'échelle, d'introduire la représentation graphique (cf. Figure 5.2) servant de support à l'application du modèle dans le cadre de l'expérimentation et de présenter deux cas d'études illustratifs (i.e. les Pays-Bas et une cellule du myocarde humain).

Cette deuxième partie de la formation sur le modèle expérimental a été remplacée par une formation en modélisation fonctionnelle pour les participants n'étant pas amenés à

utiliser le modèle proposé dans le cadre de l'expérimentation (i.e. ceux générant le témoin négatif).

5.2.4 Cas d'étude pédagogique

Au terme de cette première heure théorique de formation, les participants ont été amenés à mettre en pratique le modèle sur des cas d'études pédagogiques. Pendant une heure, en individuel pour les biologistes horizontaux et les ingénieurs et par groupe de deux pour les étudiants, chaque participant a ainsi pu mettre à l'épreuve sa compréhension du modèle sur le cas du corps humain. Afin de faciliter cette étape, les participants ont reçu un corpus de textes décrivant le corps humain en plus d'un schéma du modèle et une fiche décrivant les définitions des différents sous-systèmes (ainsi qu'une liste d'exemples) à identifier pour les participants devant reconstruire le modèle type synthétisé par l'expert biologique.

5.2.5 Modélisation du cas d'étude concret

L'achèvement du cas d'étude pédagogique signe le début de l'application du modèle par les participants sur les deux cas concrets. Les étudiants ne modélisant pas les deux différents modèles se sont attribués leur système considéré par affinité. Les participants se sont vus remettre, en sus du corpus de texte agrégé par le biologiste vertical, les mêmes *templates* que lors du cas d'étude pédagogique. Au terme de deux heures d'expérimentation, les participants devaient rendre leurs documents dûment remplis, dont les réponses sont dès lors susceptibles de pouvoir être comparées au témoin positif généré par l'expert de l'organisme considéré (voir Tableau 5.2).

Tableau 5.2 – Témoins positifs générés par les experts des systèmes considérés

Invariant d'échelle	Système considéré	
	Manchot	Ovulation
Frontière	Système tégumentaire	Membrane cellulaire
Intégrateur	Bec, cavité orale, œsophage	Récepteurs membranaires et jonctions cellulaires
Extrudeur	Cloaque, glande sus-orbitale, jabot	-
Soutien	Squelette	Cytosquelette
Distributeur	Cœur, système lymphatique	Mitochondries
Convertisseur	Jabot, gésiers, proventricules, estomac, syrinx	Mitochondries
Emmagasineur	Tissus adipeux, jabot	ATP
Moteur	Muscles	Microtubules
Producteur	Glande uporygienne	Régulation de la synthèse protéique
Transducteur d'entrée	Organes sensoriels	cAMP
Transducteur interne	Régions postsynaptiques, système immunitaire	Gap Junctions (cGMP)

<i>Décodeur</i>	Régions corticales sensorielles	PKA & PDE3A
<i>Réseau</i>	Systèmes nerveux	Signalisation cellulaire
<i>Décisionnaire</i>	Système endocrinien, hémisphères cérébraux, système immunitaire	MPF complexe : CDK1/cyclin B
<i>Encodeur</i>	Cervelet, glandes externes	-
<i>Transducteur de sortie</i>	Syrinx, cloaque	-

5.2.6 Premier questionnaire

Au terme de l'expérimentation, les participants ont été amenés à répondre à un questionnaire contenant les dix questions suivantes :

- J'ai, par mon cursus ou ma curiosité personnelle, acquis une expertise biologique.
- Avant sa modélisation, je possédais une certaine connaissance du système d'étude.
- Ma connaissance initiale du système d'étude me semblait adéquate pour le traitement de sa modélisation.
- Je pense avoir compris le contenu de la formation qui a précédé l'expérimentation.
- J'étais motivé pour traiter le sujet d'étude.
- Je suis familier de la modélisation de systèmes.
- Le modèle pendant la formation m'a aidé à mieux comprendre le sujet d'étude.
- Je pense que la modélisation telle qu'elle a été formalisée va m'aider à interagir avec d'autres (biologistes/ingénieurs).
- La langue utilisée par les documents fournis (l'anglais) m'a posé un problème.
- J'ai le sentiment que le fait de disposer d'un temps supplémentaire aurait impacté ma modélisation du système.

Chaque réponse étant formalisée selon une échelle de Likert en sept points allant de « pas du tout » à « tout à fait »

5.2.7 Second questionnaire

Suite au premier questionnaire, les participants ayant appliqué le modèle s'en sont vus proposer un second, identique à celui utilisé pour évaluer les outils biomimétiques d'abstraction lors de la première expérimentation (cf. section 4.2.3).

5.2.8 Synthèse relative au protocole et autres indications

Formalisée ainsi, l'expérimentation vise à valider certains points particuliers relative au modèle :

- Un modèle permettant de modéliser les systèmes vivants, indépendamment de leur niveau systémique biomimétique peut être établi.
- Ce modèle est adapté à différents types de profils, allant d'un niveau limité de connaissance en biologie (élèves ingénieurs/ingénieur) à une expertise intermédiaire (étudiants en biologie) puis à une expertise certaine (biologistes horizontaux).

- Le modèle mène à l'identification de sous-systèmes fonctionnels et donc à la caractérisation des ressources du système.

Le respect de ces critères assurera que le modèle est pertinent pour ses desseins relatifs à la conception bio-inspirée.

L'approche proposée par l'expérimentation vise une double validation :

- Une validation qualitative par l'intégration des ingénieurs et des biologistes horizontaux à l'expérimentation, profils cibles de la recherche qui seront amenés à utiliser le modèle dans un contexte industriel.
- Une validation quantitative par l'intégration des étudiants en biologie et ingénierie à l'expérimentation, dont la participation a permis d'étendre le nombre de participants.

Le protocole de l'expérimentation est synthétisé par la Figure 5.3. Au cours de la modélisation des systèmes biologiques, les participants étaient libres de décider du temps assigné à l'identification de chaque sous-système. Il a néanmoins été demandé aux étudiants, seule population de participants à travailler en différents groupes simultanément, de ne pas échanger quant au processus et/ou résultats de leur production à l'extérieur de leur groupe de travail.

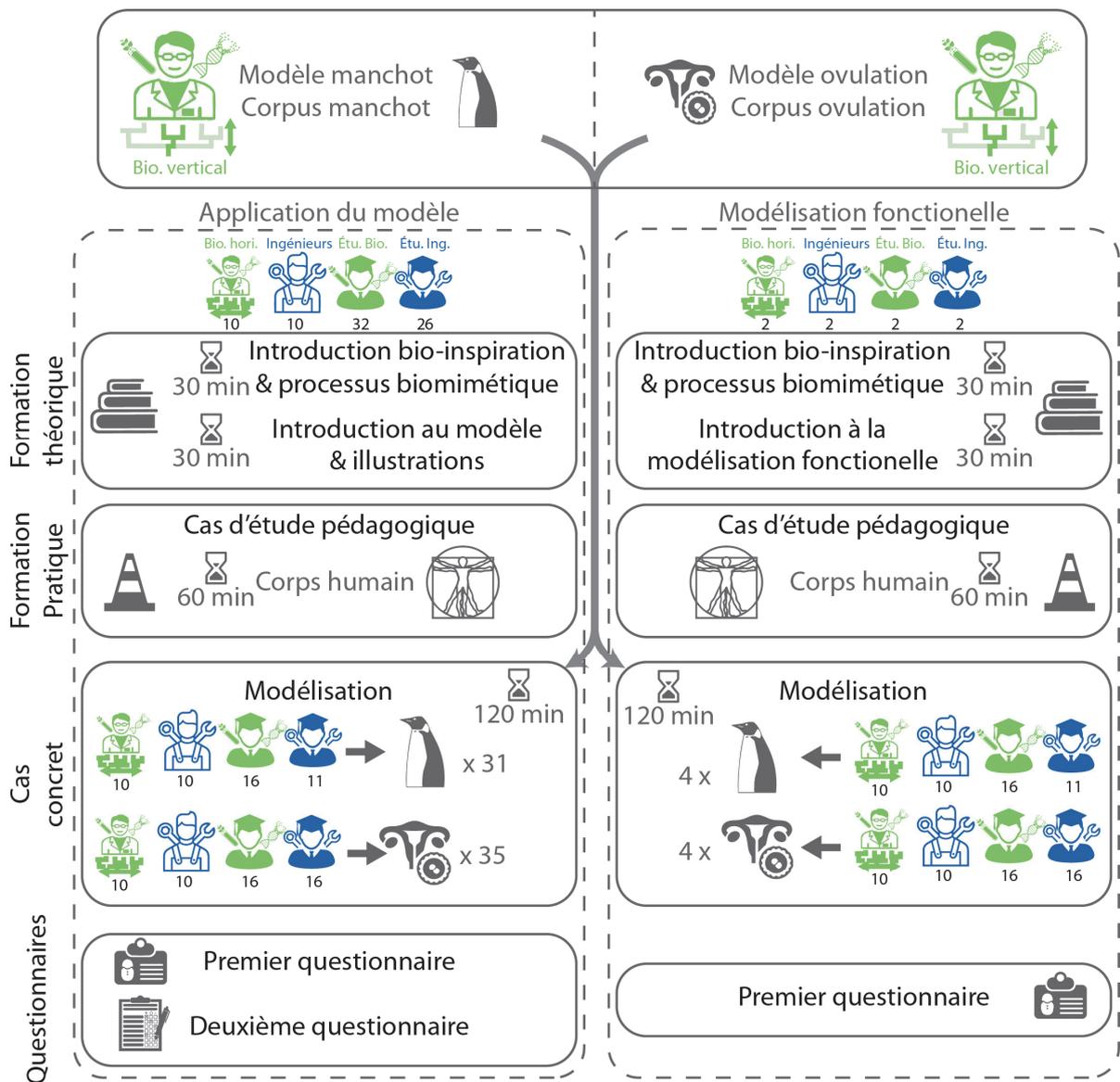


Figure 5.3 – Synthèse du protocole de la seconde expérimentation

5.3 RÉSULTATS DE LA SECONDE EXPÉRIMENTATION

Le premier questionnaire rempli par les participants permet la mesure de la corrélation intra-classe des populations ainsi que la mesure de l'impact du modèle présenté sur le processus biomimétique. Ce même questionnaire servira aussi de base quant à l'identification des prérequis nécessaires pour une bonne application du modèle. Enfin, le second questionnaire auquel les participants ont répondu permettra l'évaluation subjective, par les participants, du modèle utilisé.

Les résultats relatifs au premier questionnaire (relatif au profil et résultats des participants) sont résumés par le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 – Statistiques descriptives des résultats de l'expérimentation

Variable	N	M	ET	Min	Max
Score	95	85.65	15.71	38	100
Expertise biologique	98	3,34	2,15	0	6

Connaissance système	98	2,32	1,93	0	6
Expertise en modélisation	98	2,10	1,82	0	6
Confiance pour modélisation	98	4,83	1,01	2	6
Compréhension de la formation	98	4,24	1,32	0	6
Motivation quant à l'expérimentation	98	2,66	1,89	0	6
Aisance linguistique	92	4,35	1,67	0	6
Aisance quant au temps imparti	92	4,73	1,36	1	6
Acquisition connaissances	98	4,69	1,26	1	6
Facilitation de l'interaction	98	4.49	1,29	1	6

5.3.1 Impact du modèle

Une analyse comparant les résultats relatifs à l'utilisation du modèle présenté d'une part et de la modélisation fonctionnelle d'autre part, par les différentes populations présentent lors de l'expérimentation, est présentée dans cette présente section.

5.3.1.1 Biologistes horizontaux

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour les biologistes horizontaux sont documentés par le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 - Résultats de l'analyse ANOVA - biologistes horizontaux (avec $p < .05$)

Id	Variable indé.	Variable dépendante	Résultat
1.1	Modèle utilisé	Expertise biologique	$F(1, 20) = 1.36 ; p = .270$
1.2	Modèle utilisé	Connaissance système	$F(1, 20) = .93 ; p = .359$
1.3	Modèle utilisé	Expertise en modélisation	$F(1, 20) = .15 ; p = .704$
1.4	Modèle utilisé	Confiance pour modélisation	$F(1, 20) = .26 ; p = .624$
1.5	Modèle utilisé	Compréhension de la formation	$F(1, 20) = .06 ; p = .815$
1.6	Modèle utilisé	Motivation quant à l'expérimentation	$F(1, 20) = .00 ; p = 1.00$
1.7	Modèle utilisé	Aisance linguistique	$F(1, 20) = .39 ; p = .546$
1.8	Modèle utilisé	Aisance quant au temps imparti	$F(1, 20) = .09 ; p = .766$
1.9	Modèle utilisé	Acquisition connaissances	$F(1, 20) = 138.89 ; p = .00$
1.10	Modèle utilisé	Facilitation de l'interaction	$F(1, 20) = 55.23 ; p = .00$

Les résultats démontrent que pour deux populations ne montrant pas de différences significatives de profil (*résultats 1.1 à 1.8*) l'utilisation du modèle présenté en section 5.1.3.2 induit un impact positif sur l'acquisition de connaissances relatives au système considéré (*résultat 1.9*) ainsi que sur la facilitation d'une potentielle interaction avec un expert l'organisme considéré (*résultat 1.10*).

5.3.1.2 Concepteurs – Ingénieurs

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour les concepteurs/ingénieurs sont documentés par le Tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Résultats de l'analyse ANOVA – concepteurs/ingénieurs (avec $p < .05$)

Id	Variable indé.	Variable dépendante	Résultat
2.1	Modèle utilisé	Expertise biologique	$F(1, 20) = .40 ; p = .543$
2.2	Modèle utilisé	Connaissance système	$F(1, 20) = .26 ; p = .624$
2.3	Modèle utilisé	Expertise en modélisation	$F(1, 20) = .145 ; p = .711$
2.4	Modèle utilisé	Confiance pour modélisation	$F(1, 20) = .09 ; p = .773$
2.5	Modèle utilisé	Compréhension de la formation	$F(1, 20) = 1.62 ; p = .232$
2.6	Modèle utilisé	Motivation quant à l'expérimentation	$F(1, 20) = .26 ; p = .624$
2.7	Modèle utilisé	Aisance linguistique	$F(1, 20) = .15 ; p = .708$
2.8	Modèle utilisé	Aisance quant au temps imparti	$F(1, 20) = 1.16 ; p = .306$
2.9	Modèle utilisé	Acquisition connaissances	$F(1, 20) = 30.10 ; p = .00$
2.10	Modèle utilisé	Facilitation de l'interaction	$F(1, 20) = 36.46 ; p = .00$

Les résultats démontrent que pour deux populations ne montrant pas de différences significatives de profil (*résultats 2.1 à 2.8*) l'utilisation du modèle présenté en section 5.1.3.2 induit un impact positif sur l'acquisition de connaissances relatives au système considéré (*résultat 2.9*) ainsi que sur la facilitation d'une potentielle interaction avec un expert l'organisme considéré (*résultat 2.10*).

5.3.1.3 Étudiants en biologie

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour les étudiants en biologie sont documentés par le Tableau 5.6.

Tableau 5.6 – Résultats de l'analyse ANOVA – étudiants en biologie (avec $p < .05$)

Id	Variable indé.	Variable dépendante	Résultat
3.1	Modèle utilisé	Expertise biologique	$F(1, 33) = 1.35 ; p = .253$
3.2	Modèle utilisé	Connaissance système	$F(1, 33) = .26 ; p = .617$
3.3	Modèle utilisé	Expertise en modélisation	$F(1, 33) = .19 ; p = .668$
3.4	Modèle utilisé	Confiance pour modélisation	$F(1, 33) = 1.56 ; p = .220$
3.5	Modèle utilisé	Compréhension de la formation	$F(1, 33) = .47 ; p = .497$
3.6	Modèle utilisé	Motivation quant à l'expérimentation	$F(1, 33) = .37 ; p = .548$
3.7	Modèle utilisé	Aisance linguistique	$F(1, 28) = .09 ; p = .769$
3.8	Modèle utilisé	Aisance quant au temps imparti	$F(1, 28) = .015 ; p = .902$
3.9	Modèle utilisé	Acquisition connaissances	$F(1, 33) = 22.41 ; p = .000$
3.10	Modèle utilisé	Facilitation de l'interaction	$F(1, 33) = 12.58 ; p = .001$

Les résultats démontrent que pour deux populations ne montrant pas de différences significatives de profil (*résultats 3.1 à 3.8*) l'utilisation du modèle présenté en section 5.1.3.2 induit un impact positif sur l'acquisition de connaissances relatives au système considéré (*résultat 3.9*) ainsi que sur la facilitation d'une potentielle interaction avec un expert l'organisme considéré (*résultat 3.10*).

5.3.1.4 Étudiants en ingénierie

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour les étudiants en ingénierie sont documentés par le Tableau 5.7.

Tableau 5.7 - Résultats de l'analyse ANOVA - étudiants en ingénierie (avec $p < .05$)

Id	Variable indé.	Variable dépendante	Résultat
4.1	Modèle utilisé	Expertise biologique	$F(1, 27) = 1.21 ; p = .282$
4.2	Modèle utilisé	Connaissance système	$F(1, 27) = .07 ; p = .792$
4.3	Modèle utilisé	Expertise en modélisation	$F(1, 27) = .02 ; p = .879$
4.4	Modèle utilisé	Confiance pour modélisation	$F(1, 27) = .18 ; p = .672$
4.5	Modèle utilisé	Compréhension de la formation	$F(1, 27) = .63 ; p = .433$
4.6	Modèle utilisé	Motivation quant à l'expérimentation	$F(1, 27) = .71 ; p = .407$
4.7	Modèle utilisé	Aisance linguistique	$F(1, 27) = .83 ; p = .370$
4.8	Modèle utilisé	Aisance quant au temps imparti	$F(1, 26) = .36 ; p = .556$
4.9	Modèle utilisé	Acquisition connaissances	$F(1, 27) = 6.19 ; p = .02$
4.10	Modèle utilisé	Facilitation de l'interaction	$F(1, 27) = 42.27 ; p = .000$

Les résultats démontrent que pour deux populations ne montrant pas de différences significatives de profil (*résultats 4.1 à 4.8*) l'utilisation du modèle présenté en section 5.1.3.2 induit un impact positif sur l'acquisition de connaissances relatives au système considéré (*résultat 4.9*) ainsi que sur la facilitation d'une potentielle interaction avec un expert l'organisme considéré (*résultat 4.10*).

5.3.1.5 Conclusion quant à l'impact du modèle

Avec un impact positif sur l'acquisition de connaissances relatives au système considéré ainsi que sur facilitation d'une potentielle interaction avec un expert l'organisme considéré pour l'ensemble des populations considérées, les résultats expérimentaux dénotent de l'intérêt du modèle proposé. Comparativement au témoin négatif (i.e. modélisation fonctionnelle), le modèle présenté semble plus à même d'efficacement préparer les concepteurs biomimétiques à interagir avec un ou plusieurs biologistes verticaux.

5.3.2 Prérequis nécessaires à l'utilisation du modèle

La seconde partie de l'analyse statistique porte sur le taux de succès qu'on obtenus les participants à modéliser leur(s) système(s) d'étude selon le témoin positif formalisé par l'expert biologique du système considéré.

Les biologistes horizontaux et les concepteurs/ingénieurs ayant appliqué le modèle aux deux systèmes, leurs résultats peuvent être respectivement combinés. Les étudiants, et en biologie et en ingénierie, n'ayant travaillé que sur l'un des deux systèmes, il est nécessaire de vérifier que leurs résultats sont comparables. Pour ce faire, une analyse de la variance (ANOVA) utilisant le système d'étude (i.e. manchot empereur et ovulation) comme variable indépendante et l'ensemble des critères du premier questionnaire comme variable

dépendante a été réalisée. La différence entre les deux groupes n'est pas significative, et ce pour chacun des critères considérés (homogénéité des variances allant de $F(1,31) = 3.73$ avec $p = .063$ pour la connaissance du système à $F(1,31) = 0.05$ avec $p = .826$ pour la connaissance nécessaire à la modélisation du système). On peut donc conclure que les étudiants en biologie d'une part et les étudiants en ingénierie d'autre part appartiennent respectivement à une même population permettant la comparaison de leurs résultats.

5.3.2.1 Impact des variables

La première partie de l'analyse s'appuie sur un raisonnement « toutes choses égales par ailleurs » ; correspondant à la mesure de l'effet d'une variable explicative, conditionnellement à chacune des autres variables considérées. Suite à la construction préalable d'un modèle dans lequel les liens existants entre la variable expliquée et les variables explicatives est élaboré, le contrôle simultané des effets de chacune des variables sur le score obtenu par les participants de l'expérimentation est étudié. L'ensemble des résultats est présenté par le Tableau 5.8.

Variable	Attributs	Impact
Expérience	Expert, Étudiant	31%
Motivation	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	20%
Compréhension de la formation	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	19%
Domaine d'origine	Ingénierie, Biologie	7%
Expertise en biologie	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	7%
Expertise en modélisation	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	6%
Confiance pour modélisation	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	4%
Temps imparti	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	2%
Aisance linguistique	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	2%
Système considéré	Ovulation, Manchot	2%
Connaissance du système	0 ;1 ;2 ;3 ;4 ;5 ;6	1%

Tableau 5.8 - Impact relatif des différentes variables sur le score obtenu par les participants durant l'expérimentation

Cette analyse de l'impact des variables sur le score obtenu tend à démontrer certains éléments clés :

- La différence de profil entre les experts et les étudiants impacte plus fortement le score d'application du modèle que celle liée à leur domaine d'appartenance (ingénierie et biologie).
- La motivation et la formation en amont constituent des éléments clés dans la complétion de l'exercice.
- L'expertise en biologie et l'expertise en modélisation impactent de manière similaire (respectivement 7% et 6%) les résultats obtenus par les participants.

- Le système d'étude ainsi que sa connaissance préalable par les individus appliquant le modèle important peu (impact respectif sur le score de 2% et de 1%).

