



HAL
open science

innovation bio-inspirée : modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomiméticien

Eliot Graeff

► **To cite this version:**

Eliot Graeff. innovation bio-inspirée : modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomiméticien. Biotechnologie. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE027 . tel-02951019

HAL Id: tel-02951019

<https://theses.hal.science/tel-02951019>

Submitted on 28 Sep 2020

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 SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
LCPI – Campus de PARIS

THÈSE

présentée par : **Eliot GRAEFF**

soutenu le : **7 Juillet 2020**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie industriel (Science de la conception)**

Innovation bio-inspirée : Modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomiméticien

THÈSE dirigée par :
Pr. Améziane AOUSSAT

et co-encadrée par :
Dr. Nicolas MARANZANA

Jury

M. Mickaël GARDONI, Prof. Dr., ETS, Montréal
M. Marc DESMULLIEZ, Prof. Dr., Heriot-Watt University, Édimbourg
M. Stéphane NEGNY, Prof. Dr., INP-ENSIACET, Toulouse
Mme Kalina RASKIN, Dr., CEEBIOS, Paris
M. Jian-Sheng SUN, Prof. Dr., MNHN, Paris
M. Améziane AOUSSAT, Prof. Dr., LCPI, Arts et Métiers, Paris
M. Nicolas MARANZANA, Dr., LCPI, Arts et Métiers, Paris

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Directeur
Co-directeur

REMERCIEMENTS

Cette thèse de doctorat représente la synthèse de trois ans de réflexion, de remises en question et d'échanges. Ces travaux sont ainsi dédiés à tous ceux qui ont directement ou indirectement soutenu mes efforts, corrigé mes erreurs, alimenté ma réflexion, qui m'ont offert un recul nécessaire et m'ont permis de reprendre mon souffle.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury, Pr. Mickaël Gardoni (Président), Pr. Marc Desmulliez (Rapporteur), Pr. Stéphane Negny (Rapporteur), Dr. Kalina Raskin (Examinatrice) et Pr. Jian-Sheng Sun (Examineur) pour leurs analyses et leurs commentaires extrêmement constructifs.

Je remercie le Pr. Améziane Aoussat pour m'avoir donné la chance d'intégrer le LCPI en thèse de doctorat sur l'ingénierie de la conception, et ce malgré mon cursus d'ingénieur spécialisé sur les Sciences du Vivant. Je remercie également Dr. Nicolas Maranzana pour son soutien, sa confiance et pour nos échanges qui m'ont toujours permis d'avancer librement et d'explorer le champ des possibles.

Je remercie l'ensemble des membres de l'écosystème du LCPI, notamment Claude Gazo, Fabrice Mantelet et Camille Jean pour leur intérêt, leur expérience et leur passion qu'ils ont sus me transmettre, ainsi que pour leur confiance dans le cadre de projets et d'activités d'enseignement. Merci à Céline Rodrigo pour son expertise, sa disponibilité et pour nos moments de rires et de décompression partagés. Merci à l'équipe technique et administrative du laboratoire : Pierre Vedel, Séverine Fontaine, Valérie Saffar, Bernard Aubagne et Héléne Zimmer dont le savoir-faire, la bonne humeur et le soutien ont été des atouts quotidiens précieux. Merci à Martin Marx qui, par son professionnalisme et son expertise, a su incarner au-delà de nos espérances notre travail de recherche à travers la plateforme LINKAGE. Ces travaux de doctorat n'auraient pu exister sans le terreau fertile du LCPI.

Je remercie mes collègues doctorants pour leur joie de vivre, leur ouverture d'esprit, leur curiosité, leur envie de débattre et leur volonté permanente d'entraide. Je tiens également à remercier Simon Debord et Mathieu François pour nos discussions scientifiques, ou non, nos moments de doute et nos expériences heureuses partagées. Merci à Anneline Letard avec qui j'ai le plaisir de partager à la fois une passion pour la bio-inspiration, de nombreuses réflexions scientifiques et une envie de changer le monde, mais également une amitié qui n'a fait que croître au cours des épreuves que nous avons traversées ensemble. Merci aux membres du Ceebios, à Estelle Cruz, Hugo Bachellier, Luce-Marie Petit et Dounia Dems pour nos discussions sur le futur du biomimétisme, pour leur confiance et leur volonté de partager leurs expériences. Merci à Pierre-Emmanuel Fayemi, Tarik Chekchak, Guillaume Lecointre, Anabelle Aish, Kristina Wanieck, Julian Vincent et Norbert Hoeller pour leur temps, leur expertise scientifique, leurs critiques toujours constructives et leurs conseils extrêmement précieux. Ces travaux de doctorat n'auraient pu se développer sans cet entourage bienveillant dont les contributions ont été essentielles.

Merci à mes parents, Olivier et Sophie pour leur soutien permanent, pour leur envie de comprendre, pour leurs temps et pour l'exemple d'une vie pleine d'amour et de joie qu'ils incarnent. Merci à Jules et Zoé pour leurs oreilles attentives, leurs questions, les débats et les idées qu'ils savent créer et concrétiser comme personne. Merci à mes grands-parents pour leur relecture, leur curiosité constante, leurs encouragements et pour ces instants de bonheur à imaginer les futurs possibles. Ces travaux de doctorat n'auraient pu grandir sans ses racines et la confiance qu'elles me transmettent.

Il me tient également à cœur de remercier mes amis pour nos échanges captivants sur tous les sujets possibles et imaginables, pour leurs conseils précieux, pour leur curiosité sans borne et leur soutien quotidien par-delà nos passions communes. Merci à Hugo, Juliette, Thibault, Vincent, Ornella, Robinson, Joris et Sarah pour leurs relectures, leurs avis et leurs expertises propres. Merci à ceux qui m'entourent depuis toujours et qui ont fait de tant d'évènements des souvenirs précieux. Ces travaux de doctorat n'auraient pu aboutir sans ses échanges incessants, ces moments de vie partagés, cette symbiose.

Enfin, je veux remercier Marine pour sa patience et son écoute, pour ses relectures, pour son énergie et sa bonne humeur communicative, pour son soutien permanent, pour ses mots d'encouragement et pour me pousser à toujours faire les choses à fond, à oser et donc à pouvoir.

Pour conclure, je souhaite remercier celle ou celui qui lit ces lignes. J'espère que les travaux qui sont présentés dans ce manuscrit sauront répondre à certaines de vos questions, soulever de nouvelles interrogations ou nourrir votre réflexion. En attendant de pouvoir en discuter, il ne me reste plus qu'à vous souhaiter bonne lecture.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	5
LISTE DES FIGURES	7
LISTE DES TABLEAUX	9
INTRODUCTION GENERALE	11
1 CHAPITRE 1 : CONTEXTE DES TRAVAUX.....	19
1.1 CONTEXTE GENERAL	20
1.2 CONTEXTE INDUSTRIEL	20
1.3 CONTEXTE SCIENTIFIQUE.....	24
1.4 CONTEXTE DU LABORATOIRE DE RECHERCHE	31
1.5 ENJEUX DES TRAVAUX	34
1.6 CONCLUSION SUR LE CONTEXTE DE NOS TRAVAUX	36
2 CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART.....	37
2.1 STRUCTURE DE L'ETAT DE L'ART.....	38
2.2 INGENIERIE DE LA CONCEPTION	39
2.3 SCIENCES DU VIVANT	59
2.4 CONCEPTION BIOMIMETIQUE	75
2.5 CONCLUSION SUR L'ETAT DE L'ART.....	114
3 CHAPITRE 3 : PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES.....	115
3.1 FORMULATION DE LA PROBLEMATIQUE.....	116
3.2 HYPOTHESES	116
3.3 STRUCTURE ET APPROCHE METHODOLOGIQUE	119
3.4 CONCLUSION SUR LE CHAPITRE 3.....	120
4 CHAPITRE 4 : LEGITIMITE ET ATTENTES DES PRATICIENS	121
4.1 FONDEMENTS ET STRUCTURATION DU CHAPITRE 4.....	122
4.2 MATERIELS ET METHODES DU CHAPITRE 4	124
4.3 RESULTATS DU CHAPITRE 4	131
4.4 CONCLUSION DU CHAPITRE 4.....	146
5 CHAPITRE 5 : ADAPTATION DU PROCESSUS ET DES PRATIQUES	147
5.1 FONDEMENT ET STRUCTURATION DU CHAPITRE 5	148
5.2 MATERIELS ET METHODES UTILISES DANS LE CHAPITRE 5	150

5.3	IDENTIFICATION DES POINTS CLES D'AMELIORATION	154
5.4	ADAPTATION DU CADRE METHODOLOGIQUE	161
5.5	ÉVALUATION DES APPORTS PRESCRIPTIFS	197
5.6	CONCLUSION SUR LE CHAPITRE 5	203
6	CHAPITRE 6 : INTEGRATION ET FORMALISATION DU BIOMIMETICIEN	205
6.1	FONDEMENT ET STRUCTURATION DU CHAPITRE 6	206
6.2	MATERIELS ET METHODES UTILISES DANS LE CHAPITRE 6	210
6.3	COMMUNICATION ET COLLABORATION AU SEIN D'UNE EQUIPE DE CONCEPTION BIOMIMETIQUE INTERDISCIPLINAIRE .	214
6.4	LE BIOMIMETICIEN.....	236
6.5	CONCLUSION SUR LE CHAPITRE 6.....	243
6.6	CONCLUSION SUR LES PHASES EXPERIMENTALES	246
7	CHAPITRE 7 CONTRIBUTIONS ET LIMITES	249
7.1	CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES	250
7.2	CONTRIBUTIONS ACADEMIQUES ET SCIENTIFIQUES	252
7.3	CONTRIBUTIONS PEDAGOGIQUES	258
7.4	SYNTHESE SUR LES CONTRIBUTIONS	258
8	CHAPITRE 8 : CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	261
8.1	CONCLUSION.....	262
8.2	PERSPECTIVES.....	271
8.3	PUBLICATIONS ASSOCIEES A CE TRAVAIL DE THESE	275
	REFERENCES	277
	TABLE DES ANNEXES	297
	ANNEXES.....	298

Liste des figures

Figure 1.1. Courbe de l'évolution de la dépense des pays de l'OCDE en R&D en milliards de dollars US (OCDE, 2018a)...	22
Figure 1.2 Positionnement des travaux de recherche au sein des sciences de la conception, inspiré de Fayemi (2016).....	25
Figure 1.3 Rosace représentant les différents axes et domaines d'activités poursuivis par le LCPI.....	32
Figure 1.4 Positionnement des travaux présentés selon les axes du laboratoire	34
Figure 2.1 Structure de l'état de l'art.....	38
Figure 2.2 Structure de l'état de l'art sur l'ingénierie de la conception.....	39
Figure 2.3 Classification des concepts associés aux théories de conception, adaptée de Lahonde (2010)	47
Figure 2.4. Processus de résolution de problèmes suggéré par TRIZ, issue de Fayemi (2016)	50
Figure 2.5. Processus de Systematic Design, adaptée de Pahl et al. (2007).....	51
Figure 2.6. Processus de formalisation du raisonnement de conception, adaptée de Gero et al. (2002).....	52
Figure 2.7. Processus du New Product Design, issue de Aoussat (1990).....	53
Figure 2.8. Représentation des espaces C et K et de leurs interactions, adaptée de Berthet (2014)	53
Figure 2.9. Typologies des modèles de processus de conception, traduit de Blessing (1994) par Fayemi (2016).....	55
Figure 2.10. Structure de l'état de l'art sur les sciences du vivant.....	59
Figure 2.11. Comparaison des théories de l'évolution de Lamarck et Darwin	66
Figure 2.13 Théorie Générale des Systèmes, input, output, throughput, issue de Fayemi (2015)	72
Figure 2.14 Leviers de résolution de problèmes en biologie et technologie, modifiés de Vincent et al. (2006).....	75
Figure 2.15 Structure de l'état de l'art sur la conception biomimétique.....	75
Figure 2.16 Exemple d'innovation biomimétique avec les technologies antimicrobiennes Sharklet®	76
Figure 2.17 Cadre sémantique de la bio-inspiration (ISO/TC266, 2015).....	78
Figure 2.18. Extrait des estimations de l'impact économique de la bio-inspiration sur les secteurs industriels américains (en pourcentages de ventes) par le Fermanian Business & Economic Institute (2013).....	82
Figure 2.19 Évolution des articles mentionnant « biomimetics » publiés sur Science direct et par la Design Society.....	83
Figure 2.20 Champs scientifiques associés aux travaux sur la bio-inspiration. (A) Évolution des publications jusqu'en 2014, par Snell-Rood (2016), (B) état des lieux actuel (% des articles) issu de Sharma (2019).....	83
Figure 2.21 Schéma explicatif de la Design Research Methodology (DRM), adaptée de Blessing et al. (2009)	87
Figure 2.22 Méthodologie de conception biomimétique, adaptée de Lenau et al. (2010)	88
Figure 2.23 Approche biomimétique de l'ingénierie, par Fayemi (2016) basée sur Bogatyrev et al. (2015)	89
Figure 2.24 Processus IDEA-Inspire, par Fayemi (2016) basée sur Chakrabarti et al. (2005)	90
Figure 2.25 Algorithme de traduction des mots-clés biologiques pertinents, par Fayemi (2016) issue de Cheong (2011)	92
Figure 2.26 Processus de conception biomimétique <i>problem-driven</i> unifié, adaptée de Fayemi (2017).....	93
Figure 2.27 Le BiomimeTree, issue de Fayemi (2017)	101
Figure 3.1 Synthèse des deux hypothèses et sous hypothèses	119
Figure 3.2 Structure du raisonnement explicité dans nos travaux	120
Figure 4.1 Sous-hypothèses traitées dans le chapitre 4.....	122
Figure 4.2. La taxonomie du biomimétisme, issue de Baumeister (2013).....	128
Figure 4.3. Exemple d'une recherche sur AskNature pour la requête « <i>How does nature filter liquids ?</i> »	129
Figure 4.4 Alignement du processus de référence avec celui utilisé dans l'expérience 1	129
Figure 4.5 Quels intérêts ont les entreprises à faire de la biomimétique ? (% des répondants, choix multiples).....	132
Figure 4.6 Pourquoi intégrer une/un biologiste ? (% des répondants, choix multiples).....	133
Figure 4.7 À quelles étapes intégrer la/le biologiste ?.....	134
Figure 4.8 Quel cadre d'intégration considérer ?	135
Figure 4.9 Comparaison des évaluations sur la richesse (A) et la précision (B) des informations proposées sur AskNature. 143	143

Figure 4.10 Validation des sous-hypothèses H.1.1 et H.2.1	146
Figure 5.1 Sous-hypothèses traitées dans le chapitre 5.....	148
Figure 5.2 Questions sur les axes du processus biomimétique unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017)	154
Figure 5.3 Questions sur les sémantiques associées au processus unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017)	156
Figure 5.4 Illustration de l'évolution des niveaux d'abstraction au cours des étapes du processus.....	168
Figure 5.5 Processus de conception biomimétique représenté dans le référentiel préconisé	168
Figure 5.6 Identification d'espaces de résolution par des projections conceptuelles en biologie	175
Figure 5.7 Carte des 99 écorégions représentant le biome "Déserts et arbustes xériques".	178
Figure 5.8 Illustration des concepts de groupe monophylétique (A), paraphylétique (B) et polyphylétique (C).....	182
Figure 5.9 Amplification de la recherche grâce à des outils biologiques	183
Figure 5.10 Synthèse des apports des champs de l'Écologie et de la Systématique pour la pratique biomimétique.	190
Figure 5.11 Implication des membres des équipes au cours du processus de conception biomimétique.....	190
Figure 5.12 Le processus interdisciplinaire de conception biomimétique : les sémantiques	190
Figure 5.13 Arbre de décisions du premier Go/No Go.....	192
Figure 5.14 Arbre de décisions du second Go/No Go	193
Figure 5.15 Arbre de décisions du troisième Go/No Go	194
Figure 5.16 Le processus interdisciplinaire de conception biomimétique technology pull	195
Figure 5.17 Validation des sous-hypothèses H.1.2 et H.2.2	203
Figure 6.1 Sous-hypothèses traitées dans le chapitre 6.....	206
Figure 6.2 Application de la théorie de la communication aux équipes interdisciplinaires de conception biomimétique, inspirée du modèle de Shannon (1948)	209
Figure 6.3 Méthode de formalisation d'un référentiel (cognitif et conceptuel) partagé.....	212
Figure 6.4 Dessin d'observation d'une aile de <i>Pantarbes</i> , un genre d'abeille, issue de Metcalf (Metcalf, 1918)	218
Figure 6.5 Echanges gazeux au niveau de branchies, issu de (Reece et al., 2015) cité par (Kumar et al., 2018)	218
Figure 6.6 Exemple d'un processus cyclique, comportement des canaux ioniques lors de la propagation d'un potentiel d'action, modifié de (J. Forehand, 2009).....	219
Figure 6.7 Exemple d'un processus acyclique, dessin de dix étapes du développement embryonnaire d'un poussin, adaptée de (Minot, 2011).....	219
Figure 6.8 Voie moléculaire générique, depuis la fixation d'une molécule A à la sécrétion d'une protéine p	220
Figure 6.9 Description des états composant le problème de conception (image LINKAGE).....	224
Figure 6.10 Définition des états et des scénarios du problème de conception (image LINKAGE)	224
Figure 6.11 Définition de l'environnement spécifique aux différents états du système (image LINKAGE).....	225
Figure 6.12 Génération des interactions (image LINKAGE)	226
Figure 6.13 Exemple d'un impact de l'eau stagnante sur l'air (image LINKAGE).....	227
Figure 6.14 Exemple d'un tableau d'abstraction basé sur les interactions (image LINKAGE).....	228
Figure 6.15 Exemple d'une synthèse graphique (image LINKAGE)	228
Figure 6.16 Exemple de fenêtres d'aide guidant les équipes	231
Figure 6.17 Validation des hypothèses H.1.3 et H.2.3	245
Figure 7.1 Logo de l'outil LINKAGE	251
Figure 7.2 Méthode quant à l'implémentation en pratique des apports de ce doctorat	253
Figure 7.3 Résumé graphique des contributions apportées à l'explicitation du « biologiste » en biomimétique.....	254
Figure 7.4 Résumé graphique des contributions apportées à la définition du biomiméticien	255
Figure 7.5 Résumé graphique de la contribution apportée par LINKAGE	256
Figure 7.6 Résumé graphique des contributions apportées au processus biomimétique.....	257
Figure 8.1 Figure de synthèse sur la conclusion.....	269

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Exemple de caractérisation de quelques champs biologiques	27
Tableau 2.1. Classification des théories et méthodologies de conception (Tomiyama et al., 1997)	45
Tableau 2.2 Comparaison des processus de génération de solutions biologiques et techniques	74
Tableau 2.3 Exemple de concepts biomimétiques pour les catégories d'inspiration, adapté de (Nagel et al., 2015).....	81
Tableau 2.4 Structures de recherche sur les méthodologies biomimétiques, modifié de Fayemi (2016).....	84
Tableau 2.5 Équivalents sémantiques décrivant les deux approches du processus biomimétique	86
Tableau 2.6 Synthèse comparative de 18 processus de conception biomimétique technology-pull	95
Tableau 2.7 Synthèse sur les axes de recherche sur la biomimétique	103
Tableau 2.8 Comparaison des solutions disponibles face aux freins de recherche, sélection et compréhension	111
Tableau 4.1 Caractérisation de l'échantillon étudié dans le questionnaire n°1	125
Tableau 4.2 Caractérisation de l'échantillon étudié dans le questionnaire n°2	126
Tableau 4.3 Caractéristiques de l'échantillon de l'expérimentation n°1	128
Tableau 4.4 Attentes sur les apports des différents profils	136
Tableau 4.5 Attentes croisées des acteurs.....	137
Tableau 4.6 Synthèse des résultats des questionnaires 1 & 2	138
Tableau 4.7 Comparaison du nombre d'éléments identifiés à chaque étape du processus selon les profils	139
Tableau 4.8 Évolution comparée des écarts moyen des éléments identifiés.....	139
Tableau 4.9 Proportion des éléments identifiés en commun ou de manière spécifique à chaque population	140
Tableau 4.10 Comparaison du nombre d'éléments identifié pour chaque catégorie selon la population	141
Tableau 4.11 Synthèses des recommandations issues du chapitre 4 sur l'axe métier	145
Tableau 4.12 Synthèses recommandations issues du chapitre 4 sur l'axe processus	145
Tableau 5.1 Projets étudiants faisant partie du retour d'expérience	150
Tableau 5.2 Échantillon des biologistes interviewés	151
Tableau 5.3 Extrait de l'AMDEC appliquée au processus de conception biomimétique	152
Tableau 5.4. Composition de l'échantillon d'industriel participant à l'expérience 2	153
Tableau 5.5 Tableau de synthèse sur l'analyse des étapes du processus	158
Tableau 5.6 Scénarios défaillants notés les plus critiques	160
Tableau 5.7 Synthèse des recommandations issues du chapitre 5	161
Tableau 5.8 Résultats de l'analyse du cadre temporel.....	163
Tableau 5.9 Niveaux d'abstraction considérés au cours du processus biomimétique.....	166
Tableau 5.10 Principaux prismes d'abstraction préexistants et questions génériques proposées	172
Tableau 5.11 Niveaux et prismes d'abstractions pour la conduction électrique dans de l'eau de mer	173
Tableau 5.12 Caractérisation des types d'organismes porteurs	184
Tableau 5.13 Adéquation entre les recommandations de la phase descriptive et les apports du chapitre 5.....	196
Tableau 5.14 Comparaison des trois processus sur leur aspect visuel (n=32)	197
Tableau 5.15 Comparaison de la perception de la logique des axes (n=32)	198
Tableau 5.16 Évolution des sémantiques des étapes à la suite de l'expérience 2	198
Tableau 5.17 Comparaison de la capacité du processus à détecter les risques et à corriger les erreurs	199
Tableau 5.18 Comparaison de l'acceptabilité finale des processus	199
Tableau 5.19 Résultats de la phase d'amplification par les outils phylogénétiques	201
Tableau 6.1 Échantillon de l'expérimentation 3	213
Tableau 6.2 Analyse comparative sur les processus en conception biomimétique et en biologie	216

Tableau 6.3 Analyse comparative des représentations graphiques en conception et en biologie	221
Tableau 6.4 Synthèse des axes formalisant le référentiel cognitif prescrit	222
Tableau 6.5 Positionnement de LINKAGE par rapport aux éléments constitutifs des modèles de la littérature	229
Tableau 6.6 Incarnation du référentiel cognitif à travers LINKAGE	231
Tableau 6.7 Évaluation de LINKAGE sur les critères d'utilisabilité de Nielsen	232
Tableau 6.8 Évaluation de LINKAGE sur des critères d'ergonomie.....	232
Tableau 6.9 Évaluation des apports de l'outil LINKAGE	233
Tableau 6.10 Missions et activités des biomiméticiens	238
Tableau 6.11 Compétences du biomiméticien : savoir et savoir-faire	240
Tableau 6.12 Compétences du biomiméticien : savoir-être.....	241
Tableau 6.13 Synthèse des apports prescriptifs du chapitre 6	244
Tableau 6.14 Retour sur la démarche de validation de l'hypothèse 1.....	247
Tableau 6.15 Retour sur la démarche de validation de l'hypothèse 2.....	248
Tableau 7.1 Synthèse sur les contributions à travers le prisme des critères d'interdisciplinarité de Nancarrow	259
Tableau 8.1 Structuration des travaux présentés selon la DRM	266

Introduction générale

La vie existe sur Terre depuis au moins 3,8 milliards d'années (Forterre et al., 2007), 3,8 milliards d'années de résilience et de survie (Reynolds et al., 2012). Chaque génération d'êtres vivants voit ainsi certains représentants survivre suffisamment longtemps pour se reproduire permettant l'émergence d'une nouvelle génération. Par le biais de mécanismes génétiques essentiellement basés sur des erreurs, du hasard, celle-ci apparaît légèrement différente. Plusieurs milliards de cycles plus tard, ces mécanismes naturels conduisent à la complexité et à la diversité des formes de vie aujourd'hui présentes sur notre planète.

Imaginons un instant le nombre incommensurable d'êtres vivants ayant vécu depuis l'émergence du premier organisme jusqu'à nos jours. Prenons conscience de la diversité des scénarios que cela représente.

Par son apparition tardive, l'Homme observe cette évolution a posteriori. Il en distingue alors principalement les résultats, ces chemins évolutifs formés d'espèces s'adaptant au cours des âges sous la pression de sélection des contraintes environnementales.

L'absence d'intention derrière ce mécanisme fondamental est difficilement acceptable par le raisonnement humain. Il s'agit encore aujourd'hui de l'un des grands mystères de l'univers qui nous entoure, la vie existe sans but connu.

Laissons un instant la considération biologique pour observer ces phénomènes depuis l'ingénierie. Ces trajectoires évolutives apparaissent rétrospectivement comme de remarquables défis d'innovation. L'autonomie, la structuration, l'équilibre, l'interopérabilité, l'adaptabilité, l'efficacité, etc. des systèmes et des mécanismes vivants représentent un savoir que nous commençons à peine à appréhender.

En tant qu'être vivant, l'espèce humaine n'échappe pas à la règle. Après la séparation de la lignée *Homonina* de celle de nos cousins Chimpanzés (lignée *Pan*) il y a environ 7 millions d'années, près de 6,7 millions d'années supplémentaires (Hublin et al., 2017) sont nécessaires à l'émergence d'*Homo sapiens*, 6,7 millions d'années de mécanismes génétiques et évolutifs.

Face aux temps biologiques, la présence de l'Homme sur Terre représente moins de 0,01 % de l'histoire de la Vie. En cette courte période, l'Humain s'est développé comme aucun être vivant ne l'avait fait avant lui, exploitant son environnement jusqu'à épuisement et allant jusqu'à imaginer quitter la planète qui l'a vu naître. Pourtant, l'Humain d'aujourd'hui et celui d'il y a 300 000 ans possèdent une forte proximité génétique alors même que leurs modes de vie sont radicalement différents. Le moteur de cette évolution n'est donc pas uniquement biologique.

Si le temps s'impose comme une ressource des plus rares et donc des plus précieuses pour l'Homme, il est probable que la conscience du temps qui passe soit un des éléments qui l'ait rendu unique. La capacité de l'homme à anticiper le futur le menant à concentrer son raisonnement sur des objectifs, l'a conduit à une domination quasi absolue du monde vivant. Paradoxalement, cette projection dans le futur apparaît court-termiste comparée au référentiel dans lequel nous nous trouvons. Là où le temps apparaît comme une ressource

répandue du point de vue de l'évolution biologique, la prise de conscience de notre mortalité individuelle, et ainsi de la quantité limitée de temps dont nous disposons, a conduit l'Homme à pallier cette lenteur des mécanismes biologiques par l'émergence de la technologie.

Les outils technologiques se complexifient au cours du temps par le biais du développement de l'intellect, lui-même permis par la mise en place d'un système sociétal stable, et nourri de découvertes scientifiques. À travers une approche par essais/erreurs (similaire à l'évolution biologique) et orientée vers des buts établis (contrairement à l'évolution biologique), les avancées sont pour la plupart consignées, transmises, et l'espèce humaine voit ses progrès technologiques dépasser ses propres attentes, ouvrant un champ des possibles jusqu'alors inimaginable.

Par ce rapide tour d'horizon effleurant la comparaison des évolutions biologiques et technologiques, trois éléments centraux à cette thèse de doctorat peuvent être identifiés.

Le premier est l'incroyable capacité du vivant à s'adapter progressivement à son environnement et au maintien d'un équilibre dynamique malgré les mécanismes menant à la croissance de la biodiversité. Le monde vivant est donc capable de générer des solutions face à d'innombrables problèmes, du moment qu'il en a le temps.

Le second correspond aux aspects intrinsèques à l'Homme, tels que sa capacité à innover, sa fondamentale curiosité, son envie profonde d'avancer et la conscience individuelle d'une mort inéluctable rendant son temps précieux. Contrairement aux mécanismes de l'évolution biologique, l'Homme est capable de formaliser des objectifs variés, qu'il souhaite réaliser le plus rapidement possible, du moins au cours de sa propre vie. Ainsi, l'Homme est capable d'innover à une rapidité fulgurante, par rapport au monde vivant qui l'entoure. En accumulant bout à bout les objectifs individuels ayant mené au développement des sociétés humaines, la digression du référentiel dans lequel se place l'Homme par rapport à celui du monde qui l'entoure apparaît comme une évidence. En d'autres termes, la société humaine centrée sur l'individu n'a jamais correspondu au référentiel du vivant, centré sur les groupes d'individus, leurs interconnexions et leur équilibre.

Le troisième élément qui émerge de la confrontation de ces deux notions est l'inadéquation profonde qui existe entre le référentiel actuel de l'innovation technologique et celui du monde biologique. Celle-ci conduit aujourd'hui l'espèce humaine à une crise sans précédent, qui se manifeste à l'échelle planétaire et touche toutes les espèces (changement climatique, effondrement de la biodiversité, des ressources, etc.). Notre système d'innovation technologique ne peut donc conduire, tel quel, à la sortie de la crise dans laquelle l'espèce humaine se trouve.

Dans la situation actuelle, la planète n'a pas besoin d'être sauvée, ni même la Vie, elle a le temps, les ressources et les mécanismes d'évolution nécessaire à la génération de solutions. C'est bien l'espèce humaine qui manque de temps face aux risques écologiques (Hoegh-Guldberg et al., 2018). Geste antinaturel, s'il en est, notre volonté de vitesse individuelle a raccourci notre espérance de vie en tant qu'espèce.

Face à ces problématiques, il nous faut trouver des solutions. L'immense majorité des problèmes auxquels l'Homme doit faire face aujourd'hui sont des problèmes préexistants à

son apparition. Qu'il s'agisse de la production d'énergie, de la résistance à des conditions physico-chimiques, de l'organisation sociale et de bien d'autres encore, le monde vivant a déjà dû faire face à ces problématiques. Au cours des 3,8 milliards d'années d'évolution, des réponses ont déjà été sélectionnées. Outre le fait d'être identifiées et éprouvées, celles-ci se sont développées en synergie, non pas basées sur des hypothèses conscientes, subjectives, mais sur leur capacité à permettre la survie des représentants des espèces. L'Homme a ainsi la chance de posséder autour de lui une source incommensurable de solutions répondant aux problèmes complexes, multifactoriels, auxquels il doit faire face.

L'idée fondatrice de la biomimétique, cœur de cette thèse de doctorat, apparaît alors comme une évidence : structurer des approches permettant de comprendre et transférer ces solutions, depuis les êtres vivants vers des solutions technologiques. À travers cette démarche, il s'agit de replacer l'innovation au centre d'un référentiel cohérent par rapport au monde vivant tel qu'il existe. Le potentiel innovant de cette démarche dépasse notre capacité d'appréciation et c'est bien là tout son intérêt mais aussi sa complexité. Pouvons-nous réussir à effectuer cette transition ? Comment réussir à réorienter l'innovation par des stratégies nouvelles pour l'Homme ?

Le concept de bio-inspiration n'est pas nouveau, déjà Léonard de Vinci s'inspirait au XVe siècle des rapaces pour imaginer son ornithoptère (Da Vinci, 1945; Richter et al., 2008). Depuis, de nombreuses inventions se sont basées sur l'ingéniosité de la nature, du scratch inspiré de la fleur de bardane aux revêtements super-hydrophobes issus de la feuille de lotus.

Ce qu'entreprend la biomimétique est la prise de conscience de ce potentiel et la formalisation d'approches méthodologiques permettant aux concepteurs de choisir volontairement la nature comme un modèle de résolution de problèmes. L'objectif est donc de systématiser sa prise en compte à travers son ancrage comme une stratégie d'innovation fiable et reproductible.

Ce travail de doctorat possède plusieurs enjeux. Le premier est technologique et apparaît central à la biomimétique. Dès les débuts de son utilisation, celle-ci a eu pour but de favoriser l'innovation à travers la résolution de problèmes complexes, la positionnant comme une stratégie d'innovation très prometteuse (Keshwani et al., 2017; Ahmed-Kristensen et al., 2014). Dans la mesure où ce fort potentiel ne semble pas pour autant conduire à une diffusion conséquente en dehors du monde académique, cette thèse s'inscrit dans la nécessité d'une meilleure formalisation des approches méthodologiques, permettant un accès plus large aux pratiques biomimétiques. L'accompagnement de la mise en pratique de cette approche en dehors du cadre de la recherche constitue donc un des enjeux principaux de cette thèse.

Le second est l'enjeu scientifique lié à la conception biomimétique dont plusieurs freins méthodologiques sont actuellement rencontrés dans la littérature. À travers les conclusions et apports scientifiques détaillés dans ces travaux, un ensemble de solutions est proposé pour résoudre ces problèmes, en particulier, la mise en place d'une approche interdisciplinaire (biologie/ingénierie). Ainsi, cette thèse de doctorat vise notamment à valoriser les savoirs et savoir-faire issus de la biologie par leurs intégrations comme sources de questionnements scientifiques en ingénierie de la conception. Cette démarche poursuit également l'objectif

Introduction générale

secondaire d'assister le décloisonnement des sciences et la mise en place d'études pluridisciplinaires.

Le troisième enjeu de nos travaux est pédagogique. Il apparaît alors comme la conséquence directe de la restructuration de l'innovation technologique et de l'évolution des champs scientifiques. Il s'agit de former de nouveaux acteurs transdisciplinaires, apportant la vision nécessaire à la transition évoquée précédemment.

Un dernier élément apparaît transversal à ceux précédemment énoncé : l'enjeu sociétal. Là où l'innovation reste un des principaux leviers de compétitivité, plusieurs décennies de rapports scientifiques n'ont que récemment conduit le monde politique et industriel à considérer le changement climatique et son impact sur notre société comme le principal défi des générations à venir (IPCC, 2014). La biomimétique offre une solution à cette dualité nécessaire entre innovation et considérations environnementales. Certains travaux se concentrant sur ces aspects ont souligné l'apport de la biomimétique pour des projets d'innovation durable (Vincent et al., 2006; Hwang et al., 2015; Bar-Cohen, 2006; Lenau et al., 2020).

Précisons cependant que la biomimétique ne traite que de l'innovation technologique. Celle-ci peut, ou non, être utilisée à des fins d'éco-innovation. Il ne s'agit donc pas de trouver une recette miracle qui contraindrait l'innovation à prendre une direction ou une autre. L'évolution à effectuer est purement cognitive et humaine. Nous, concepteurs, sommes les acteurs responsables du développement technologique. Dans ce cadre, la biomimétique vise à mettre à disposition des équipes les outils méthodologiques permettant cette transition.

Pour répondre à ces enjeux, ces travaux de recherche, financés par une bourse ministérielle (MERNT), s'appuient sur la collaboration interdisciplinaire de profils issus de l'ingénierie de la conception et des sciences du vivant, au sein du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), HESAM Université.

Dans ce contexte, cette thèse de doctorat s'inscrit au sein de l'axe de recherche visant à optimiser le processus de conception biomimétique en tant qu'approche de résolution de problème, dite approche « *technology pull* ». À travers l'état de l'art effectué sur ce champ scientifique, les freins à la mise en place efficace d'une approche biomimétique sont identifiés comme étant concentrés sur les étapes associant technologie et biologie. Ainsi, nos travaux de recherche s'articulent autour de la problématique suivante : « **Comment optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull* ?** »

Deux hypothèses sont formalisées pour répondre à cette question de recherche.

La première aborde l'axe métier, presque entièrement absent de la littérature spécialisée sur les méthodologies de conception biomimétique, et propose *l'intégration d'un nouveau profil transdisciplinaire et spécialisé au sein des équipes de conception biomimétiques*. La seconde s'appuie sur la première et cible *l'adaptation du cadre méthodologique permettant l'intégration opérationnelle de ces nouveaux acteurs au sein des équipes de conception biomimétiques*.

Introduction générale

Ces deux hypothèses sont étudiées à travers une revue de littérature pluridisciplinaire, la récolte de données pratiques et de retours expérimentaux via le suivi de trois projets étudiants et la mise en place de deux enquêtes. Un ensemble de contributions théoriques visant l'adaptation du cadre conceptuel entourant la biomimétique, la formalisation d'apports méthodologiques et leurs évaluations à travers trois expérimentations est alors proposé.

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse de doctorat sont organisés en quatre phases principales :

- Phase 1. Présentation du contexte, des enjeux et de l'état de l'art.
- Phase 2. Formalisation de la problématique émergeant des constats issus de la littérature et des hypothèses de résolution associées.
- Phase 3. Description des travaux menés durant ce doctorat visant à tester et valider les hypothèses.
- Phase 4. Synthèse des contributions, limites, conclusions et perspectives.

Ces quatre phases sont structurées en 8 chapitres permettant l'explicitation du raisonnement au cours de cette recherche.

Chapitre 1. Contexte, positionnement et enjeux des travaux (Phase 1)

Le premier chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrivent les travaux présentés dans ce document : le contexte industriel associé aux défis de la conception moderne et le contexte spécifique aux sciences de la conception. Ce chapitre repositionne notre recherche au sein du cadre formé par les contributions de la communauté scientifique ainsi qu'au sein des thématiques de recherche du laboratoire. Une prise de recul sur nos axes de recherche souligne enfin les enjeux techniques, scientifiques, pédagogiques et sociétaux associés à cette thèse de doctorat.

Chapitre 2. État de l'art (Phase 1)

Le chapitre 2 développe l'état de l'art sur l'ingénierie de la conception, les sciences du vivant et la conception biomimétique. Il est fait état de l'histoire, des concepts et objectifs de ces différents champs d'intérêt. Ce chapitre 2 souligne de cette manière les fondations scientifiques sur lesquelles nos travaux sont construits. Un ensemble d'éléments clés est extrait à travers la présentation des approches préexistantes et des constats issus de la littérature.

Chapitre 3. Problématique et hypothèse (Phase 2)

Les observations tirées de l'état de l'art sont synthétisées dans le chapitre 3 pour conduire à la formalisation de la problématique de recherche guidant cette thèse de doctorat. L'approche

méthodologique visant à la résolution ce celle-ci est ensuite présentée et mène à l'émergence des deux hypothèses structurant ces travaux de recherche.

Chapitre 4. Légitimité et attentes des praticiens (Phase 3)

La légitimité de l'intégration de profils ayant une formation en biologie (hypothèse 1), doit être validée avant que les attentes des équipes de conception biomimétique face à de tels acteurs soient caractérisées (hypothèse 2).

La première expérimentation de cette thèse s'intéresse de ce fait à l'évaluation quantitative et qualitative de l'apport que peut représenter un biologiste lors de la pratique de la biomimétique. Plus particulièrement, cette mise en situation lors d'un projet de conception accéléré permet la comparaison des résultats intermédiaires et finaux obtenus par 42 étudiants ayant ou non une formation approfondie en biologie.

Cette première expérimentation valide le fondement de notre première hypothèse et par-delà la justification de la nécessité d'investissements sur l'intégration de ces profils, qu'il s'agisse d'efforts de recherche ou d'implication d'acteurs de l'innovation. La deuxième partie du chapitre traite des besoins des équipes de conception biomimétique et des freins potentiels à l'intégration de nouveaux acteurs.

Deux questionnaires centrés sur la perception, les attentes et les objectifs des populations (ingénieurs et biologistes) sont par conséquent conçus. Afin d'obtenir une vision d'ensemble, l'étude est effectuée auprès de potentiels membres d'équipe de conception biomimétique d'une part (questionnaire n°1) et auprès d'experts en sciences de la conception sur la biomimétique d'autre part (questionnaire n°2). Ces enquêtes visent notamment à apporter des réponses aux questions suivantes : Qu'attendent les différents protagonistes de leurs collègues respectifs ? Quelles visions communes peuvent être utilisées comme socle de l'intégration des acteurs transdisciplinaires ? Quels points de divergence seront à prendre en compte pour anticiper de potentiels problèmes lors de la mise en place de ces approches de conception biomimétique ?

Ce chapitre 4 permet donc la validation de la cohérence de nos hypothèses dans un contexte professionnel et la mise en place d'un cahier des charges de résolution.

Chapitre 5. Adaptation du processus et des pratiques (Phase 3)

Le chapitre 5 identifie dans un premier temps un ensemble de leviers d'amélioration du processus biomimétique à travers une évaluation des risques (AMDEC) effectuée en collaboration avec des experts de la biomimétique, des interviews de biologistes, ingénieurs et designers, ainsi que les retours d'expériences des étudiants ayant participé aux projets supervisés.

Un ensemble d'optimisations, tel que la mise en place d'axes explicites au référentiel, la re-formalisation sémantique des étapes ou encore l'établissement de trois étapes de validation intermédiaire menant à des boucles d'itérations, est mise en place. L'intégration du

Introduction générale

biomiméticien¹ sur l'ensemble du processus est également décrite, tout comme la composition variable de l'équipe selon les étapes.

La deuxième expérience de cette thèse de doctorat vise la validation des apports du processus optimisé. Plus spécifiquement c'est l'augmentation de la quantité d'informations extractibles et donc la réduction des risques associés à la pratique de la biomimétique qui sont testées. À travers une évaluation de nos contributions par près de 30 acteurs du monde industriel, certains éléments clés sont validés et des leviers d'amélioration sont identifiés. Basés sur ces résultats, une seconde version du processus optimisé est proposée.

La deuxième partie du chapitre 5 se concentre sur la pratique des équipes de conception. En interrogeant la manière dont la biologie peut être utilisée comme une science appliquée en biomimétique, cette partie vise à la formalisation d'une approche incluant les champs biologiques, leurs référentiels conceptuels, leurs savoirs, leurs savoir-faire et leurs outils.

Ainsi, l'Écologie et la Biologie évolutive, plus particulièrement la Systématique, sont identifiées comme deux champs d'intérêt pour la résolution des freins actuels au processus biomimétique. La formalisation de ponts conceptuels conduisant à des méthodes pratiques basées sur l'utilisation de ces champs biologiques est alors présentée. Une preuve de concept ciblée sur les étapes 3 et 4 du processus conclut ce chapitre.

Chapitre 6. Formalisation et intégration du biomiméticien (Phase 3)

Face à la mise en place du contexte méthodologique dans les chapitres précédents, ce 6^{ème} chapitre questionne finalement l'intégration du biomiméticien au sein de l'équipe de conception biomimétique. Plus particulièrement, l'obstacle de la communication est abordé par la comparaison des référentiels cognitifs. À travers la mise en évidence de points de convergence et de spécificités, un outil visant à favoriser la communication au sein des équipes pluridisciplinaires de conception biomimétique est conçu. Sa mise en place sous forme numérique est détaillée et accompagnée d'un exemple d'utilisation.

La troisième expérience de cette thèse de doctorat présente l'évaluation à travers des ateliers de cet outil d'accompagnement du raisonnement, de formalisation de l'information et de communication. Tout d'abord effectuée par des étudiants, cette phase d'évaluation conduit à une boucle d'amélioration, avant qu'une nouvelle évaluation, par des professionnels, valide les apports de l'outil.

La deuxième partie de ce chapitre 6 synthétise l'ensemble des résultats obtenus au cours des chapitres précédents afin de nourrir la formalisation d'un profil transdisciplinaire : le biomiméticien.

Chapitre 7. Contribution et limites (Phase 4)

Le chapitre 7 met en exergue les contributions industrielles, académiques et pédagogiques apportées par nos études. Leurs descriptions d'un côté et la précision de leurs limites de

¹ Nouveau membre transdisciplinaire des équipes de conception, défini et intégré au cours de ces travaux.

Introduction générale

l'autre rendent compte du travail de formalisation et d'évaluation poursuivi au cours de ces recherches.

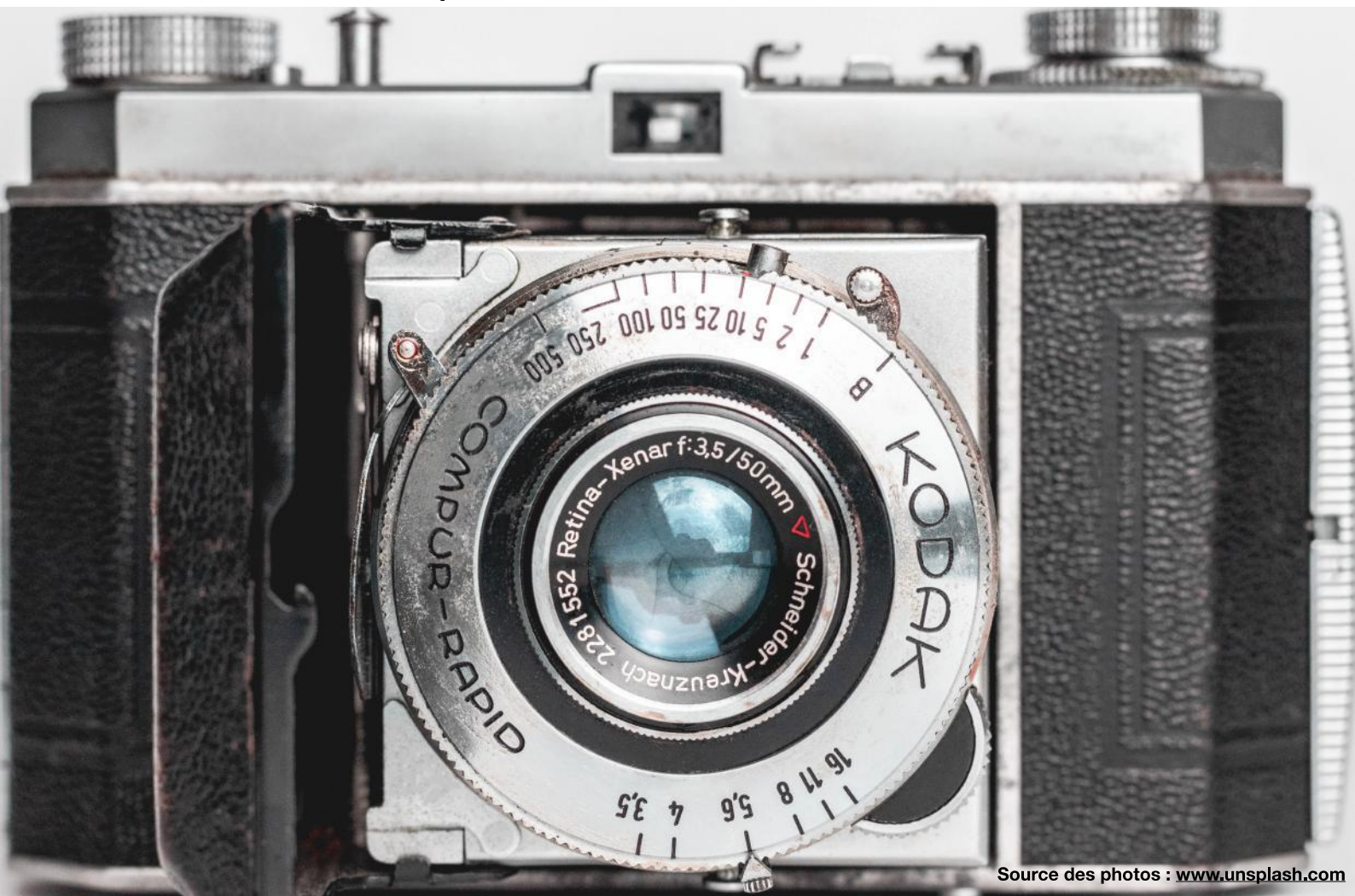
Chapitre 8. Conclusion et perspectives (Phase 4)

Le chapitre 8 synthétise les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse et les recontextualise afin d'en faire émerger les apports et les perspectives qu'ils sous-tendent. Un ensemble de questions restant à résoudre est finalement soulevé pour alimenter la poursuite des réflexions scientifiques sur les méthodologies de conception biomimétique.



CHAPITRE 1

CONTEXTE, POSITIONNEMENT ET ENJEUX



1.1 Contexte général

La population mondiale a dépassé les 7,6 milliards d'individus et devrait atteindre 9,8 milliards de personnes d'ici 2050 d'après les Nations Unis (ONU, 2017). Chaque année, nous consommons plus de ressources que la Terre n'est capable d'en générer (Global Footprint Network, 2016). L'humanité vit à crédit et l'explosion démographique ne fait que précipiter cette tendance. Le désastre écologique dû à la surexploitation, la surconsommation et à la pollution de notre environnement conduit l'Homme vers un bouleversement de son développement dont il peine à appréhender les ramifications.

Pourtant, c'est également un contexte qui pousse au surpassement, à la réorientation de l'innovation technologique et aux bouleversements socio-culturels. La nécessité de nouvelles approches et de nouvelles idées, s'impose comme une évidence pour sortir de l'impasse. Ces défis sont fascinants au vu de leur transversalité. Comment anticiper une population de près de 10 milliards d'individus ? Comment rendre accessible la technologie à tous ? Comment continuer à innover ? Comment résoudre l'écueil environnemental ? Autant de questions qui forment le contexte général dans lequel s'inscrit cette thèse de doctorat.