En considérant les éléments soulignés ci-dessus, il semble possible d'affirmer que le modèle tend à être utilisable sans prérequis de connaissances biologiques spécifiques.

5.3.2.2 Carte de l'usabilité

Afin d'étudier l'usabilité du modèle, les résultats expérimentaux nécessaires à la mise en œuvre d'une Analyse des Correspondances Multiples (ACM), ont été convertis de la manière suivante :

- Score : Une discussion avec les experts biologistes verticaux a abouti à la conclusion que tout score supérieur à 75 (soit 75% de bonnes réponses ou douze réponses correctes sur les seize possibles) dénotait une bonne compréhension de l'organisme, les erreurs relevées pouvant être assimilées à de l'inadvertance ou du manque de temps. Dès lors le score d'usabilité a été réencodé de la façon suivante : Usabilité parfaite (scores égaux à 100) / Usabilité bonne (score compris entre 75 et 100) / Usabilité insuffisante (score inférieur à 75).
- Autres variables : les notes équivalentes à 0 et 1 définissent une catégorie « mauvaise », les attributs équivalents à 2, 3 et 4 définissent une catégorie « moyenne » et les attributs équivalents à 5 et 6 définissent une catégorie « Bonne » (e.g. mauvaise expertise biologique si la variable expertise biologique égale 0).

Les résultats de la conversion sont présentés par la Figure 5.4.

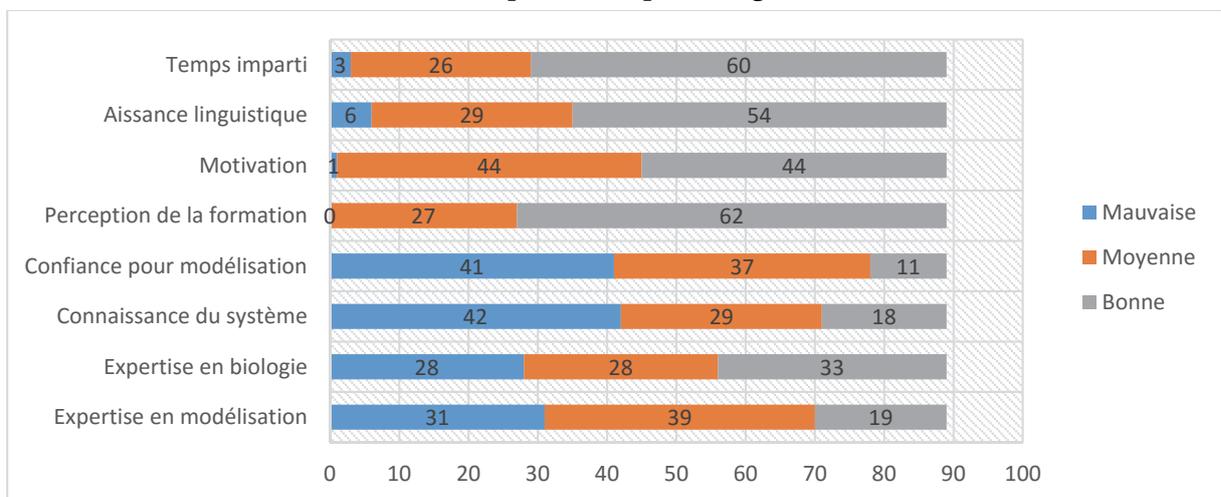


Figure 5.4 – Résultats considérés pour l'ACM

L'ACM opérée explique la variance totale du jeu de données au travers de 15 dimensions. La Figure 5.5 présente la cartographie des deux premières dimensions. Ces deux dimensions synthétisent 30,3% de l'inertie totale (avec respectivement 20% et 10,3%). La Figure 5.5 présente la cartographie de ces deux premières dimensions.

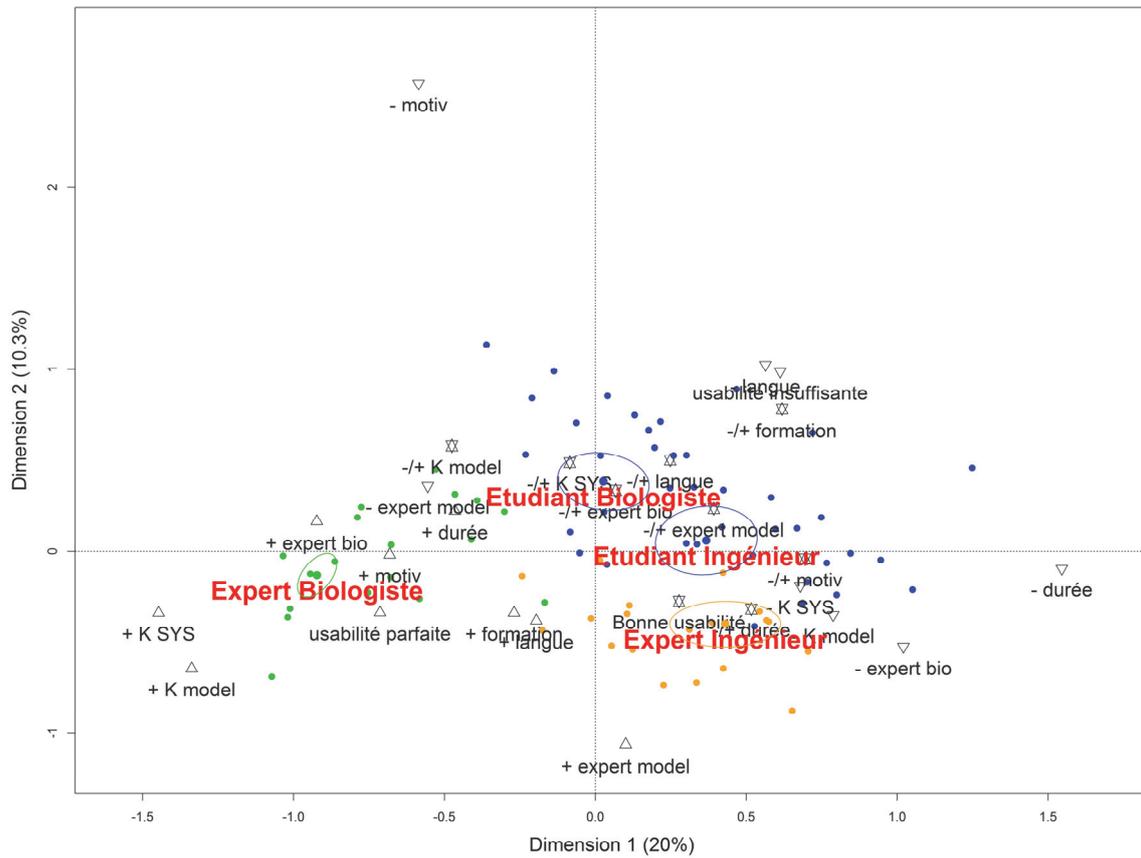


Figure 5.5 – Cartographie de l'usabilité du modèle et positionnement relatif des populations de rattachement des participants à l'expérimentation

La première dimension se caractérise par une représentation de la connaissance en biologie (i.e. Connaissance du système (K SYS), Confiance pour la modélisation (K model) et Expertise biologique (expert bio)), positionnant les valeurs positives à gauche et celles négatives à droite. La deuxième dimension illustre particulièrement l'expérience des participants (i.e. Aisance linguistique (langue), Compréhension de la formation (formation), Motivation (motiv)), positionnant les valeurs positives en bas et celles négatives en haut.

L'ACM fait état de 3 groupes de population distincts dont les caractéristiques constitutives sont mentionnées en Figure 5.6.

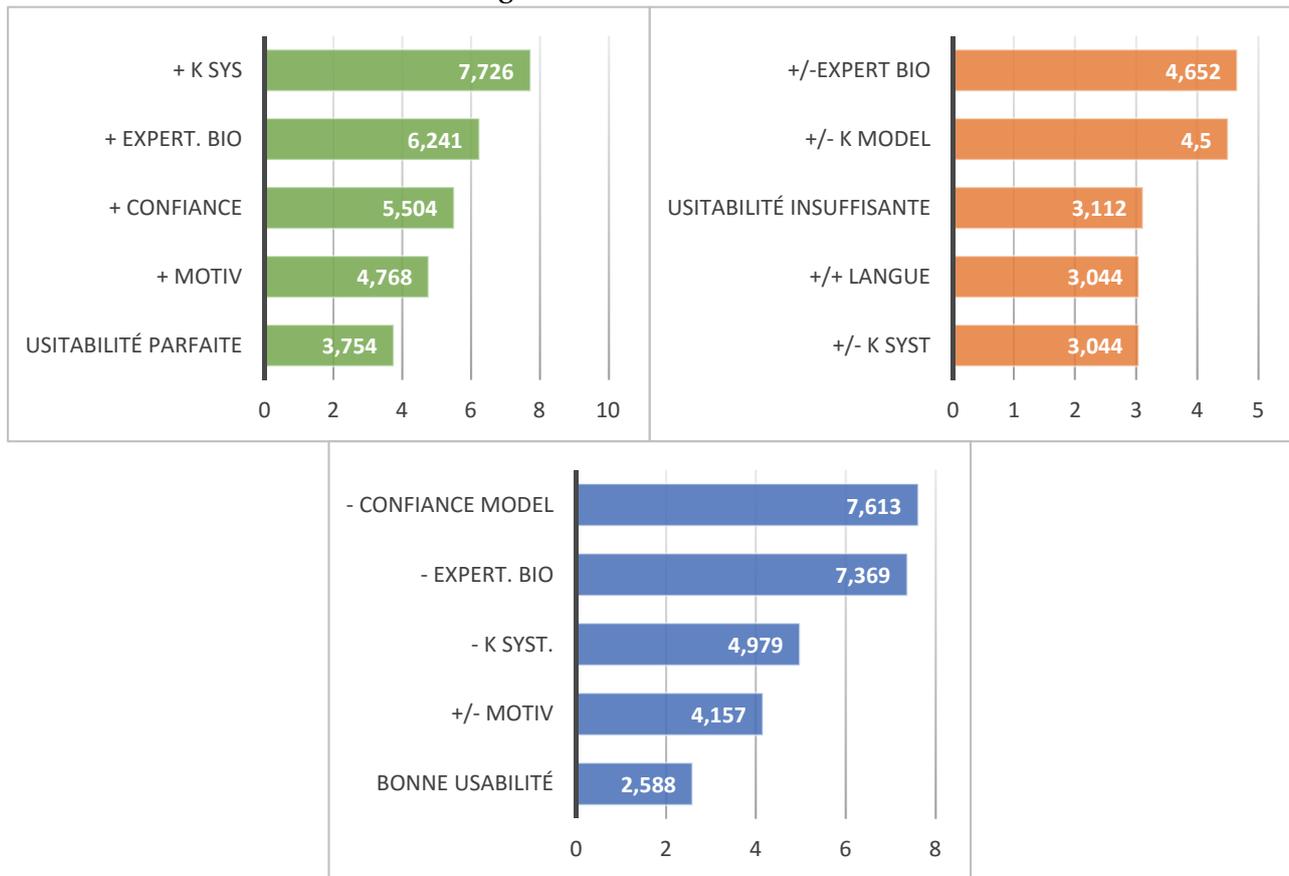


Figure 5.6 – Description des groupes

Le premier groupe correspond ainsi à l'usabilité parfaite du modèle, le second à l'usabilité insuffisante du modèle et le troisième à sa bonne usabilité. La superposition des populations de participants aux groupes identifiables fait apparaître que le premier groupe (usabilité parfaite) correspond aux biologistes experts, le second (usabilité insuffisante) aux étudiants (à la fois en biologie et en ingénierie) et le troisième (bonne usabilité) aux experts ingénieurs. Cette analyse des barycentres des populations conforte le point avancé dans la section 5.3.2.1, selon lequel l'expérience des participants prime dans la bonne application du modèle sur leur domaine d'application (i.e. biologie ou ingénierie). Il est à noter que la durée de l'exercice, illustrée par la figure Figure 5.7 a été perçue comme significativement plus insuffisante par les experts ingénieurs, $M = 3.35$, que par les experts biologistes et les étudiants avec respectivement $M = 5.4$, $Z = 3.48$, $p < .000$ et $M = 4.44$, $Z = 3.38$, $p < .001$. Par cette variable, les experts ingénieurs formalisent le ressenti que leurs résultats d'usabilité du modèle auraient pu être positivement impacté s'ils avaient disposé de plus de temps.

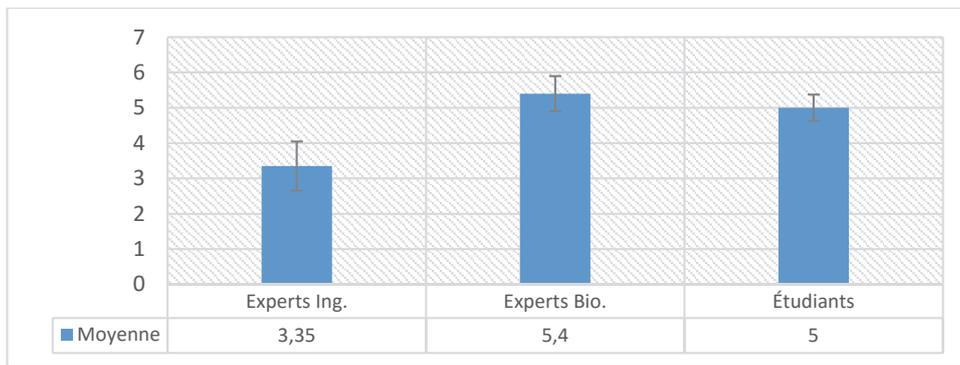


Figure 5.7 – Résultats de la variable « Temps imparti » pour les trois groupes de population identifiés

Les ingénieurs professionnels, population cible, présentant une bonne usabilité de l'outil présenté (adéquation avec le modèle de référence supérieur à 75%), l'analyse des résultats démontre qu'une expertise biologique ou des connaissances spécifiques au système étudié ne constituent nullement des prérequis à l'application du modèle.

5.3.3 Évaluation de l'outil de modélisation

Une analyse de l'appréciation du modèle en fonction des groupes relatifs à l'usabilité (i.e. parfaite usabilité – experts biologistes, bonne usabilité – experts ingénieurs, usabilité insuffisante – étudiants) de l'outil est présentée par le Tableau 5.9.

Tableau 5.9 - Résultats de l'évaluation de l'outil Babel.

Babel (α)	Cm (SD)	Ins (SD)	Fi (SD)	Cg (SD)	Pc (SD)	(1) (SD)	(2) (SD)	(3) (SD)	(4) (SD)	(5) (SD)	(6) (SD)
Experts Bio. (.686)	2.7 (0.4)	2.4 (0.6)	2.3 (0.6)	2.5 (0.5)	2.9 (0.2)	2.5 (0.7)	1 (0.6)	2.6 (0.5)	2.5 (0.5)	2.8 (0.4)	2.8 (0.4)
Experts Ing. (.914)	2.8 (0.4)	2.2 (0.6)	2.2 (0.6)	2.7 (0.5)	2.9 (0.3)	1.6 (0.4)	1.5 (0.4)	2.5 (0.4)	2.6 (0.3)	2.8 (0.2)	2.8 (0.2)
Étudiants (.56)	2.1 (0.6)	2.0 (0.6)	1.7 (0.7)	1.9 (0.8)	2.0 (0.7)	1.5 (0.8)	1.2 (0.8)	1.8 (0.9)	2.3 (0.7)	1.9 (1)	2.0 (0.7)

Avec pour critères théoriques Cm : Capacité de modélisation ; Ins : Intégration des niveaux systémiques ; Fi : Filtrage de l'information ; Cg : Capacité de généralisation ; Pc : Préservation des contraintes ; et pour critère pratiques 1 : Rapidité ; 2 : Simplicité ; 3 : Autonomie ; 4 : Adaptabilité (domaine) ; 5 : Adaptabilité (groupe) ; 6 : Précédence.

Les résultats récoltés dénotent de profils relativement similaires pour les populations d'experts, les étudiants tendant à noter l'outil plus faiblement.

Sur le plan pratique, les ingénieurs semblent avoir trouvé l'outil moins rapide que les biologistes. Cet élément peut être expliqué par la quantité d'articles scientifiques biologiques à analyser, articles que les ingénieurs n'ont pas l'habitude de lire. Ce manque d'habitude pourrait donc expliquer le ressenti relatif au manque de temps dans l'application du modèle. L'inverse semble vrai quant à la simplicité de l'outil : les ingénieurs, souvent plus au fait de la modélisation de système, semblent le trouver plus simple à appliquer que les biologistes.

De manière globale l'outil obtient de bons scores théoriques, tout particulièrement sur sa capacité de modélisation, de généralisation et de préservation des contraintes. Sur le

plan pratique, son adaptabilité et sa capacité à faciliter l'implémentation d'un outil aval sont mises en avant par les résultats expérimentaux.

5.4 CONCLUSION DE LA SECONDE EXPÉRIMENTATION

Les résultats présentés et issus de la seconde expérimentation nécessitent d'être discutés à deux égards. Premièrement, le faible nombre de témoins négatifs peut constituer un frein dans la validation statistique de la quantification de l'apport du modèle. Deuxièmement, si les biologistes n'ont eu aucune difficulté à analyser le corpus de textes scientifiques (malgré la variation de résultats) dans le temps imparti, l'aspect temporel semble avoir posé problème aux ingénieurs, peu versés à l'exercice. Il semble donc probable que les ingénieurs aient présenté de meilleurs résultats avec plus de temps à disposition pour la complétion de l'exercice.

Ces deux constats mis à part, les tendances existantes au sein des résultats de l'expérimentation sont fortes. Premièrement, les utilisateurs du modèle tendent à se sentir plus à même d'entrer en contact avec un expert biologique du système étudié suite à la complétion de l'application du modèle. Cette observation peut être expliquée par la capacité du modèle à favoriser l'acquisition de connaissances spécifiques sur le système biologique étudié. Deuxièmement, ce n'est pas le niveau de connaissance en biologie (que ce dernier soit général ou spécifique au système considéré) qui tend à être un prérequis à l'utilisation du modèle (même si ce dernier en facilite l'usage), mais l'expertise métier (i.e. biologistes/ingénieurs d'une part et étudiants d'autre part) qui constitue le premier facteur discriminant la bonne usabilité du modèle. La conjonction de ces deux éléments permet la validation de la seconde hypothèse considérant qu'il est possible de « favoriser l'interaction entre les acteurs par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie. »

De manière générale le modèle ne bénéficie pas uniquement aux ingénieurs. Au cours de l'expérimentation, nombre des biologistes (à la fois verticaux et horizontaux) ont exprimé son impact quant à leur façon de concevoir le système considéré. Cette observation semble intimement liée à l'apport de la modélisation fonctionnelle, qui tend à analyser de façon systématique un système, manière de procéder à laquelle peu de biologistes sont formés.

Au terme de cette seconde expérimentation, il semble donc possible d'affirmer que Babel est un outil de modélisation répondant aux besoins d'acquisition de connaissance en biologie par les concepteurs biomimétiques. Cet apport de connaissance opéré facilite et favorise l'interaction avec les experts biologistes, inhérente à la démarche [Helms et al., 2009, Jacobs et al., 2014, Yen et al., 2014], bénéficiant, de ce fait, à l'implémentation des démarches biomimétiques *problem-driven*.

Chapitre 6

Contributions

Apports issus des travaux de recherche

Les contributions, synthétisé par la Figure 6.1, constituent le suc de la recherche présentée. C'est à partir de ces dernières qu'ont été formalisées un ensemble de publications faisant état des travaux mis en œuvre.

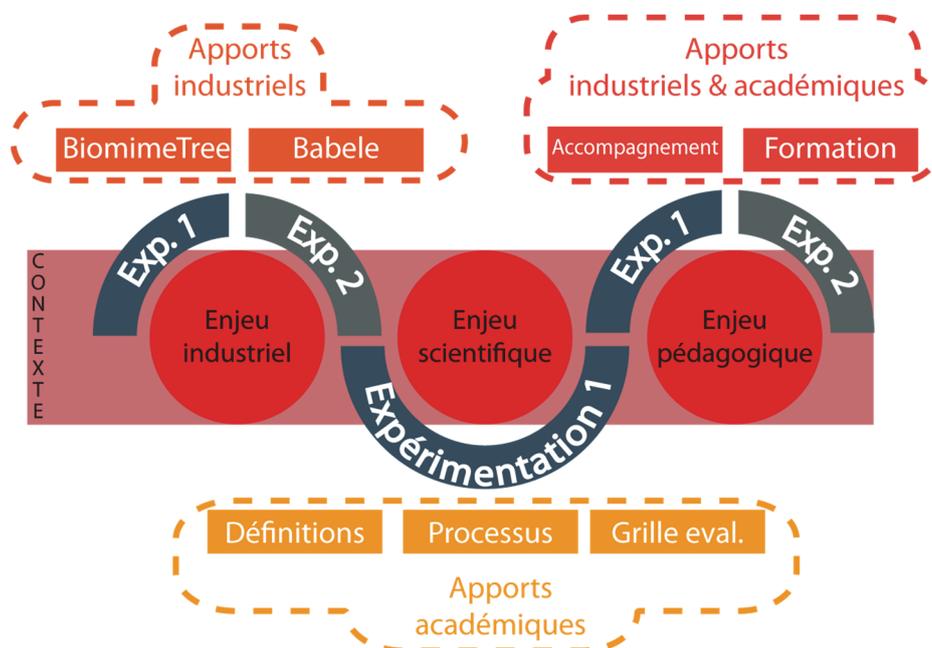


Figure 6.1 – Synthèse des apports des travaux de recherche

“The earth has its music for those who will listen.” Reginald Holmes (Fireside Fancies, 1955).

Photographie d’Ursula Bruehl© : « oudemansiella mucida »

6.1 CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES

Les contributions industrielles sont constituées d'éléments des résultats de la première et de la seconde expérimentation. Ces différentes contributions sont :

- Arbre de classification biomimétique (BiomimeTree) (section 4.5)
- L'outil de facilitation de l'interaction ingénieurs-biologistes (Babele) (section 5.1.3.2)
- L'offre d'accompagnement des entreprises dans la mise en œuvre de la biomimétique.