Nous passerons ici l'aspect politique intrinsèquement lié à ces problématiques, pour nous concentrer sur le rôle que peut tenir l'innovation, la technologie et la science face à ces challenges.

1.2 Contexte industriel

Dans un contexte industriel d'extrême concurrence, et ce à une échelle mondiale, l'innovation s'est imposée comme un des facteurs clefs de compétitivité des entreprises (Paul, 2011). Le contexte industriel encadrant la biomimétique est ainsi abordé par le prisme de l'innovation. Après la présentation des concepts clés, d'un rapide historique et de l'inclusion du contexte industriel au sein du contexte économique, les tendances actuelles concluront cette partie.

Concepts et définitions

En 1939, Schumpeter, avec pour objectif d'identifier les facteurs clefs des évolutions économiques, différencie l'innovation de l'invention en soulignant le fait que cette dernière, contrairement à l'innovation, « *...ne produit en tant que telle absolument aucun effet économique pertinent* », définissant alors l'innovation comme « *...la mise en place d'une nouvelle fonction de production* » (Schumpeter, 1939). Ses travaux seront par la suite largement repris, notamment par Maclaurin qui proposera en 1953 la définition suivante de l'innovation : « *Quand une invention est commercialement introduite en tant que produit ou processus nouveau ou amélioré, elle devient une innovation* » (Maclaurin, 1953). Ces définitions historiques sont notamment complétées en 2013 par la norme FD X50-271 définissant l'innovation comme un « *processus qui conduit à la mise en œuvre d'un ou plusieurs produits, services, procédés, formes d'organisations, modèles d'affaires, nouveaux ou améliorés, susceptibles de répondre à des attentes implicites ou explicites et de générer une valeur économique, environnementale ou sociétale pour toutes les parties prenantes* ».

L'industrie est, elle, présentée par l'INSEE comme étant l'ensemble des « *activités économiques qui combinent des facteurs de production (installations, approvisionnements, travail, savoir) pour produire des biens matériels destinés au marché.* » (INSEE, 2016).

L'historique entrelacé de l'innovation et de l'industrie permet de comprendre le lien entre ces deux concepts et d'explicitier le contexte industriel moderne.

Une courte introduction à l'histoire de l'industrie moderne

L'industrie moderne apparaît à la suite de la première révolution industrielle dans les années 1760. Poussées par l'apparition de la machine à vapeur, les premières usines voient le jour et le monde entre peu à peu dans les premières phases d'optimisation de la productivité. L'impact fondamental des réseaux de transports et de communication est également au centre de ces réorganisations.

Dans les années 1890, la généralisation de l'utilisation des hydrocarbures et de l'électricité comme sources d'énergie transforme une nouvelle fois l'industrie. On parle de seconde révolution industrielle. C'est l'entrée dans une production de masse telle qu'on la conçoit aujourd'hui, les secteurs de l'automobile et de la chimie se déploient et conduisent notamment à l'émergence des théories du Taylorisme (Taylor, 1911) et Fordisme (Ford et al., 1922), organisant le travail dans un objectif de rentabilité.

Le contexte des deux guerres mondiales de la première moitié du XX^e siècle mène à la mise en place d'un monde concentré autour de deux superpuissances industrielles l'URSS, jusqu'en 1991, et les États-Unis. La seconde partie du XX^e voit l'industrie s'ouvrir à travers une mondialisation de la production et des échanges commerciaux. L'apparition à partir des années 70, puis la généralisation de nouvelles technologies telles que l'informatique, internet, la téléphonie mobile, les biotechnologies, etc. plonge la société dans une troisième révolution industrielle. L'accélération des échanges de données, des communications, du transport et de la production, ainsi que les profondes évolutions sociétales associées, conduisent à la mise à disposition du grand public de ces hautes technologies.

Le contexte actuel voit l'émergence d'une quatrième révolution industrielle axée sur la digitalisation. Notamment basée sur l'Intelligence Artificielle (IA), l'évolution des techniques de fabrication (ex. fabrication additive), les réseaux intelligents et la connectivité des infrastructures de production, cette nouvelle aire nommée industrie 4.0, pousse le principe de robotisation et d'automatisation jusqu'à l'autonomie des structures de production.

Le lien étroit qui existe entre industrie, innovation et science émerge alors clairement. Chaque révolution industrielle est faite d'innovations, à la fois sources et conséquences de découvertes scientifiques, qui redéfinissent le cadre de la conception, de la production, de l'échange commercial et par-delà, celui de notre société.

Lien entre science et innovation

La science est définie comme un « ensemble cohérent de connaissances relatives à certaines catégories de faits, d'objets ou de phénomènes obéissant à des lois et/ou vérifiés par les méthodes expérimentales » (Dictionnaire Larousse, 2018). En ce sens, elle s'impose en interaction avec la technologie.

Là où la science vise la compréhension de phénomènes fondamentaux (ex. comportement de la lumière en optique), elle ouvre la porte à une multitude d'applications technologiques issues de ces découvertes et commercialisée comme innovation (ex. le microscope, le télescope, le laser, etc.). Le lien étroit entre science et innovation tient dans sa réciprocity. Ces mêmes innovations conduisent en effet à de nouvelles découvertes scientifiques uniquement rendues possible grâce à elles (ex. biologie cellulaire, exploration spatiale, appareil de mesure à haute précision, etc.).

La mise en place de partenariats entre la recherche publique et les acteurs industriels (ex. thèse CIFRE, projet ANR, Instituts Carnot, Crédit Impôt Recherche, etc.) se manifeste comme un levier stratégique permettant de stimuler l'innovation tout en finançant l'exploration scientifique.

Lien entre industrie et innovation

Dans un monde globalisé où les matières premières et la main d'œuvre entrent en compétition à l'échelle planétaire, la création de ressources internes sous forme d'innovation émerge comme un facteur déterminant pour la survie des entreprises (Paul, 2011).

Les attentes du grand public envers de constantes nouveautés et le climat de forte concurrence conduit les entreprises à investir massivement dans l'innovation. Si l'on omet les crises économiques des années 1990 et de 2008, les dépenses en Recherche et Développement (R&D) n'ont fait qu'augmenter sur les 40 dernières années, passant de 0,36 milliards de dollars US en 1981 à 1,37 milliards de dollars US en 2018 pour les pays de l'OCDE (OCDE, 2018a) (Figure 1.1).

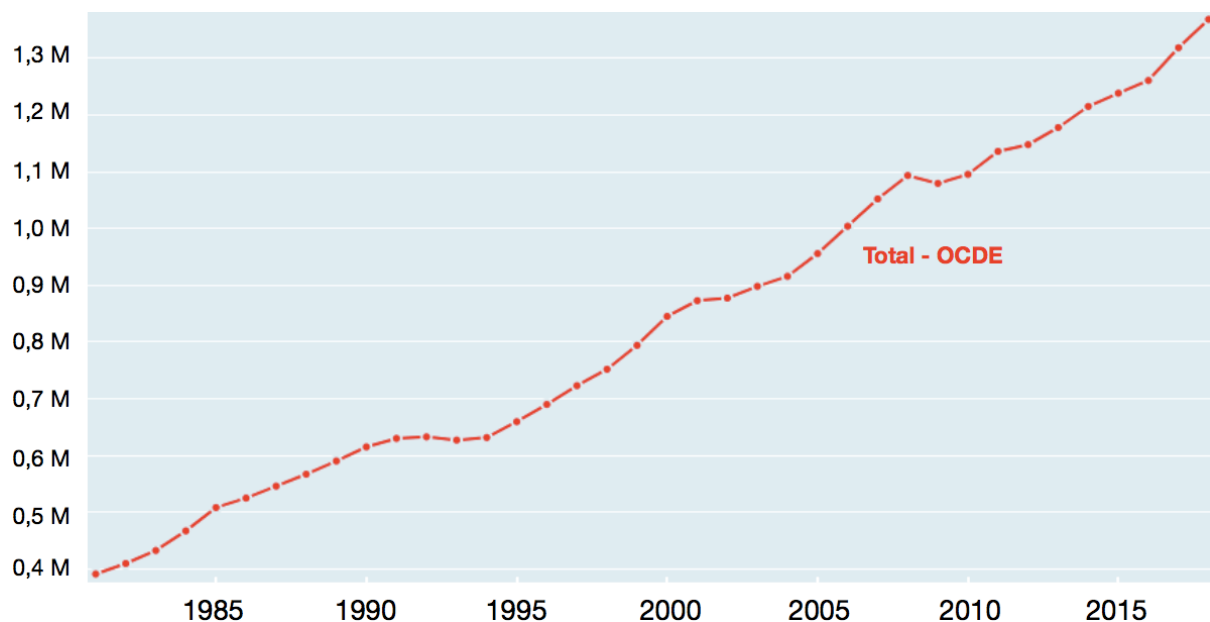


Figure 1.1. Courbe de l'évolution de la dépense des pays de l'OCDE en R&D en milliards de dollars US (OCDE, 2018a)

L'apparition de *start-up* incarne la place grandissante que tient l'innovation dans l'industrie moderne. Ces petites entreprises concentrent leurs ressources limitées sur une très forte activité de R&D afin d'initier leur croissance par la mise sur le marché de technologies de

pointe. Celles-ci constituent des cibles d'acquisition à forte valeur ajoutée pour de grosses entreprises moins structurées pour l'innovation.

Comme nous le verrons dans l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.2.1.4), l'innovation ne se cantonne pas à l'innovation produit. Elle est omniprésente dans l'industrie, allant de l'innovation de processus, à l'innovation organisationnelle, en passant par l'innovation métier et marketing.

Face aux contraintes du monde moderne, l'innovation s'inscrit donc d'une part comme un outil de résolution de problème, et d'autre part comme une démarche structurante du paysage industriel et économique. Son impact sociétal prend peu à peu une ampleur considérable alors même que le consommateur devient progressivement acteur dans l'orientation même de ces stratégies.

Tendances actuelles

Le contexte industriel moderne fait face à la prise de conscience par les consommateurs de leur pouvoir dans l'orientation des axes d'innovations. Ce changement de positionnement, du statut de spectateur émerveillé à celui d'acteur éclairé, conduit l'innovation à se recentrer sur le consommateur. Qu'il s'agisse de la prise en compte de besoins spécifiques (ex. personnalisation des services), du financement d'innovations qui les touchent (ex. financement participatif) ou du pouvoir issu de leurs habitudes de consommation, (ex. croissance de l'agriculture biologique (Renault et al., 2018)), le consommateur ne veut et ne peut plus être ignoré. Le client, le *qui*, impose un nouveau pouvoir décisionnel.

Face à la diversité des acteurs, vient la variabilité du référentiel de consommation, et la question du *quoi* et du *pourquoi* consommer ?

D'un côté le consommateur souhaite se procurer des produits et services personnalisés, à la mode, exotiques, abordables et qui répondent instantanément à ses moindres envies, poussant à une croissance de la consommation.

De l'autre, la surconsommation se place au centre de réflexions grandissantes liées à la crise environnementale. À travers un ensemble de nouveaux outils d'information et d'aide à la décision, telles que les applications Yuka (Yuka, online) sur l'industrie agroalimentaire et Clear Fashion (Clear Fashion, online) sur l'industrie du textile, l'acheteur s'informe et décide *quoi* acheter. L'acte d'achat, le *pourquoi*, représente alors, outre l'acquisition d'un produit ou service, un acte de soutien et d'engagement éthique.

La dualité de ces nouvelles contraintes dans l'approche de la consommation, et par extrapolation de la conception industrielle, soulève des défis techniques considérables.

Par l'ensemble des problématiques clefs d'innovation que ces challenges représentent, ils constituent un point stratégique fondamental pour les services R&D. Tout en maintenant un niveau de service constant, ils visent de larges axes d'amélioration telle que la réduction de la pollution atmosphérique lors des cycles de production, la prise en compte, dès les phases amonts de conception, des déchets produits ou encore l'abandon progressif des plastiques.

Ainsi, la nécessité d'intégrer ces nouvelles attentes, et donc la question technique, le « *Comment ?* », de la cohérence des concepts d'industrie et de durabilité est aujourd'hui au cœur des préoccupations.

Positionnement de la biomimétique et de nos travaux dans le contexte industriel

Tant par l'émergence d'une quatrième révolution industrielle que par la formalisation de nouvelles contraintes de conception, l'industrie est par conséquent vouée à de profondes évolutions.

La biomimétique se positionne comme une démarche visant à repenser l'innovation afin d'intégrer ces défis fondamentaux et contribuer au développement d'un système économique, industriel et sociétal répondant aux contraintes du contexte industriel moderne.

Dans ce contexte, nos travaux visent à favoriser le passage de la biomimétique théorique, élaborées par la recherche scientifique, à son application comme stratégie de résolution de problèmes au service des entreprises. La formalisation de processus et de profils adaptés à ce transfert dans le monde industriel sera notamment discutée.

1.3 Contexte scientifique

Les défis explicités dans les parties précédentes apparaissent fondamentalement interdisciplinaires, faisant intervenir des champs issus des sciences de la nature (étude de la vie, de la terre, de la matière et de l'univers), des sciences formelles (études des raisonnements logiques tel que les mathématiques, visant à la formalisation de modèles), des sciences humaines et sociales (études des langues, de l'histoire, de la philosophie, de la psychologie, du droit, de la sociologie, de l'économie, etc.).

Le cadre des travaux présentés dans cette thèse est structuré par le champ scientifique de la biomimétique (ISO/TC266, 2015), à l'interface entre l'ingénierie de la conception, associant sciences formelles, naturelles et sciences humaines, et les sciences du vivant, partie intégrante des sciences naturelles. La pluridisciplinarité de ce contexte, bien que représentant une difficulté évidente, est également la source du potentiel innovant de la biomimétique

1.3.1 Science de l'ingénierie de la conception

Au sein des sciences de l'ingénierie, le champ des sciences de l'ingénierie de la conception couvre l'ensemble des théories, méthodologies, méthodes et outils guidant la pratique de la conception. Elle a pour but de guider les concepteurs dans leurs démarches en formalisant des approches leur permettant d'une part d'appréhender correctement un problème, et d'autre part de le résoudre.

Quatre domaines principaux peuvent être distingués au sein des sciences de l'ingénierie de la conception (Hubka et al., 1982) :

- **La théorie des systèmes techniques**, qui s'intéresse à la compréhension des artéfacts (= *systèmes artificiels*) par la modélisation de leurs propriétés mécaniques, leur structure, leur fonctionnement, leur coût, leur contexte social, etc. Ce domaine

contient tout « *le savoir à propos de l'objet visé par le processus de conception* » (Hubka et al., 1982).

- **La théorie de la conception et théorie du processus de conception**, qui s'intéresse à l'action du concepteur. Elle rassemble un ensemble de processus, de méthodes et d'outils techniques utilisés par le concepteur. Ce domaine contient la formalisation du savoir et du savoir-faire du concepteur.
- **La connaissance appliquée issue des sciences humaines et sociales**, qui s'intéresse au fonctionnement des équipes de conception et plus particulièrement à la génération et au transfert d'informations, et donc de savoirs, sous toutes leurs formes.
- **Les méthodologies de conception**, qui étudient l'ensemble des méthodes de conception dans le but de sortir de la *conception par intuition* et d'entrer dans la *conception structurée*. On cherche à établir des modèles pour guider le concepteur à chaque étape du processus de conception. La recherche dans ce domaine vise à prendre en compte de nouveaux facteurs permettant d'anticiper le plus en amont possible des paramètres tels que le risque, la qualité, etc.

Au sein ce contexte, nos travaux se positionnent à l'intersection entre les méthodologies de conception (adaptation des outils et processus), la connaissance appliquée issue des sciences humaines (communication et transfert d'informations au sein d'équipes interdisciplinaires) et la théorie de la conception (pratique de la biomimétique) (Figure 1.2).

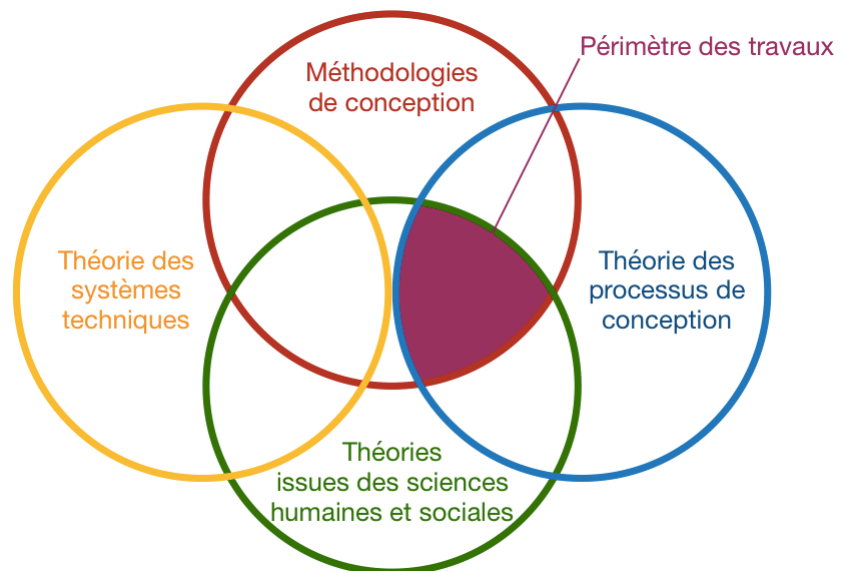


Figure 1.2 Positionnement des travaux de recherche au sein des sciences de la conception, inspiré de Fayemi (2016)

L'ingénierie de la conception est également une source d'innovations dans la mesure où elle permet, par la conception de nouvelles théories, méthodes et outils, d'appréhender les problèmes de conception sous de nouveaux angles. On peut ainsi citer le *Design Thinking* (Brown, 2009), approche visant à mettre l'expérience et le besoin utilisateur au cœur du

processus de conception ou encore le *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* (Thompson et al., 2016), visant à considérer les atouts et contraintes de la Fabrication Additive (FA) lors des phases amonts du processus de conception.

La *biomimétique*, sujet de ces travaux, apparaît de la même manière comme une innovation en tant que telle.

1.3.2 Conception biomimétique

La conception biomimétique est une approche méthodologique visant à comprendre, modéliser et transférer les stratégies de résolution de problèmes issues du monde vivant pour conduire à des innovations technologiques. On parlera de biomimétisme, uniquement dans le cas où ces innovations ont pour objectifs le développement durable (ISO/TC266, 2015). Ces définitions seront présentées plus en détail dans l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.1.2).

Au sein des sciences de la conception abordant la problématique de la biomimétique, un certain nombre d'axes de recherche peuvent être identifiés :

- La mise en exergue du potentiel innovant de la biomimétique (Keshwani et al., 2017).
- La formalisation et l'optimisation de processus de conception biomimétique, tels que BioGen (Badarnah et al., 2015).
- La formalisation et l'optimisation d'outils de conception biomimétique (McInerney et al., 2018; Helms et al., 2014).
- Les bonnes pratiques visant à l'élaboration d'un savoir et d'un savoir-faire spécialisé (Hashemi Farzaneh et al., 2019; Chirazi et al., 2019).
- Les processus cognitifs associés à la biomimétique (conception par analogie, pluridisciplinarité, idéation, etc.) (Schöfer et al., 2018; Ahmed-Kristensen et al., 2014).
- La modélisation des systèmes biologiques (Baldussu et al., 2012; Chakrabarti et al., 2005).
- L'évaluation du caractère durable de la biomimétique et donc son lien avec le biomimétisme (Mead et al., 2017).
- Les approches pédagogiques entourant l'émergence de ce champ scientifique (Stevens et al., 2019),

Sans être exhaustive, cette liste rend compte de la diversité des sujets de recherche impliqués dans le développement méthodologique de la biomimétique.

Appliquant le cadre de lecture défini lors de la présentation des sciences de la conception (Chapitre 1, partie 1.3.1), nos travaux abordent la biomimétique sur quatre des aspects précédemment présentés :

- ***La formalisation et l'optimisation des bonnes pratiques visant à l'élaboration d'un savoir et d'un savoir-faire spécialisé (méthodologies de conception)*** : par la

formalisation d'un profil original intégré aux équipes, le *biomiméticien*, combinant des compétences issues des sciences du vivant et de l'ingénierie de la conception.

- **La formalisation et l'optimisation de nouveaux outils de conception biomimétique (théorie de la conception)** : par l'adaptation d'un certain nombre d'outils issus de la biologie pour accompagner l'activité des biomiméticiens.
- **L'étude des processus cognitifs associés aux approches biomimétiques (connaissance appliquée issue des sciences humaines)** : par l'application des théories de la communication aux équipes biomimétiques et la conception d'un outil favorisant les échanges au sein des équipes interdisciplinaires.
- **La formalisation et l'optimisation du processus de conception biomimétique (théorie de la conception)** : par l'adaptation du processus de conception visant à faciliter sa mise en œuvre pratique et l'intégration du biomiméticien.

L'originalité de nos hypothèses, et donc la richesse scientifique de notre recherche, réside ainsi dans le fait d'aborder les différents points précédemment présentés avec le regard d'un biologiste. Cette démarche nous mènera à l'intégration de compétences, d'outils et de raisonnements biologiques dans le cadre méthodologique de la conception biomimétique.

1.3.3 Sciences du vivant

Le terme « biologie » à proprement parler est attribué au philosophe allemand Hanov en 1766 (Hanov, 1766). Repris en 1802 par Treviranus (Treviranus, 1802) et Lamarck (Lamarck, 1809), la biologie prend son sens moderne « ...les différentes formes et manifestations de la vie, les conditions et les lois sous lesquelles ce phénomène a lieu et les causes par lesquelles il est déterminé. La science qui s'occupe de ces objets sera désignée par nous du nom de biologie ou science de la vie ».

La biologie se compose d'un grand nombre de champs dont la classification varie en fonction des prismes de caractérisation et des échelles systémiques considérées pouvant conduire à des recoupements (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Exemple de caractérisation de quelques champs biologiques

Type de classifications	Exemple de modalités		Exemple de champs biologiques associés	
	(A)	(B)	(A)	(B)
Par taxon étudié	Animaux	Bactéries	Zoologie	Microbiologie
Par niveau systémique	Cellule	Tissu	Biologie cellulaire	Histologie
Par sujet d'étude	Fonctions et propriétés	Forme et structure	Physiologie	Anatomie
Par environnement	Biotope marin	Extra-terrestre	Biologie marine	Exobiologie
Par objectif	Descriptif	Prescriptif	Biologie évolutive	Biotechnologie

Ces différents champs sont composés de plusieurs niveaux structurels que nous découperons dans ces travaux en quatre parties :

Chapitre 1 – Contexte des travaux

- Les connaissances (sémantiques, théorie, lois, réseaux conceptuels, informations biologiques spécifiques, etc.),
- Le cadre méthodologique (l'ensemble des processus et outils associé au champ considéré),
- Les raisonnements (les processus cognitifs et la logique propre au champ étudié)
- Les pratiques (capacité à effectuer une activité biologique, à utiliser un outil, à formaliser correctement son travail, etc.).

Il est à noter que les champs biologiques sont poreux, notamment aux connaissances qui sont largement transférées entre les champs proches. L'éloignement de certains domaines d'étude en revanche (notamment entre différents taxons ou environnements), entraîne la formation de silos qui peuvent s'avérer relativement hermétiques.

La diversité des prismes abordant la complexité des sciences du vivant explique en partie l'intérêt qu'elle représente en tant que source d'innovations. Celle-ci souligne également les difficultés auxquelles ces travaux devront faire face. Chacun de ces domaines sont étudiés par des chercheurs aux pratiques, vocabulaires, raisonnements et outils variés au sein même de la biologie.

À l'inverse des sciences mathématiques, physiques et chimiques largement intégrées aux pratiques de la conception, les sciences biologiques sont encore très peu transférées et appliquées en dehors de leur champ d'origine et restent souvent des sciences fondamentales.

Seuls quelques champs de la biologie sont ancrés dans le monde la conception, comme les biotechnologies, où le vivant est utilisé à des fins de production (agroalimentaire, pharmaceutique...).

Nos travaux prennent le parti d'aborder la méthodologie biomimétique en évitant l'utilisation d'organismes biologiques comme des éléments de réponse. L'idée sous-jacente est d'éviter l'exploitation des êtres vivants pour les considérer comme source d'inspiration. La majorité des champs biologiques traitant de l'utilisation du vivant à des fins de production sont ainsi laissés de côté dans cette thèse.

1.3.4 Pluri, inter et transdisciplinarité en conception

Concepts

L'interaction des champs scientifiques est structurée selon un ensemble de concepts dont les définitions sont présentées ci-dessous :

- La pluridisciplinarité est l'approche visant à combiner plusieurs disciplines ou plusieurs domaines de recherche au sein d'un projet (Dictionnaire Larousse). Plus précisément il s'agit d'« *une approche qui guide des projets sans présupposer quant à la forme de l'implication des disciplines associées, ni quant au degré de réciprocité dans le partenariat, ni enfin quant au fait que cette implication conjointe serve un objectif authentiquement commun aux différents partenaires* » (Denis, 2003). On parlera donc

de processus et d'équipes pluridisciplinaires lorsque ceux-ci s'appuient sur « *les connaissances de différentes disciplines mais reste à l'intérieur de leurs frontières (scientifiques existantes)* » (Choi, B, Pak, 2006).

- L'interdisciplinarité interroge les interactions entre les disciplines (Dictionnaire Larousse), il s'agit d'« *une forme de coopération plus intégrée (que la pluridisciplinarité) mise en œuvre en vue de résoudre un problème commun. Des ressources sont partagées par plusieurs disciplines et le résultat final dépend étroitement de la coopération. Ici, on assiste à la convergence de disciplines sur un objectif partagé, mais sans que soit mise en question l'identité de chaque discipline au sein du partenariat* » (Denis, 2003). On parlera de processus et d'équipes interdisciplinaires lorsque ceux-ci « *analysent, synthétisent et harmonisent les liens entre les disciplines en un ensemble coordonné et cohérent* ». (Choi, B, Pak, 2006)
- La transdisciplinarité, même si faisant également intervenir plusieurs disciplines, diffère de l'interdisciplinarité et de la pluridisciplinarité dans la mesure où elle tend à traverser les frontières entre les sciences (Dictionnaire Larousse), « *La transdisciplinarité peut caractériser une démarche encore plus intégrée (que l'interdisciplinarité et de la pluridisciplinarité), avec franchissement des limites des champs disciplinaires et définition d'un champ de recherche nouveau dans lequel les disciplines partenaires se fondent dans une démarche conceptuelle et méthodologique unique* » (Denis, 2003). Il ne s'agit plus d'ajouter du savoir issu de différents champs, mais d'associer ces savoirs pour créer un nouveau champ de connaissances. On parlera de processus, d'équipe, d'acteurs et d'outils transdisciplinaires lorsque ceux-ci « *transcendent les frontières des champs scientifiques existants* » (Choi, B, Pak, 2006).

Une gradation des modalités d'interaction d'une discipline par rapport à une autre peut être mise en évidence, de l'interaction la moins contraignante (pluridisciplinarité) à l'interaction la plus intriquée (transdisciplinarité).

Tendances actuelles et lien avec les champs de la science de la conception

Si l'on s'intéresse aux tendances de la conception moderne, on observe une accélération de ces stratégies de mixité disciplinaire et la prise en compte de champs de plus en plus éloignés.

Ainsi, du fait de la place centrale qu'occupe l'utilisateur en conception moderne (Chapitre 1, partie 1.2), la tendance actuelle est à l'intégration des disciplines permettant sa prise en compte. Qu'il s'agisse de la perception de l'objet (design artistique) (Eder, 2013), de l'expérience utilisateur à travers son interaction avec l'objet (l'ergonomie) (Wilson, 2000) ou la caractérisation du besoin auquel il répond et de son impact sur la société (les sciences humaines et environnementales) (Piyush Tantia, 2017), on s'intéresse de plus en plus à l'intégration de nouveaux domaines de compétence en conception.

La pluridisciplinarité émerge lors des projets de conception par le transfert d'informations d'une autre discipline à une autre, sous la forme, ou non, d'acteurs pouvant également apporter une expertise. Cette pluridisciplinarité est largement répandue dans les sciences de

la conception moderne, telle l'intervention d'un ergonomiste en fin de projet ou d'un designer en phase de créativité par exemple.

L'interdisciplinarité demande une structuration plus en amont des interactions disciplinaires. L'implication des différentes disciplines intervient notamment à travers la composition de l'équipe projet, et la coordination des pratiques. L'interdisciplinarité requière par conséquent une considération spécifique à la gestion d'équipe afin d'harmoniser les objectifs des différents membres et d'assurer une collaboration efficace. En prenant du recul sur la pratique de la conception, on autorise l'adaptation des processus et outils conduisant à une plus grande profondeur de coopération. Les processus d'intégration des ergonomes lors des phases amonts de conception en est un exemple (Aoussat et al., 2000)

La transdisciplinarité est accessible par la transformation des champs conceptuels et cognitifs. Un tel niveau d'interaction impacte à la fois les acteurs, les outils et les processus. Ainsi, les champs disciplinaires sont combinés tôt dans la conception du cadre méthodologique du nouveau domaine pour que celle-ci modifie profondément l'approche de conception. Ces évolutions nécessitent de nouveaux cursus de formation pour former des acteurs au nouveau cadre méthodologique. C'est par exemple le cas avec les approches de conception durable en génie urbain (Butt et al., 2018; Biberhofer et al., 2017).

Cette tendance de combinaison des disciplines apparaît au cœur de la biomimétique.

Positionnement des travaux

La volonté de s'inspirer de la nature pour générer des innovations apparaît intrinsèquement pluridisciplinaire. L'étude du vivant (biologie) conduit à la génération de connaissances, alors utilisées à des fins d'innovation grâce à un raisonnement par analogie (ingénierie de la conception).

Au premier stade de développement pluridisciplinaire, les concepteurs utilisent directement de l'information issue de la recherche en biologie. C'est la démarche actuellement la plus répandue en conception biomimétique.

Le passage à l'interdisciplinarité émerge de l'intégration structurée d'acteurs issus de la biologie au sein des équipes de conception biomimétique. Celle-ci doit conduire à la formalisation d'un objectif partagé par les membres de l'équipe et la mise en commun de leurs ressources, qu'il s'agisse de connaissance, pratiques, raisonnement ou méthodes. Il s'agit aujourd'hui d'un des objectifs d'évolution de la recherche en biomimétique. L'adaptation du cadre méthodologique permettant la mise en place de processus et d'équipes interdisciplinaires apparaît comme l'un des objectifs de nos travaux.

Enfin, la formalisation d'acteurs et d'outils transdisciplinaires issus de la combinaison des disciplines de la biologie et de l'ingénierie de la conception émerge comme un deuxième objectif à notre étude.

Ainsi, nos travaux proposent d'une part des contributions transdisciplinaires, propres au champ de la biomimétique (préconisation sur les outils et acteurs), et d'autre part des apports interdisciplinaires accompagnant les équipes dans la structuration de leurs pratiques (préconisation sur le processus).

1.4 Contexte du laboratoire de recherche

1.4.1 Écosystème Européen de la biomimétique

La biomimétique, présente depuis les années 60 en Europe, voit son développement s'accroître depuis les années 2000. L'Allemagne et son réseau de près de 100 acteurs, le BIONIKON (Bionikon, online), s'impose comme le leader académique et industriel du secteur avec près de 120 millions d'euros investis depuis le début des années 2000 (Ceebios, 2018). Le réseau NIM (Nature-Inspired Manufacturing) initié à l'université Heriot Watt, conduit également le Royaume-Uni à occuper une place importante dans l'écosystème européen.

Récemment, la France s'est attachée à rattraper son retard en multipliant les initiatives, tel que la publication d'un rapport centré sur le Biomimétisme par le Conseil Économique Social et Environnemental (CESE, 2015) ou encore par la mise en place du Centre d'études et d'expertise en biomimétisme (Ceebios) en 2014.

L'apparition de prises de positions politiques à propos du biomimétisme (Legifrance, 2016; Hamon, 2017; Ministère de la transition Écologique et Solidaire, 2016) tout comme sa couverture médiatique grandissante montre également l'intérêt croissant que porte la société française pour la bio-inspiration.

L'écosystème académique français étudiant cette thématique représente aujourd'hui plus de 175 unités de recherche d'après le Ceebios (Ceebios, 2018). Parmi ces unités, le Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI, EA 3927) de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers aborde la question de la biomimétique par le prisme de l'ingénierie de la conception.

1.4.2 Positionnement au sein du laboratoire

Expertise du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI)

Le LCPI (EA 3927) est un laboratoire traitant des problématiques liées au domaine du génie industriel défini par l'*American Institute of Industrial Engineers* comme englobant « ...la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés, constitués de personnes, matériaux, informations, équipements et énergie. Il utilise les connaissances et savoir-faire issus des sciences mathématiques, physiques et sociales, ainsi que les principes et méthodes propres à l'analyse technique et à l'ingénierie de la conception, dans le but de spécifier, prédire et évaluer les résultats découlant de ces systèmes » (American Institute of Industrial Engineers, 2018). Plus précisément, le laboratoire aborde principalement « l'optimisation du processus de conception et d'innovation » (LCPI, online).

Positionnement au sein des travaux du laboratoire

Le cœur de la recherche explicité ci-dessus se décompose en deux axes principaux :

- L'axe métiers : vise à l'enrichissement du processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et pratiques métiers (design, ergonomie, ingénierie, etc.)
- L'axe processus : ambitionne la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

Historiquement, les travaux abordant la pluridisciplinarité et plus particulièrement la biomimétique se positionnent à l'intersection de ces deux axes de recherche, conduisant le laboratoire à représenter son activité à travers la rosace ci-dessous (Figure 1.3).

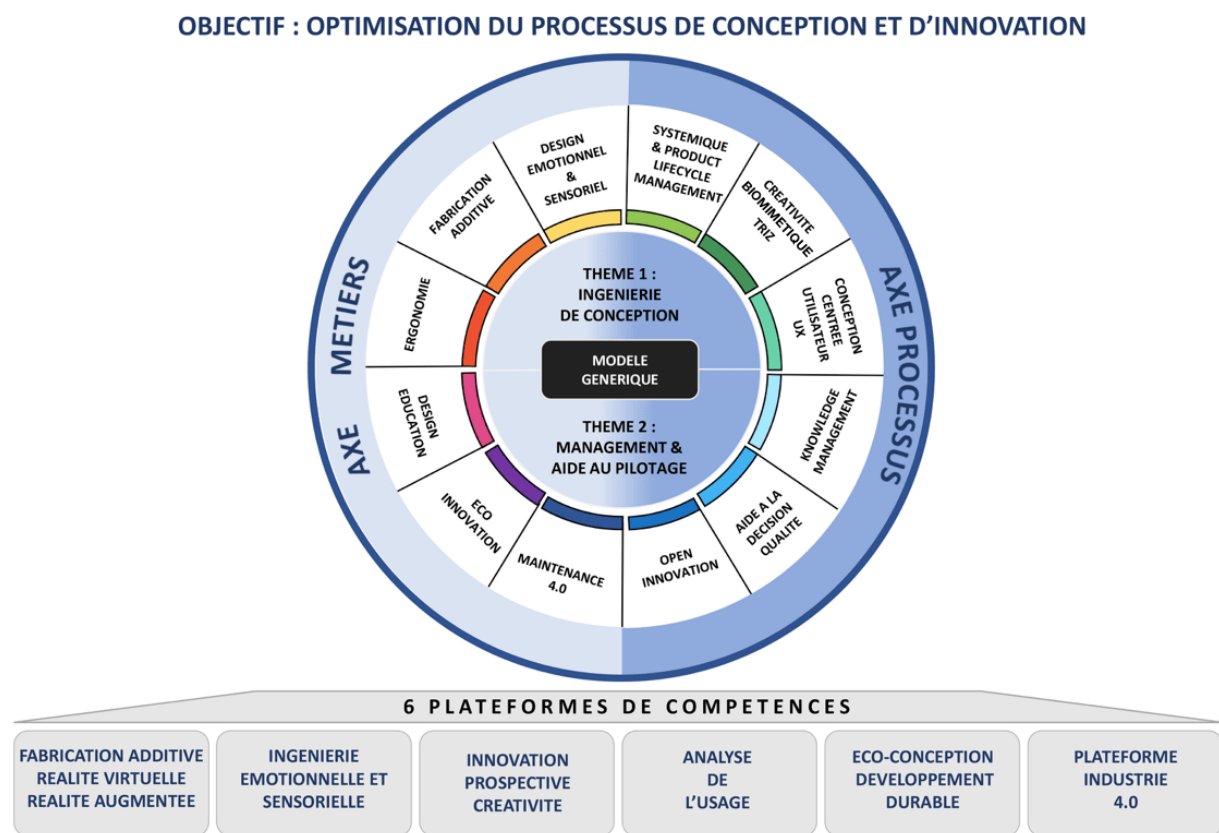


Figure 1.3 Rosace représentant les différents axes et domaines d'activités poursuivis par le LCPI

Au sein du laboratoire, nos travaux se positionnent sur le domaine de la biomimétique (vert foncé sur la figure 1.3) à travers le thème de « l'ingénierie de la conception » et poursuivent à la fois les *axes processus* et *métiers* (ce dernier n'ayant pas été traité dans les précédents travaux du laboratoire en biomimétique).

LCPI et pluridisciplinarité

Le LCPI aborde la question de la pluridisciplinarité depuis les années 90 et les travaux menés par le Pr. Améziane Aoussat (Aoussat, 1990) sur le développement d'une approche plurielle pour caractériser la pertinence en conception innovante. Ce point de départ souligne

notamment la nécessité de formaliser des méthodes liées à l'intégration de profils originaux tel que l'intégration de l'ergonome au sein des équipes de conception (Aoussat et al., 2000).

Associée à cette notion d'intégration de profils nouveaux au sein des méthodologies, vient celle de l'apprentissage et du travail collaboratif tel que décrit dans les travaux de Nicolas Maranzana (Maranzana et al., 2008; Maranzana, 2009).

Plus récemment, la pluridisciplinarité est abordée dans la thèse de doctorat de Malte Schöfer (Schöfer, 2015) avec pour but de déterminer son impact dans le cadre de l'utilisation de différentes méthodes de résolution de problème. Il choisit dans ses travaux d'interroger des profils relatifs aux sciences naturelles comme un exemple d'expertise originale, ouvrant la voie à la recherche sur la biomimétique au laboratoire.

Ces résultats montrent l'intérêt qualitatif et quantitatif de l'association entre biologistes et concepteurs durant le processus de créativité et de résolution de problèmes. Il met également en évidence l'intérêt de la modélisation pour la communication interdisciplinaire et illustre son propos par l'utilisation d'outils dérivés de la théorie russe de résolution des problèmes inventifs, ou TRIZ (Altshuller, 1984), pour modéliser les concepts associés aux sciences naturelles.

La biomimétique au LCPI

De 2013 à 2016, le LCPI est le premier laboratoire français à accueillir une thèse de doctorat sur les méthodologies de conception biomimétique. Réalisée par Pierre-Emmanuel Fayemi celle-ci s'intitule « *Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d'un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d'un outil de transfert de connaissances* » (Fayemi, 2016).

Appuyer sur les travaux antérieurs de Nathalie Lahonde (Lahonde, 2010) visant la « *formalisation d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision* », Fayemi évalue et classe les processus et outils de conception biomimétique existants. À la suite de ses analyses, il propose un processus de conception biomimétique unifié permettant au laboratoire de se pourvoir d'un socle théorique fondateur (Fayemi et al., 2017).

Les contributions de cette thèse comprennent également un outil d'aide à la décision permettant de faciliter le choix des outils au cours du processus biomimétique, le *BiomimeTree*, et un outil de modélisation des systèmes biologiques *Biomimetics Analyzer of Biologically Expertized literature for Engineers* (BABELE) (Fayemi et al., 2015), visant à faciliter la sélection de modèles biologiques d'intérêt par des concepteurs non formés en biologie.

Par ces travaux présentant la première thèse sur l'ingénierie de la conception biomimétique en France, le LCPI s'ancre au sein du paysage européen de la biomimétique. Ces premières études constituent les fondations théoriques des études présentées dans ce document et positionnent cette thèse de doctorat dans la continuité des thématiques de recherche du laboratoire (Figure 1.4).

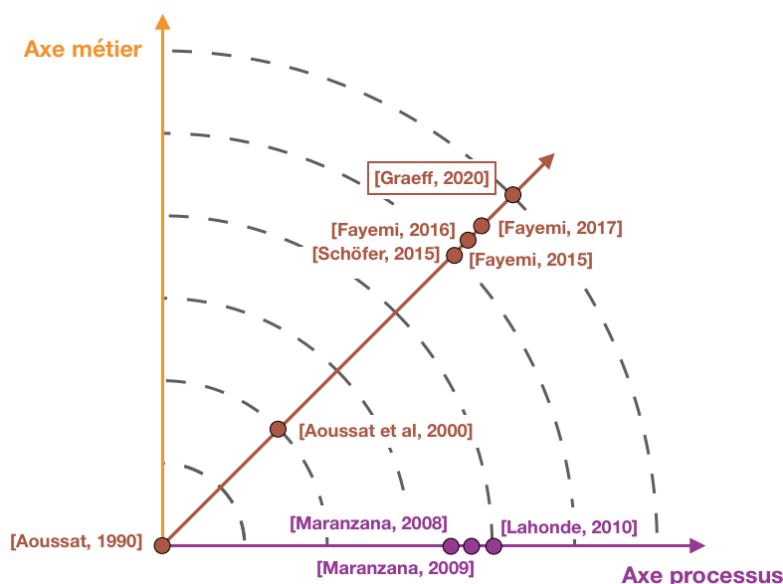


Figure 1.4 Positionnement des travaux présentés selon les axes du laboratoire

En parallèle des travaux présentés dans ce manuscrit, le LCPI accueille également une deuxième thèse sur la thématique de la bio-inspiration. Cette thèse CIFRE, en partenariat avec le Ceebios et conduite par Anneline Letard, interroge les apports des outils et raisonnements issus du designer en biomimétisme.

1.5 Enjeux des travaux

À travers les différents prismes contextualisant nos travaux, un ensemble d'enjeux sociétaux, pédagogiques, scientifiques et industriels se dégagent.

Enjeux de société, l'urgence environnementale

La société moderne se trouve aujourd'hui face à un challenge écologique considérable : la modification de l'écosystème sur lequel elle est construite. Sans avoir la prétention de répondre à tous les problèmes posés par le couperet environnemental, la bio-inspiration peut s'avérer être un formidable outil de sensibilisation et un moteur de cette transition nécessaire.

L'enjeu ici est donc de mettre en place des approches d'innovation efficaces (biomimétique) et conduisant à recentrer l'Homme comme une partie intégrante et intégrée du monde vivant (biomimétisme).

Concevoir en transférant les stratégies du vivant et les règles de conception propre à la Nature apparaît comme un pas fédérateur vers un futur dans lequel l'Homme pourra poursuivre son développement sociétal en symbiose avec la biosphère².

Enjeux scientifiques, briser les silos entre biologie et ingénierie

Bien qu'elles aient un impact important au sein de leurs communautés spécialisées, une large majorité des publications traitant du savoir biologique descriptif ne dépassent les frontières

² « Ensemble des écosystèmes de la Terre, correspondant à la mince couche (20 km max.) de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la lithosphère où la vie est présente. » (Dictionnaire Larousse)

des sciences fondamentales que par des applications directes sur les organismes biologiques comme en médecine ou en agroalimentaire. Un des enjeux de la biomimétique est la valorisation de ses savoirs théoriques dans d'autres champs afin d'en faire un moteur de l'innovation.

Réciproquement, il est à considérer que la modélisation des processus biologiques par une approche d'ingénierie soit une source de nouvelles hypothèses de recherche pour les biologistes eux-mêmes (Helfman Cohen et al., 2016).

Les apports bidirectionnels ici préconisés peuvent amener à un décloisonnement de ces sciences en une association à bénéfice réciproque, la *symbiose*³ en biologie. La communication entre ces disciplines, la coopération et la mise en commun des savoirs apparaît en elle-même comme une formidable source de nouvelles connaissances, voire de nouveaux champs transdisciplinaires.

Enjeux industriels, du potentiel technique aux nécessités méthodologiques

Le potentiel technique et innovant de la biomimétique a été démontré à de nombreuses reprises dans la littérature (Keshwani et al., 2017; Ahmed-Kristensen et al., 2014; Hwang et al., 2015; Bar-Cohen, 2006). Les enjeux industriels de ces travaux de thèse portent donc plutôt sur la capacité de l'ingénierie de la conception à faire de la biomimétique une stratégie standardisée, facile à mettre en place, garantissant des résultats et durable dans le temps. En d'autres termes, l'enjeu est de diminuer les risques associés à cette stratégie d'innovation et la rendre concrètement accessible aux industriels par le développement de l'axe métier et processus.

Enjeux pédagogiques, nécessité d'un changement de référentiel

Au vu des défis précédemment évoqués, qu'ils soient sociétaux, scientifiques ou industriels, la place de la formation académique et professionnelle apparaît fondamentale.

Il n'existe aujourd'hui en France que très peu d'établissements prodiguant des modules de formations associées à ces problématiques (8 en 2017) (Ceebios, 2017b). En janvier 2020, le premier « *master of science* » français sur la conception biomimétique voit le jour, le master « *Nature-Inspired Design*[®] » de l'école de design ENSCI les ateliers.

Malgré ce premier pas encourageant, le manque de cursus en France perdure et conduit à un manque de profils formés à ces approches, constituant un des freins principaux au développement de la biomimétique.

Un certain nombre de contributions de ce travail de doctorat auront ainsi pour objectif de participer à l'élaboration de nouvelles formations. Par ailleurs, un ensemble de missions d'enseignement a été mené au cours de ces trois ans de recherche, visant à partager le potentiel de l'approche, présenter les avancées scientifiques et mettre à la disposition de futurs professionnels un certain nombre d'outils biomimétiques.

³ « Association étroite de deux ou plusieurs organismes différents, mutuellement bénéfique, voire indispensable à leur survie » (Dictionnaire Larousse)

1.6 Conclusion sur le contexte de nos travaux

À travers la présentation du contexte lié à cette thèse de doctorat, le cadre au sein duquel se placent ces travaux de recherche est établi.

Celui-ci dépend de critères scientifiques, académiques, industriels et sociétaux précédemment identifiés, critères qui guideront la structuration du raisonnement formalisé tout au long de cette thèse. Le positionnement de ces travaux au sein de ce référentiel permet leur incorporation au sein des écosystèmes scientifiques et industriels identifiés et leur cohérence académique et sociétale.

Les multiples enjeux qui en découlent appuient la pertinence de l'approche et présentent un ensemble d'objectifs associés à nos travaux.

Dans la partie suivante, nous aborderons l'état de l'art afin de poser les bases scientifiques de la recherche présentée dans ce manuscrit et de conduire à la formulation d'une problématique permettant de répondre aux enjeux précédemment identifiés.



CHAPITRE 2

ETAT DE L'ART



2.1 Structure de l’état de l’art

Ce deuxième chapitre vise à présenter l’ensemble des éléments issus de la littérature supportant le raisonnement scientifique suivi dans nos études. À travers la description des concepts, théories, processus et outils préexistants, cet état de l’art doit permettre au lecteur de juger de la pertinence de nos travaux dans le contexte scientifique actuel. Celui-ci conduira également à l’identification de freins menant, dans le chapitre 3, à la problématique de recherche de nos travaux (Chapitre 3, partie 3.1).

La thématique centrale de cette thèse de doctorat est la formalisation des approches méthodologiques biomimétiques. Le positionnement scientifique décrit dans le chapitre 1 (Chapitre 1, partie 1.3) nous invite à aborder trois champs scientifiques structurants.

L’ingénierie de la conception (Chapitre 2, partie 2.2) émerge comme le prisme principal à travers lequel ces travaux sont construits. La mise en évidence des principaux concepts, théories et processus qui lui sont associés contribue à la compréhension du fondement scientifique et méthodologique conduisant à la formalisation de la biomimétique.

Dans un second temps, les sciences du vivant (Chapitre 2, partie 2.3) sont introduites afin d’explicitier un ensemble de concepts clés. Ceux-ci détaillent d’une part les mécanismes conduisant la Vie à se développer malgré d’innombrables contraintes, et décrivent d’autre part un ensemble de propriétés des systèmes vivants leur permettant de résoudre les problèmes auxquels ils se sont adaptés.

Enfin, l’état de l’art sur les approches biomimétiques (Chapitre 2, partie 2.4) expose les spécificités conceptuelles et méthodologiques associées à cette stratégie d’innovation. La description de ses limites actuelles et des récents travaux visant à leurs résolutions conclut ce chapitre par la formalisation de questions scientifiques restant à résoudre (Figure 2.1).