6.1.1 Modèle de classification des outils biomimétiques - BiomimeTree

Il semble utopique de penser qu'un concepteur novice ou même avancé (et donc en définitive tout concepteur non expert) en biomimétique soit à même de se retrouver parmi la soixantaine d'outils identifiés et présentés en section 2.5.3, sans soutien méthodologique. C'est en ce sens qu'ont été synthétisés les tenants, mais aussi les aboutissants de la première expérimentation, afin de formaliser un arbre de décision biomimétique. Ce nouveau modèle, puisque c'est ce à quoi s'apparente le résultat, constitue un moyen mis à disposition des concepteurs biomimétiques en vue de leur apporter un support méthodologique. Cet arbre, présenté dans sa première mouture en Figure 4.17, est à même d'intégrer des spécificités projets et/ou des préférences de conception afin de pointer en direction d'un outil unique, correspondant le plus aux attentes de conception, et ce, pour chacune des étapes de la conception bio-inspirée. Le processus biomimétique s'en trouve ainsi intégralement reconstitué, et le concepteur biomimétique, par répercussion, guidé à travers ce dernier.

Bien que mentionné parmi les contributions industrielles, cet arbre de décision fait aussi preuve d'un apport académique. En agencant méthodiquement les outils biomimétiques, l'arbre de décision propose un cadre de référence au sein duquel chaque développeur d'outils biomimétiques est à même de comprendre le positionnement des travaux d'autrui vis-à-vis des siens. Fort de cette caractéristique, l'arbre de décision s'approche ainsi d'un support à la collaboration, contribuant à la facilitation des interfaces entre outils, adressant, de ce fait, l'enjeu scientifique (« Accroître la visibilité du domaine en l'organisant ») mentionné dans le contexte des travaux.

BiomimeTree:

L'arbre de classification des outils biomimétiques

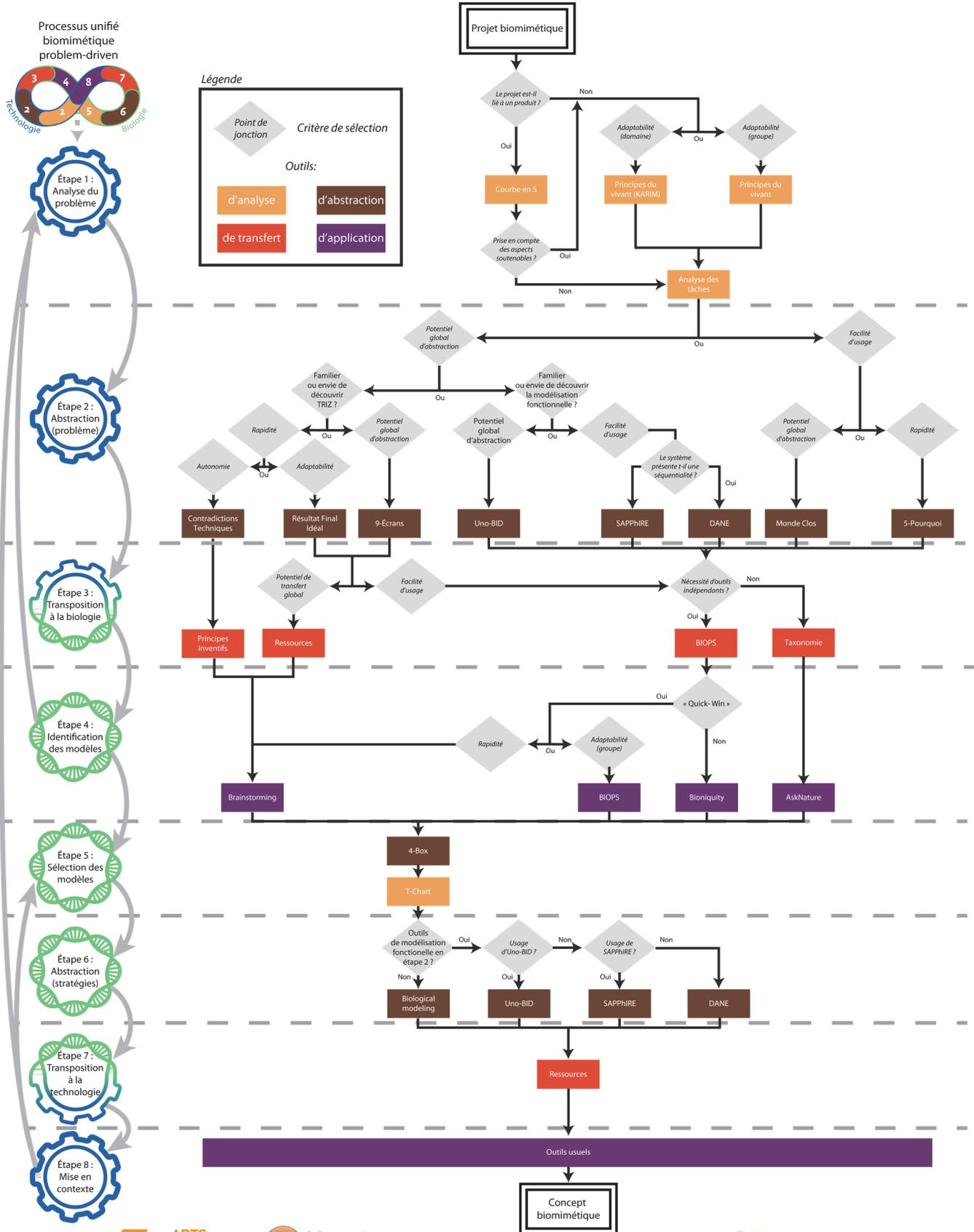


Figure 4.17 - L'Arbre de classification biomimétique (Problem-driven) - BiomimeTree

6.1.2 Outils de transfert de connaissances - Babele

En choisissant de positionner les biologistes au centre de la démarche biomimétique, les travaux de recherche prennent le parti de la montée en compétences des concepteurs afin de faciliter leurs interactions avec les biologistes.

L'outil élaboré s'articule autour des invariants d'échelles de Miller [1978] et de la loi d'intégralité des parties d'un système technique [Salamatov, 1996] (cf. Figure 6.2). Cet outil, intitulé Babele (pour *Biomimetics Analyser of Biologically Expertised Literature for Engineers*) est une grille de lecture du vivant, rendant accessible la compréhension des systèmes hautement complexes, car vivants, aux concepteurs avec peu, voire pas de connaissances préalables. Cette prouesse est rendue possible par une mise en adéquation du vivant avec l'entendement conceptuel de ce qu'est un système en ingénierie. Ainsi en subdivisant les systèmes considérés en sous-systèmes fonctionnels, le modèle réduit la complexité relative aux systèmes biologiques jusqu'à les rendre appréhendables aux ingénieurs.

L'approche proposée ne se cantonne pas exclusivement aux concepteurs. En se positionnant à équidistance de la biologie et de l'ingénierie, le modèle est aussi profitable aux biologistes. Comme exprimé au cours de l'expérimentation, la modélisation présentée prodigue une perspective nouvelle aux biologistes experts d'un organisme (i.e. verticaux), l'approche systématique telle qu'envisagée en ingénierie. Dans le cadre d'une approche « *solution-based* », le modèle pourrait être à même de faciliter, cette fois, la prise de contact d'expert de la conception par des biologistes, prodiguant la réciproque de l'avantage présenté ci-dessus.

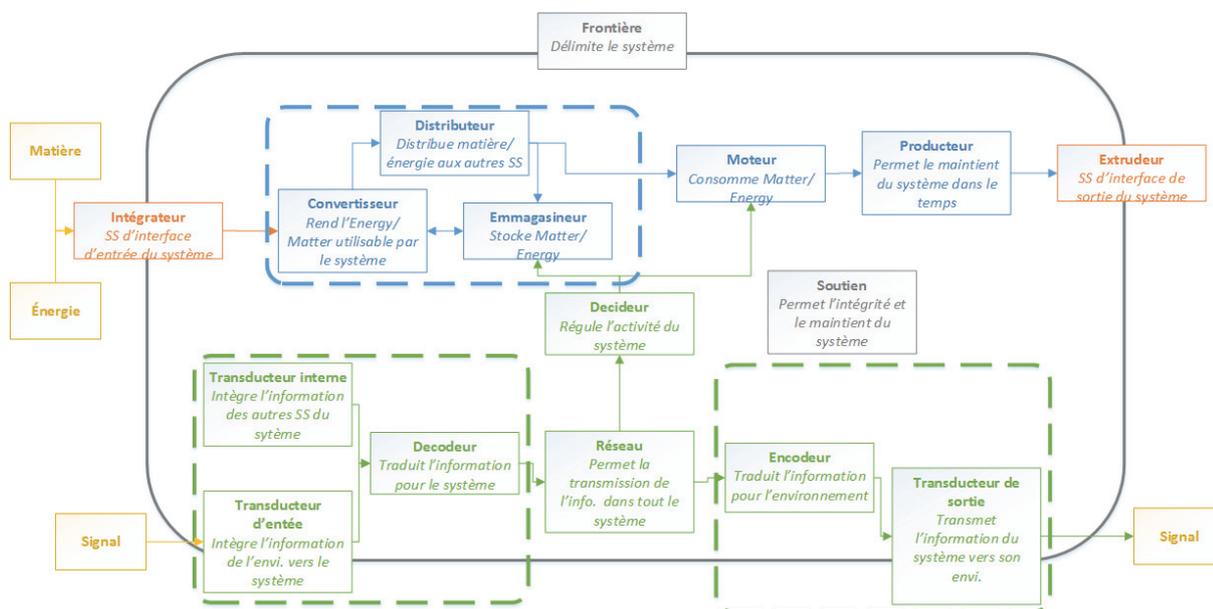


Figure 6.2 – Représentation de l'outil de modélisation biologique Babele

6.1.3 Offre d'accompagnement des entreprises dans la mise en œuvre de la biomimétique

Les connaissances acquises tout au long de la recherche et relatives à la bio-inspiration ainsi que les outils la facilitant ont permis la formalisation d'une démarche

d'accompagnement des entreprises. À ce jour, cette offre B2B¹³ ayant pour objectif le développement de nouveaux concepts biomimétiques a été souscrite par plusieurs entreprises (e.g. Air liquide, BIC). Cette formation constitue donc une contribution industrielle, au même titre que les pistes de solutions identifiées lors des ateliers industriels de la première expérimentation. En ce sens, il semble possible d'affirmer que l'enjeu industriel formulé au sein du contexte (« Faciliter l'adoption des démarches bio-inspirées par les entreprises ») ainsi que l'enjeu pédagogique (« favoriser la montée en compétences des acteurs du processus biomimétique ») ont bien été adressés par les travaux de recherche.

6.2 CONTRIBUTIONS ACADÉMIQUES

Les contributions académiques sont principalement les éléments ayant permis l'obtention des résultats de la première expérimentation, ou en faisant partie intégrante. Ces différentes contributions sont :

- Les nouvelles définitions et le redécoupage du champ sémantique de la bio-inspiration (section 2.2.3)
- La formalisation du modèle de processus biomimétique problem-driven unifié (section 4.1.2).
- Le développement d'une grille d'évaluation des outils biomimétiques (section 4.2.3).
- L'élaboration d'une formation portant sur les processus et les outils biomimétiques.

6.2.1 Nouvelles définitions

Longtemps perçus comme synonymiques, les différents termes relatifs à la bio-inspiration ont, avec le temps, divergé au point que les utiliser de façon interchangeable les déprécie. Pour lever cet élément nuisible, le présent document présente un nouvel ensemble de concepts sémantiques. Ces nouvelles définitions de la bio-inspiration, du biomimétisme, de la bionique et de la biomimétique (se référer à la section 2.2.3), offre un entendement clarifié des notions et des périmètres d'actions des termes suscités. Ayant été sanctionné puis adopté par le Comité Technique 266 dans le cadre des travaux de normalisation sur la biomimétique [ISO/TC266, 2015b], il semble plus que probable que l'emploi (aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale) des différents termes mentionnés tende, dans les années à venir, vers celui des définitions introduites dans les présents travaux.

6.2.2 Processus unifié

Comme détaillé au sein de l'état de l'art (cf. section 2.5.2), un grand nombre de processus biomimétiques ont été développés et sont encore développés aujourd'hui. Si cet épanchement d'approches spécifiques est nécessaire en vue de pouvoir répondre aux différents cadres d'implémentations possibles, il résulte de cette disparité conceptuelle, une

¹³ Abréviation de « Business-to-business », constituant un ensemble de pratique ayant lieu dans le cadre où la relation clients-fournisseurs ne comporte que des entreprise (en opposition au BtoC)

difficulté quant à l'entendement de la trame générale de la démarche biomimétique. Il est aujourd'hui donc nécessaire que les concepteurs soient suffisamment experts pour être capables de sélectionner un processus pertinent pour leur projet de conception. Afin de compenser cette constatation générant un accroissement des barrières d'entrées du domaine, un processus biomimétique unifié a été proposé et présenté en Figure 6.3. Bâti sur les modèles de processus les plus représentatifs (nombre de citation et reconnaissance des auteurs), ce modèle présente une démarche biomimétique allant de l'identification du problème à la définition d'un concept de solution finale. En plus d'offrir un entendement commun pouvant constituer une porte d'entrée à la thématique de la conception bio-inspirée, le modèle tend aussi à rapprocher le processus biomimétique à celui de la conception générale, le rendant encore plus accessible aux concepteurs novices en bio-inspiration.

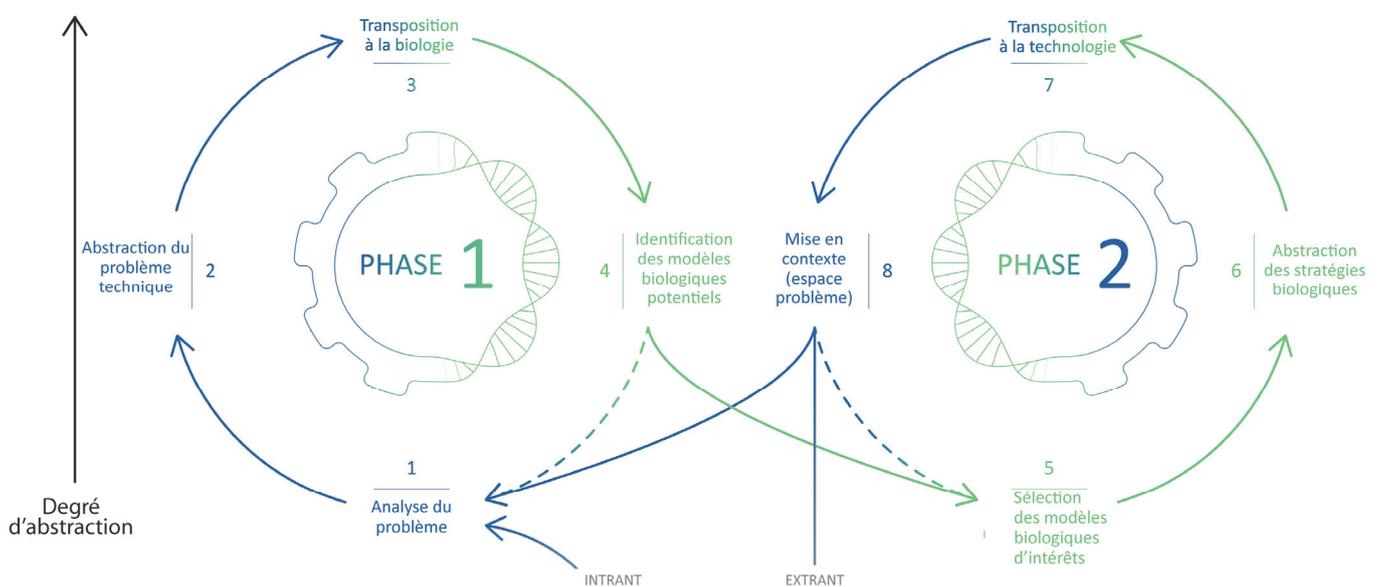


Figure 6.3 – Modèle de processus biomimétique problem-driven unifié (version circulaire)

6.2.3 Grille d'évaluation des outils biomimétiques

Si l'évaluation des outils est un thème somme toute commun (cf. section 4.2.3) dans la conception, elle n'en demeurait pas moins inédite une fois rattachée à la biomimétique. De façon analogue au modèle de processus, l'absence d'un cadre commun a abouti à une grande disparité, chaque outil ayant été développé selon ses propres métriques. Des critères d'évaluation, communs à l'ensemble des outils biomimétiques ont ainsi été proposés (cf. Tableau 6.1). Leur contribution, en permettant l'identification des forces et des faiblesses des outils considérés, est de trois ordres. Premièrement ils permettent un positionnement, relatif entre eux, des outils biomimétiques, aboutissant à l'arbre de décision biomimétique (cf. section 4.5 et 6.1.1). Deuxièmement, ils soulignent de potentiels axes de développements d'un outil considéré en vue de son amélioration (e.g. renforcer l'un de ses points forts ou compenser l'un de ses points faibles). Troisièmement, enfin, ils offrent un panorama méthodologique de la biomimétique, décrivant eux-mêmes une fois considérés comme un ensemble uni, une métrique de la maturité du domaine.

Tableau 6.1 - Grilles d'évaluations des quatre types d'outils biomimétiques

	Outils d'analyse	Outils d'abstraction	Outils de transfert	Outils d'application
Critères théoriques	Complétude de l'analyse	Capacité de généralisation	Sens de transposition	Unicité
	Précision de l'analyse	Filtrage de l'information	Adéquation	Expansion des connaissances
	Idéalité	Préservation des contraintes	Polyvalence	Modularisation
	Priorisation	Capacité de modélisation	Constance	Inventivité
Niveaux systémiques				
Critères pratiques	Rapidité			
	Simplicité			
	Autonomie			
	Adaptabilité au champ d'application			
	Adaptabilité au groupe			
	Précédence			

6.2.4 Formation aux méthodes et outils biomimétiques

L'axe de la formation ayant été défini comme un enjeu de ces travaux de recherche, il semble dès lors nécessaire de revenir sur ce point précis afin de constater si ce besoin a été adressé ou non. Bien qu'aucune démarche pédagogique n'ait été détaillée au sein du document, un certain nombre de personnes ont tout de même été formées dans le cadre de la mise en œuvre de la recherche (i.e. participants des expérimentations). Si ces personnes ont reçu un contenu pédagogique ciblé (i.e. liés aux besoins spécifiques de l'expérimentation), d'autres ont reçu, sous l'impulsion de structures d'enseignements, une formation plus transverse. Ainsi, une formation capitalisant sur les travaux de recherche (e.g. définitions sémantiques (cf. section 2.2.3), exemples d'applications (cf. section 2.2.5), processus unifié (cf. section 4.1.2), outils biomimétiques (cf. section 2.5.3)) a été formalisée puis dispensée par l'intermédiaire de l'École de Biologie Industrielle, les Arts & Métiers Paristech, l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParistech) et le Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis. Cette formation apparaît comme inédite, encore plus quand enseignée en langue française, car abordant non pas une veine théorique de la biomimétique en particulier, mais présentant bel et bien un aperçu tendant vers l'exhaustivité des courants du domaine. Au total, non moins de cent cinquante personnes ont ainsi été formées, permettant de constater que l'enjeu de formation a bel et bien été abordé au cours des travaux de recherche.

Chapitre 7



Conclusion & Perspectives

Originalité de la recherche et prospective quant aux travaux

Les deux expérimentations présentées au cours du quatrième (première expérimentation) et cinquième chapitre (seconde expérimentation) abordent la question de recherche initialement proposée (« Comment s'approprier les méthodes biomimétiques et faciliter leur déploiement pour la conception de produits innovants ? »). Ce chapitre final propose une prise de recul quant aux éléments de réponses apportées par les travaux de thèses en vue d'en présenter une vue synthétique. Suite au retour sur les différentes hypothèses formalisées ainsi que sur l'originalité des contributions qui en résultent, le chapitre introduit une synthèse globale, à laquelle succède, en guise d'épilogue, une réflexion quant aux poursuites envisagées des travaux présentés.

« La nature est bien faite » Aphorisme populaire

Photographie issue de scifi.stackexchange.com

7.1 CONCLUSION

La conclusion présentée au sein de cette section aborde séparément le bilan relatif au déroulé de la recherche (via un retour sur la problématique et les hypothèses (section 7.1.1) d'une part, et l'originalité des travaux (section 7.1.2), d'autre part, aboutissant à une conclusion générale (section 7.1.3).

7.1.1 Retour sur la problématique et les hypothèses

Lors de l'établissement du contexte des travaux de recherche (chapitre 1), il a été explicité que si le « quoi », le « pour quoi » et le « pourquoi » de la bio-inspiration étaient aujourd'hui relativement bien connus, la question du « comment » restait en suspens. La problématique de recherche considérée par ces travaux ambitionnait donc d'étudier ce « comment » de la conception bio-inspirée, par l'intermédiaire de l'exploration de l'interrogation du « *Comment s'approprier les méthodes biomimétiques et faciliter leur déploiement pour la conception de produits innovants ?* »

Cette problématique, portant sur la structuration du domaine de recherche que constitue la biomimétique, sous-tend à rendre la conception bio-inspirée plus accessible à deux égards. Premièrement, elle cherche à en augmenter l'accessibilité par sa formalisation (« comment s'approprier les méthodes biomimétiques »), élément auquel répond le modèle proposé en conclusion de la première expérimentation. Deuxièmement, elle vise cet accroissement d'accessibilité à travers une réduction des freins inhérents à l'implémentation de la démarche, élément auquel répond l'outil introduit et validé au cours de la seconde expérimentation.

Un passage en revue quant aux apports relatifs à ces deux éléments (i.e. le modèle BiomimeTree et l'outil Babele) est proposé par un retour séquentiel sur chacune des hypothèses de travail auxquelles ils tendaient respectivement à répondre.