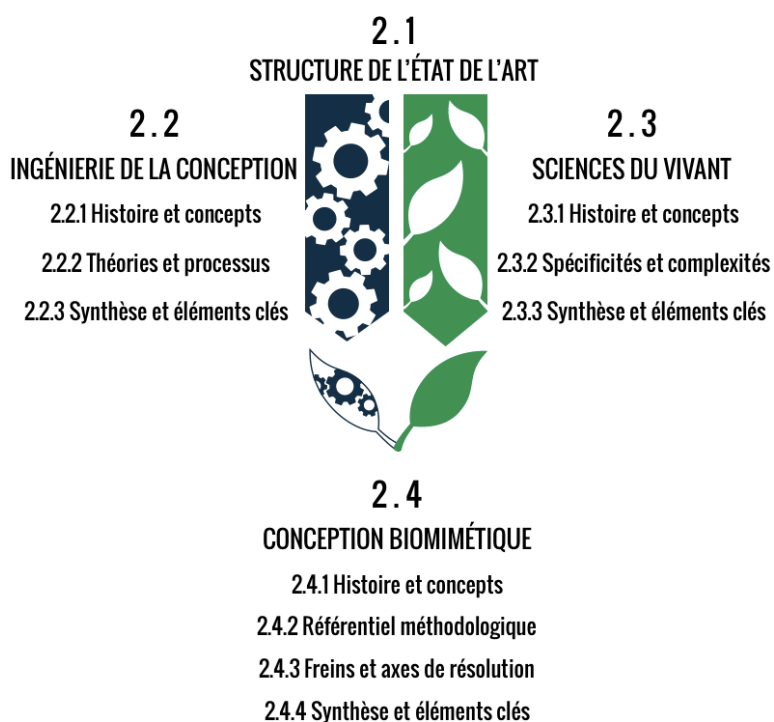


Figure 2.1 Structure de l’état de l’art

Afin de faciliter la lecture, les chapitres 4, 5 et 6, cœur de ce manuscrit, débiteront également par la présentation d’un ensemble de travaux issus de la littérature scientifique, spécifique à l’hypothèse ou au chapitre traité et s’ajoutant à cet état de l’art.

2.2 Ingénierie de la conception

Comme explicité dans le chapitre 1, l’enjeu principal de ces recherches est de contribuer à la formalisation de méthodologies encadrant la conception bio-inspirée (Chapitre 1, partie 1.5). Dans cette optique, l’ingénierie de la conception émerge comme le champ d’étude scientifique structurant le raisonnement présenté dans ce manuscrit. La description de l’histoire, des concepts, des théories et des processus associés à celui-ci établit une première partie des fondements théoriques nécessaires au développement d’une dynamique scientifique propre et cohérente (Figure 2.2).

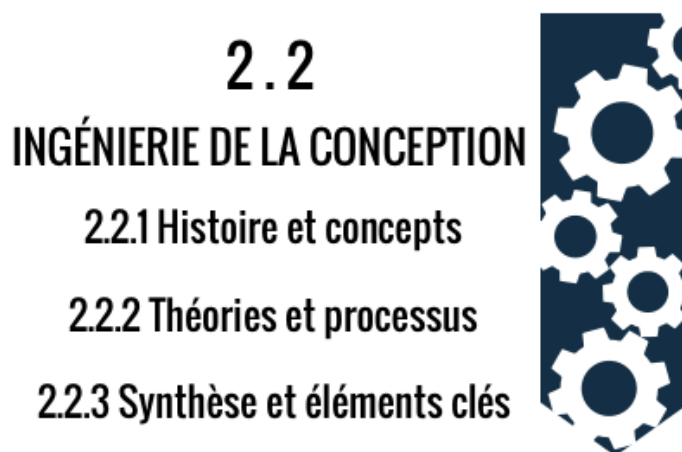


Figure 2.2 Structure de l’état de l’art sur l’ingénierie de la conception

2.2.1 Histoire et concepts

À travers l’émergence historique de l’ingénierie de la conception, cette partie souligne les concepts clés associés à ce champ d’étude. Plus particulièrement les éléments constitutifs du cadre de la conception sont identifiés afin de conduire aux théories, processus et outils, produits de la réflexion des acteurs de cette démarche scientifique.

Pour prévenir toute confusion, nous précisons que le terme anglais « *design* », entendu en tant que champ d’étude, correspond au français « *conception* » (Cross, 2001) et non pas au « *design* » français. Le terme français « *design* » est, lui, le plus souvent associé au champ esthétique du design (artistique, graphique, etc.) (Letard et al., 2018) et n’est donc pas un équivalent du terme « *design* » en anglais.

2.2.1.1 Développement historique de la recherche sur la conception

Bien que la première référence à l’ingénierie de la conception soit considérée comme celle de Zwicky en 1948 (Cross, 1993), c’est dans les années 60 que celle-ci apparaît comme un

véritable sujet de recherche internationale. Les raisons de son émergence sont étroitement liées à un contexte historique d’extrêmes tensions.

En premier lieu, l’effort de recherche considérable déployé pendant la seconde guerre mondiale génère un ensemble de nouvelles méthodes notamment basées sur le calcul scientifique et l’informatique. Celles-ci visent à faciliter la prise de décision par la modélisation et la quantification des risques.

D’autre part, les années 60 voient deux « superpuissances » (Hallowell, 1945), l’URSS et les USA, s’affronter dans une course à l’innovation et à la domination par la technologie. Deux systèmes foncièrement différents s’affrontent ainsi dans leur façon de concevoir. L’étude et la formalisation d’approches optimisées, systématiques voir scientifiques de la conception s’imposent alors comme des avantages stratégiques (Cross, 2001).

C’est dans cette effervescence que se tient en 1962 la « *Conference on Design Methodology* » à Londres, plus tard considérée comme le rassemblement fondateur de l’ingénierie de la conception (Cross, 1993). Son succès international conduit, après une seconde conférence à Birmingham en 1965, à la création en 1966 de la Design Research Society (DRS), « *société savante engagée à promouvoir et développer la recherche sur la conception* ». La structuration des acteurs en un réseau de recherche cohérent permet la confrontation et l’harmonisation du référentiel scientifique. Encore aujourd’hui, cette organisation est considérée comme un des centres névralgiques de la recherche sur l’ingénierie de la conception et poursuit sa promotion à travers le monde (Design Research Society, online).

Le contexte particulièrement propice des *Trente Glorieuses* (1945-1975) est le théâtre d’une formidable croissance industrielle durant laquelle les premiers ouvrages traitant de la méthodologie de la conception sont publiés (Hall, 1962; Asimow, 1962; Alexander, 1964; Archer, 1964; Simon, 1969; Jones, 1970). Cette première génération de praticiens, chercheurs, professeurs, et plus généralement, penseurs de l’ingénierie de la conception, pousse à la rationalisation de la conception comme une science à part entière, « *a science of design* » (Simon, 1969). À travers ces travaux émergent également un ensemble de réflexions liées aux approches de résolution de problèmes et de créativité. Plus spécifiquement, Gordon décrit en 1961 la « *Synectics* » (Gordon, 1961), approche qui ouvre une première porte sur le raisonnement par abstraction et analogie, cœur des processus de conception biomimétique.

Devant l’absence de résultats probants à ces premiers travaux et dans la vague des bouleversements sociétaux accompagnant l’avènement de la troisième révolution industrielle des années 70 (Cross, 2001), la formalisation de l’ingénierie de la conception, notamment son approche scientifique, est entièrement remise en question. Ce bouleversement est d’autant plus profond que les pionniers eux-mêmes reviennent sur leur pas. En particulier, Alexander et Jones rejettent les travaux fondateurs et abandonnent l’approche scientifique de la conception (Alexander, 1971; Jones, 1977). Ils jugent qu’elle fige inutilement tout ce qu’elle touche dans un cadre strict centré sur le raisonnement logique.

« *Je n’aime pas le langage machine, le comportementalisme, la tentative continue de fixer la vie au sein d’un cadre logique* » (Jones, 1977).

Les théories et méthodologies de la conception tendent alors à mieux représenter la pratique du terrain qui met à mal la rigidité des processus établis. Les travaux de Simon (Simon, 1969) soulignent la nécessité de structurer l’ingénierie de la conception en déterminant l’espace des problèmes considérés, les critères d’évaluation des solutions et de façon plus générale un cadre permettant de guider et délimiter la démarche tout en laissant une flexibilité nécessaire au caractère évolutif et créatif d’une solution. L’intervention d’experts permettant de résoudre des problèmes techniques précis et de stimuler une conception innovante est également abordée. À travers cette notion d’*espace des solutions*, Simon ouvre la voie à un raisonnement vers des solutions dites « *appropriées* » plutôt qu’« *optimales* ».

Dans la même logique, Rittel (Rittel et al., 1973) fait état de l’échec de la première génération, avançant notamment comme explications principales le « *dilemme de la rationalité* » et souligne la mauvaise définition des problèmes étudiés (« *wicked problems* »). Il propose alors un ensemble d’axes de réflexion poussant à la création de processus, méthodes et outils de seconde génération pour répondre aux « *wicked problems* » de la conception. À travers ses travaux, Rittel émancipe la nouvelle génération et fait apparaître la nécessité d’intégrer des acteurs extérieurs, notamment les utilisateurs, qui seront considérés à terme comme des partenaires actifs permettant de mieux définir les problèmes. La tendance à l’intégration de l’utilisateur se poursuit avec le concept du besoin utilisateur pouvant mener à la redéfinition du problème à résoudre (Simon, 1973).

Sur ces nouvelles bases, l’ingénierie de la conception prend un essor considérable dans les années 80. La communauté internationale poursuit sa structuration et les premiers journaux scientifiques consacrés à la recherche en conception apparaissent, *Design Studies* en 1979, *Design Issues* en 1984 et *Research in Engineering Design* en 1989.

En Europe, l’Allemagne s’impose sur le devant de la scène internationale avec la création par Vladimir Hubka du *Workshop-Design-Konstruktion* (WDK) en 1980, devenant *Design Society* en 2000 (Design Society, 2016). Avec l’établissement de ces supports institutionnels, la recherche explose et un grand nombre d’ouvrages fondateurs de l’ingénierie de la conception moderne sont publiés (Penny, 1970; Cross, 2008; Suh, 1990; Pahl et al., 2007; French, 1985; Altshuller, 1984). Cette profusion de savoirs donne également lieu à la mise en place de cycles de conférences internationales, telle que l’*International Conference on Engineering Design* (ICED) instaurée par le WDK en 1981. Ces événements visent à stimuler les échanges et la diffusion des travaux, tout en asseyant l’ingénierie de la conception dans son approche scientifique.

Aux États-Unis, la poussée européenne se répercute par l’intermédiaire des publications et des conférences. En 1988, le cycle des conférences *Design Theory and Methodology* (DTM) est lancé par l’*American Society of Mechanical Engineers*. Le réseau ainsi établi stimule l’effort de la communauté scientifique internationale.

Après les années 80 et l’expansion de l’ingénierie de la conception, un nouveau phénomène émerge. La première génération de concepteurs mettait l’ingénieur et le produit au centre, la seconde génération a recadré la construction des méthodologies de conception autour de l’utilisateur. La troisième génération pousse cette approche et souligne

l’importance d’une meilleure intégration du processus de conception pour répondre aux besoins et attentes de l’utilisateur.

La prise en compte de nouvelles disciplines dès les phases amonts du processus de conception, telle que l’ergonomie, la qualité, la maintenance, le marketing, etc., s’impose comme une nécessité afin de répondre à l’évolution de la demande (Aoussat et al., 2000). Ces nouveaux apports permettent aux concepteurs d’adapter les méthodologies de conception aux défis du 21^{ème} siècle en s’attaquant à la recherche d’innovations complexes, notamment associées aux nouvelles technologies, et ce dans un cadre évoluant avec une extrême rapidité.

C’est dans cette dynamique qu’apparaît la *conception concourante* (Sohlenius, 1992; Prasad, 1996), visant à traiter dans un même temps un ensemble d’éléments dépendant des différentes étapes du cycle de vie d’un produit pour accélérer sa conception. Dans le même temps émerge la *conception séquentielle* (Prasad, 1996), découpant la méthodologie de conception en étapes assignées à des experts pour répondre à la complexité des attentes.

Les années 2000 voient ces approches donner naissance à la conception collaborative (Kvan, 2000), issue de la nécessité de multiplier les acteurs en conception concourante, et à la gestion du cycle de vie (Saaksvuori et al., 2008), issue du besoin de liaison et d’anticipation entre les étapes de la conception séquentielle.

La course à une innovation toujours plus rapide associée à la complexification des produits et donc des processus de conception, conduit à une spécialisation des entreprises et de leurs méthodologies. Inévitablement, différentes problématiques telles que la restriction du champ d’expertise et l’augmentation des points de fixation⁴ émergent comme des freins à l’innovation.

Face à ces freins, l’innovation ouverte (Chesbrough, 2006) explore la voie de la coopération entre les entreprises. Celle-ci permet la mise en place de travaux croisés et d’échanges de technologies qui stimulent l’innovation tout en offrant également un accès, direct ou indirect (licences, etc.), à de nouveaux marchés.

La décennie actuelle est le théâtre d’une évaluation massive des différentes approches de la conception. Avec l’augmentation du nombre de journaux et de conférences dédiés à l’ingénierie de la conception, de même que l’internationalisation de la recherche, la prolifération des années 90 et 2000 conduit en effet à de nouveaux écueils.

Le premier réside dans la quantité de théories et de méthodologies développées (sans même parler des outils), menant à des difficultés liées à la sélection de celles-ci et à l’émergence de méthodes d’aide au choix des méthodes (Lahonde, 2010). Ces prises de décisions apparaissent étroitement liées à l’appréciation des options. La tendance actuelle est donc aux comparaisons, tests et évaluation des différentes méthodologies, processus, méthodes et outils. La poursuite d’une universalité des modèles est toujours profondément ancrée et la combinaison de différentes méthodologies dans cette optique est à prévoir.

⁴ Il s’agit de la tendance des équipes à limiter leur raisonnement créatif en reposant leurs idées (en « fixant ») sur des solutions existantes, et plus généralement sur le savoir spécifique à un problème donné.

Le second écueil émerge du manque de valorisation des travaux et de l’inertie du passage de la recherche à la pratique. Ainsi, les praticiens n’utilisent que peu de méthodologies dans les faits. Les professionnels n’ont pas les moyens, l’expertise ou le recul pour choisir et parfois même pour comprendre les théories créées. Un profond décalage entre le chercheur en ingénierie de la conception et le praticien apparaît. La génération de méthodologies plus proches des pratiques réelles de la conception reste donc au centre des attentes (Chakrabarti et al., 2014; Blessing et al., 2016).

Outre ces différents aspects, la formalisation des éléments structurant l’ingénierie de la conception permet aujourd’hui son intégration sur un ensemble de nouveaux champs dû à la croissance des sciences de l’information, du numérique, de la cognition et de l’écologie (Hatchuel et al., 2018).

Comme souligné par Cross, les travaux de recherche au cours des cinquante dernières années ont par ailleurs conduit à la croissance des enseignements associés à la conception (Cross, 2018). Cet aspect fondamental structure les approches des acteurs de la conception et apparaît comme le levier principal de transfert de connaissance depuis la recherche vers la pratique.

Ce rapide retour sur l’histoire de l’approche scientifique de l’ingénierie de la conception souligne les leviers de son émergence, les diverses problématiques ayant ponctué son développement ainsi que les concepts principaux la structurant. La description d’un ensemble de ces concepts dans la partie suivante conduit à la présentation du référentiel conceptuel associé aux sciences étudiant l’ingénierie de la conception.

2.2.1.2 Référentiel conceptuel des sciences étudiant l’ingénierie de la conception

Cette partie présente sous la forme d’une liste de définition les principaux concepts associés aux sciences sur l’ingénierie de la conception. Pour chacun d’entre eux, quelques-unes des définitions existant dans la littérature sont présentées avant de préciser celles considérées dans nos travaux.

Avec l’historique précédemment décrit, le concept d’**ingénierie de la conception** apparaît comme variant avec l’évolution des approches. Tel que décrit par Hubka (Hubka et al., 1987; Hubka et al., 1996), un grand nombre de définitions de l’ingénierie de la conception sont proposées.

« L’ingénierie de la conception est un processus effectué par les humains, aidés de moyens techniques, à travers lequel de l’information sous la forme de besoins est convertie en information sous la forme de descriptions de systèmes techniques, de telle manière que ces systèmes techniques répondent aux besoins de l’humanité. » (Asimow, 1962) (Traduit par l’auteur)

« La création d’une solution synthétique sous la forme d’un produit, processus ou système qui répond à des besoins perçus par la concordance entre les exigences fonctionnelles dans le domaine fonctionnel et les paramètres de conception dans le domaine physique, grâce à la sélection appropriée des paramètres de conception satisfaisant les exigences fonctionnelles » (Suh, 1990) (Traduit par l’auteur)

Chapitre 2 – État de l’art

Cette diversité rend le concept peu clair dans la mesure où selon le prisme à travers lequel il est décrit, il peut s’agir : d’un art, d’une approche de résolution de problèmes, d’une démarche de prise de décision, d’une science appliquée, d’une approche de sélection de modèles et d’ajustement, d’une collecte et manipulation d’informations, etc. (Hubka et al., 1996).

Afin de poser un concept de référence sur lequel raisonner, nous choisissons la définition de l’*Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET)* qui décrit l’ingénierie de la conception comme :

« ... le processus de conception d’un système, composant ou processus visant à répondre à un besoin désiré. Il s’agit d’un processus de décision (souvent itératif), au sein duquel les sciences fondamentales, les mathématiques et les sciences de l’ingénierie sont utilisées pour transformer de façon optimale pour atteindre un objectif défini. » (ABET, 2013) (Traduit par l’auteur).

L’ingénierie de la conception sera donc considérée comme un champ et **la conception** sera considérée comme une pratique, une activité (Maranzana, 2009). Par l’évolution de cette pratique, la relation entre le champ de l’ingénierie de la conception et l’approche scientifique évolue, conduisant à l’émergence d’un ensemble de concepts.

Le premier, essentiellement décrit par Cross, est **la conception scientifique (« Scientific Design »)** qui vise à souligner dans l’approche moderne de la conception la place centrale des données scientifiques. La conception scientifique correspond à la pratique de la conception moderne décrite dans l’historique (Chapitre 2, partie 2.2.1.1).

« La conception scientifique fait référence à la conception moderne et industrielle basée sur des savoirs scientifiques, utilisant à la fois un mélange de méthodes de conception intuitives et non intuitives. En cela elle se distingue de la conception préindustrielle ciblée sur l’artisanat. » (Cross, 2001). (Traduit par l’auteur)

Le deuxième concept, est **la science de la conception (« Design science »)**. Sans faire l’unanimité dans sa nature (Cross, 2018) et sa pertinence, *« L’acte de concevoir n’est pas lui-même une activité scientifique et ne le sera jamais »* (Grant, 1979), la science de la conception est un concept qui vise à rassembler en une science l’ensemble des connaissances associées à la pratique de la conception. Hubka définit la science de la conception comme suit :

« L’ingénierie de la conception a besoin d’une grande quantité de savoir, que nous pouvons nommer comme la science de la conception, une étude scientifique de l’activité de conception dans son contexte. Celle-ci comprend une collection de savoirs connectés de manière logique dans le domaine de la conception et contient des concepts d’informations techniques et de méthodologies de conception. » (Hubka et al., 1987) (Traduit par l’auteur)

Nous prendrons pour référence la synthèse plus restrictive qu’en fait Cross :

« La science de la conception fait référence à une approche de la conception qui serait explicitement organisée, rationnelle et entièrement systématique notamment grâce à l’utilisation de processus et de méthodologies de conception. Elle se distingue de la conception scientifique dans la mesure où elle ne fait pas qu’utiliser les savoirs scientifiques comme des outils durant la pratique de la conception. Elle considère ainsi que la pratique de la conception peut être vue, d’une certaine manière, comme une démarche scientifique en elle-même. » (Cross, 2001). (Traduit par l’auteur)

La science sur la conception (« Science of design ») est définie comme une approche méta de la science de la conception, tel que décrit par Gasparski et Strzalecki :

« la science sur la conception doit être comprise, de la même manière que la science sur la science, comme une fédération de sous-disciplines ayant la conception comme sujet de leurs intérêts cognitifs »
(Gasparski et al., 1990). (Traduit par l’auteur)

Cross établit que la science sur la conception peut être vue comme la méthodologie de la conception « *l’étude des principes, pratiques et procédures de la conception* » (Cross, 2001) ou encore selon Adams comme « *une approche prescriptive indiquant comment concevoir* » (Adams, 2015)

Dans ce manuscrit, nous considérerons comme référence la définition étendue de Cross :

« La science sur la conception fait référence à l’ensemble des travaux qui abordent l’amélioration de la compréhension de la conception à travers des méthodes de recherche considérées comme ‘scientifiques’ (c.à.d. stables entre les études et fiables). » (Cross, 2001) (Traduit par l’auteur)

La science sur la conception diffère des deux précédents concepts dans la mesure où elle vise l’étude et la réflexion scientifique associées aux théories permettant la mise en place de la science de la conception.

À travers la mise en place du référentiel conceptuel encadrant la relation entre science et l’ingénierie de la conception, nous pouvons placer nos travaux à l’interface entre ces différents concepts. Par l’analyse et la compréhension issues de la science sur la conception, un ensemble de préconisations et d’optimisations des approches procédurales de la conception est établi afin de faciliter la pratique scientifique de la conception.

Ces fondements théoriques permettent également l’apparition d’un ensemble de concepts lié aux productions de la recherche scientifique sur l’ingénierie de la conception et décrit dans la partie suivante.

2.2.1.3 Référentiel conceptuel structurant l’ingénierie de la conception

Les concepts de théories, méthodologies, méthodes et outils de conception apparaissent parfois difficiles à distinguer. En prenant en référence les travaux de Lahonde (Lahonde, 2010), la question de leur classification apparaît alors primordiale.

Les travaux de synthèse et de comparaison de Tomiyama (Tomiyama et al., 2009; Tomiyama et al., 1997) permettent la proposition d’une classification des théories et méthodologies de conception selon l’axe Abstrait/Concret et l’axe Général/Particulier (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Classification des théories et méthodologies de conception (Tomiyama et al., 1997)

	Générique	Spécifique
Abstrait	Théorie de la conception	Méthode basée sur les mathématiques
Concret	Méthodologie de conception	
	Méthodologie poursuivant un but concret Processus de conception	Méthode de conception

On définira le premier axe comme celui représentant le niveau d’abstraction associé aux théories et méthodologies. Dans le cas d’un haut niveau d’abstraction, le cœur du raisonnement se porte sur les éléments théoriques extraits de leur mise en pratique, on parle de **théorie de la conception**. Décrite par Adams comme des approches « *descriptives* » (Adams, 2015), elles apportent un cadre conceptuel à la réflexion entourant la pratique de la conception. Elles la délimitent et posent un ensemble de lois et d’hypothèses fondamentales, axiomes sur lesquels sont construites les méthodes de conception. Parmi ces théories se trouvent la *General Design Theory* (Yoshikawa, 1981), la *Universal Design Theory* (Grabowski et al., 1999) ou encore la théorie C-K (Concept-Knowledge) (Hatchuel et al., 2003). Établis à un haut niveau d’abstraction elles sont parfois difficiles à appréhender dans la pratique de la conception.

À un niveau plus concret, les **méthodologies de conception** décrites par Adams comme « *prescriptives* » (Adams, 2015) correspondent à la science des méthodes. Elle les discute, les classe et guide les concepteurs dans leur approche de la pratique de la conception. Lahonde (Lahonde, 2010) classe notamment la conception systématique de Pahl and Beitz (Pahl et al., 2007) parmi les méthodologies de conception. Les méthodologies de *Design for X*, tel que *le design for additive manufacturing* (Thompson et al., 2016), apparaissent alors comme des **méthodologies orientées vers un objectif précis**.

Enfin, les **processus** s’intéressent à l’organisation des étapes génériques à suivre durant la pratique de conception, telle que dans l’ingénierie concurrente (Prasad, 1996).

Le second axe aborde la généralité et apparaît logiquement comme évoluant avec la taille du domaine d’application. La tendance visant la conception d’approches génériques est contrebalancée par le besoin d’approches adaptées à des cas particuliers et donc spécifiques.

Ces théories et méthodologies de conception posent ainsi un cadre conceptuel dans lequel la pratique de la conception est décrite et construite. En écho à la relation entre science et ingénierie de la conception décrite en partie 2.2.1.3, les objectifs de ces théories sont doubles. Il s’agit d’une part de formalisations conceptuelles et d’autre part de l’accompagnement des concepteurs lors des pratiques de conception.

Afin de passer des hauts niveaux conceptuels aux niveaux pratiques, les théories comprennent des **méthodes** qui proposent « *une démarche cherchant à définir l’ordonnancement de toutes les activités à mener à bien pour atteindre un objectif final* » (Lissandre, 1990) cité par Lahonde (Lahonde, 2010). La méthode se pose comme une suite d’étapes spécifiques visant à atteindre un objectif de conception donné grâce aux savoirs, savoir-faire et aux outils du concepteur.

Ces **outils** permettent aux praticiens de franchir les différentes étapes déterminées par la méthode, agissant comme les « *briques élémentaires d’une méthodologie permettant d’aboutir à des résultats concrets* » (Schöfer, 2015).

La distinction entre méthodes et outils est parfois remise en question (Cross, 2008) mais nous choisissons ici de représenter une relation hiérarchique entre ces deux concepts pour la simple raison qu’une méthode peut faire intervenir plusieurs outils. La hiérarchie classifiant ces différents concepts est présentée en Figure 2.3.

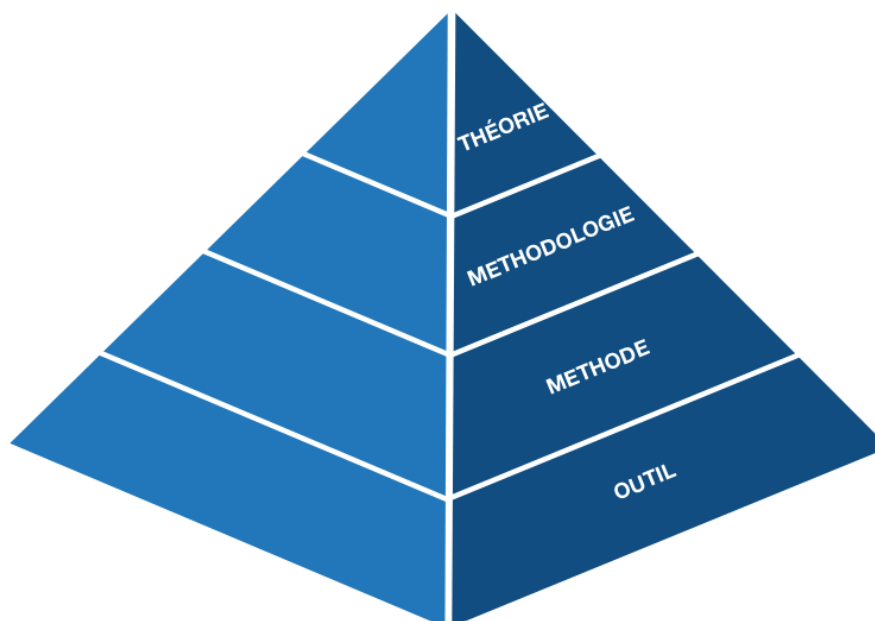


Figure 2.3 Classification des concepts associés aux théories de conception, adaptée de Lahonde (2010)

Sans structurer ces différents niveaux de manières imperméables, ce prisme de lecture permet de définir les concepts associés à l’ingénierie de la conception.

Comme établi précédemment, un ensemble de méthodologies vise à favoriser le caractère innovant de la conception. Les concepts encadrant ces approches sont présentés dans la partie suivante.

2.2.1.4 Référentiel conceptuel de l’innovation en ingénierie de la conception

Comme explicité dans le *Manuel d’Oslo* publié par l’OCDE (OCDE, 2018b), l’innovation et l’ingénierie de la conception sont étroitement liés. Une innovation est définie comme suit :

« Une innovation n’est pas seulement une idée nouvelle ou une invention. Elle doit être mise en œuvre soit directement, soit en étant fournie à des tierces parties, entreprises, individus ou organisations, qui en font usage. Les effets économiques et sociaux des inventions et des idées dépendent de la diffusion et de l’adoption des innovations associées. En outre, l’innovation est une activité dynamique et universelle qui éclot dans toutes les branches d’une économie, et non la prérogative du seul secteur des entreprises.

D’autres types d’organisations, des individus aussi, apportent fréquemment des changements à des produits ou des processus, et génèrent, collectent et diffusent des connaissances nouvelles qui présentent un intérêt pour l’innovation. » (OCDE, 2018b) (Traduit par l’auteur)

Quatre sujets principaux d’innovation sont distingués par l’OCDE (OCDE, 2018b) :

- L’innovation produit : « *L’introduction d’un bien ou d’un service nouveau.* »,
- L’innovation de procédé : « *La mise en œuvre d’une méthode de production ou de distribution nouvelle ou sensiblement améliorée.* » Définition à laquelle nous ajouterons l’axe d’innovation sur les personnes impliquées dans les procédés ciblés, « *people innovation* » telle que décrite par Knight (Knight, 1967) et reprise par Rowley (Rowley et al., 2011),

- L'innovation de commercialisation : « *La mise en œuvre d'une nouvelle méthode de commercialisation impliquant des changements significatifs de la conception ou du conditionnement, du placement, de la promotion ou de la tarification d'un produit.* »
- L'innovation d'organisation : « *La mise en œuvre d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures de la firme.* »

Outre les sujets d'innovation, l'innovation en elle-même est caractérisable. Notamment, le degré de nouveauté peut être considéré comme un critère discriminant.

On distinguera ainsi les innovations incrémentales (Dewar et al., 1986), proposant des modifications apportées à un concept préexistant (ex : un rasoir avec 3, puis 4, puis 5 lames), des innovations radicales (Dewar et al., 1986), proposant un changement fondamental du concept (ex : rasoir à lame, puis rasoir laser).

La capacité des entreprises à innover, et donc à concevoir des produits, des organisations, des processus ou des moyens de commercialisation nouveaux menant à des gains économiques, est un enjeu central sur le marché moderne ultra-concurrentiel.

« L'innovation représente le processus de renouvellement de base de toute organisation. À moins que celle-ci ne change son offre et la façon dont elle crée et met à disposition cette offre, elle met en jeu sa survie et ses perspectives de croissance » (Bessant et al., 2005) (Traduit par l'auteur)

Ce lien entre innovation et survie des entreprises trouvera un écho tout particulier dans les mécanismes de survie des êtres vivants, parallèle qui sera synthétisé en partie 2.3.4.

2.2.1.5 Synthèse sur le cadre conceptuel de l'ingénierie de la conception

La mise en place du référentiel associé à la relation entre science et ingénierie de la conception d'une part et à l'approche conceptuelle des constituants de l'ingénierie de la conception et de l'innovation d'autre part, structure le champ au sein duquel notre étude se développe.

Du fait de sa nature variable et de la quantité de travaux de recherche parallèles, complémentaires et/ou contradictoires, l'ingénierie de la conception apparaît comme un sujet en constante évolution.

Après avoir mis en place le cadre conceptuel considéré dans nos travaux, un ensemble de théories et processus de conception est présenté.

2.2.2 Les théories et processus de conception

L'objectif de cette partie est la présentation de théories qui apparaissent clés dans la compréhension du développement de la biomimétique. L'idée n'est donc pas ici de présenter toutes théories existantes en ingénierie de la conception mais de donner aux lecteurs une idée plus précise de la diversité de celles-ci tout en ciblant notre présentation sur les éléments permettant la compréhension des démarches à venir.

2.2.2.1 Théories et méthodologies de la conception.

Les théories seront ici présentées selon un ordre chronologique.

La synectique

La synectique, proposée par W. J. J. Gordon et J.M. Prince au sein du cabinet Arthur D. Little en 1961, correspond à la théorisation du processus de créativité (Gordon, 1961). Le but de cette approche est de stimuler l’activité créative du concepteur en le rendant conscient des processus cognitifs mis en jeu lors de ces étapes fondamentales du processus de conception. Cette théorie repose sur trois hypothèses :

- De manière transversale, la première hypothèse porte sur le processus créatif de l’homme et postule que celui-ci est plus lié à la composante émotionnelle et à l’irrationalité qu’aux ressources intellectuelles ou rationnelles.
- Gordon formule la seconde hypothèse suivante : « *L’efficacité créatrice des individus peut être augmentée de façon marquée s’ils comprennent les processus psychologiques par lesquels ils opèrent* »
- Découlant des deux premières hypothèses, Gordon pose également l’hypothèse que « *ce sont les éléments émotionnels, irrationnels qui doivent être compris pour augmenter la probabilité de succès dans une situation de résolution de problèmes* »

Ces hypothèses reposent sur trois postulats :

- Le processus créatif peut-être expliqué et décrit de sorte qu’on peut former des personnes pour accroître leur créativité.
- Les processus inventifs artistiques et scientifiques sont analogues et sont nourris des mêmes processus cognitifs.
- La créativité individuelle et en groupe sont, elles aussi, analogues.

La synectique est donc la prise de conscience des processus créatifs et le changement intentionnel du référentiel du problème étudié vers l’irrationalité dans l’objectif de stimuler la créativité.

Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs, TRIZ

La TRIZ, ou Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs, est une théorie de conception proposée en Russie par Altshuller dans la deuxième partie du XX^{ème} siècle (Altshuller, 1984; Rosenau, 1998). Cette théorie est particulièrement complète et donc complexe. Elle est formée de deux parties :

- Une partie descriptive basée sur huit lois d’évolution (trois lois statiques, trois lois cinématiques et deux lois dynamiques) permet la modélisation des systèmes techniques (Cavallucci et al., 2001). Cette partie formalise le cadre théorique sous-jacent au développement de la TRIZ.

- Une partie prescriptive, notamment basée sur la formalisation d’un Résultat Idéal Final (RIF) et l’abstraction des problèmes techniques en un format générique modélisé par des contradictions. Ces contradictions sont prédéfinies par la TRIZ et sont issues de l’analyse de plus de 40 000 brevets inventifs. Celles-ci sont associées à un ensemble de principes de résolution de problèmes à travers un outil nommé matrice de contradiction. Cette partie prescriptive renferme une grande quantité d’autres outils et formalise la méthodologie associée à la théorie.

L’approche de la TRIZ se veut être une approche presque philosophique. On cherche à considérer les problèmes à des niveaux méta, ou abstraits, à modéliser et à transposer les solutions d’un domaine technologique à un autre par analogie (Figure 2.4).

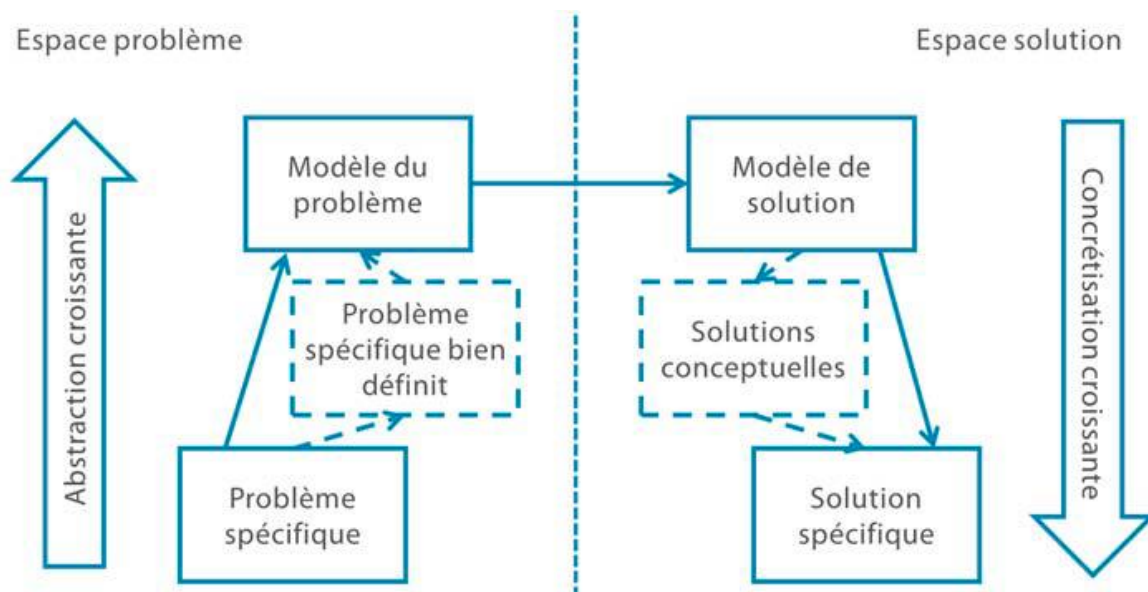


Figure 2.4. Processus de résolution de problèmes suggéré par TRIZ, issue de Fayemi (2016)

Systematic Design

Systematic Design est une méthodologie initialement proposée par Pahl et Beitz en 1984 découpant le processus de conception en quatre phases (Pahl et al., 2007) (Figure 2.5) :

- La clarification, phase durant laquelle l’équipe étudie le projet d’un point de vue holistique, reformule les objectifs, étudie le marché, évalue les ressources mises à disposition, établit un cahier des charges, etc.
- La conception générale, visant les étapes de réflexion basées sur le cadre établi dans la phase de clarification. Elle conduit entre autres à l’analyse fonctionnelle, la résolution de problèmes et de la génération de solutions conceptuelles.
- L’incarnation des concepts précédemment établis, conduit à préciser la structure physique de la solution imaginée, la génération de plans, de modèles numériques, de prototypes, le choix des matériaux, etc.

- La conception détaillée vise la caractérisation précise de la solution permettant sa mise en production.

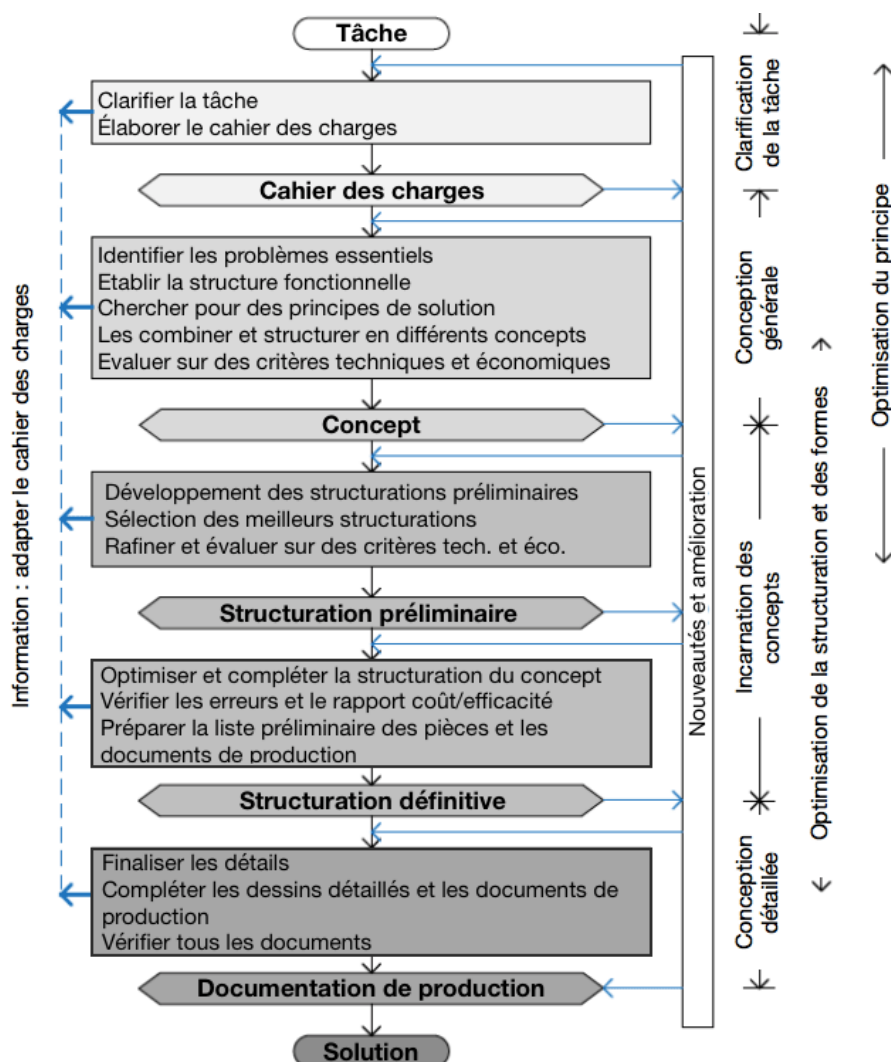


Figure 2.5. Processus de Systematic Design, adaptée de Pahl et al. (2007)

Théorie du Design Thinking

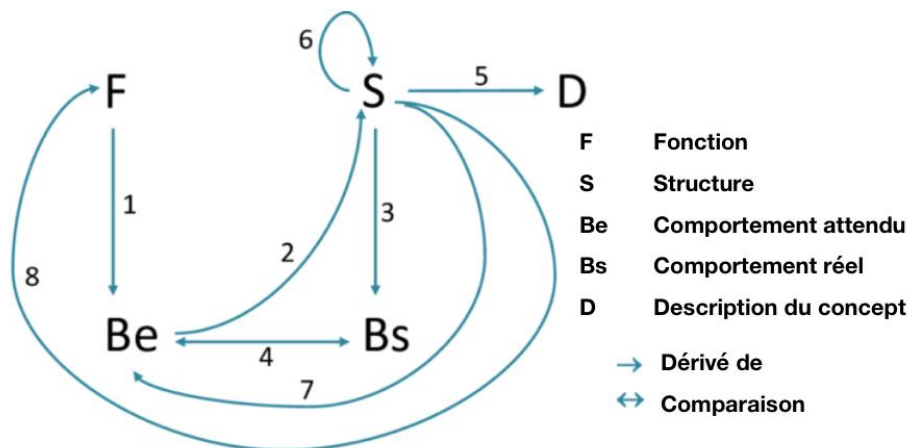
La théorie du Design Thinking, introduite par Rowe (Rowe, 1987), vise à formaliser la pensée du concepteur lors des travaux de conception, à l’origine en architecture et en urbanisme. Par la suite, ce sont les travaux de Tim Brown et David Kelley du cabinet IDEO qui conduisent à la reconnaissance du Design Thinking au sein de la communauté internationale (Brown, 2009).

Le Design Thinking cherche dans une première étape, dite *d’inspiration*, à prendre en compte le contexte et les utilisations. Cette phase d’empathie doit conduire le concepteur à cerner et définir les problèmes auxquels sont confrontés les utilisateurs afin de formaliser la problématique de conception. L’étape suivante, dite phase *d’idéation*, doit permettre de définir une solution conceptuelle par la créativité. La dernière phase, dite *d’implémentation*, vise à prototyper et tester les solutions conceptuelles afin d’obtenir un retour utilisateur. Le processus est itératif jusqu’à ce qu’une solution soit acceptée.

Théorie FBS

Introduite par John Gero en 1990, la théorie FBS vise à décrire d’une part les processus de conception, mais également les systèmes étudiés et/ou conçus. Cinq concepts génériques composent cette modélisation : Fonction (F), Comportement attendu (Be), Comportement issu de la structure (Bs), Structure (S) et Descriptions techniques (D) (Gero, 1990).

Le but poursuivi est d’expliciter la transformation depuis les fonctions requises d’un concept vers la description finale du résultat de conception. Celle-ci passe par la formalisation du triptyque comportement attendu de l’artéfact, comportement de la structure de l’artéfact (i.e. comportement réel) et structure physique de l’artéfact (Figure 2.6).



(1) formulation, (2) synthèse, (3) analyse, (4) évaluation, (5) documentation, (6) reformulation de type 1, (7) reformulation de type 2, (8) reformulation de type 3

Figure 2.6. Processus de formalisation du raisonnement de conception, adaptée de Gero et al. (2002)

New Product Design

La méthodologie du New Product Design (Figure 2.7) est formalisée au sein du laboratoire LCPI par Aoussat (Aoussat, 1990; Aoussat et al., 2000). Celle-ci s’articule en quatre phases :

- La traduction du besoin, visant l’élaboration d’un cahier des charges fonctionnel par l’identification et l’analyse des attentes et besoins de l’entreprise.
- L’interprétation du besoin, qui établit un ensemble de concepts de résolution.
- La définition du produit, qui voit l’établissement d’un concept détaillé sous la forme d’un produit.
- La validation du produit, permettant la génération de prototypes et la mise en place de phase de tests confrontant le produit aux attentes initiales.

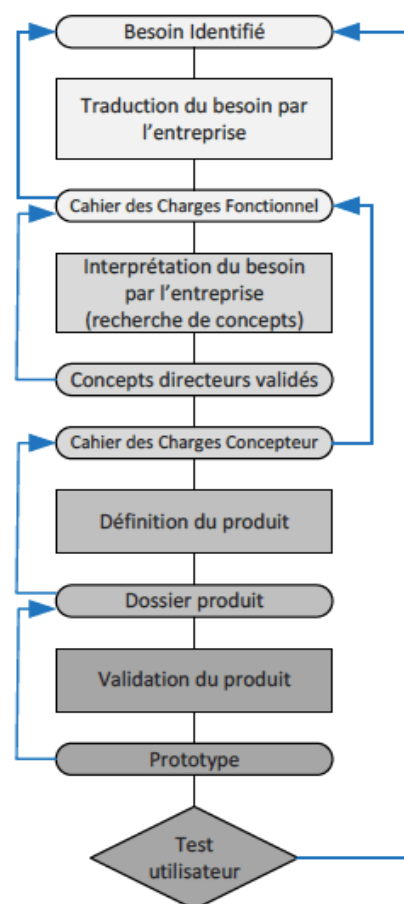


Figure 2.7. Processus du New Product Design, issue de Aoussat (1990)

Théorie C-K

La théorie C-K (Concept-Knowledge) (Hatchuel et al., 2003) vise à décrire le raisonnement de conception en introduisant deux espaces, celui des concepts (C) et celui des connaissances (K), ainsi qu’un ensemble d’opérateurs assurant le passage d’un espace à l’autre et représentant le raisonnement de conception (Figure 2.8) (Berthet, 2014).

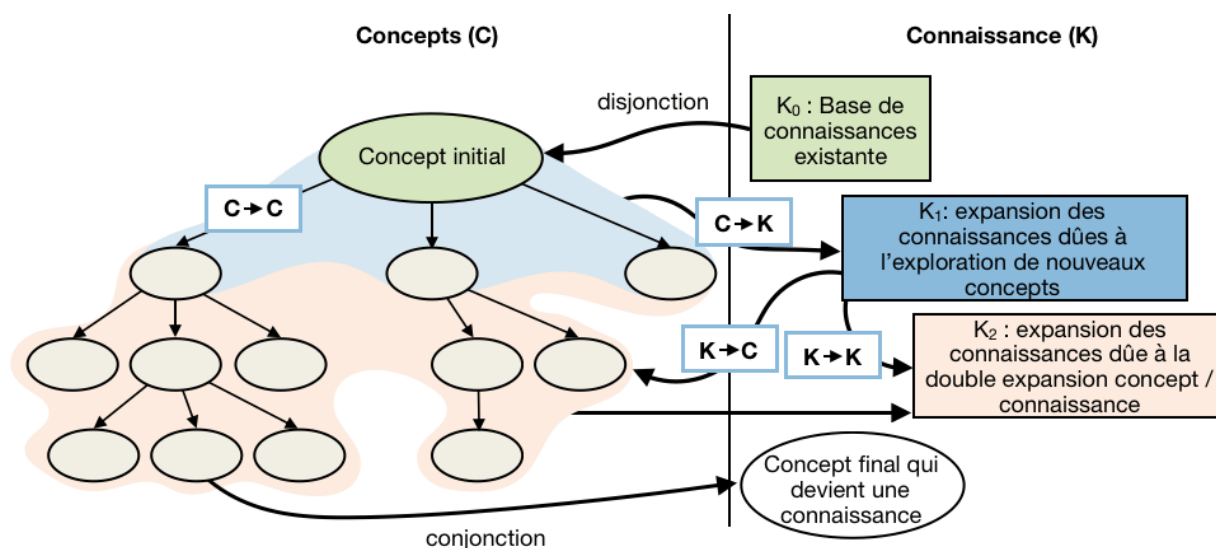


Figure 2.8. Représentation des espaces C et K et de leurs interactions, adaptée de Berthet (2014)

Ces opérateurs sont décrits comme :

- Le phénomène de conjonction (C dans K) par la formalisation d’un concept, une nouvelle poche de connaissances est ouverte dans K.
- Le phénomène de disjonction (K dans C) par l’ajout ou la suppression d’une poche de connaissances dans K on entraîne une modification du concept dans C par la modification de ces attributs.
- L’expansion de l’espace C (C dans C) par la formation d’un arbre des concepts, entraînant la partition ou l’inclusion des concepts en branches. L’horizontalité correspond à une divergence par partition, là où la verticalité correspond à une convergence vers un concept final.
- L’expansion de l’espace K (K dans K) par le raisonnement logique ou la confrontation de deux poches de connaissances entraînant la formation de nouveaux savoirs.