7.1.1.1 Retour sur la première hypothèse

La première hypothèse, portant sur l'établissement d'un référentiel des outils biomimétiques, est explorée par l'intermédiaire d'une étude empruntant l'angle de l'analyse pratique en intégrant un ensemble de critères subjectifs. Afin de rendre possible cette étude, un nombre plus restreint d'outils a été considéré, grâce à la prise en compte du critère de maturité (i.e. existence de documentation quant à leur implémentation sur des cas concrets, leur description théorique, de cas d'étude illustratif et de recommandation d'usage).

Cette analyse pratique, combine des ateliers industriels faisant intervenir des experts et une étude terrain lors de la conférence TRIZ Future 2013. En analysant le ressenti des biomiméticiens lors de la mise en œuvre de vingt-deux outils biomimétiques, un certain nombre de résultats expérimentaux ont été agrégés. L'analyse statistique de ces résultats a permis, la différenciation des outils considérés, aboutissant à l'émergence d'un modèle de classification des outils biomimétiques. Ce modèle, un arbre de classification appelé *BiomimeTree*, constitue un moyen d'assister les concepteurs dans leur sélection des outils lors d'implémentation de démarches biomimétiques. C'est l'élaboration de ce modèle qui permet la validation de l'hypothèse H1, selon laquelle, l'analyse pratique des outils

biomimétiques rendrait possible l'émergence d'un référentiel, validant par ce fait la première hypothèse.

La combinaison de cette analyse pratique, combinée à une analyse théorique des outils biomimétiques devrait être à même d'alimenter le positionnement relatif des outils biomimétiques au sein du référentiel, intégrant au sein d'un modèle hybride, aspects théoriques et pratiques de l'analyse des outils biomimétiques.

7.1.1.2 Retour sur la seconde hypothèse

La seconde hypothèse, considérant le fait qu'il soit possible de « favoriser l'interaction entre les acteurs par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie », a été abordée par la seconde expérimentation. C'est à travers la validation distincte de ses deux sous composantes, à savoir, que la modélisation de systèmes biologiques favorise l'interaction entre les acteurs d'une part, et que cette modélisation du vivant ne requiert pas de connaissances existantes en biologie d'autre part, que cette seconde hypothèse a pu être validée.

Retour sur la sous-hypothèse H2a

Les résultats relatifs aux critères spécifiques relatifs à l'acquisition de connaissances et à la facilitation de l'interaction (présents au sein du premier questionnaire – dit profile-lors de l'expérimentation) s'avèrent différents entre les participants ayant utilisé le modèle présenté et ceux utilisant la modélisation fonctionnelle de façon générique (témoins négatifs). Sur ces deux critères considérés, l'usage du modèle « Babele » semble, tel qu'illustré par la Figure 7.1, apporter une acquisition accrue de connaissances ainsi qu'une interaction entre acteurs significativement facilitée.

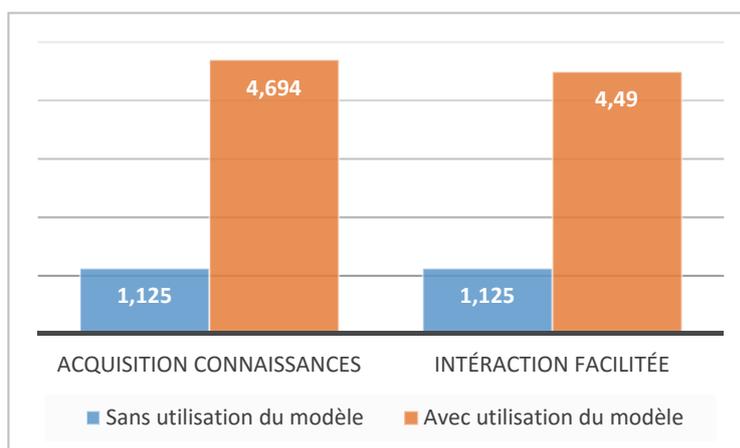


Figure 7.1 - Synthèse des résultats expérimentaux quant à l'acquisition de connaissances et la facilitation de l'interaction prodiguée par l'outil.

Ces éléments valident ainsi la sous-hypothèse H2a, selon laquelle « la modélisation des systèmes biologiques permettrait la facilitation de l'interaction entre biologistes et ingénieurs ».

Retour sur la sous-hypothèse H2b

L'Analyse en Composantes Principales, couplée à la Classification Hiérarchique sur Composantes Principales a permis de mettre en avant l'existence de trois « cluster » parmi les quatre populations de participants (i.e. Experts biologistes, Experts ingénieurs, Étudiants biologistes, Étudiants ingénieurs) via le regroupement, rendu possible par les résultats expérimentaux, des deux sous-populations d'étudiants. Les trois groupes présentent une usabilité de l'outil différente (cf. Figure 7.2). Experts biologiques et Experts ingénieurs avec un score moyen de modélisation respectifs de 98,2 et 94,2 présentent une usabilité satisfaisante. Le pourcentage d'individus dont le score d'usabilité est supérieur à 75 est de 100% pour les Experts biologiques et de 95% pour les Experts ingénieurs. À l'opposé, les Étudiants présentent un score moyen de modélisation de 78% couplé à un pourcentage d'individus dont le score d'usabilité est supérieur à 75 de 72%. L'usabilité de l'outil Babele a donc été jugée comme insuffisante pour la population labélisée « Étudiants ».

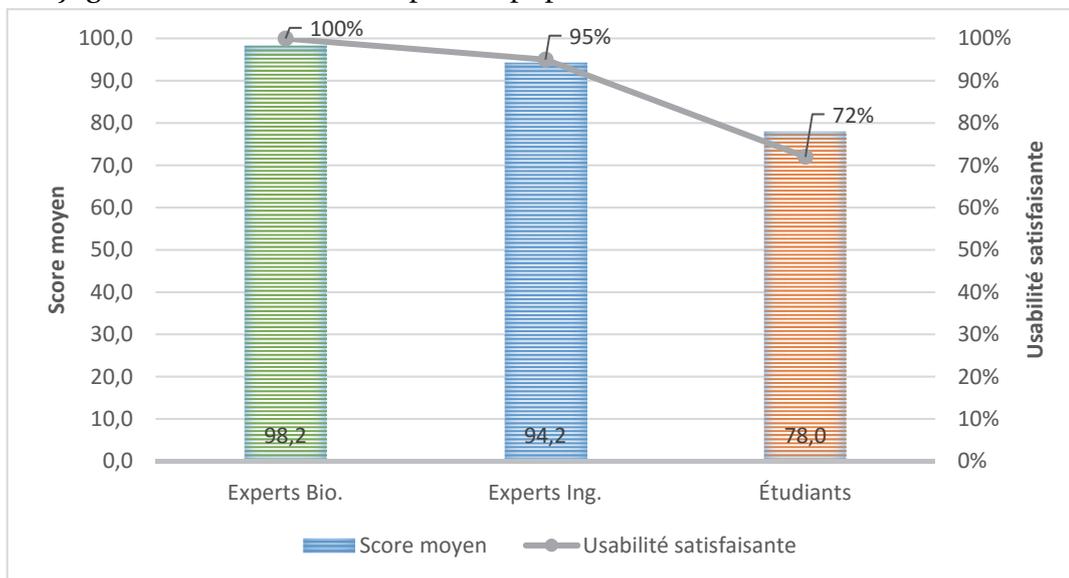


Figure 7.2 – Score moyen et pourcentage d'usabilité par population cible

Les scores d'usabilité semblent ainsi décorrélés de l'expertise biologique et de la connaissance du système considéré (les Étudiants ayant des scores plus élevés que les Experts ingénieurs sur ces deux critères, tel qu'illustré par la Figure 7.3).

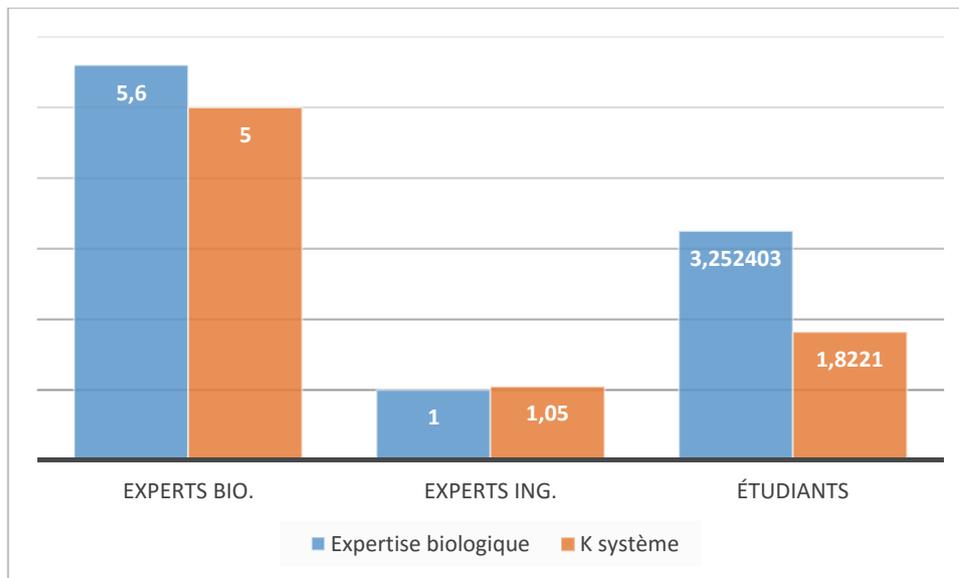


Figure 7.3 - Synthèse des résultats expérimentaux quant à l'expertise biologique et les connaissances du système étudiés par les participants.

Ces résultats tendent à démontrer que le bon usage du modèle ne requiert pas de connaissances préalables du système considéré ou bien même en biologie de façon générale (bien que cette dernière tende à en faciliter l'usage, cf. Figure 7.2). Combiné à l'observation selon laquelle les résultats expérimentaux ne diffèrent pas en fonction des systèmes considérés, il semble possible d'affirmer que les concepteurs biomimétiques devraient être capables d'avoir une usabilité satisfaisante de l'outil. Ce constat constitue une validation de la sous-hypothèse H2b selon laquelle la modélisation des systèmes biologiques facilitant l'interaction biologistes-ingénieurs ne nécessite pas de connaissances initiales en biologie.

7.1.2 Originalité des travaux

La biomimétique, en faisant appel à des compétences et expertises distantes, requiert et s'articule bien souvent autour de collaborations. Ainsi, si la mixité des profils et des structures auquel se rattachent les participants sont les maîtres mots de la biomimétique dans son application, force est de constater que cela est encore peu le cas pour les chercheurs investiguant son pendant méthodologique. C'est en ce sens que se positionne l'originalité des travaux. En sus des contributions spécifiques (section 6.1 et 6.2), l'approche utilisée par la présente recherche est originale à deux égards différents.

Interaction individuelle et institutionnelle

Une très vaste majorité des travaux relatés dans l'état de l'art sont le fait d'une structure de recherche unique, explorant une théorie, une méthodologie et/ou développant un outil spécifique et unique (e.g. Université de Toronto et le langage naturel, Idea-Inspire de l'IDeaS Lab de l'Institut Indien des Sciences de Bangalore). Si cet axe de travail est nécessaire et suivi dans le cadre de la deuxième partie des expérimentations (Chapitre 5), la première expérimentation (Chapitre 4) suit une piste tout autre. En explorant de la façon la plus exhaustive possible les outils biomimétiques pouvant être mis à contribution dans une démarche industrielle, les travaux concatènent les travaux existants des autres chercheurs

de la thématique, formalisant par la même occasion un cadre propice à la collaboration (voir section 6.1.1). L'exploration de cette première hypothèse est ainsi abordée, elle aussi, selon un angle collaboratif, grâce à des travaux communs avec l'Institut Technologique de Deggendorf afin de combiner analyses théoriques et pratiques, tout en capitalisant sur leurs synergies.

Interaction disciplinaire

La collaboration au sein de l'implémentation de la biomimétique, comme mentionné plus haut, est centrale. À cet égard, deux approches sont envisageables : accentuer ce besoin de collaboration en facilitant cette dernière, ou inversement, le réduire en incorporant la connaissance distante nécessaire. Aujourd'hui, une grande majorité des contributions biomimétiques provenant de l'ingénierie de la conception se concentrent, à la vue de l'état de l'art (Chapitre 2) exclusivement sur l'injection d'information biologique dans des outils issus de l'ingénierie afin que l'intervention d'un expert biologique au sein du processus biomimétique ne soit plus un prérequis. C'est sur cet aspect que la présente recherche est doublement originale. Premièrement le modèle proposé ainsi que ses perspectives (section 7.2) visent à faciliter l'intégration des connaissances d'un expert biologique dans le processus biomimétique, accroissant son caractère essentiel à la démarche. Deuxièmement, cette facilitation de l'interaction est explorée, non pas en mettant à disposition un outil d'ingénierie adapté à la biologie (e.g. DANE, SAPPhIRE, Uno-BID), mais en proposant un outil biologique adapté aux besoins des concepteurs. Cette approche visant à empêcher que la biomimétique ne devienne un soliloque de l'ingénierie de la conception, est aujourd'hui fondamentalement originale dès lors que les travaux s'inscrivent en science de la conception.

7.1.3 Conclusion générale

L'instauration du cadre de recherche et l'établissement du positionnement des travaux ont permis de mettre en exergue trois enjeux que la présente recherche se devait d'adresser :

- Un enjeu industriel visant à faciliter l'adoption des démarches bio-inspirées.
- Un enjeu scientifique visant à accroître la visibilité du domaine en l'organisant.
- Un enjeu pédagogique visant à permettre la formation aux outils et méthodes de conception bio-inspirées et à favoriser la montée en compétences des acteurs du processus biomimétique.

En filigrane, c'est vers la diffusion de la biomimétique que convergent ces besoins identifiés.

L'état de l'art présenté souligne que si la biomimétique est bien ancrée dans le domaine scientifique, son adoption par l'industrie constitue un facteur clé dans la diffusion de la démarche. Ainsi, si la biomimétique définit aujourd'hui un champ de recherche dynamique, le caractère apathique de l'émergence des produits biomimétiques, dont la création est initiée par une entreprise, constitue un facteur limitant d'importance à l'essor

du domaine. En péroration de ce constat, c'est un besoin de rationalisation tant sémantique, que procédural, mais encore méthodologique qui est mis en évidence.

C'est sur cette nécessité de rationalisation qu'est alignée la problématique de recherche. Cette problématique, formalisée « *Comment s'approprier les méthodes biomimétiques et faciliter leur déploiement pour la conception de produits innovants ?* », vise ainsi à éliminer le caractère démiurgique de la bio-inspiration et, pour ce faire, à la faire tendre vers la robustesse et la répétabilité attendue d'une démarche industrielle. Cette problématique est considérée selon deux hypothèses. La première porte sur la sélection de méthodes et aborde « *l'établissement d'un référentiel des outils biomimétiques à partir d'une analyse pratique de ces derniers.* » La seconde hypothèse traite de l'interaction pluridisciplinaire et porte sur « *la facilitation de l'interaction entre les acteurs de la biomimétique par la formalisation d'un outil de modélisation du vivant ne nécessitant pas de connaissances préalables en biologie.* »

Chacune de ces hypothèses est investiguée par une expérimentation spécifique, tel qu'illustré en Figure 7.4.

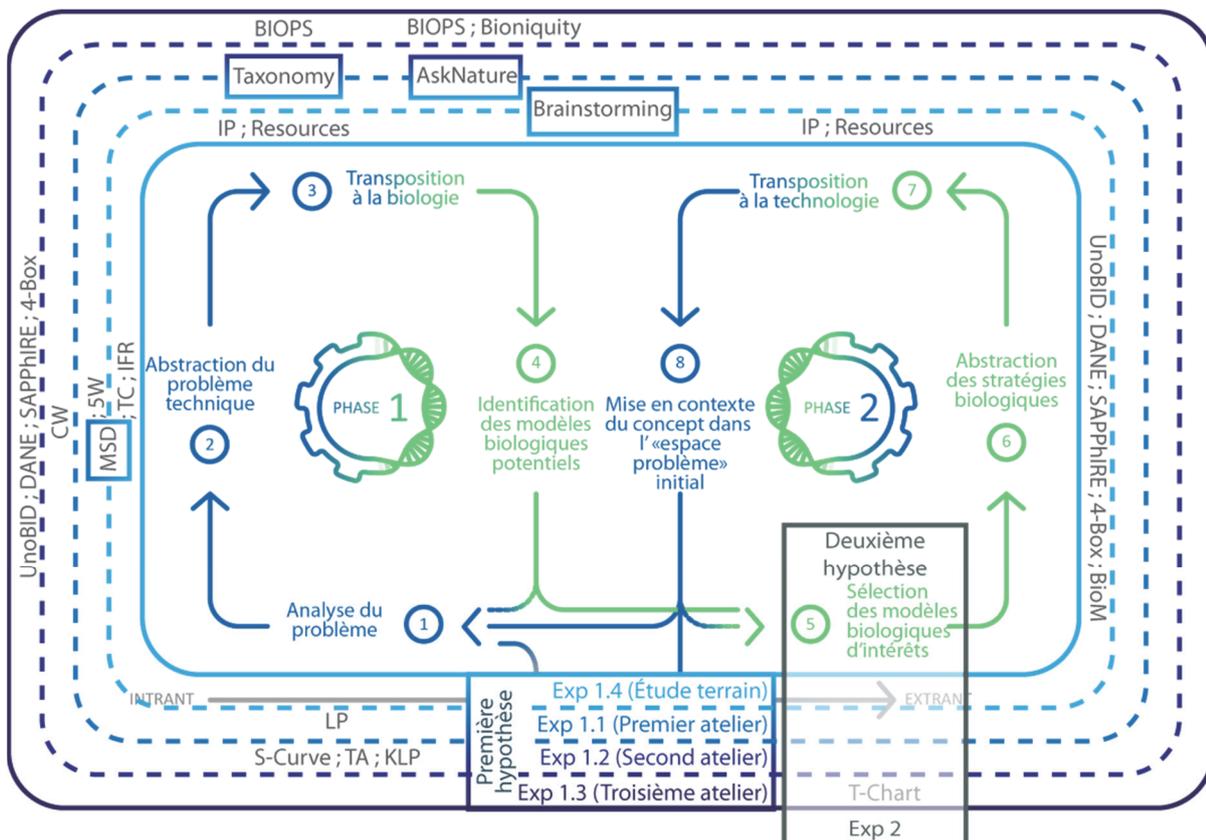


Figure 7.4 - Représentation schématique du positionnement des expérimentations

La première expérimentation, explorant la première hypothèse, formalise tout d'abord (tout comme cela a été le cas pour les définitions conceptuelles de la bio-inspiration au cours de l'état de l'art) le modèle de processus biomimétique problem-driven. C'est l'élaboration de ce processus biomimétique « unifié » qui rend possible la mise en adéquation des outils biomimétiques identifiés et présentés par l'état de l'art. Une fois les outils répartis tout au long du processus et catégorisés selon leur typologie (i.e. analyse,

abstraction, transfert, application), ces derniers sont analysés selon une grille de lecture combinant critères théoriques et pratiques. Cette analyse mise en place s'inscrit conjointement dans le cadre de la mise en place de trois ateliers industriels et d'une étude terrain (lors de la TRIZ Future Conference de 2013). Les résultats expérimentaux relatifs aux outils biomimétiques sont compilés et formalisés sous la forme d'un arbre de classification appelé BiomimeTree. Ce modèle structurant la boîte à outils biomimétique permet aux concepteurs désireux d'implémenter une démarche de conception bio-inspirée d'être guidés à travers l'ensemble du processus biomimétique.

La deuxième expérimentation, explorant la seconde hypothèse, s'attarde sur une phase spécifique de ce processus, celle liée à la sélection du ou des modèles biologiques d'intérêts. L'expérimentation introduit un outil combinant théorie générale des systèmes appliquée au vivant et lois d'intégralité des parties d'un système de TRIZ. Cet outil de modélisation est ensuite évalué par quatre-vingt-six participants (i.e. douze experts biologistes, douze experts ingénieurs, trente-quatre étudiants biologistes, vingt-huit étudiants ingénieurs) sur deux systèmes biologiques (i.e. le manchot empereur et le mécanisme d'ovulation). L'expérimentation démontre qu'en facilitant l'acquisition de connaissances biologique relative à un système vivant spécifique, les potentiels concepteurs biomimétiques se sentent plus à même d'interagir avec les experts biologiques, requis dans la mise en œuvre de la démarche.

Un retour global sur ces deux expérimentations, voir Figure 6.3, permet de constater l'adéquation de la recherche vis-à-vis des enjeux formulés au cours du contexte et positionnement des travaux. L'enjeu pédagogique (visant à clarifier les concepts) étant adressé par des contributions sémantiques (nouvelles définitions des concepts relatifs à la bio-inspiration et reformulation des invariants d'échelles du vivant). L'enjeu scientifique étant adressé par des contributions procédurales (i.e. le modèle de processus biomimétique problem-driven unifié et le positionnement de l'expert biologique au sein de la démarche biomimétique problem-driven, et l'enjeu méthodologique étant adressé par des contributions méthodologiques (i.e. BiomimeTree – le modèle de classification biomimétique et *Babele* - l'outil de transfert de connaissance). L'ensemble de ces apports a permis la constitution de deux contributions tierces, l'élaboration d'une formation aux méthodes et outils biomimétiques (enseignée à ce jour à l'École de Biologie Industrielle, aux Arts & Métiers Paristech, à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParistech) et au Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis) et d'une offre d'accompagnement à l'implémentation de démarches biomimétiques.

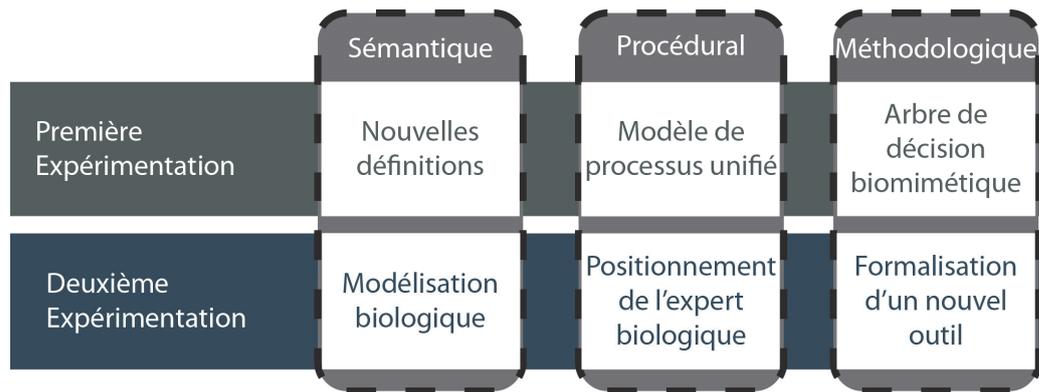


Figure 7.5 – Représentation schématique de l'élucidation du besoin de rationalisation par les expérimentations mises en œuvre dans le cadre des travaux de recherche.

En conclusion, il semble devenir clair que l'innovation et les découvertes technologiques ne sont pas seulement des clés de la croissance économique de ce XXI^e siècle, mais sont aussi une nécessité pour la prospérité des individus et sociétés modernes. La quantité innombrable de systèmes et matériaux existants dans la nature sont une richesse pour l'innovation, richesse jusqu'alors exploitée comme simple combustible, support de nos activités. Aujourd'hui plus que jamais, les entreprises doivent utiliser cette ressource pour réduire temps et coûts associés au développement de produits et de technologies. Nouvelles voies d'innovation, nouveaux produits et marchés, accroissement de l'efficacité, objectif de soutenabilité sont les promesses de l'innovation bio-inspirée, à laquelle les travaux de recherche présentés se sont efforcés de contribuer à l'essor.

7.2 PERSPECTIVES

Les travaux de recherche présentés au sein de ce document ne constituent nullement une finalité et sont donc susceptibles de s'inscrire dans une dynamique plus large. Il est à noter que cette poursuite des travaux qui tend à se distancier des travaux de recherche mis en œuvre dans le cadre de cette thèse de doctorat est actuellement en cours d'initiation.

7.2.1 BiomimeTree

La poursuite du développement de l'outil BiomimeTree s'inscrit ouvertement dans une dynamique de collaboration. Comme l'a démontré la première expérimentation, le scope des participants est à même de pouvoir s'ouvrir en termes d'expertise liée à la thématique de la biomimétique. Cette composante permet dès lors de mettre l'effort sur l'agrégation de données statistiques, grâce au potentiel afflux de participants. Le choix a ainsi été opéré de mettre à disposition une version hébergée en ligne du BiomimeTree afin que ce dernier soit accessible au plus grand nombre (voir le logo présenté en Figure 7.6).



Figure 7.6 – Logo de la version du BiomimeTree hébergé en ligne

Après un bref rappel de la genèse de l'arbre de classification, un rapide questionnaire permettant de comprendre quel est le contexte de conception doit être rempli par les utilisateurs pour accéder à l'arbre. L'accès au BiomimeTree se fait selon les étapes du processus unifié, les choix de réponses pointant vers un outil unique. Chaque outil est introduit par la formalisation de la formation prodiguée aux participants de l'expérimentation. Après la dispense d'une introduction théorique, et d'un exemple illustratif, la bonne complétion de l'exemple pédagogique devra être vérifiée afin de s'assurer du bon usage de l'outil par son utilisateur. Une fois cela réalisé, des modèles et formulaires guides conjointement à des directives générales quant à la bonne implémentation de l'outil seront mis à disposition des utilisateurs. Il conviendra bien entendu de co-développer ces formations en ligne et documents avec les auteurs à l'origine des outils afin de s'assurer du bon alignement de l'information dispensée avec la volonté de ses derniers. À la fin de l'application de chaque outil et avant la poursuite de la complétion de l'arbre de classification, il est nécessaire que le questionnaire reprenant les critères d'évaluation de la première expérimentation (par type d'outils) soit rempli par les utilisateurs. Ce questionnaire se différencie du premier par une échelle de réponses en sept points et l'adjonction du renseignement des cinq mots clés décrivant le mieux, selon les utilisateurs, l'usage de l'outil. C'est par l'intermédiaire de ces questionnaires que l'agrégation de nouveaux résultats expérimentaux est envisagée. À terme, l'accumulation de ces nouveaux résultats couplée à l'ajout de nouveaux outils (dès que ces derniers remplissent les critères de maturité) devrait permettre la formalisation d'une version robuste et maintenue à jour du BiomimeTree.

7.2.2 BABEL (Sélection d'analogies)

Lors de l'implémentation d'un processus biomimétique problem-driven, la quasi-absence d'outils facilitant l'étape de sélection des systèmes biologiques induit la nécessité pour les concepteurs, dès lors que la connaissance n'est pas interne à l'organisation, d'intégrer une expertise biologique externe. L'identification, le recrutement et le suivi de la mobilisation d'experts biologiques est une tâche fastidieuse et chronophage. Premièrement, techniciens et biologistes n'ont pas l'habitude de travailler ensemble, à ce titre, ils ne disposent pas du même langage ni des mêmes référentiels conceptuels, compliquant d'autant leur interaction.

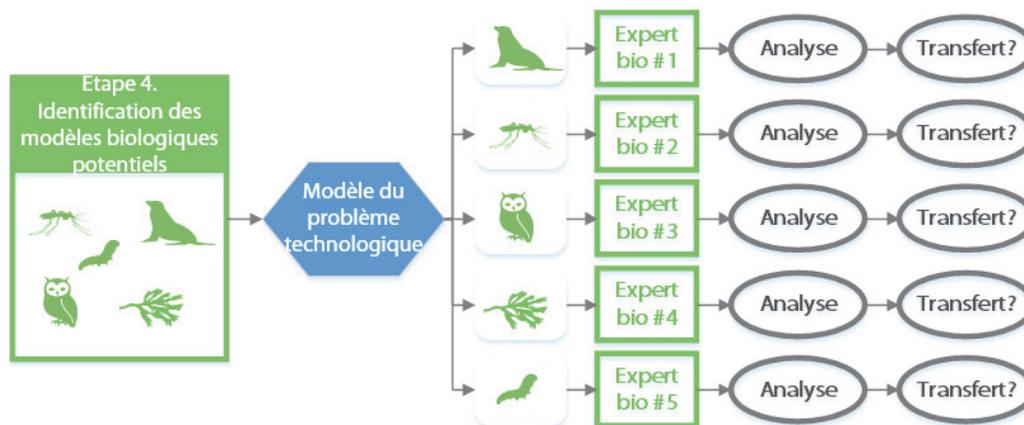


Figure 7.7 – Illustration de la complétion de l'étape de sélection des modèles biologiques pertinents lorsque la connaissance n'existe pas en interne

Face à cette démarche difficile à mettre en œuvre pour les organisations industrielles (tout particulièrement les petites et moyennes entreprises), illustrée en Figure 7.7, la poursuite des réflexions liées à la modélisation du vivant serait susceptible de faciliter l'étape de sélection des modèles biologiques.

Si l'outil Babel, présenté en section 5.1.3.2, est capable de modéliser les systèmes vivants, il n'est en revanche pas à même de les mettre en corrélation avec des systèmes techniques. Pour répondre à cet enjeu, un modèle permettant aux concepteurs, sans connaissances spécifiques en biologie initiales, d'ordonner par pertinence les systèmes biologiques identifiés par eux même semble d'intérêt.

Le modèle en cours d'élaboration s'articulerait sur la définition d'un espace technologique, correspondant au problème initial, et d'un espace biologique, correspondant à chacun des systèmes vraisemblablement à même d'offrir une ou plusieurs opportunités pour aboutir à une solution. La modélisation des deux types de systèmes considérés rendrait possible la classification des analogies par l'élaboration d'un ratio bénéfices/risques. Les bénéfices seraient définis par l'intégration à l'outil Babel du concept de l'idéalité (voir section 2.5.3.1). L'idéalité serait utilisée comme référence, permettant la mesure de l'impact négatif ou positif d'une solution prodigué par un système biologique en lien avec une problématique technologique initiale.

L'identification des risques de transfert s'appuierait sur l'intégration du concept des ressources (présenté en section 2.5.3.1). Tout système technique possède une variété de ressources disponibles afin de remplir sa fonction. Zlotin et Zusman [2005] considèrent les

types de ressources suivants comme constituant d'un système : les substances, les champs, les ressources fonctionnelles, les ressources spatiales, les ressources temporelles et les ressources informationnelles. Plus un système biologique et technique utilise des ressources similaires, plus le transfert de connaissance du premier vers le deuxième sera facilité. La quantification des adaptations à mettre en œuvre permet ainsi l'identification des efforts nécessaires à l'implémentation de l'analogie, soulignant les risques probables d'échecs (e.g. dans le cas de l'Eastgate Centre, la composante spatiale diffère, menant à des problématiques d'échelle).

L'ajout de cette composante dimensionnante à l'outil Babel devrait aboutir à l'obtention d'un outil de modélisation permettant aux concepteurs de potentiellement identifier les analogies biomimétiques les plus pertinentes. Son usage tendrait, de ce fait, à repenser l'initiation de l'interaction avec les experts biologiques. Le modèle ne vise aucunement à exclure les biologistes experts du processus biomimétique, mais à en retarder l'intervention. Cette modification de la planification du besoin d'expertise biologique devrait permettre aux concepteurs de requérir l'expertise scientifique de manière séquentielle, grâce à l'établissement de la probabilité de la pertinence de l'analogie entre problématique initiale et système vivant identifié. L'approche permet ainsi éventuellement de réduire substantiellement la charge de travail et son effort relatif dans la complétion du processus biomimétique, tel qu'illustré par la Figure 7.8.

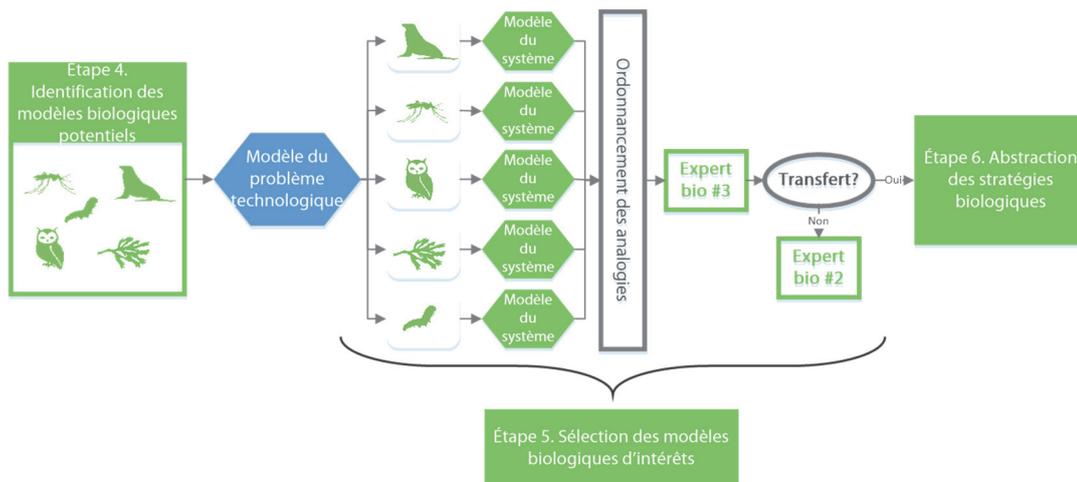


Figure 7.8 – Proposition schématique quant au processus de sélection des analogies biomimétiques.

7.2.3 Approche « Solution-Based »

Comme détaillé au cours de l'état de l'art (cf. section 2.5.1.3), l'approche « *problem-driven* » est celle faisant le plus de sens à être explorée dès lors qu'il s'agit de favoriser la diffusion de la biomimétique dans le tissu économique industriel. Face à la réticence des biologistes constatée lors des échanges avec ces derniers, la biomimétique gagnerait aussi à ce que les biologistes montent, de consort avec les concepteurs, en compétence sur le sujet. En l'état, la quasi-intégralité de l'approche empruntée par les travaux, qui se concentre exclusivement sur l'approche « *problem-driven* », pourrait être retranscrite à l'approche « *solution-based* ». Le processus unifié, la grille d'évaluation des outils, un référentiel

méthodologique et un dispositif facilitant la prise de contact entre experts sont autant d'éléments contribuant à la structuration de l'approche. L'intérêt présenté serait ici double, en montant en compétences sur la biomimétique, les biologistes seraient à même de posséder une approche structurée favorisant l'émergence d'un plus grand nombre de produits « *solution-based* » mis sur le marché. Cet accroissement aurait pour répercussion une sensibilisation au sujet des biologistes, au sens large, contribuant par la même occasion à l'essor de l'approche « *problem-driven* ».

7.3 PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS

Journaux internationaux

- Fayemi, P. E., Wanieck, K., Maranzana, N., Zollfrank C., Aoussat, A. (Accepté le 08.11.16). "Biomimetics, process and tools." *Bio-inspiration & Biomimetics*. DOI:10.1088/ISSN.1748-3190.
- Wanieck, K., Fayemi, P. E., Maranzana, N., Zollfrank C., Jacobs, S. (Soumis le 20.08.2016). "Biomimetics and its tools." *Bioinspired, biomimetric and nanobiomaterials*. ISSN 2045-9858.
- Fayemi, P. E., Vitoux, C., Schöfer, M., & Bersano, G. (2016). "Using TRIZ to Combine Advantages of Different Concepts in an Eco-Design Process." In *Sustainable Design and Manufacturing 2016* (pp. 513-523). Springer International Publishing.
- Pierre-Emmanuel, F., Stefano, D., Thomas, F., Maranzana, N., & Giacomo, B. (2016). "Ideality & Bio-Inspired Based Collaborative Bibliographic Search Method." *Procedia CIRP*, 39, 138-143.
- Malte, S., Pierre-Emmanuel, F., Giacomo, B., & Jean-Michel, C. (2015). "Methodological Support for Prospective Studies in New Concept Development." *Procedia Engineering*, 131, 1041-1049.
- Fayemi, P. E., Crubleau, P., & Richir, S. (2015). "Restoring TRIZ Approach to Ease a Technology Transfer." *Procedia Engineering*, 131, 214-218.

Journal national

- Fayemi, P. E., Maranzana, N., Aoussat, A., & Bersano, G. (2015). "Biomimétisme et supports méthodologiques." *Techniques de l'ingénieur*, ARTICLE DE RÉFÉRENCE, Référence IN218.

Conférences internationales

- Fayemi, P. E. I., Maranzana, N., Aoussat, A., Chekchak, T., & Bersano, G. (2015). "Modeling biological systems to facilitate their selection during a bio-inspired design process." In *DS 80-2 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 2: Design Theory and Research Methodology Design Processes, Milan, Italy, 27-30.07. 15*.

- Fayemi, P. E., Maranzana, N., Aoussat, A., & Bersano, G. (2015). "Assessment of the Biomimetic Toolset—Design Spiral Methodology Analysis." In *ICoRD'15—Research into Design Across Boundaries Volume 2* (pp. 27-38). Springer India.
- Fayemi, P. E., Maranzana, N., Aoussat, A., & Bersano, G. (2014). "Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools." In *International Design Conference-DESIGN*, Dubrovnik – Cavtat, Croatia, 19-22.05.2014.

Conférences nationales

- Fayemi, P. E., Maranzana, N., Aoussat, A., & Bersano, G. (2013). "Contextualisation des outils biomimétiques afin de développer une nouvelle méthodologie." *CONFERE 2013*, Biarritz, France, 4-5.07.13.

Conférences invitées internationales

- Fayemi, P.E. (2015). "Biomimetics: From its theoretical understanding to its practical use." *Nature Inspired Manufacturing Workshop 14-15 December 2015*, University of Cambridge, England.
- Fayemi, P.E., Wanieck, K. (2015). "Biomimetics: from theory to practice." *Biomimicry Practitioners Conference 6-9 November, 2015*, Mallorca.
- Fayemi, P.E. (2015). "Modeling biological systems to facilitate their selection during a bio-inspired design process." *Biomimicry Practitioners Conference 6-9 November, 2015*, Mallorca.

Conférences invitées nationales

- Fayemi, P.E. (2015). "Innovation basée sur le Biomimétisme." *7e édition Stratégies d'Innovation Marcus Evans*, 25 & 26 Mars 2015, Paris
- Magnier P., Fayemi, P.E. (2015). "Intelligence Inventive & Mapping de réseaux de Recherche", *Conférence GFII : Les nouvelles formes de l'Intelligence Economique au service de la recherche scientifique*, 5 mars 2015, Paris.
- P.E., Fayemi. (2014). "Biomimétisme et innovation systématique - Théorie", *Conférence Aristote: Le biomimétisme, comment la nature nous aide à innover*, 3 Juin 2014, École Polytechnique, Palaiseau.
- P.E., Fayemi. (2013). "Le biomimétisme en pratique, cas d'étude du projet FLOTA", *1ere Conférence CEEBIOS sur le biomimétisme*, 14 Avril 2013, Paris.

RÉFÉRENCES

A

- Adams, R. S., Turns, J., and Atman, C. J., "Educating effective engineering designers: The role of reflective practice," *Design studies*, vol. 24, pp. 275-294, 2003.
- Ahmed, S., Blessing, L., and Wallace, K., "The relationships between data, information and knowledge based on a preliminary study of engineering designers," in *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences*, 1999, pp. 12-15.
- Albano, L. D. and Suh, N. P., "Axiomatic design and concurrent engineering," *Computer-Aided Design*, vol. 26, pp. 499-504, 1994.
- Alexander, C., *Notes on the Synthesis of Form* vol. 5: Harvard University Press, 1964.
- Alexander, C., "The state of the art in design methods," *DMG newsletter*, vol. 5, pp. 3-7, 1971.
- Alford, M., Bharathan, K., Clymer, J. R., Dean, D. L., Duke, J., Hill, G., et al., "The design-methods comparison project," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 80-103, 1998.
- Altshuller, G., *And suddenly the inventor appeared: TRIZ, the theory of inventive problem solving*: Technical Innovation Center, Inc., 1996.
- Altshuller, G., *40 Principles: TRIZ keys to innovation* vol. 1: Technical Innovation Center, Inc., 1997.
- Altshuller, G. S., *Creativity as an exact science*: Gordon and Breach, 1988.
- Amabile, T. M., "The social psychology of creativity: A componential conceptualization," *Journal of personality and social psychology*, vol. 45, p. 357, 1983.
- Amabile, T. M., *Creativity in context: Update to "the social psychology of creativity."*: Westview press, 1996.
- Ampère, A.-M., *Essai sur la philosophie des sciences, ou, Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*: Chez Bachelier, 1856.
- Antony, F., Griefshammer, R., Speck, T., and Speck, O., "Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure," *Bio-inspiration & biomimetics*, vol. 9, p. 016013, 2014.
- Aoussat, A., "La pertinence en innovation: nécessité d'une approche plurielle," *Laboratoire Conception de Produits et Innovation*, 1990.
- Aoussat, A., "Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels," *Rapport de synthèse en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble*, 1996.
- Aoussat, A., Christofol, H., and Le Coq, M., "The new product design-a transverse approach," *Journal of Engineering Design*, vol. 11, pp. 399-417, 2000.
- Archer, B., "Viewpoint: Design, innovation, agility," *Design studies*, vol. 20, pp. 565-571, 1999.
- Archer, L. B., *Systematic method for designers*: Council of Industrial Design, 1964.
- Arlitt, R. M., Immel, S. R., Berthelsdorf, F. A., and Stone, R. B., "The Biology Phenomenon Categorizer: A Human Computation Framework in Support of Biologically Inspired Design," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111105, 2014.
- Asimow, M., *Introduction to design* vol. 394: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1962.
- Autumn, K., "Properties, principles, and parameters of the gecko adhesive system," in *Biological adhesives*, ed: Springer, 2006, pp. 225-256.
- Autumn, K., Dittmore, A., Santos, D., Spenko, M., and Cutkosky, M., "Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 3569-3579, 2006.
- Autumn, K. and Gravish, N., "Gecko adhesion: evolutionary nanotechnology," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 366, pp. 1575-1590, 2008.
- Autumn, K., Liang, Y. A., Hsieh, S. T., Zesch, W., Chan, W. P., Kenny, T. W., et al., "Adhesive force of a single gecko foot-hair," *Nature*, vol. 405, pp. 681-685, 2000.
- Azad, M., Ellerbrok, D., Barthlott, W., and Koch, K., "Fog collecting biomimetic surfaces: Influence of microstructure and wettability," *Bio-inspiration & biomimetics*, vol. 10, p. 016004, 2015.
- Bachmann, T. and Wagner, H., "The three-dimensional shape of serrations at barn owl wings: towards a typical natural serration as a role model for biomimetic applications," *Journal of anatomy*, vol. 219, pp. 192-202, 2011.
- Badarnah, L., "Towards the LIVING envelope: Biomimetics for building envelope adaptation," *Delft University of Technology. doi*, vol. 10, 2012.
- Badarnah, L. and Kadri, U., "A methodology for the generation of biomimetic design concepts," *Architectural Science Review*, vol. 58, pp. 120-133, 2015.
- Baldussu, A., "A problem solving methodology for the development of bio-inspired products. Systematic use of natural design principles for designers without biological knowledge," 2014.
- Bar-Cohen, Y., "Biomimetics—using nature to inspire human innovation," *Bio-inspiration & Biomimetics*, vol. 1, p. P1, 2006.
- Baratin, M. and Moussy, C., *Conceptions latines du sens et de la signification: colloque du Centre Alfred Ernout, Université de Paris IV, 4, 5 et 6 juin 1996* vol. 5: Presses Paris Sorbonne, 1999.
- Bardach, E., *Practical guide for policy analysis: the eightfold path to more effective problem solving*: Sage, 2011.
- Basadur, M., "Managing the creative process in organizations," 1991.
- Bateson, G., *Mind and nature: A necessary unity*: Dutton New York, 1979.
- Baumeister, D., Tocke, R., Dwyer, J., and Ritter, S., *Biomimicry resource handbook: a seed bank of best practices*: Biomimicry 3.8, 2013.
- Bayazit, N., "Investigating design: A review of forty years of design research," *Design issues*, vol. 20, pp. 16-29, 2004.