Il est intéressant de voir que, comme pour la synectique, c’est la formalisation et la prise de conscience du raisonnement cognitif qui apparaît comme la source d’une amélioration du processus de conception.

Autres approches

Les approches présentées ici sont celles fournissant un cadre à nos travaux mais ne représentent pas une liste exhaustive. On peut notamment citer la théorie générale de la conception (Yoshikawa, 1981), la méthodologie axiomatique de la conception (Suh, 1998), la théorie KLDEO (Smithers, 1998), la théorie universelle de la conception (Grabowski et al., 1999), la théorie de la synthèse (Takeda et al., 1999), la théorie du développement de concept nouveau (Koen et al., 2001) ou encore la théorie de la conception par infusion (Shai et al., 2004).

Au sein de ces approches théoriques et méthodologiques, la pratique de conception s’appuie sur un ensemble de processus (généraux) et de méthodes (individuelles) guidant les praticiens de la conception d’un point de vue plus opérationnel. Dans ce contexte, et comme souligné par Fayemi (Fayemi, 2016), la biomimétique apparaît comme une théorie, elle-même accompagnée d’un ensemble de processus et d’outils.

2.2.2.2 Classification des processus de conception.

De la même manière que pour les théories la caractérisation des processus rend compte de leur grande diversité.

En 2005, Wynn et Clarkson publient un livre intitulé *Design process improvement : A review of current practice* (Wynn et al., 2005) dans lequel ils consacrent un chapitre présentant trois classifications des processus de conception. Celles-ci seront par la suite synthétisées par Gericke et Blessing (Gericke et al., 2011).

La première, issue des travaux de Blessing (Blessing, 1994), différencie les processus basés sur les étapes (analyse du problème, conception détaillée, etc.) des processus basés sur les activités (générer, évaluer, sélectionner, etc.). Elle distingue quatre typologies de processus (Figure 2.9).

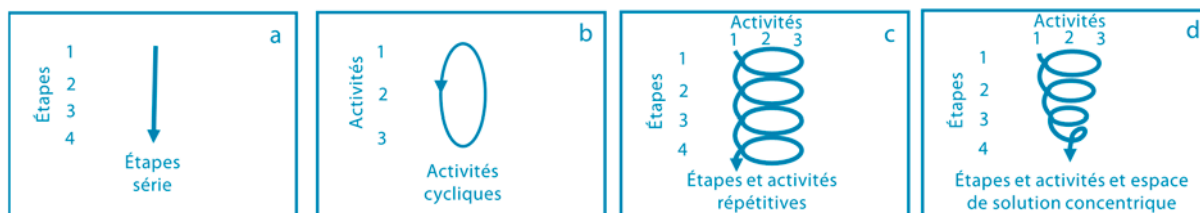


Figure 2.9. Typologies des modèles de processus de conception, traduit de Blessing (1994) par Fayemi (2016)

Le modèle (a) représente le processus de conception par une suite chronologique d’étapes. Le modèle (b) considère l’aspect itératif des processus, notamment de résolution de problèmes, représenté en une suite d’activités. Le modèle (c) combine les deux modèles précédents en considérant le processus de conception comme une suite chronologique d’étapes faites d’activités itératives. Enfin, le modèle (d) est construit comme le modèle (c) mais ajoute la notion de convergence vers la solution.

La seconde classification est issue des travaux de (Lawson, 1980) et s’intéresse à l’orientation du processus vers le champ des problèmes ou celui des solutions :

- Les *processus orientés solution* comme ceux présentant une solution initiale qui sera analysée, évaluée puis modifiée à travers un processus itératif.
- Les *processus orientés problème* se concentrent sur une analyse et abstraction approfondies et détaillées du problème avant la génération d’un ensemble de solutions possibles.

Sur ce mode de classification, Wynn et Clarkson précisent que les travaux de Lawson identifient le background du concepteur comme un facteur déterminant dans le choix des processus orientés produit ou solution.

Le dernier type de classification, formalisé par Wynn et Clarkson, distingue *les processus abstraits, procéduraux et analytiques* (traduit par l’auteur) :

- « *Approches abstraites, qui sont proposées pour décrire les processus de conception à un haut niveau d’abstraction. Une telle littérature est souvent pertinente pour un large spectre d’utilisation mais n’offre pas de lignes directrices spécifiques quant à l’amélioration des processus.* »
- « *Approches procédurales, qui sont de nature plus concrète, et se concentrent sur un aspect spécifique du projet de conception. Elles sont moins génériques que les approches abstraites mais plus pertinentes pour des utilisations pratiques.* »

- « *Approches analytiques, qui sont utilisées pour décrire des cas particuliers des projets de conception. Ces approches sont constituées de deux parties : une représentation utilisée pour décrire les aspects du projet de conception, comme la matrice de la conception structurelle ou DSM (Steward, 1981) ; et les techniques, procédures ou outils numériques, qui utilisent la représentation pour mieux comprendre ou pour améliorer le processus de conception.* »

La classification des processus nous permet ainsi d’identifier un ensemble de caractéristiques clés des processus : le format du processus, son orientation et son champ d’action.

Comme souligné par Lawson (Lawson, 1980), et identifié par Lahonde (Lahonde, 2010), le profil du concepteur (savoir, savoir-faire et savoir-être) apparaît également comme un élément essentiel à la caractérisation et processus.

2.2.2.3 Les acteurs de la conception

L’une des difficultés de la conception moderne, mais qui en fait également sa richesse, est l’importante variabilité des types de profils impliqués. Lahonde identifie trois profils essentiels, le décideur, le concepteur et l’utilisateur (Lahonde, 2010).

Dans le cadre de nos travaux l’utilisateur est laissé de côté, et ce malgré sa pertinence générale en ingénierie de la conception précédemment décrite.

La place du décideur, bien qu’elle soit fondamentale dans l’acceptabilité de nouvelles approches d’innovation, telle que la biomimétique, n’est également que peu discutée dans notre étude.

Celle-ci se concentre en revanche sur la pratique de la conception et donc sur le profil restant, celui du concepteur.

Alors qu’à l’origine, le concepteur est un ingénieur en charge d’un projet de conception, le plus souvent mécanique, l’évolution des attentes et des pratiques conduit à l’intégration de profils nouveaux tels que les ergonomes (Aoussat et al., 2000). Si l’on s’intéresse aux mécanismes ayant permis leur entrée au sein des équipes de conception trois étapes peuvent être synthétisées :

- La première étape est l’identification de besoins, besoins auxquels les concepteurs ne savent pas répondre. Ceux-ci conduisent dans un premier temps à la génération de nouveaux outils (Berns, 1984).
- La seconde étape, est une étape d’intégration partielle voir de rejet (Broberg, 2007). S’ensuit une complexification des processus visant à intégrer des méthodes pour répondre aux besoins, sans arriver à remplacer l’expertise du profil manquant (Falzon, 2005; Bernard et al., 2017).
- Enfin, face à des résultats qui ne correspondent pas aux attentes et à la complexité des méthodes utilisées, la recherche méthodologique s’ouvre à la formation des ingénieurs au nouveau champ et/ou à l’intégration d’acteurs au sein des équipes (Marsot, 2002; Broberg, 2007; Daniellou, 2005; Lim, 2003; Seim et al., 2014). On

observe alors une dissémination progressive de nouvelles méthodes et des outils associés à cette intégration.

Cette dernière phase permet la mise en place d’un contexte méthodologique nécessaire à une conception collaborative. De manière générale et non concentrée sur les ergonomes, Kvan souligne que le succès de l’activité collaborative des équipes repose sur trois éléments clés : « L’interdépendance des tâches (à quel point les membres de l’équipe travaillent conjointement), l’interdépendance des résultats (si et comment, la performance de l’équipe est récompensée) et le sentiment de capacité (le fait que les membres de l’équipe croient que l’équipe peut être efficace.) » (Kvan, 2000). Sur le même axe, Nancarrow identifie 10 leviers faisant une bonne équipe interdisciplinaire : (1) Le leadership et la gestion d’équipe, (2) la communication, (3) les récompenses, la mise à disposition de formations et d’aide au développement personnel, (4) l’adéquation des ressources et procédures, (5) l’adéquation de la combinaison des compétences, (6) le climat de travail, (7) les caractéristiques individuelles, (8) la clarté de la vision suivie, (9) la qualité et les résultats des travaux, (10) le respect et la compréhension des rôles (Nancarrow et al., 2013).

Par ailleurs, l’intégration de nouveaux champs d’expertise mène aussi à la dissémination de formations adaptées, conduisant à une nouvelle génération de professionnels, ayant assimilé à travers leur formation, les attentes, les savoirs et le savoir-faire requis (Garrigou et al., 2001; Hall-Andersen et al., 2016). Cette nouvelle génération peut par la suite effectuer une boucle d’itération méthodologique par l’apport de retours d’expériences et donc d’heuristiques spécifiques à leurs nouvelles positions. Ces observations, ici présentées pour les ergonomes sont aussi valables pour d’autres profils tel que ceux issues de la maintenance, de la qualité, etc.

Ainsi, l’adéquation qui doit exister entre les membres des équipes et le contexte méthodologique émerge comme un paramètre de caractérisation.

2.2.2.4 Synthèse sur les approches de la conception

La présentation de différents prismes abordant la conception conduit à l’identification d’un ensemble de niveaux de lecture tels que les axes d’abstraction et de généralité. Outre ces caractérisations conceptuelles, un ensemble d’éléments structurels sont également identifiés. Notamment, les processus de conception peuvent être en majorité synthétisés par trois étapes génériques (Blessing, 1995) issues de la méthodologie de Pahl & Beitz (Pahl et al., 2007) précédemment présentées : une étape de clarification du problème (menant au cahier des charges), une étape de conception générale (menant aux solutions conceptuelles) et une étape de conception détaillée (menant à la description complète du produit).

Les éléments qui apparaissent spécifiques aux différentes approches sont les éléments de modélisation, de raisonnement et de résolution de problèmes. La diversité entre ces approches peut être caractérisée à travers différents critères :

- La structuration des processus (typologies des processus),

- Le type d’informations initiales (problème versus solution),
- Le type d’objectifs poursuivi par les processus (processus abstraits, procéduraux et analytiques),
- Les acteurs impliqués dans l’approche de conception, qui caractérisent le champ conceptuel descriptif (théorie) et prescriptif (méthodologie) à considérer.

La partie suivante reprendra les éléments clés développés dans cet état de l’art sur l’ingénierie de la conception et proposera un ensemble de lignes directrices conduisant à aborder les sciences du vivant avec un regard pertinent.

2.2.3 Synthèse et éléments clés sur l’ingénierie de la conception

À travers cette première partie de l’état de l’art, l’historique structurant les approches scientifiques de l’ingénierie de la conception permet d’identifier un ensemble de tendances modernes et de défis qui leur sont associés :

- Intégration de nouveaux champs scientifiques au sein des approches de la conception : sciences du numérique, sciences de l’environnement, etc.
- Augmentation de la fréquence de conception et donc le besoin constant d’innovation,
- Repositionnement des consommateurs comme des acteurs de la conception,
- Croissance de l’écart entre les contributions de la recherche scientifique sur l’ingénierie de la conception et les pratiques réelles de la conception,
- Développement des enseignements comme levier de transfert de savoirs.

Par ailleurs, cette partie conduit à l’identification d’un ensemble de concepts explicitant le cadre des relations entre sciences et ingénierie de la conception. Les apports issus des approches scientifiques de l’ingénierie de la conception et des types de contributions méthodologiques (théorie, méthodologie, méthode, processus et outils) formalisent alors une part du référentiel conceptuel supportant notre étude.

La caractérisation des spécificités de ces apports nous conduit à considérer le profil des concepteurs, et par-delà, la composition des équipes de conception. Les observations effectuées sur l’intégration des ergonomes soulignent trois axes d’intérêt par rapport à nos travaux :

- Le premier est la résistance au changement qui doit être prise en compte afin de rendre possible l’intégration de profils atypiques,
- La seconde est l’extrême variabilité des profils intégrés aux équipes de conception et donc la difficulté de définir une « équipe type », et même de définir le rôle de chacun des acteurs au sein de ces équipes,

- La troisième est la nécessité de l’adéquation entre cadre méthodologique et acteurs afin d’atteindre une intégration opérationnelle menant à une pratique collaborative efficace. Ainsi, le besoin d’adaptation du cadre aux nouveaux profils apparaît comme un prérequis à l’expansion du champ d’action des équipes de conception.

Dans la mesure où notre étude se porte sur un domaine interdisciplinaire (ISO/TC266, 2015), nous devons porter une attention toute particulière à ces trois points.

La biomimétique, définie comme le champ structurant l’approche technique et méthodologique de la conception bio-inspirée, fait partie du domaine de l’ingénierie de la conception présenté dans cette partie 2.2. Sa spécificité se concentre sur son approche de résolution de problèmes par analogie avec les stratégies du monde vivant.

La partie suivante présente un ensemble de concepts, de mécanismes et de processus propres au monde vivant, amenant à considérer les spécificités des stratégies biologiques.

2.3 Sciences du vivant

Afin de comprendre la complexité et le potentiel associé aux stratégies issues du monde vivant, cette partie décrit l’histoire des sciences du vivant accompagnée d’un ensemble de concepts et de mécanismes biologiques fondamentaux (Figure 2.10).

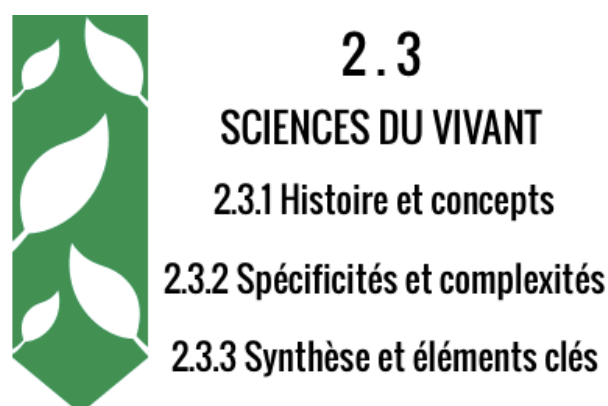


Figure 2.10. Structure de l’état de l’art sur les sciences du vivant

2.3.1 Histoire et concepts

L’histoire des sciences du vivant sera abordée à travers un ensemble de prismes : le concept de Vie, la structuration de la cellule à l’organisme, la génétique et l’évolution comme un moteur de résolution de problèmes.

2.3.1.1 Origine et définition de la vie

Bien que la datation exacte de l’apparition de la vie sur Terre soit impossible, la découverte de fossiles de micro-organismes au Canada en 2017 nous permet d’établir la présence du premier être vivant connu, génériquement nommé LUCA (Last Universal Common Ancestor), à une date située entre -3,77 et -4,28 milliards d’années (Dodd et al., 2017).

Outre les traces physiques d'une forme de vie similaire à celle connue dans le monde moderne, la question de l'existence d'une forme antérieure et différente de vie reste entière. Dans ce contexte, la définition du cadre dans lequel considérer la Vie apparaît nécessaire.

Sans entrer dans les considérations philosophiques qui seront ici mises de côté, établir une définition de ce qu'est la vie s'avère être une tâche complexe pour la communauté scientifique.

Alors que dans les années 1800, Bichat décrit largement la vie comme « *l'ensemble des fonctions qui résistent à la mort.* » (Bichat, 1800), l'avancée des connaissances scientifiques permet aux chercheurs d'affiner petit à petit cette définition. En 1875, Claude Bernard propose ainsi une liste de cinq points essentiels au caractère vivant d'un organisme (Bernard, 1875) : « *ils [les êtres vivants] sont d'une complexité organisée, ils ont la faculté de se reproduire, ils évoluent (...), ils renouvellent leur substance en conservant leur forme (nutrition) et ils sont caduques : ils tombent malades, ils meurent.* ». La prise en compte des théories de l'évolution et du mécanisme de la reproduction dans la formulation de cette définition ouvre un débat sur les limites associées à celle-ci. Définit-on ici l'être vivant au sens singulier ou définit-on la vie au sens absolu ?

Ce célèbre point de divergence est représenté par le « *problème de la mule* » (Chodasewicz, 2014). La mule naît du croisement entre une jument et un âne et forme un hybride stérile, mais non moins vivant, remettant en cause la question de la reproduction dans la définition de Claude Bernard.

Du point de vue de l'individu, un être-vivant stérile reste un être vivant. En revanche, du point de vue évolutif, l'absence de potentiel reproducteur conduit à la disparition de l'espèce, et donc à l'absence de vie. Ce type de cas particuliers, auquel les formes de vie intermédiaires tels les virus s'ajoutent, pose un problème à la mise place d'une définition unanime.

Une des définitions la plus large et la plus reconnue est celle proposée par la NASA en 1994, qui l'établit dans le cadre de ses programmes de recherches sur la vie extraterrestre : « *La vie est un système chimique auto-entretenu capable d'évolution darwinienne* » (NASA, 1994). L'agence précise que cette définition s'applique à la vie telle qu'elle est connue sur Terre, prenant ainsi en compte l'absence de connaissance concernant des possibles formes de vie extra-terrestre, ou des formes de vie antérieures à celle jusqu'à présent étudiée.

Dans la mesure où aucune définition n'apparaît unanime et où il semble nous manquer certaines connaissances pour pouvoir décrire pleinement les mécanismes sous-jacents à ce que l'on appelle la vie (Cleland et al., 2002), nous considérerons dans ces travaux la définition la plus large possible, celle proposée par la NASA.

2.3.1.2 Découverte de la cellule, brique unitaire du vivant

Comme précisé dans le contexte de ces travaux, le développement des sciences de la vie est intimement lié aux avancées techniques. L'exemple le plus symbolique de ces apports sur le monde de la biologie est la conception du microscope en 1595 par Zaccharias et Hans Janssen (Masters, 2008). À travers cet accès à l'infiniment petit, un ensemble de concepts nouveaux émerge et structurent les bases de la biologie moderne.

La découverte de la cellule par Robert Hooke (1665) puis son observation par Leeuwenhoek (1674) permet l’identification de la plus petite entité vivante connue (1 à 100 μm). La découverte dans certaines cellules de structures internes et compartimentées, tel que le noyau par Brown (1833), ou la mitochondrie par Altmann (1890) grâce à des colorations spécifiques, poseront les bases de la biologie cellulaire et de la distinction entre les organismes Eucaryotes (du grec Eu « Vrai » et Karyon « Noyau ») et Procaryotes (du grec Pro « Avant » et Karyon « Noyau »).

Basée sur ces découvertes, émerge la théorie cellulaire. Celle-ci unifie le monde vivant selon trois lois fondamentales (Ribatti, 2018) :

- Les études de Schleiden en botanique (1838) et Schwann en zoologie (1839) mènent à la première loi qui établit que « *tout organisme vivant est composé d’une ou plusieurs cellules* »,
- La seconde loi découle directement de la première et postule que « *les cellules sont les unités de structure et de fonction du vivant* »,
- La troisième loi, qui réfute notamment la théorie de la génération spontanée grâce aux travaux de Virchow (1855), dit que toute *cellule provient d’une cellule préexistante*.

Les innovations successives en microscopie : Microscope Électronique à Transmission (1940), Microscope Électronique à Balayage (1970), Microscope aux rayons X ou encore à effet tunnel (1980), conduiront les biologistes à décrire avec une précision toujours plus grande les structures biologiques.

2.3.1.3 Les organismes vivants, représentant des espèces

En reprenant les fondements de la théorie cellulaire, deux types d’organismes vivants peuvent être identifiés :

- Les organismes unicellulaires composés d’une seule cellule. Ils englobent un ensemble de microorganismes tels que les protistes, comme les paramécies (*Paramecium*) ou le *Plasmodium falciparum*, certaines bactéries, comme *Escherichia coli* ou le staphylocoque doré (*Staphylococcus aureus*), certains champignons, comme la levure *Saccharomyces cerevisiae*, ou encore certaines algues, telles que les chlorelles (*Chlorella*) ou la spiruline (*Spirulina*).
- Les organismes pluricellulaires composés de plusieurs cellules. Ils comprennent le reste des êtres vivants, comme les végétaux complexes, les vertébrés, les insectes, les champignons pluricellulaires (tel le bolet (*Boletus*) ou les chanterelles (*Cantharellus*)), etc.

Au sein des organismes pluricellulaires, le grand nombre de cellules conduit à une structuration à de multiples niveaux d’organisation dont les tissus, organes, et systèmes :

- Les tissus, « *ensemble normal ou pathologique de cellules d'un organisme. Ces cellules ont alors la même fonction et présentent la même différenciation morphologique* » (Ex. le tissu musculaire strié cardiaque, le tissu adipeux, le tissu épithélial, etc.). Les tissus s'associent le plus souvent en un organe (CNRTL, 2012).
- Les organes, « *ensemble d'éléments cellulaires physiologiquement différenciés et combinés, remplissant une fonction déterminée* » (CNRTL, 2012), parmi lesquels on peut citer le cœur, le foie, les poumons, le cerveau, etc.
- Les systèmes, « *ensemble d'organes ou de tissus présentant la même structure, participant à la même fonction, constituant une entité biologique* » (CNRTL, 2012), parmi lesquels on peut citer le système nerveux, le système digestif, le système urinaire, le système immunitaire, etc.

Ces niveaux fonctionnels et organisationnels composant les organismes pluricellulaires amènent à considérer un dernier point fondamental pour leur fonctionnement : l'information.

Face l'immensité du nombre de cellules composant un organisme (estimé à 3.10^{13} en moyenne chez l'être humain (Combemorel, 2016)), la gestion de l'information apparaît vitale. On distingue deux grands types de communication chez la plupart des organismes pluricellulaires complexes : le système nerveux (uniquement chez les animaux) et le système hormonal. Sans entrer dans le détail de leur fonctionnement, le système nerveux est basé sur un message électrique appelé potentiel d'action, qui se propage le long des nerfs. Le système hormonal, lui, se base sur des messagers chimiques appelé hormones, qui peuvent avoir des actions plus ou moins ciblées et à des distances plus ou moins grandes selon les types et les modes d'émission (paracrine, endocrine, autocrine, etc.).

Ces deux systèmes de communication fonctionnent en étroite collaboration et peuvent même parfois être intriqués comme au niveau des synapses. Il s'agit là des deux types principaux de communication mais il en existe d'autre, telle l'information de contact, primordiale dans le maintien de l'architecture tissulaire notamment.

À la communication interne à l'organisme, s'ajoute la gestion de l'information au cours du temps, entre lignées cellulaires et par extrapolation à l'échelle des espèces. En effet, comme énoncé dans la théorie cellulaire, toute cellule, et par extension tout organisme, n'est que le produit de la division d'une autre cellule (essentiellement les cellules dites souches pour les organismes pluricellulaires).

Face à la vision centrée sur la cellule, s'associe donc une vision centrée sur l'information héréditaire, dite génétique, conduisant aux approches modernes des sciences de la vie.

2.3.1.4 La génétique et l'ADN, code universel du monde vivant

Le code génétique est un langage chimique principalement composé de quatre bases azotées, l'adénine, la cytosine, la guanine et la thymine. Cette molécule permet notamment le stockage de l'information nécessaire à la différenciation d'une cellule souche (cellules

relativement indifférenciées à forte fréquence de multiplication) en n’importe laquelle des cellules d’un organisme. Elle code également pour la mise en place architecturale de celui-ci et assure son fonctionnement à tous les stades de son développement. Outre cela, elle représente le support de transmission de l’information lors de la reproduction et assure donc une stabilité relative entre les générations.

Ce sont les travaux de Mendel sur l’hérédité et l’identification du concept des gènes à travers l’hybridation et la transmission d’information sur des lignées de pois qui marquent le début de la génétique (Mendel, 1865). Le gène peut être défini de manière simplifiée comme une séquence d’ADN (ou d’ARN dans certains virus) possédant un emplacement spécifique dit locus, et codant pour la séquence d’acide-aminés d’un polypeptide donné (Pearson, 2006). On appelle *allèle* la version d’un gène. Ces allèles variables sont représentatifs de la diversité génétique. Par exemple, les groupes sanguins A, B, AB, O sont issus de différents allèles d’un même gène.