B

- Benyus, J. M., *Biomimicry*: William Morrow New York, 1997.
- Bernard, C., "Principe de médecine expérimentale," *Paris: Baillière*, 1847.
- Bhushan, B. and Sayer, R. A., "Gecko feet: natural attachment systems for smart adhesion," in *Applied Scanning Probe Methods VII*, ed: Springer, 2007, pp. 41-76.
- Bila-Deroussy, P. and Bouchard, C., "Étude et conception d'un outils de créativité pour l'innovation dans l'expérience utilisateur," 2012.
- Birmingham, R., *Understanding engineering design: context, theory and practice*: Prentice Hall PTR, 1997.
- Blessing, L., "What is this thing called design research?," in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003.
- Blessing, L. T. M., *A process-based approach to computer-supported engineering design*: University of Twente, Enschede, 1994.
- Boden, M. A., *Dimensions of creativity*: MIT Press, 1996.
- Boden, M. A., "Creativity and artificial intelligence," *Artificial Intelligence*, vol. 103, pp. 347-356, 1998.
- Boden, M. A., "Computer Models of Creativity.," in *Handbook of Creativity*, S. R. Cambridge, Ed., ed: Cambridge University Press, 1999, pp. 351-372.
- Boden, M. A., *The creative mind: Myths and mechanisms*: Psychology Press, 2004.
- Boer, H. and Gertsen, F., "From continuous improvement to continuous innovation: a (retro)(per) spective," *International Journal of Technology Management*, vol. 26, pp. 805-827, 2003.
- Boesel, L. F., Greiner, C., Arzt, E., and del Campo, A., "Gecko-inspired surfaces: a path to strong and reversible dry adhesives," *Advanced Materials*, vol. 22, pp. 2125-2137, 2010.
- Boeuf, G., "Océan et recherche biomédicale," *Journal de la Société de Biologie*, vol. 201, pp. 5-12, 2007.
- Bogatyrev, N. R. and Vincent, J. F., "Microfluidic Actuation in Living Organisms: a Biomimetic Catalogue," in *Proceedings of the First European Conference on Microfluidics*, Bologna, 2008, p. 175.
- Bonser, R., "A design for life-Biologists and engineers have focused on mimicking natural materials with increasing success over the past few decades. Now it could be time to devote more effort to drawing," *Materials World*, vol. 13, pp. 21-21, 2005.
- Bonser, R. and Vincent, J., "Technology trajectories, innovation, and the growth of biomimetics," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 221, pp. 1177-1180, 2007.
- Borelli, G. A., *On the movement of animals*: Springer Science & Business Media, 2012.
- Bourgeois, P. and Grou, P., "Les grands défis technologiques et scientifiques au XXIe siècle," *Paris, Ellipses Edition*, 2007.
- Braha, D., Brown, D. C., Chakrabarti, A., Dong, A., Fadel, G., Maier, J. R., et al., "DTM at 25: essays on themes and future directions," in *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2013, pp. V005T06A018-V005T06A018.
- Bransford, J. D. and Stein, B. S., "The ideal problem solver. A guide for improving thinking, learning, and creativity," *A Series of Books in Psychology, New York: Freeman, 1984*, vol. 1, 1984.
- Braun, T. and Lindemann, U., "Supporting the selection, adaptation and application of methods in product development," in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003.
- Brown, T., "Design thinking," *Harvard business review*, vol. 86, p. 84, 2008.
- Browning, T. R., "Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions," *IEEE Transactions on Engineering management*, vol. 48, pp. 292-306, 2001.
- Brunel, J., d'Este, P., and Salter, A., "Investigating the factors that diminish the barriers to university-industry collaboration," *Research Policy*, vol. 39, pp. 858-868, 2010.
- Bryant, C. R., Stone, R. B., McAdams, D. A., Kurtoglu, T., and Campbell, M. I., "Concept generation from the functional basis of design," in *ICED 05: 15th International Conference on Engineering Design: Engineering Design and the Global Economy*, 2005, p. 1702.
- Buchanan, R., "Design research and the new learning," *Design issues*, vol. 17, pp. 3-23, 2001.
- Buchanan, R., "Design as inquiry: the common, future and current ground of design," in *DRS Futureground International Conference, Melbourne*, 2004.
- Buisine, S., Besacier, G., Aoussat, A., and Vernier, F., "How do interactive tabletop systems influence collaboration?," *Computers in Human Behavior*, vol. 28, pp. 49-59, 2012.
- Cameron, G., *TRIZICS: teach yourself TRIZ, how to invent, innovate and solve "impossible" technical problems systematically*: CreateSpace, 2010.
- Cantamessa, M., "Design research in perspective: A meta-research on iced 97 and iced 99," *WDK Publications*, pp. 29-36, 2001.
- Capra, F., *The web of life: A new scientific understanding of living systems*: Anchor, 1996.
- Carayannis, E. G., *Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation, and Entrepreneurship*: Springer, 2013.
- Casakin, H., "Visual analogy as a cognitive strategy in the design process: Expert versus novice performance," *Journal of Design Research*, vol. 4, p. 124, 2004.
- Casas, J., "Le Biomimétisme: convergence de disciplines," *Variations*, pp. 223-232, 2012.
- Cavallucci, D., "Designing the Inventive Way in the Innovation Era," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014, pp. 237-262.
- Cavallucci, D. and Lutz, P., "Intuitive design method (IDM), a new approach on design methods integration," in *Proceeding of ICAD2000: First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA-June*, 2000, pp. 21-23.
- Cavallucci, D. and Rousselot, F., "Evolution Hypothesis as a means for linking system parameters and laws of engineering system evolution," *Procedia Engineering*, vol. 9, pp. 484-499, 2011.

- Cavallucci, D. and Weill, R. D., "Integrating Altshuller's development laws for technical systems into the design process," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 50, pp. 115-120, 2001.
- Cerqueira, M., "Title," unpublished].
- Chakrabarti, A., "Towards a measure for assessing creative influences of a creativity technique," in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003.
- Chakrabarti, A., "Supporting Analogical Transfer in Biologically Inspired Design," in *Biologically Inspired Design*, ed: Springer, 2014, pp. 201-220.
- Chakrabarti, A. and Blessing, L., "A Review of Theories and Models of Design," *Journal of the Indian Institute of Science*, vol. 95, pp. 325-340, 2016.
- Chakrabarti, A. and Blessing, L. T., "An Anthology of Theories and Models of Design," 2014a.
- Chakrabarti, A. and Blessing, L. T., "Theories and models of design: A summary of findings," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014b, pp. 1-45.
- Chakrabarti, A., Sarkar, P., Leelavathamma, B., and Nataraju, B., "A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas," *AIE EDAM*, vol. 19, pp. 113-132, 2005.
- Chamberlain, P., Bonsiepe, G., Cross, N., Keller, I., Frens, J., Buchanan, R., et al., *Design research now: Essays and selected projects*: Walter de Gruyter, 2007.
- Cheong, H., Chiu, I., Shu, L., Stone, R., and McAdams, D., "Biologically meaningful keywords for functional terms of the functional basis," *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, p. 021007, 2011.
- Cheong, H., Hallihan, G., and Shu, L., "Understanding analogical reasoning in biomimetic design: An inductive approach," in *Design computing and cognition '12*, ed: Springer, 2014, pp. 21-39.
- Cheong, H. and Shu, L., "Automatic extraction of causally related functions from natural-language text for biomimetic design," in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2012, pp. 373-382.
- Cheong, H., Shu, L., Stone, R. B., and McAdams, D. A., "Translating terms of the functional basis into biologically meaningful keywords," in *ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2008, pp. 137-148.
- Chesbrough, H. W., *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology*: Harvard Business Press, 2006.
- Chevassus, B., "Les enjeux de la biodiversité animale," 2005.
- Chi, M. T., Glaser, R., and Rees, E., "Expertise in problem solving," DTIC Document 1981.
- Chiu, I. and Shu, L., "Biomimetic design through natural language analysis to facilitate cross-domain information retrieval," *AI EDAM: Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, vol. 21, pp. 45-59, 2007a.
- Chiu, I. and Shu, L., "Using language as related stimuli for concept generation," *AI EDAM: Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, vol. 21, pp. 103-121, 2007b.
- Chiu, I. and Shu, L. H., "Natural language analysis for biomimetic design," in *ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2004, pp. 99-107.
- Choi, H., Park, H., and Sagong, W., "Biomimetic flow control based on morphological features of living creatures)," *Physics of Fluids (1994-present)*, vol. 24, p. 121302, 2012.
- Choulier, D., *Comprendre l'activité de conception*: Univ. de technologie Belfort-Montbéliard, 2008.
- Chulvi, V., González-Cruz, M. C., Mulet, E., and Aguilar-Zambrano, J., "Influence of the type of idea-generation method on the creativity of solutions," *Research in Engineering Design*, vol. 24, pp. 33-41, 2013.
- Chung, K. K., Schumacher, J. F., Sampson, E. M., Burne, R. A., Antonelli, P. J., and Brennan, A. B., "Impact of engineered surface microtopography on biofilm formation of *Staphylococcus aureus*," *Biointerphases*, vol. 2, pp. 89-94, 2007.
- Churchman, C. W., "Guest editorial: Wicked problems," ed: JSTOR, 1967.
- CNRTL. (2016, May 18th). *Ethymologie de l'inspiration*.
- Cohen, Y. H., Reich, Y., and Greenberg, S., "Biomimetics: Structure-Function Patterns Approach," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111108, 2014.
- Court, A. W., "The modelling and classification of information for engineering designers," University of Bath, 1995.
- Cross, N., "A history of design methodology," in *Design methodology and relationships with science*, ed: Springer, 1993, pp. 15-27.
- Cross, N., "Design cognition: Results from protocol and other empirical studies of design activity," 2001a.
- Cross, N., "Designerly ways of knowing: Design discipline versus design science," *Design issues*, vol. 17, pp. 49-55, 2001b.
- Cross, N., *Engineering design methods: strategies for product design*: John Wiley & Sons, 2008.
- Crutzen, P. J., "Geology of mankind," *Nature*, vol. 415, pp. 23-23, 2002.
- Crutzen, P. J., *The "anthropocene"*: Springer, 2006.
- Cruz, E., "Title," unpublished].
- Cummings, J. N. and Kiesler, S., "Collaborative research across disciplinary and organizational boundaries," *Social studies of science*, vol. 35, pp. 703-722, 2005.
- Da Vinci, L., "Codex on the flight of birds," *Leonardo Da Vinci, Reynal and Co. NY*, 2013.
- Darwin, C., "On the Origin of Species," 2001.
- De Pauw, I., Kandachar, P., Karana, E., Peck, D., and Wever, R., "Nature inspired design: Strategies towards sustainability," in *Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation: 14th European Roundtable on Sustainable*

Consumption and Production (ERSCP) conference and the 6th Environmental Management for Sustainable Universities (EMSU) conference, Delft, The Netherlands, October 25-29, 2010, 2010.

- De Rosnay, J., *Le macroscopie. Vers une vision globale*. Seuil, 2014.
- de Vries, M. J., Cross, N., and Grant, D., *Design Methodology and Relationships with Science* vol. 71: Springer Science & Business Media, 2013.
- Dearborn, D. C. and Simon, H. A., "Selective perception: A note on the departmental identifications of executives," *Sociometry*, pp. 140-144, 1958.
- Deldin, J.-M. and Schuknecht, M., "The AskNature database: enabling solutions in biomimetic design," in *Biologically inspired design*, ed: Springer, 2014, pp. 17-27.
- Dell, M., "Bioniquity® - How to benefit from Nature's IQ for new product development", presented at the XVII ISPIM Conference, Athens, Greece 2006.
- Delmas, M. A. and Burbano, V. C., "The drivers of greenwashing," *California Management Review*, vol. 54, pp. 64-87, 2011.
- Descartes, R., Haldane, E. S., and Ross, G. R. T., "The philosophical works of Descartes," 1931.
- Dewey, J., *How we think*: Courier Corporation, 1910.
- Deyber, A., *Les Gaulois en guerre: Stratégies, tactiques et techniques*: Errance, 2009.
- Dixon, J. R., "On research methodology towards a scientific theory of engineering design," in *Design Theory'88*, ed: Springer, 1989, pp. 316-337.
- Dixon, J. R. and Finger, S., "Editorial: Research in Engineering Design," *Research in Engineering Design*, vol. 1, pp. 1-1, 1989.
- Dorst, K. and Dijkhuis, J., "Comparing paradigms for describing design activity," *Design Studies*, vol. 16, pp. 261-274, 1995.
- Dougherty, D., "Interpretive barriers to successful product innovation in large firms," *Organization Science*, vol. 3, pp. 179-202, 1992.
- Drack, M. and Gebeshuber, I. C., "Comment on "Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research" by AE Rawlings, JP Bramble and SS Staniland, *Soft Matter*, 2012, 8, 6675," *Soft Matter*, vol. 9, pp. 2338-2340, 2013.
- Drucker, P., *The Practice of Management*, ed: New York Harper Brothers, 1954.
- Durand, H., Larriou, C., and Hubert, C., "Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France: état des lieux, potentiel, leviers," *Études et documents*, 2012.
- Eastman, C., "New directions in design cognition: studies of representation and recall," *Design knowing and learning: Cognition in design education*, pp. 147-198, 2001.
- Eckert, C. and Stacey, M., "Sources of inspiration: a language of design," *Design studies*, vol. 21, pp. 523-538, 2000.
- Eckert, C. and Stacey, M., "Constraints and conditions: drivers for design processes," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014, pp. 395-415.
- Eder, W. E., "Engineering Design vs. Artistic Design—A Discussion," *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, 2012.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., et al., "Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe," *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, vol. 24, pp. 243-248, 2015.
- Eggermont, M., "Biomimetics as problem-solving, creativity and innovation tool," *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*, 2011.
- Eisenberg, L., "Tree of Life," ed. 2008.
- Elices, M., Guinea, G., Plaza, G., Karatzas, C., Riekkel, C., Agullo-Rueda, F., et al., "Bioinspired fibers follow the track of natural spider silk," *Macromolecules*, vol. 44, pp. 1166-1176, 2011.
- Erden, M. S., Komoto, H., van Beek, T. J., D'Amelio, V., Echavarria, E., and Tomiyama, T., "A review of function modeling: approaches and applications," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 22, pp. 147-169, 2008.
- Evans, J. H., "Basic design concepts," *Journal of the American Society for Naval Engineers*, vol. 71, pp. 671-678, 1959.
- Fayemi, P.-E., Maranzana, N., Aoussat, A., and Bersano, G., "Contextualisation des outils biomimetiques afin de développer une nouvelle méthodologie," ed: Confere, 2013.
- Fayemi, P.-E. C., Tarik, Bersano, Giacomo; Maranzana, Nicolas; Aoussat, Améziane, "Biomimétisme et supports méthodologiques," *Technique de l'ingénieur*, 2015.
- Fayemi, P., Maranzana, N., Aoussat, A., and Bersano, G., "Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools," *Design (Design14)*, 2014.
- FBEI, "Global biomimicry efforts: an economic game changer," Fermanian Business & Economic Institute 2010.
- FBEI, "BIO-INSPIRATION: An Economic Progress report," Fermanian Business & Economic Institute 2013.
- Finger, S. and Dixon, J. R., "A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes," *Research in engineering design*, vol. 1, pp. 51-67, 1989.
- Finke, R. A., Ward, T. B., and Smith, S. M., "Creative cognition: Theory, research, and applications," 1992.
- Fleck, L., *Genesis and development of a scientific fact*: University of Chicago Press, 2012.
- Forest, J., "Finalités, modalités et résultats d'une science de la conception," *Pour une science de la conception: Fondements, méthodes, pratiques. Sévenans, F, Pôle éditorial de l'UTBM*, pp. 11-23, 2005.
- Forest, J., Micaëlli, J.-P., and Perrin, J., "Innovation et conception: pourquoi une approche en terme de processus?," in *Deuxième Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel*, 1997, p. 10 p.

- Forníés, I. L. and Muro, L. B., "A Top-down Biomimetic Design Process For Product Concept Generation," *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, vol. 7, pp. 27-48, 2012.
- Franke, S., Kirschner, R., Kain, A., Becker, I., and Lindemann, U., "Managing Early Phases of Innovation Processes and the Use of Methods within Empirical Results From an Industry Survey," in *DS 58-1: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 1, Design Processes, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009*, 2009.
- Fratzl, P., "Biomimetic materials research: what can we really learn from nature's structural materials?," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 4, pp. 637-642, 2007.
- Fraunhofer. *BIOPS*. Available: <http://nature4innovation.com/>
- French, M. J., *Conceptual Design for Engineers*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Fu, K., Moreno, D., Yang, M., and Wood, K. L., "Bio-Inspired Design: An Overview Investigating Open Questions From the Broader Field of Design-by-Analogy," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111102, 2014.
- Galle, P., "Worldviews for design theory," in *Wondergrounds, Design Research Society International Conference, Lisbon*, 2006.
- Gasparski, W. and Strzalecki, A., "Contributions to design science: Praxeological perspective," *Design Methods and Theories*, vol. 24, p. 3, 1990.
- Gebeshuber, I. C. and Drack, M., "An attempt to reveal synergies between biology and mechanical engineering," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 222, pp. 1281-1287, 2008.
- Gebeshuber, I. C., Gruber, P., and Drack, M., "A gaze into the crystal ball: biomimetics in the year 2059," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, pp. 2899-2918, 2009.
- Geim, A. K., Dubonos, S., Grigorieva, I., Novoselov, K., Zhukov, A., and Shapoval, S. Y., "Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair," *Nature materials*, vol. 2, pp. 461-463, 2003.
- Gentner, D., "Structure-mapping: A theoretical framework for analogy," *Cognitive science*, vol. 7, pp. 155-170, 1983.
- Gericke, K. and Blessing, L., "Comparisons of design methodologies and process models across domains: a literature review," in *DS 68-1: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 1: Design Processes, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08. 2011*, 2011.
- Gero, J. S., "Design prototypes: a knowledge representation schema for design," *AI magazine*, vol. 11, p. 26, 1990.
- Gero, J. S., "Creativity, emergence and evolution in design," *Knowledge-Based Systems*, vol. 9, pp. 435-448, 1996.
- Gillies, A. G., Kwak, J., and Fearing, R. S., "Controllable particle adhesion with a magnetically actuated synthetic gecko adhesive," *Advanced Functional Materials*, vol. 23, pp. 3256-3261, 2013.
- Glenn, J. C., Florescu, E., and Team, M. P., "2015-16 State of the Future," *World Federation of United Nations Associations. Washington DC*, 2015.
- Glier, M. W., McAdams, D. A., and Linsey, J. S., "Concepts in biomimetic design: methods and tools to incorporate into a biomimetic design course," in *ASME 2011 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, 2011, pp. 655-660.
- Goel, A. K. and Helms, M. E., "Theories, Models, Programs, and Tools of Design: Views from Artificial Intelligence, Cognitive Science, and Human-Centered Computing," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014, pp. 417-432.
- Goel, A. K., McAdams, D. A., and Stone, R. B., *Biologically inspired design: computational methods and tools*. Springer Science & Business Media, 2013.
- Goel, A. K., Vattam, S., Wiltgen, B., and Helms, M., "Information-processing theories of biologically inspired design," in *Biologically Inspired Design*, ed: Springer, 2014, pp. 127-152.
- Goel, A. K., Zhang, G., Wiltgen, B., Zhang, Y., Vattam, S., and Yen, J., "On the benefits of digital libraries of case studies of analogical design: Documentation, access, analysis, and learning," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 29, pp. 215-227, 2015.
- Goldschmidt, G., "Modeling the role of sketching in design idea generation," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014, pp. 433-450.
- Goldschmidt, G. and Sever, A. L., "Inspiring design ideas with texts," *Design Studies*, vol. 32, pp. 139-155, 2011.
- Gonçalves, M., "Decoding designers' inspiration process," TU Delft, Delft University of Technology, 2016.
- Gonçalves, M., Cardoso, C., and Badke-Schaub, P., "What inspires designers? Preferences on inspirational approaches during idea generation," *Design studies*, vol. 35, pp. 29-53, 2014.
- Gordon, W. J., "Synectics: The development of creative capacity," 1961.
- Grabowski, H., Lossack, R.-S., and El-Mejbri, E.-F., "Towards a universal design theory," in *Integration of process knowledge into design support systems*, ed: Springer, 1999, pp. 47-56.
- Gramann, J., "Problemmodelle und Bionik als Methode," Universität München, 2004.
- Grant, D., "Design methodology and design methods," *Design Methods and Theories*, vol. 13, pp. 46-47, 1979.
- Gregory, S., "Editorial: Design Studies-the New Capability," *Design Studies*, vol. 1, 1979.
- Gruber, P., *Biomimetics in Architecture*. Springer Wien, 2010.
- Guilford, J. P., "The nature of human intelligence," 1967.
- Hall, A. D., "A methodology for systems engineering," 1962.
- Hansen, W. R. and Autumn, K., "Evidence for self-cleaning in gecko setae," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, pp. 385-389, 2005.
- Hargroves, K. and Smith, M., "Innovation inspired by nature: Biomimicry," *Ecos*, vol. 2006, pp. 27-29, 2006.

G

H

- Hargroves, K. and Smith, M. H., *The natural advantage of nations: business opportunities, innovation and governance in the 21st century*: Earthscan, 2013.
- Harkness, J. M., "In Appreciation of A Lifetime of Connections: Otto Herbert Schmitt, 1913-1998," *Physics in Perspective*, vol. 4, pp. 456-490, 2002.
- Hartwick, J. M. and Olewiler, N. D., *The economics of natural resource use*: JSTOR, 1986.
- Harvey, W. and Bowie, A. T., "On the motion of the heart and blood in animals (Willis's trans., rev. and edited)," 1962.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Reich, Y., and Weil, B., "A systematic approach of design theories using generativeness and robustness," in *DS 68-2: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 2: Design Theory and Research Methodology, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15-19.08. 2011*, 2011.
- Hatchuel, A. and Weil, B., "A new approach of innovative Design: an introduction to CK theory," in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003.
- Heinze, T., Shapira, P., Senker, J., and Kuhlmann, S., "Identifying creative research accomplishments: Methodology and results for nanotechnology and human genetics," *Scientometrics*, vol. 70, pp. 125-152, 2007.
- Helms, M. and Goel, A. K., "The Four-Box Method: Problem Formulation and Analogy Evaluation in Biologically Inspired Design," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111106, 2014.
- Helms, M., Vattam, S. S., and Goel, A. K., "Biologically inspired design: process and products," *Design studies*, vol. 30, pp. 606-622, 2009.
- Henderson, R. M. and Clark, K. B., "Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms," *Administrative science quarterly*, pp. 9-30, 1990.
- Hennessey, B. A. and Amabile, T. M., "Creativity," *Annual Review of Psychology*, vol. 61, pp. 569-598, 2010.
- Herrera-Hernandez, M., Luna, C., Prada, L., Berdugo, C., and Al-Ashaab, A., "Modelling the product development performance of Colombian companies," in *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference-Competitive Design*, 2009.
- Hicks, B. J., Culley, S. J., Allen, R., and Mullineux, G., "A framework for the requirements of capturing, storing and reusing information and knowledge in engineering design," *International journal of information management*, vol. 22, pp. 263-280, 2002.
- Hill, B., "Erfinden mit der Natur," *Strukturen und Funktionen biologischer Systeme als Innovationspotentiale für die Technik*, 1998.
- Hoagland, M. B., *The way life works*: Crown Publishing Group (NY), 1995.
- Hoeller, N., Salustri, F., DeLuca, D., Pedersen, Z., Love, M., McKeag, T., et al., "Patterns from Nature," in *Proceedings Society for Experimental Mechanics Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Springfield, MA, June, 2007*, pp. 4-6.
- Horowitz, R., "Creative problem solving in engineering design," Tel-Aviv University, 1999.
- Horvath, I., "A contemporary survey of scientific research into engineering design," in *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED*, 2001.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J., and Ephraums, J., "Climate change: the IPCC scientific assessment," *American Scientist (United States)*, vol. 80, 1990.
- Howard, T. J., "Information management for creative stimuli in engineering design," University Library, 2008.
- Howard, T. J., Culley, S., and Dekoninck, E., "Information as an input into the creative process," in *DS 36: Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, 2006.
- Hubka, V., *Principles of engineering design*: Elsevier, 2015.
- Hubka, V. and Eder, W. E., "A scientific approach to engineering design," *Design studies*, vol. 8, pp. 123-137, 1987.
- Hudson, M., Smart, A., and Bourne, M., "Theory and practice in SME performance measurement systems," *International journal of operations & production management*, vol. 21, pp. 1096-1115, 2001.
- Hwang, J., Jeong, Y., Park, J. M., Lee, K. H., Hong, J. W., and Choi, J., "Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine," *International journal of nanomedicine*, vol. 10, p. 5701, 2015.
- Isaksen, S. G. and Treffinger, D. J., "Creative problem solving," *The Basic Course. New York: Bearly Limited*, 1985.
- ISO/TC266, "Biomimetics - Biomimetic structural optimization, ISO 18459:2015," ed: Beuth Verlag, 2015a.
- ISO/TC266, "Biomimetics - Terminology, concepts and methodology, ISO 18458:2015," ed: Beuth Verlag, 2015b.
- Jacobs, S., "Biomimetics: A Simple Foundation Will Lead To New Insight About Process," *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, vol. 9, pp. 83-94, 2014.
- Jacobs, S. R., Nichol, E. C., and Helms, M. E., "“Where Are We Now and Where Are We Going?” The BioM Innovation Database," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111101, 2014.
- Jamsari, E. A., Nawati, M. A. M., Sulaiman, A., Sidik, R., Zaidi, Z., and Ashari, M. Z. A. H., "Ibn Firnas and his contribution to the aviation technology of the world," *Advances in Natural and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 74-79, 2013.
- Jay, E. and Perkins, D., "Creativity's compass: a review of problem finding," *Creativity research handbook*, vol. 1, pp. 257-293, 1997.
- Johansson, Å., Guillemette, Y., Murtin, F., Turner, D., Nicoletti, G., de la Maisonneuve, C., et al., "Looking to 2060: Long-term global growth prospects," 2012.
- Jonassen, D. H., "Instructional design models for well-structured and III-structured problem-solving learning outcomes," *Educational Technology Research and Development*, vol. 45, pp. 65-94, 1997.

• Références •

- Jonassen, D. H., "Toward a design theory of problem solving," *Educational technology research and development*, vol. 48, pp. 63-85, 2000.
- Jones, G. R., *Organizational Theory, Design, and Change: Text and Cases*: Upper Saddle River, 2003.
- Jones, J. C., "A method of systematic design," in *Conférence on design methods*, 1963, pp. 53-73.
- Jones, J. C., "How my thoughts about design methods have changed during the years," *Design methods and Theories*, vol. 11, pp. 48-62, 1977.
- Jones, J. C. and Thornley, D. G., "Conference on design methods. Papers presented at the Conference on Systematic and intuitive methods in Engineering industrial design, architecture and communications(London, sept. 1962)," 1963.
- Joron, M., "Coloration avertissante et mimétisme mullérien: le problème de la diversification," 2000.
- Jowett, B., *The dialogues of Plato* vol. 4: Scribner, Armstrong, 1874.
- Kaiser, M., Hashemi Farzaneh, H., and Lindemann, U., "BIOSCRABBLE—THE ROLE OF DIFFERENT TYPES OF SEARCH TERMS WHEN SEARCHING FOR BIOLOGICAL INSPIRATION IN BIOLOGICAL RESEARCH ARTICLES," in *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference*, 2014.
- Ke, J., Chiu, I., Wallace, J., and Shu, L., "Supporting biomimetic design by embedding metadata in natural-language corpora," in *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2010, pp. 167-174.
- Keller, A., Pasman, G., and Stappers, P., "Collections designers keep: Collecting visual material for inspiration and reference," *CoDesign*, vol. 2, pp. 17-33, 2006.
- Khandwalla, P. N., "An exploratory investigation of divergent thinking through protocol analysis," *Creativity Research Journal*, vol. 6, pp. 241-259, 1993.
- Kiehl, J. T. and Shields, C. A., "Climate simulation of the latest Permian: Implications for mass extinction," *Geology*, vol. 33, pp. 757-760, 2005.
- Kim, J., Bouchard, C., Omhover, J.-F., and Aoussat, A., "Towards a model of how designers mentally categorise design information," *CIRP journal of manufacturing science and technology*, vol. 3, pp. 218-226, 2010.
- Kim, W. C. and Mauborgne, R., "Blue ocean strategy," *If you read nothing else on strategy, read these best-selling articles.*, p. 71, 2004.
- Kobayashi, K., "JFS Bio-Mimicry Interview Series: No. 6 Technologies Learned From Living Things:" Shinkansen Technology Learned From an Owl?"—The Story of Eiji Nakatsu," *Japan for Sustainability Newsletter*, pp. 200503-2, 2005.
- Koch, K. and Barthlott, W., "Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367, pp. 1487-1509, 2009.
- Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., et al., "Providing clarity and a common language to the "fuzzy front end"," *Research-Technology Management*, vol. 44, pp. 46-55, 2001.
- Koskela, L., Codinhoto, R., Tzortzopoulos, P., and Kagioglou, M., "The Aristotelian proto-theory of design," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014, pp. 285-303.
- Koudal, P., "Mastering Innovation: Exploiting Ideas for Profitable Growth," ed: March, 2004.
- Kozaki, K. (2014, 06/23). *Biomimetics Ontology DB*. Available: http://biomimetics.hozo.jp/ontology_db.html
- Kozaki, K. and Mizoguchi, R., "An ontology explorer for biomimetics database," in *Proceedings of the 2014 International Conference on Posters & Demonstrations Track-Volume 1272*, 2014, pp. 469-472.
- Kucharavy, D. and De Guio, R., "Application of S-shaped curves," *Procedia Engineering*, vol. 9, pp. 559-572, 2011.
- Küppers, U. and Tributsch, H., *Verpacktes Leben-verpackte Technik: Bionik der Verpackung*: John Wiley & Sons, 2009.
- Kvan, T., "Collaborative design: what is it?," *Automation in construction*, vol. 9, pp. 409-415, 2000.
- Laffite, P. and Saunier, C., "Les apports de la science et de la technologie au développement durable, tome II: La biodiversité: l'autre choc? l'autre chance," *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, 2007.
- Lahonde, N., "Optimisation du processus de conception: proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision," *Arts et Métiers ParisTech*, 2010.
- Lamarck, J.-B.-P., *Philosophie zoologique*, 1809.
- Langevin, J., "La chasse traditionnelle inuite face aux changements climatiques et aux développements économiques: le cas des mammifères marins," Université de Sherbrooke, 2012.
- Laubichler, M. D. and Maienschein, J., "1 Embryos, Cells, Genes, and Organisms: Reflections on the History of Evolutionary Developmental Biology," *Integrating evolution and development: From theory to practice*, p. 1, 2007.
- Lawson, B., *How designer think*: Architectural Press, 1980.
- LCPI. (2016, 21 juillet). Available: <http://lcp.ensam.eu/theme-de-recherche-114295.kjsp?RH=6600224935547&RF=1446136676020>
- Le Masson, P., Weil, B., and Hatchuel, A., *Les processus d'innovation: Conception innovante et croissance des entreprises*: Lavoisier Paris, 2006.
- Lecointre, G., Fortin, C., and Guillot, G., *Guide critique de l'évolution*: Belin, 2009.
- Lee, J., Fearing, R. S., and Komvopoulos, K., "Directional adhesion of gecko-inspired angled microfiber arrays," *Applied Physics Letters*, vol. 93, p. 191910, 2008.
- Lenau, T. (2013, 21 Juillet). *Bio-inspired design - Biomimetics inspiration from nature to create new and improved products*. Available: <http://polynet.dk/bionik/>

K

L

- Lenau, T., Cheong, H., and Shu, L., "Sensing in nature: using biomimetics for design of sensors," *Sensor Review*, vol. 28, pp. 311-316, 2008.
- Lenau, T. A., "Biomimetics as a design methodology-possibilities and challenges," in *DS 58-5: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 5, Design Methods and Tools (pt. 1), Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009*, 2009.
- Lepora, N. F., Verschure, P., and Prescott, T. J., "The state of the art in biomimetics," *Bio-inspiration & biomimetics*, vol. 8, p. 013001, 2013.
- Lilenthal, O., "Birdflight as the Basis of Aviation," *Training*, vol. 2013, pp. 04-09, 1911.
- Lindemann, U. and Gramann, J., "Engineering design using biological principles," in *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 2004*.
- López-Mesa, B., "Selection and use of engineering design methods using creative problem solving," *Department of Applied Physics and Mechanical Engineering*, 2003.
- Lopez-Mesa, B. and Vidal, R., "Novelty metrics in engineering design experiments," in *DS 36: Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 2006*.
- Lossack, R. and Grabowski, H., "The axiomatic approach in the universal design theory," in *ICAD2000, 1st International Conference on Axiomatic Design*, 2000, pp. 21-23.
- Love, T., "Constructing a coherent cross-disciplinary body of theory about designing and designs: some philosophical issues," *Design Studies*, vol. 23, pp. 345-361, 2002.
- Lubart, T. I., "Creativity," in *Handbook of Perception and Cognition*. vol. 2, R. J. Sternberg, Ed., ed: Academic Press, 1994, pp. 289-332.
- Majchrzak, A., Cooper, L. P., and Neece, O. E., "Knowledge reuse for innovation," *Management science*, vol. 50, pp. 174-188, 2004.
- Malik, F., Clement, R., Gethin, D., Krawszik, W., and Parker, A., "Nature's moisture harvesters: a comparative review," *Bio-inspiration & biomimetics*, vol. 9, p. 031002, 2014.
- Mann, D., "Using S-curves and trends of evolution in R&D strategy planning," *TRIZ Journal*, July, 1999.
- Maranzana, N., Dubois, S., Gartsier, N., De Guio, R., and Caillaud, E., "Performance of the Problem Solving Process in Design: Measure and Impact Factors," in *ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design*, 2009, pp. 235-246.
- Margolin, V., "Editorial," *Design Issues*, vol. 1, pp. 3-3, 1984.
- Massey, A. P. and Wallace, W. A., "Understanding and facilitating group problem structuring and formulation: mental representations, interaction, and representation aids," *Decision Support Systems*, vol. 17, pp. 253-274, 1996.
- Maturana, H. R. and Varela, F. J., *Autopoiesis and cognition: The realization of the living* vol. 42: Springer Science & Business Media, 1991.
- Mead, T. L., "Biologically-Inspired Management Innovations," in *ISPIM Conference Proceedings*, 2014, p. 1.
- MEDDE. (2014, 21 juillet). *Biomimétisme*. Available: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bioeconomie-biotechnologies.30481.html>
- Merriam-Webster, "Biomimetics," in *Merriam-Webster*, ed, 2016a.
- Merriam-Webster, "Invention," in *Merriam-Webster*, ed, 2016b.
- Merrifield, P. R., Guilford, J. P., Christensen, P. R., and Frick, J., "The role of intellectual factors in problem solving," *Psychological Monographs: General and Applied*, vol. 76, p. 1, 1962.
- Merrill, C. L., "Biomimicry of the Dioxigen Active Site in the Copper Proteins Hemocyanin and Cytochrome Oxidase: Part I: Copper (I) Complexes Which React Reversibly with Dioxigen and Serve to Mimic the Active Site Function of Hemocyanin. Part II: Mu-Imidazolato Binuclear Metalloporphyrin Complexes of Iron and Copper as Models for the Active Site Structure in Cytochrome Oxidase," Rice University, 1982.
- Michka Mélo, K. R., Michel DAIGNEY, Sebastiaan DE NEUBOURG, Tarik CHEKCHAK, "Introduction to Nature Inspired Solutions," ed. http://www.karimnetwork.com/wp-content/uploads/2015/02/Guide_Biomimicry_online.pdf. Paris Region Entreprises, 2015.
- Midler, C., "Modèles gestionnaires et régulations économiques de la conception," *Coopération et conception, Octares*, 1996.
- Miller, J. G., "Living systems," 1978.
- Milwich, M., Speck, T., Speck, O., Stegmaier, T., and Planck, H., "Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom," *American Journal of Botany*, vol. 93, pp. 1455-1465, 2006.
- Mokross, K., Ryder, T. B., Côrtes, M. C., Wolfe, J. D., and Stouffer, P. C., "Decay of interspecific avian flock networks along a disturbance gradient in Amazonia," *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 281, p. 20132599, 2014.
- Mougenot, C., "Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée," Arts et Métiers ParisTech, 2008.
- Mougenot, C., Bouchard, C., Aoussat, A., and Westerman, S., "Inspiration, images and design: an investigation of designers' information gathering strategies," *Journal of Design Research*, vol. 7, pp. 331-351, 2008.
- Müller, L., Milwich, M., Gruhl, A., Böhm, H., Gude, M., Haushahn, T., et al., "Biomimetically optimized branched fiber composites as technical components of high load capacity," *Technical Textiles/Technische Textilien*, vol. 56, 2013.
- Mumford, M. D., Baughman, W. A., Threlfall, K. V., Supinski, E. P., and Costanza, D. P., "Process-based measures of creative problem-solving skills: I. Problem construction," *Creativity Research Journal*, vol. 9, pp. 63-76, 1996.

M

- Mumford, M. D., Reiter-Palmon, R., and Redmond, M. R., "Problem construction and cognition: Applying problem representations in ill-defined domains," 1994.
- Murphy, G., *The big book of concepts*: MIT press, 2004.
- Nachtigall, W., "Bionik-Design für funktionelles Gestalten," ed: Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 1997.
- Nachtigall, W., "Bionik-Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 1998," ed: Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- Nachtigall, W., *Biologisches Design: Systematischer Katalog für bionisches Gestalten*: Springer-Verlag, 2006.
- Nagel, J. K., Nagel, R. L., and Stone, R. B., "Abstracting biology for engineering design," *International Journal of Design Engineering*, vol. 4, pp. 23-40, 2011.
- Nagel, J. K., Nagel, R. L., Stone, R. B., and McAdams, D. A., "Function-based, biologically inspired concept generation," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 24, pp. 521-535, 2010a.
- Nagel, J. K. and Stone, R. B., "A computational approach to biologically inspired design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 26, pp. 161-176, 2012.
- Nagel, J. K., Stone, R. B., and McAdams, D. A., "An engineering-to-biology thesaurus for engineering design," in *ASME 2010 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, 2010b, pp. 117-128.
- Nagel, J. K., Stone, R. B., and McAdams, D. A., "Function-based biologically inspired design," in *Biologically Inspired Design*, ed: Springer, 2014, pp. 95-125.
- Nakagawa, T., "Overall dataflow structure for creative problem solving in triz/usit," in *The 7th Altshuller Institute TRIZ Conference*, 2005, p. 248.
- Nakagawa, T., Kosha, H., and Mihara, Y., "Usage of USIT Solution Generation Methods: A Simple and Unified System of TRIZ," *TRIZCON2003, held at Philadelphia, USA, on Mar*, pp. 16-18, 2003.
- Nelson, W. A., "Problem solving through design," *New Directions for Teaching and Learning*, vol. 2003, pp. 39-44, 2003.
- Newell, A., "The knowledge level," *Artificial intelligence*, vol. 18, pp. 87-127, 1982.
- Newell, A. and Simon, H. A., *Human problem solving* vol. 104: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1972.
- Newsome, S. L., Spillers, W. R., and Finger, S., *Design Theory'88: Proceedings of the 1988 NSF Grantee Workshop on Design Theory and Methodology*: Springer Science & Business Media, 2013.
- Nolan, V., *The Innovator's Handbook: The Skills of Innovative Management: Problem Solving, Communication, and Teamwork*: Penguin Group USA, 1989.
- Novacek, M. and Wheeler, Q., "Introduction. Extinct taxa: accounting for 99.999...% of the Earth's biota," *Extinction and phylogeny*, pp. 1-16, 1992.
- Novick, L. R., "Analogical transfer, problem similarity, and expertise," *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol. 14, p. 510, 1988.
- NRC, *A new biology for the 21st century: ensuring the United States leads the coming biology revolution*: National Academies Press (US), 2009.
- Ōno, T., *Toyota production system: beyond large-scale production*: Productivity press, 1988.
- Orgel, L. E., "The origin of life—a review of facts and speculations," *Trends in biochemical sciences*, vol. 23, pp. 491-495, 1998.
- Orman, B., "Art Nouveau & Gaudí: The Way of Nature," *JCCC Honors Journal*, vol. 4, p. 2, 2013.
- Osborn, A. F., "Applied imagination," 1953.
- Ostrom, J. H., "Archaeopteryx and the origin of flight," *Quarterly Review of Biology*, pp. 27-47, 1974.
- Oxford, U. P. (2016a, May 18th). *Definition of inspiration*.
- Oxford, U. P. (2016b, 18/05/2016). *Oxford Dictionaries*.
- Oxman, R. E. and Oxman, R. M., "Refinement and adaptation in design cognition," *Design Studies*, vol. 13, pp. 117-134, 1992.
- Pahl, G. and Beitz, W., *Engineering design: a systematic approach*: Springer Science & Business Media, 2013.
- Park, G.-J., *Analytic methods for design practice*: Springer Science & Business Media, 2007.
- Passet, R., *L'économique et le vivant* vol. 23: Payot, 1979.
- Pavé, A., "Histoire d'une démarche : quand la vie inspire l'ingénieur," presented at the La bio-inspiration : le vivant, source d'innovation technologique, 2013.
- Pemsel, H., *A history of war at sea: an atlas and chronology of conflict at sea from earliest times to the present*: Naval Institute Press, 1977.
- Popper, K., *The logic of scientific discovery*: Routledge, 2005.
- Powers, A., "Spider Silk: Stronger than Steel? Nature's Supermaterial," *Berkeley Scientific Journal*, vol. 18, 2013.
- Prasad, B., *Concurrent engineering fundamentals* vol. 1: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- Prigogine, I. and Stengers, I., *The end of certainty*: Simon and Schuster, 1997.
- Raup, D. M., *Extinction: bad genes or bad luck?*: WW Norton & Company, 1992.
- Rawlings, A. E., Bramble, J. P., and Staniland, S. S., "Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research," *Soft Matter*, vol. 8, pp. 6675-6679, 2012.
- Reap, J., Baumeister, D., and Bras, B., "Holism, biomimicry and sustainable engineering," in *ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2005, pp. 423-431.
- Reap, J. and Bras, B., "A Method of Finding Biologically Inspired Guidelines for Environmentally Benign Design and Manufacturing," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111110, 2014.

N

O

P

R

- Reich, Y., Hatchuel, A., Shai, O., and Subrahmanian, E., "A theoretical analysis of creativity methods in engineering design: casting and improving ASIT within C-K theory," *Journal of Engineering Design*, vol. 23, pp. 137-158, 2012.
- Reiter-Palmon, R., Mumford, M. D., O'Connor Boes, J., and Runco, M. A., "Problem construction and creativity: The role of ability, cue consistency, and active processing," *Creativity Research Journal*, vol. 10, pp. 9-23, 1997.
- ResilientWeb. (2015, 06/23). *Resilient Design Cards*. Available: <http://resilientweb.eu/fr/outils/boite-a-outils-resilience/>
- Rhodes, M., "An analysis of creativity," *The Phi Delta Kappan*, vol. 42, pp. 305-310, 1961.
- Ricard, P., "Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement," Conseil Economique Social et Environnemental 2015.
- Rittel, H. W., *On the Planning Crisis: Systems Analysis of the "First and Second Generations"*: Institute of Urban and Regional Development, 1972.
- Rittel, H. W. and Webber, M. M., "Dilemmas in a general theory of planning," *Policy sciences*, vol. 4, pp. 155-169, 1973.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., et al., "A safe operating space for humanity," *Nature*, vol. 461, pp. 472-475, 2009.
- Rosa, F., Cascini, G., and Baldussu, A., "UNO-BID: unified ontology for causal-function modeling in biologically inspired design," *International Journal of Design Creativity and Innovation*, pp. 1-34, 2014.
- Rourke, J. and Seepersad, C. C., "USING BIOLOGY AS A MODEL FOR SUSTAINABILITY: INSIGHTS FOR ECODESIGN AND BIOINSPIRED DESIGN PRACTITIONERS," in *DS 80-2 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 2: Design Theory and Research Methodology Design Processes, Milan, Italy, 27-30.07. 15, 2015*.
- Rowe, P. G., *Design thinking*: MIT press, 1991.
- Runco, M. A., "Divergent thinking, creativity, and giftedness," *Gifted Child Quarterly*, vol. 37, pp. 16-22, 1993.
- Runco, M. A., *Problem finding, problem solving, and creativity*: Greenwood Publishing Group, 1994.
- Runco, M. A. and Jaeger, G. J., "The standard definition of creativity," *Creativity Research Journal*, vol. 24, pp. 92-96, 2012.
- Runco, M. A. and Sakamoto, S. O., "Experimental Studies of Creativity," *Handbook of creativity*, p. 62, 1999.
- Saaksvuori, A. and Immonen, A., *Product lifecycle management*: Springer Science & Business Media, 2008.
- Salamatov, Y. P., "System of Technology Evolution Laws (Foundations of the Theory of Technical Systems Evolution)," *Krasnoyarsk: Institute of Innovative Design*, 1996.
- Sarkar, P. and Chakrabarti, A., "The effect of representation of triggers on design outcomes," *AI EDAM (Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing)*, vol. 22, p. 101, 2008.
- Sarkar, P. and Chakrabarti, A., "Assessing design creativity," *Design Studies*, vol. 32, pp. 348-383, 2011.
- Sartori, J., Pal, U., and Chakrabarti, A., "A methodology for supporting "transfer" in biomimetic design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 24, pp. 483-506, 2010.
- Sattler, M. (2014, 23 June). *bionicsinspiration*. Available: <http://bionicsinspiration.org/>
- Savransky, S. D., *Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving*: CRC Press, 2000.
- Sawyer, R. K., *Explaining creativity: The science of human innovation*: Oxford University Press, 2011.
- Schild, K., "How to use analogies for breakthrough innovations," 2005.
- Schmitt, F. O. and Schmitt, O. H., "Partial excitation and variable conduction in the squid giant axon," *The Journal of physiology*, vol. 98, p. 26, 1940.
- Schmitt, L., Buisine, S., Chaboissier, J., Aoussat, A., and Vernier, F., "Dynamic tabletop interfaces for increasing creativity," *Computers in Human Behavior*, vol. 28, pp. 1892-1901, 2012.
- Schmitt, O. H., "The Emerging Science of Biophysics," *May*, vol. 4, p. 5, 1957.
- Schmitt, O. H., "Some interesting and useful biomimetic transforms," in *Third Int. Biophysics Congress*, 1969, p. 197.
- Schoefer, M., "Processes and Methods for Interdisciplinary Problem Solving and Technology Integration in Knowledge-Intensive Domains," Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2015.
- Schöfer, M., Maranzana, N., Aoussat, A., and Bersano, G., "Testing the value of TRIZ and its derivatives for knowledge transfer in problem solving attempts by multidisciplinary teams," in *DS 75-3: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies, Vol. 3: Design Organisation and Management, Seoul, Korea 19-22.08. 2013*, 2013.
- Schumpeter, J. A., *Business cycles* vol. 1: Cambridge Univ Press, 1939.
- Segonds, F., Père, C., Véron, P., and Aoussat, A., "Collaboration Amont et PLM: Etat des Lieux," in *CPI 2009, 6th International Conference Integrated Design and Production*, 2009, pp. 19-21.
- Setchi, R. and Bouchard, C., "In search of design inspiration: a semantic-based approach," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 10, p. 031006, 2010.
- Shah, J. J., Kulkarni, S. V., and Vargas-Hernandez, N., "Evaluation of idea generation methods for conceptual design: effectiveness metrics and design of experiments," *Journal of mechanical design*, vol. 122, pp. 377-384, 2000.
- Shai, O. and Reich, Y., "Infused design. I. Theory," *Research in Engineering Design*, vol. 15, pp. 93-107, 2004a.
- Shai, O. and Reich, Y., "Infused design. II. Practice," *Research in Engineering Design*, vol. 15, pp. 108-121, 2004b.
- Sharma, C. K., "Emerging dimensions of decentralisation debate in the age of globalisation," *Indian Journal of Federal Studies*, vol. 1, pp. 47-65, 2009.
- Sheldon, D. F., "Editorial Comment," *Journal of Engineering Design*, vol. 1, pp. 3-3, 1990/01/01 1990.

- Shneiderman, B. and Plaisant, C., "Strategies for evaluating information visualization tools: multi-dimensional in-depth long-term case studies," in *Proceedings of the 2006 AVI workshop on BEyond time and errors: novel evaluation methods for information visualization*, 2006, pp. 1-7.
- Shu, L. and Cheong, H., "A Natural Language Approach to Biomimetic Design," in *Biologically Inspired Design*, ed: Springer, 2014, pp. 29-61.
- Shu, L., Lenau, T. A., Hansen, H. N., and Alting, L., "Biomimetics applied to centering in microassembly," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 52, pp. 101-104, 2003.
- Shu, L., Ueda, K., Chiu, I., and Cheong, H., "Biologically inspired design," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 673-693, 2011.
- Sickafus, E., *Unified structured inventive thinking: How to invent*: Ntelleck, 1997.
- Siegel, D. S., Waldman, D. A., Atwater, L. E., and Link, A. N., "Toward a model of the effective transfer of scientific knowledge from academicians to practitioners: qualitative evidence from the commercialization of university technologies," *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 21, pp. 115-142, 2004.
- Silver, E. A., "An overview of heuristic solution methods," *Journal of the operational research society*, vol. 55, pp. 936-956, 2004.
- Silver, J., Withnall, R., Ireland, T., and Fern, G., "Novel nano-structured phosphor materials cast from natural Morpho butterfly scales," *Journal of Modern Optics*, vol. 52, pp. 999-1007, 2005.
- Simon, H. A., "The structure of ill structured problems," *Artificial intelligence*, vol. 4, pp. 181-201, 1973.
- Simon, H. A., *The sciences of the artificial*: MIT press, 1996.
- Sitti, M. and Fearing, R. S., "Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives," *Journal of adhesion science and technology*, vol. 17, pp. 1055-1073, 2003.
- Sloan, P. and Zalta, E. N., "The Concept of Evolution to 1872," *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.
- Smilansky, J., "Problem solving and the quality of invention: An empirical investigation," *Journal of Educational Psychology*, vol. 76, p. 377, 1984.
- Smith, C. A. B., A.; Hanson, E.; Garvin C., "Tapping into Nature," Terrapin Bright Green LLC2015.
- Smith, S. M. and Ward, T. B., "Cognition and the creation of ideas," *Oxford handbook of thinking and reasoning*, pp. 456-474, 2012.
- Smithers, T., "Towards a knowledge level theory of design process," in *Artificial Intelligence in Design'98*, 1998, pp. 3-21.
- Smithers, T., "Designing a font to test a theory," in *Artificial Intelligence in Design'00*, ed: Springer, 2000, pp. 3-22.
- Snell-Rood, E., "Interdisciplinarity: Bring biologists into biomimetics," *Nature*, vol. 529, pp. 277-278, 2016.
- SNTEDD, "Stratégie Nationale de Transition Écologique vers un Développement Durable 2015-2020," Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer5 février 2015 2015.
- Solow, R. M. and Wan, F. Y., "Extraction costs in the theory of exhaustible resources," *The Bell Journal of Economics*, pp. 359-370, 1976.
- Sørensen, M. H., "The genealogy of biomimetics: Half a century's quest for dynamic IT," in *Biologically inspired approaches to advanced information technology*, ed: Springer, 2004, pp. 496-512.
- Speck, T., Harder, D., and Speck, O., "BIOKON centers in brief-Freiburg," *BIOKON Bionik-Kompetenz-Netz-Creative transfer of biological principles into engineering*, pp. 42-43, 2006.
- Speck, T., Speck, O., Beheshti, N., and McIntosh, A., "Process sequences in biomimetic research," *Des. Nat.*, vol. 4, pp. 3-11, 2008.
- Stebbing, T., *A cybernetic view of biological growth: the Maia hypothesis*: Cambridge University Press, 2011.
- Steffen, W., Crutzen, P. J., and McNeill, J. R., "The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature," *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 36, pp. 614-621, 2007.
- Stein, M. I., "Creativity and culture," *The journal of psychology*, vol. 36, pp. 311-322, 1953.
- Stern, N. H., *The economics of climate change: the Stern review*: cambridge University press, 2007.
- Sternberg, R. J., *The nature of creativity: Contemporary psychological perspectives*: CUP Archive, 1988.
- Sternberg, R. J. and Lubart, T. I., "The concept of creativity: Prospects and paradigms," *Handbook of creativity*, vol. 1, pp. 3-15, 1999.
- Steward, D. V., "The design structure system: A method for managing the design of complex systems," *IEEE transactions on Engineering Management*, pp. 71-74, 1981.
- Suh, N. P., "Axiomatic design theory for systems," *Research in engineering design*, vol. 10, pp. 189-209, 1998.
- Suh, N. P., "Axiomatic Design: Advances and Applications (The Oxford Series on Advanced Manufacturing)," 2001.
- Takeda, H., Tsumaya, A., and Tomiyama, T., "Synthesis thought processes in design," in *Integration of process knowledge into design support systems*, ed: Springer, 1999, pp. 249-258.
- Tempelman, E., Van der Grinten, B., Mul, E., and De Pauw, I., *Nature Inspired Design*: Boekengilde: Enschede, The Netherlands, 2015.
- Terninko, J., Zusman, A., and Zlotin, B., *Systematic innovation: an introduction to TRIZ (theory of inventive problem solving)*: CRC press, 1998.
- Terzidis, K., "The etymology of design: Pre-Socratic perspective," *Design Issues*, vol. 23, pp. 69-78, 2007.
- Thiebaud, F., "Formalisation et développement de la phase de résolution de problème en conception industrielle," *Université Louis Pasteur Strasbourg I: thèse de doctorat en génie industriel*, 2003.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., et al., "Extinction risk from climate change," *Nature*, vol. 427, pp. 145-148, 2004.

- Thouvenin, E., "Modélisation des processus de conception de produits et développement de la capacité d'innovation: application au cas des PME-PMI," Arts et Métiers ParisTech, 2002.
- Tinsley, A., Midha, P. A., Nagel, R. L., McAdams, D. A., Stone, R. B., and Shu, L., "Exploring the use of functional models as a foundation for biomimetic conceptual design," in *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2007, pp. 79-92.
- Tomiyama, T., "Dealing with complexity in design: A knowledge point of view," *DESIGN METHODS FOR PRACTICE-Cover*, 2006.
- Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., and Kimura, F., "Design methodologies: Industrial and educational applications," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 543-565, 2009.
- Tomiyama, T., Takeda, H., Yoshioka, M., and Shimomura, Y., "Abduction for creative design," in *ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2003, pp. 543-552.
- Tomiyama, T. and Yoshikawa, H., "Extended general design theory," 1986.
- Trela, M., "Optimisation des performances d'innovation: Une approche combinant inventivité technique et recherche du succès commercial," Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2013.
- Tucker, N., Stanger, J. J., Staiger, M. P., Razzaq, H., and Hofman, K., "The History of the Science and Technology of Electrospinning from 1600 to 1995," *Journal of Engineered Fabrics & Fibers (JEFF)*, vol. 7, 2012.
- Turner, J. S. and Soar, R. C., "Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building," in *First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction at Loughborough University*, 2008.
- Tushman, M. L., "Technical communication in R & D laboratories: The impact of project work characteristics," *Academy of Management Journal*, vol. 21, pp. 624-645, 1978.
- Vadcard, P., "Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit," 1996.
- Vainker, S. J., *Chinese silk: a cultural history*: Rutgers University Press, 2004.
- Vakili, V., Chiu, I., Shu, L., McAdams, D., and Stone, R., "Including functional models of biological phenomena as design stimuli," in *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2007, pp. 103-113.
- Van Bergeijk, W. A., "Nomenclature of devices which simulate biological functions," *Science*, vol. 132, pp. 1248-1249, 1960.
- Van Beuzekom, B., "Biotechnology Statistics in OECD Member Countries," 2001.
- Vandevenne, D., Caicedo, J., Verhaegen, P.-A., Dewulf, S., and Dufloy, J., "Webcrawling for a biological strategy corpus to support biologically-inspired design," in *CIRP Design 2012*, ed: Springer, 2013, pp. 83-92.
- Vandevenne, D., Verhaegen, P.-A., Dewulf, S., and Dufloy, J., "Product and Organism Aspects for Scalable Systematic Biologically-Inspired Design," *Procedia Engineering*, vol. 131, pp. 784-791, 2015.
- Vandevenne, D., Verhaegen, P.-A., Dewulf, S., and Dufloy, J. R., "Automatically Populating the Biomimicry Taxonomy for Scalable Systematic Biologically-Inspired Design," in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2012, pp. 383-391.
- Vattam, S. (2010, 23 June). *Biologue*. Available: <http://home.cc.gatech.edu/dil/336>
- Vattam, S., Helms, M. E., and Goel, A. K., "Biologically-inspired innovation in engineering design: a cognitive study," 2007.
- Vattam, S., Wiltgen, B., Helms, M., Goel, A. K., and Yen, J., "DANE: fostering creativity in and through biologically inspired design," in *Design Creativity 2010*, ed: Springer, 2011a, pp. 115-122.
- Vattam, S. S. and Goel, A. K., "Foraging for inspiration: understanding and supporting the online information seeking practices of biologically inspired designers," in *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2011, pp. 177-186.
- Vattam, S. S., Goel, A. K., Rugaber, S., Hmelo-Silver, C. E., Jordan, R., Gray, S., *et al.*, "Understanding complex natural systems by articulating structure-behavior-function models," *Journal of Educational Technology & Society*, vol. 14, pp. 66-81, 2011b.
- Vattam, S. S., Helms, M. E., and Goel, A. K., "A content account of creative analogies in biologically inspired design," *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 24, pp. 467-481, 2010.
- Vermaas, P. E., "Design theories, models and their testing: on the scientific status of design research," in *An Anthology of Theories and Models of Design*, ed: Springer, 2014, pp. 47-66.
- Vermaas, P. E. and Dorst, K., "On the conceptual framework of John Gero's FBS-model and the prescriptive aims of design methodology," *Design studies*, vol. 28, pp. 133-157, 2007.
- Vincent, J. F., "Biomimetics—a review," *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 223, pp. 919-939, 2009.
- Vincent, J. F., "Biomimetics in architectural design," *Intelligent Buildings International*, pp. 1-12, 2014a.
- Vincent, J. F., "An ontology of biomimetics," in *Biologically Inspired Design*, ed: Springer, 2014b, pp. 269-285.
- Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., and Pahl, A.-K., "Biomimetics: its practice and theory," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 3, pp. 471-482, 2006.
- Vincent, J. F. and Mann, D. L., "Systematic technology transfer from biology to engineering," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 360, pp. 159-173, 2002.
- Voet, D., Voet, J. G., and Pratt, C. W., "Fundamentals of biochemistry: life at the molecular level," 2016.
- Von Bertalanffy, L., "An outline of general system theory," *British Journal for the Philosophy of science*, 1950.

- Von Bertalanffy, L., "The history and status of general systems theory," *Academy of Management Journal*, vol. 15, pp. 407-426, 1972.
- Von Gleich, A., Pade, C., Petschow, U., and Pissarskoi, E., *Potentials and trends in biomimetics*: Springer Science & Business Media, 2010.
- Wallace, K. M. and Blessing, L. T., "Observations on some German contributions to engineering design in memory of Professor Wolfgang Beitz," *Research in Engineering Design*, vol. 12, pp. 2-7, 2000.
- Wallas, G., "The art of thought," 1926.
- Ware, C., *Visual thinking: For design*: Morgan Kaufmann, 2010.
- Watson, J. D. and Crick, F. H., "Molecular structure of nucleic acids," *Nature*, vol. 171, pp. 737-738, 1953.
- Wiener, N., *Cybernetics: Control and communication in the animal and the machine*: Wiley New York, 1948.
- Williams, E. and Peterson, J., "Convergent and alternative designs in the digital adhesive pads of scincid lizards," *Science*, vol. 215, pp. 1509-1511, 1982.
- Williams, M. L., Ertas, A., and Tate, D., "Using Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis in Biologically Inspired Design as a Multidisciplinary Tool to Assess Biology-to-Engineering Transfer Risk for Candidate Analogs," *Journal of Mechanical Design*, vol. 136, p. 111107, 2014.
- Wilson, J. O. and Rosen, D., "Systematic reverse engineering of biological systems," in *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2007, pp. 69-78.
- Wilson, T. D., "Information behaviour: an interdisciplinary perspective," *Information processing & management*, vol. 33, pp. 551-572, 1997.
- Woodger, J. H., *Biological principles: A critical study*: Routledge, 2014.
- Wynn, D. and Clarkson, J., "Models of designing," in *Design process improvement*, ed: Springer, 2005, pp. 34-59.
- Yahya, H., Mossman, T., and Rossini, C. N., *Biomimetics: Technology imitates nature*: Global Pub., 2006.
- Yaniv, M., Karn, J., and Wright, P. E., *The Operon Model and Its Impact on Modern Molecular Biology*: Elsevier, 2011.
- Yen, J., Helms, M., Goel, A., Tovey, C., and Weissburg, M., "Adaptive evolution of teaching practices in biologically inspired design," in *Biologically Inspired Design*, ed: Springer, 2014, pp. 153-199.
- Yen, J. and Weissburg, M., "Perspectives on biologically inspired design: introduction to the collected contributions," *Bio-inspiration & Biomimetics*, vol. 2, 2007.
- Yen, J., Weissburg, M., Helms, M., and Goel, A., "Biologically inspired design: a tool for interdisciplinary education," ed: Taylor & Francis, 2011, pp. 331-360.
- Yim, S., Wilson, J. O., and Rosen, D. W., "Development of an ontology for bio-inspired design using description logics," in *International Conference on Product Lifecycle Management*, 2008.
- Yoshikawa, H., "General design theory and a CAD system," *Man-Machine communication in CAD/CAM*, 1981.
- Zari, M. P., "Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability," *Auckland, New Zealand*, 2007.
- Zerbst, E. W., *Bionik Biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1987.

W

Y

Z

INNOVATION PAR LA CONCEPTION BIO-INSPIRÉE : PROPOSITION D'UN MODÈLE STRUCTURANT LES MÉTHODES BIOMIMÉTIQUES ET FORMALISATION D'UN OUTIL DE TRANSFERT DE CONNAISSANCES

RÉSUMÉ :

La bio-inspiration applique des principes et des stratégies issus de systèmes biologiques afin de faciliter la conception technologique. Dotée d'un fort potentiel pour l'Innovation, la biomimétique, son pendant méthodologique, est en passe d'évoluer vers un processus clé pour les entreprises. Un certain nombre de freins demeurent cependant à lever afin que la conception bio-inspirée s'apparente à une démarche robuste et répétable. Les travaux réalisés abordent cette diffusion de la conception bio-inspirée selon deux axes distincts. Ils s'efforcent tout d'abord d'harmoniser champs conceptuels relatifs à la bio-inspiration et modèles de processus biomimétiques, en vue de rendre possible l'évaluation des outils supportant cette démarche de conception. Cette évaluation méthodologique, couverte selon l'angle objectif et subjectif, aboutit à la formalisation d'un modèle structurant, un arbre de classification, à même de guider les concepteurs biomimétiques à travers le processus biomimétique. En parallèle de l'établissement de ce cadre de référence méthodologique, les travaux s'évertuent à explorer un autre verrou inhérent à la démarche : l'interaction entre biologie et ingénierie. Les travaux tendent ainsi, par le développement d'un outil, à réduire l'une des barrières d'entrée de ce type d'approche, en proposant un modèle décrivant fonctionnellement les systèmes biologiques sans prérequis d'expertise biologique. La concaténation de ces réalisations aborde directement l'enjeu principal de ce champ disciplinaire : son essor par la dissémination de son application à l'innovation industrielle, en vue de favoriser l'émergence de « produits biomimétiques » au détriment des « accidents bio-inspirés ».

Mots clés : Biomimétique, Bio-inspiration, Conception, Innovation, Méthodes, Processus, Outils, Transfert de connaissance.

INNOVATION THROUGH BIO-INSPIRED DESIGN: SUGGESTION OF A STRUCTURING MODEL FOR BIOMIMETIC PROCESS AND METHODS

SUMMARY:

Biomimetics applies principles and strategies which stem from biological systems in order to facilitate technological design. Providing a high innovation potential, biomimetics could become a key process for various business. However, there are still a few challenges to overcome in order for the bioinspired design to become a sustainable approach. The work which has been carried out addresses this bioinspired design diffusion with two distinct focuses. First of all, they tend to standardize conceptual fields for bio-inspiration and biomimetic process models to enable the evaluation of tools supporting said design process. This methodological assessment, addressed from an objective and subjective point of view, results in the formalization of a structuring model, a classification tree which guides designers through the biomimetic process. Alongside the development of this methodological reference framework establishment, the work tends to overcome another obstacle of the bioinspired design implementation which is the interaction between biology and engineering. By developing a specific tool, the research studies offer a model which functionally describes biological systems without biological expertise prerequisites. The concatenation of these accomplishments addresses the main issue of these disciplinary fields: its development through the dissemination of its application to industrial innovation, in order to encourage the emergence of "biomimetic products" at the expense of "bio-inspired accidents".

Keywords: Biomimetics, Bio-inspiration, Innovation, Design, Methods, Process, Tools, Knowledge transfer.