Comme parfois dans l’histoire des sciences, les travaux de Mendel, pourtant fondamentaux, sont oubliés pour un temps. En parallèle, les approches se font plus descriptives et l’on étudie les composants de la cellule et du noyau par le biais de leurs propriétés physico-chimiques.

À la suite des travaux de Flemming sur la mitose (division des cellules somatiques *i.e.* non sexuelles) et la chromatine (une des formes de repliement de l’ADN) (Olins et al., 2003), c’est Waldeyer qui en 1888 nommera chromosome la forme particulièrement condensée de la chromatine (Waldeyer, 1888). À cette époque aucune connexion n’est faite entre l’approche conceptuelle de Mendel et celle physico-chimique de Waldeyer.

Ce n’est qu’au début du XX^e siècle que Sutton et Boveri font le rapprochement entre les travaux de Mendel et le comportement des chromosomes durant la mitose (Gayon, 2016). Cette association fondamentale entre la théorie de Mendel et les entités physiques des chromosomes conduira au développement de la génétique moderne et à la compréhension des phénomènes de mutation.

La découverte en 1944 par Avery et al. de l’ADN comme la molécule supportant l’information génétique change profondément la biologie (Cobb, 2014; Avery et al., 1944). La mise en évidence de sa structure par les travaux de Franklin, Wilkins, Watson et Crick (Watson et al., 1953; Pray, 2008) et par la suite la compréhension des processus moléculaires associés à celle-ci, permet à la biologie d’entrer dans l’aire de la génétique moderne. Au modèle cellulaire s’ajoute ainsi un nouveau modèle, moléculaire, unifiant lui aussi le monde vivant.

À la suite de ces travaux fondateurs, l’intérêt pour la génétique explose et tous types de disciplines associées à la biologie sont impactés. Les avancées technologiques d’extraction, de manipulation, d’amplification et d’analyse de l’ADN rendent la génétique accessible à l’immense majorité des laboratoires.

Les tendances modernes voient le passage de l’extraction de l’information contenue dans l’ADN à l’édition de cette information, notamment via de nouveaux outils moléculaires tels que CRISPR Cas-9 (Jinek et al., 2012). Tout particulièrement, les biotechnologies et plus

récemment la biologie de synthèse approchent ce « *codage biologique* » par la conception de constructions génétiques, ouvrant la porte à d’innombrables applications et à d’intenses débats éthiques quant aux dérives potentiellement tout aussi nombreuses.

Au cours de cette présentation de la génétique, il a été mis en évidence que l’information génétique se transmet de génération en génération par l’intermédiaire de l’ADN. Si cette information est transmise à d’une génération à la suivante, la question des mécanismes dynamiques conduisant aux différentes formes de vie émerge.

2.3.1.5 Biologie évolutive, théorie de l’évolution et génération de solution biologiques

Comme présenté en introduction de ce manuscrit, les êtres vivants ont traversé d’innombrables crises, transitions et événements chaotiques. Leurs capacités à s’auto-entretenir, à croître, à s’adapter et à se diversifier sont leurs principaux outils expliquant leur résilience dans le temps (Reynolds et al., 2012).

La perpétuation de la vie se distingue par des mécanismes spécifiques selon les échelles considérées.

À l’échelle de la cellule, le mécanisme de multiplication par division cellulaire, permet le passage d’une cellule mère à deux cellules filles ayant le même code génétique. Chez les êtres pluricellulaires complexes, la division cellulaire est impliquée dans une grande partie des mécanismes fonctionnels, renouvellement des tissus, la croissance, l’immunité, la cicatrisation, la cognition, le système nerveux, etc. Chez les êtres unicellulaires, la cellule devient l’organisme entier.

À l’échelle de l’organisme, c’est le concept de *reproduction* qui prévaut, l’*action par laquelle les êtres vivants produisent des êtres semblables à eux-mêmes* (CNRTL, 2012). On peut également reformuler cette définition en disant qu’il s’agit du mécanisme par lequel une entité vivante engendre la formation d’une deuxième entité vivante possédant au moins une partie du code génétique de l’entité parente, on parle également de *génération*.

Ce mécanisme est fondamental en biologie, et se décline de différentes façons variables. On peut notamment préciser que la reproduction n’est pas forcément sexuée, il ne s’agit pas toujours d’une rencontre de deux gamètes (cellules sexuelles), mâle et femelle. Elle peut être asexuée. Ce type de mécanisme reproducteur est notamment très présent chez les végétaux, appelé multiplication végétative (Ex. bouturage, marcottage, greffage) (Margara, 1984), ou chez les microorganismes (Ex. scissiparité, bourgeonnement, fission binaire, etc.) (Angert, 2005) et existe également chez les animaux (Chapman et al., 2007).

Pour résumer, le maintien individuel des organismes pluricellulaires est assuré par la *division cellulaire* et le maintien de groupes d’individus, qui peuvent être regroupés en espèces, est permis par le biais de la reproduction. Le concept d’*espèce*, est défini comme un groupe d’individus isolé des autres d’un point de vue reproductif et dont la descendance est fertile (et donc sujette à l’évolution) (Mayr, 1942). De façon plus générale, Lecointre définit une espèce comme un groupe d’individus pouvant échanger du matériel génétique, prenant ainsi en compte les espèces bactériennes aux reproductions asexuées (Lecointre et al., 2009).

À l’échelle de l’écosystème, « *système formé par un environnement (biotope) et par l’ensemble des espèces (biocénose) qui y vivent, s’y nourrissent et s’y reproduisent.* » (Tansley, 1935), un nouveau paramètre entre en jeu. L’être vivant n’est plus seul et extrait de son contexte mais évolue avec un ensemble de contraintes environnementales et interagit avec d’autres êtres vivants. Le maintien de la vie apparaît comme une question d’adaptation et d’équilibre.

L’ensemble des mécanismes expliquant l’adaptation des êtres vivants et donc l’évolution de ceux-ci sont regroupés au sein du champ de la biologie évolutive.

C’est au XIX^{ème} siècle que la formalisation scientifique de l’évolution émerge au cœur des débats de la communauté scientifique biologique. Face aux contraintes imposées par un environnement donné (biotique et abiotique), les êtres vivants sont inégaux et deux théories s’affrontent.

La première est portée par Lamarck, scientifique français à l’origine du terme « *biologie* » (1809). Il stipule que les organismes, par l’utilisation répétée d’un trait particulier, entraînent une adaptation de leur information génétique qui sera par la suite transmise à leur descendance (Simon et al., 2015; Lamarck, 1809). Cette approche considère les êtres vivants comme les acteurs moteurs de l’évolution.

En 1859, Charles Darwin propose une seconde théorie de l’évolution formalisée en 5 sous-parties (Darwin, 1859) : (1) il oppose aux actes indépendants de création des espèces du dogme religieux une évolution constante de celles-ci, (2) il suppose l’existence d’un ancêtre commun à toutes les espèces, (3) il supporte la notion d’évolution graduelle plutôt que par sauts successifs, (4) il estime que les espèces vont en se multipliant et soutient donc une diversification des espèces, (5) enfin, cœur de sa théorie, il décrit la théorie de la sélection naturelle et sexuelle.

Cette théorie est formalisée en collaboration avec Russell Wallace qui apporte avec lui le prisme de la sélection naturelle par l’environnement là où Darwin considère avant tout celui de la relation entre les êtres vivants (compétition et coopération étant tous deux vus comme des opportunités d’évolution) (Kutschera, 2009).

Selon eux, les êtres vivants, s’ils sont moteurs de l’évolution par la diversité qu’ils génèrent, ne sont pas acteurs de cette évolution mais en sont sujets. C’est un ensemble de circonstances extérieures, autrement dit des contraintes, qui façonnent les chemins évolutifs.

« *...dans ces circonstances des variations favorables auraient tendance à être préservées, et celles non favorables à être détruites. En résulterait alors la formation de nouvelles espèces. Voilà, enfin, une théorie à travers laquelle cela marchait.* » Charles Darwin d’après (Barlow Darwin, 1958) (Traduit par l’auteur)

« *La vie des animaux sauvages est une lutte pour l’existence* » Russell Wallace d’après (Kutschera, 2009) (Traduit par l’auteur)

Comparons ces deux théories à travers l’exemple très connu de la girafe. Pour Lamarck, la girafe *allonge* son cou pour chercher des feuilles jusqu’alors inaccessibles. Pour Darwin, les représentants aux cous les plus courts sont désavantagés et meurent donc plus jeunes, sans

transmettre leur information génétique. En simplifiant pour l'exemple le trait « *longueur du cou* » à un gène unique (en réalité différents gènes sont impliqués), l'allèle « *cou court* » codant pour ce caractère morphologique disparaît au profit de l'allèle « *cou long* » au sein de la population (Figure 2.1).

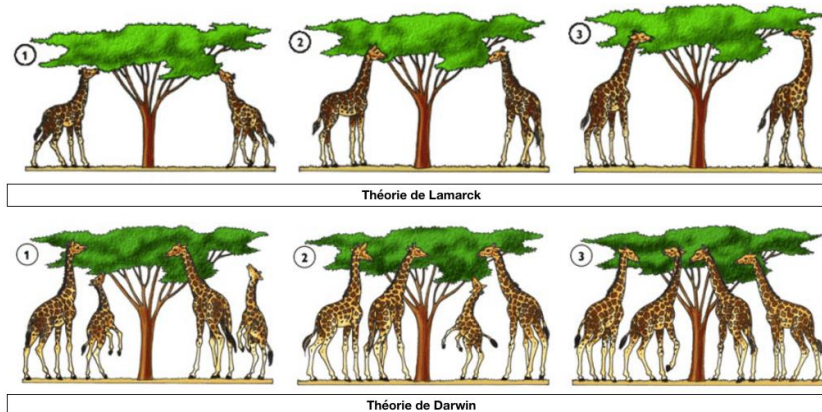


Figure 2.11. Comparaison des théories de l'évolution de Lamarck et Darwin

Toujours selon la théorie de Darwin, le paramètre fondamental à l'évolution est donc la capacité d'un organisme à transmettre son patrimoine génétique à sa descendance. Cette notion sera par la suite nommée « *fitness* » comme synonyme du temps pendant lequel un organisme peut se reproduire avec succès dans un environnement donné (Kutschera, 2009).

Là où l'essence de la théorie de Darwin est aujourd'hui largement acceptée par la communauté scientifique un ensemble de modifications et précisions lui sont apportées au cours des décennies suivantes.

Parmi d'autres contributions, Weismann (1892) réfute l'hérédité Lamarckienne (jusqu'alors considérée en partie complémentaire de la théorie Darwinienne) et souligne l'importance de la reproduction sexuée comme mécanisme au cœur de la diversité des espèces. Ces apports formalisent le *Néo-Darwinisme*.

Par la suite, la prise en compte des nouvelles découvertes issues de la génétique, la systématique, l'anatomie comparative, l'écologie et la paléontologie, ainsi que la volonté d'aborder l'évolution à travers un raisonnement scientifique moderne entraîne l'émergence de la *Théorie Synthétique*.

Élaborée par six chercheurs principaux Dobzhansky, Mayr, Huxley, Simpson, Rensch et Stebbins, celle-ci formalise notamment les moteurs de la diversité génétique : reproduction, recombinaison, mutation, dérive génétique, transfert horizontal chez les bactéries, etc. (Griffiths et al., 1999; Kutschera et al., 2004).

Aujourd'hui encore, l'avancée des connaissances conduit les chercheurs à intégrer de nouvelles découvertes, tel que les mécanismes épigénétiques (Richards, 2006), faisant avancer petit à petit la formalisation moderne de la théorie de l'évolution.

La génération de solutions biologiques dépend donc d'une part d'un ensemble de mécanismes génétiques (*Théorie Synthétique*) menant à la divergence des phénotypes⁵ et

⁵ « *Expression visible des gènes.* » (Dictionnaire Larousse)

ensuite à leur tri, principalement par sélection naturelle et sexuelle (*Théorie de Darwin-Wallace*).

2.3.1.6 Systématique et classification du monde vivant

Face à la diversité des formes de vie, les biologistes font face à la difficulté de leur classification. La question se concentre par conséquent sur l’identification de paramètres dissociant les espèces en groupes distincts.

Historiquement, les premiers caractères utilisés sont ceux facilement perceptibles, macroscopiquement visibles. Les classifications sont alors principalement basées sur des caractéristiques anatomiques, morphologiques ou écologiques. Par exemple, le phylum *Mollusca* rassemble des organismes marins (trait écologique), mous (trait morphologique), invertébrés (trait anatomique), aussi appelés mollusques.

L’avènement de la génétique change entièrement la manière dont on approche la classification. Elle permet de classer des espèces en se basant sur la proximité des séquences d’ADN (marqueurs génétiques). Devant la précision de tels paramètres, il devient même possible de retracer l’histoire évolutive des espèces et de baser les classifications sur les relations de parenté, c’est l’apparition de la phylogénétique.

Le concept de phylogénétique fait ainsi référence à l’étude de la parenté ancestrale de groupes d’organismes, qu’ils soient vivants ou éteints (Lecointre et al., 2006). Les classifications des espèces sont représentées par des arbres phylogénétiques (figure 2.12).

Les études phylogénétiques sont basées sur un principe clé appelé le principe de parcimonie. Comme ces classifications sont postérieures à l’évolution des espèces, chaque arbre phylogénétique doit être considéré comme une combinaison d’hypothèses. Il n’est en réalité pas possible de savoir avec exactitude comment l’évolution s’est produite. Cependant, selon le principe de parcimonie, l’arbre le plus précis est celui qui nécessite le moins d’hypothèses pour être conçu.

Pour simplifier, si nous considérons l’évolution d’un carré en un rectangle, le principe de parcimonie soutient un scénario où deux côtés opposés du carré s’allongent (une hypothèse), plutôt qu’un scénario où le carré se transforme d’abord en cercle, puis revient à une forme carrée, puis prend une forme de losange pour finalement se transformer en rectangle (quatre hypothèses). Les arbres phylogénétiques représentent donc la voie d’évolution la plus probable, afin d’étudier la parenté des groupes d’organismes.

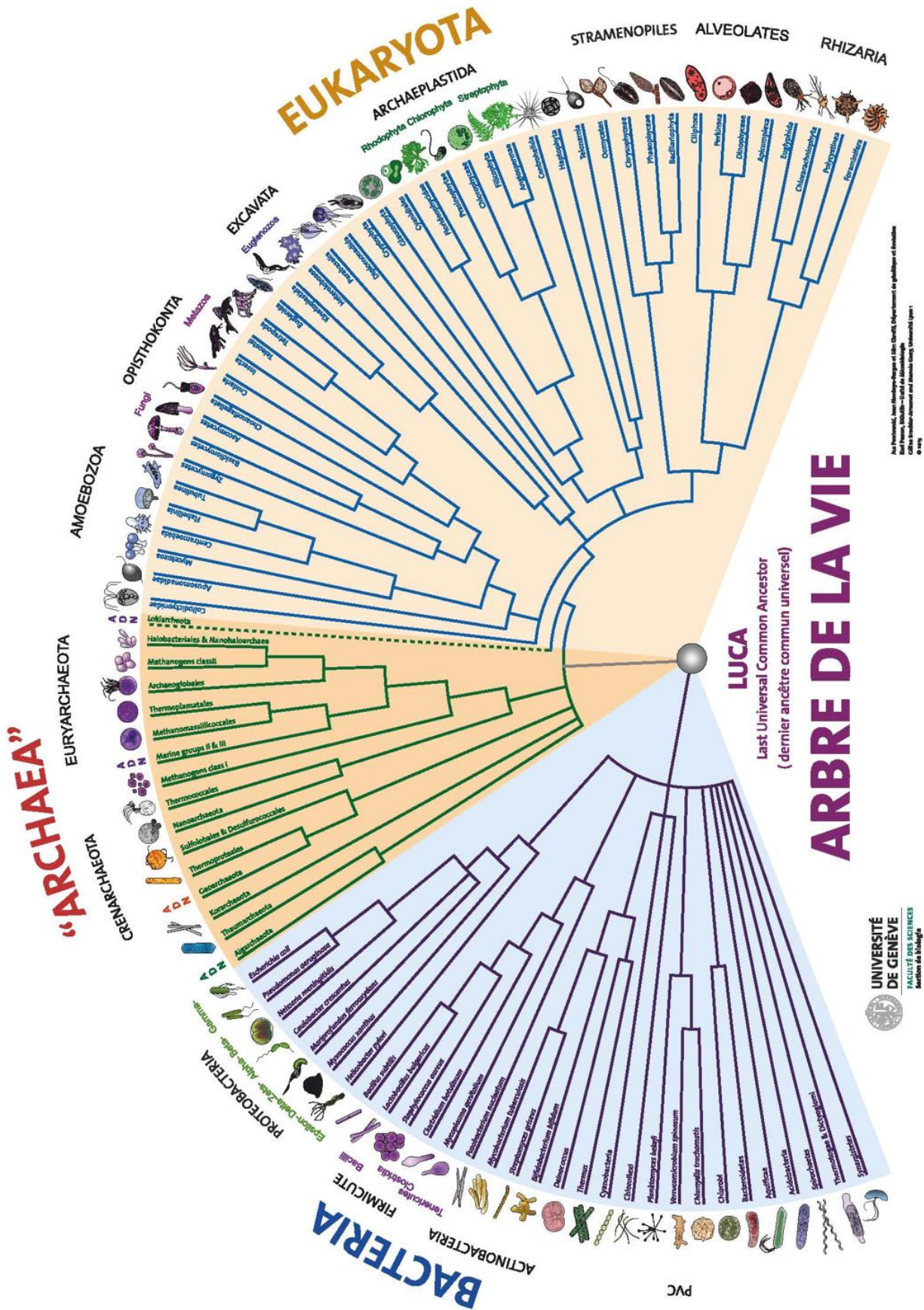


Figure 2.12 Arbre phylogénétique du vivant représentant la diversité des espèces (Université de Genève, 2015)

2.3.1.7 Synthèse et définition de concepts associés

La biologie passe donc d’une observation essentiellement structurale et macroscopique du vivant à la récolte de données microscopiques et physicochimiques. Ces nouvelles informations permettent de caractériser le vivant avec une grande précision, non seulement sur ses composants structurels et leur organisation hiérarchique, mais également sur les éléments informationnels.

La génération de théories et d’hypothèses formalisant ces nouvelles découvertes souligne le décalage existant entre le savoir et la réalité biologique, la diversité du monde vivant et son intrication en font en effet un objet d’étude particulièrement complexe.

Les spécificités du monde vivant entraînent les biologistes à l’aborder à travers un ensemble de prismes structurant la biologie en différents champs disciplinaires (Chapitre 1, partie 1.3.3) apportant leurs propres regards et découverte sur les sciences du vivant.

2.3.2 Éléments de spécificités et de complexités

La biologie est une science multiple tant par ses axes de recherche (ex. l’évolution, la physiologie, etc.) et les approches de ces axes (ex. approche génétique, cellulaire, etc.), que par la diversité des sujets de son étude (ex. bactéries, végétaux, ADN mitochondrial, etc.). Afin d’approcher les organismes biologiques de manière synthétique, ceux-ci peuvent être modélisés sous forme de système biologique. En 1975, De Rosnay définit un système comme « *un ensemble d’éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d’un but* » (De Rosnay, 1975). Les êtres vivants apparaissent alors comme des systèmes particulièrement complexes (Cambien, 2007; Bertalanffy, 1968).

Cette partie présente un ensemble d’éléments caractérisant cette complexité, leurs modes d’évolution, leurs niveaux d’organisation, la relation entre structure et fonction, leur capacité à s’auto-entretenir et leurs constantes interactions avec leur environnement.

2.3.2.1 Une spécificité des systèmes biologiques due à l’évolution biologique

La partie 2.3.1.5 a présenté l’évolution biologique à travers ces concepts fondamentaux. La question des différences entre évolution biologique et innovation technologique apparaît alors à l’origine des spécificités des systèmes vivants. En effet, si l’évolution est le moteur de la « résolution de problèmes » du monde biologique, celle-ci n’en est pas moins pourvue de contraintes menant à une complexité qui lui est propre. Elle est basée sur l’erreur, la chance, ne poursuivant pas de but précis contrairement à l’innovation technologique (Full, 2001). Elle ne pousse pas à l’optimisation des systèmes vivants mais au dépassement d’un seuil suffisant. Comme le dit Yen, il s’agit de la poursuite de “bonnes solutions en opposition aux meilleurs solutions” (Yen et al., 2011). L’évolution fait face à des contraintes multiples, parfois extrêmes, conflictuelles et profondément dynamiques, menant à des solutions multifonctionnelles basées sur des compromis et rendant d’autant plus rare l’apparition d’un caractère optimal (Full, 2001). En outre, là où l’ingénieur anticipe, avec succès ou non, l’évolution des besoins et contraintes lors des phases de conception, les êtres vivants

subissent cette modification des contraintes (Full, 2001). Ce caractère dynamique de l’évolution, ainsi que la continuité génétique entre les générations, conduisent à l’émergence de phénotypes nécessairement ancrés dans leur contexte évolutif historique. Comme souligné par Fish, “les descendants sont limités par leur ancêtres” (Fish et al., 2014). Contrairement à un ingénieur, l’évolution ne peut pas reconcevoir de zéro et chaque organisme possède donc un mix de caractères hérités, dérivés, contraignants, dont l’inertie d’adaptation, ainsi que le maintien lorsque peu soumis à sélection, ne doivent pas être négligés, « ils portent le bagage de leur histoire » (Full, 2001). Enfin, l’évolution doit parfois faire face, pour un même système vivant, à différentes contraintes en fonction de son stade de développement (du stade juvénile à la maturité sexuelle), stades inexistant dans le monde technologique (Full, 2001).

Ces spécificités des mécanismes évolutifs biologiques, sans qu’il s’agisse ici d’une liste exhaustive, conduisent à la complexité des systèmes vivants.

2.3.2.2 Une complexité d’organisation des systèmes vivants

Comme explicité par la théorie cellulaire, les systèmes vivants, s’ils sont composés de cellules, se structurent à de multiples échelles. Ces niveaux d’organisation forment la notion d’arborescence tel que décrit par Simon sur les systèmes artificiels (Simon, 1969).

Ces niveaux hiérarchiques peuvent être décrits avec différentes granularité (Bhasin et al., 2018; Miller, 1973; Vakili et al., 2001), essentiellement on distinguera : (1) Molécules, (2) Organites, (3) Cellules, (4) Tissus, (5) Organes, (6) Systèmes d’organes, (7) Organismes, (8) Groupes, (9) Organisations, (10) Communautés, (11) Écosystèmes, (12) Biosphère.

Ces niveaux sont le plus souvent associés à une évolution à l’échelle physique (du nm au km). Les êtres vivants apparaissent ainsi comme des poupées russes devant être étudiées dans leur complexité organisationnelle. Sans qu’il s’agisse à proprement parler d’une spécificité du monde vivant, cette cohésion entre un grand nombre de niveaux d’organisation compose un élément clé de sa complexité. On notera que celui-ci s’applique d’autant mieux aux êtres pluricellulaires.

2.3.2.3 Une complexité des structures fonctionnelles et informationnelles

L’association entre structures (formes) et fonctions est largement reconnue en biologie (Wainwright, 1988), qu’il s’agisse du site actif d’une enzyme ou de la structure macroscopique des poumons, les structures sont sélectionnées pour leur efficacité à effectuer une fonction donnée. Les systèmes biologiques apparaissent complexes par le nombre de sous-systèmes fonctionnels différents conduisant aux fonctions vitales.

Dans ce cadre, Miller définit dans sa théorie des systèmes vivants (Miller, 1973) 19 sous-systèmes présents à chacun des niveaux précédemment décrits : sous-système d’ingestion, de distribution, de conversion, de production, de stockage d’énergie/de matière, d’extrusion, moteurs, supports, de transduction d’entrée, de transduction de sortie, de transduction

interne, d’acheminement, de décodage, d’encodage d’association, de mémoire, de décision, de reproduction et enfin des sous-systèmes frontières.

Cette spécificité des systèmes biologiques met en évidence le profond besoin organisationnel au sein et entre des différents niveaux hiérarchiques précédemment décrits. Les échanges de flux à travers ces sous-systèmes, qu’ils soient d’énergie, de matière ou d’information, permettent le fonctionnement synergique de l’ensemble des sous-systèmes, sur l’ensemble des niveaux organisationnels.

Le maintien des équilibres est assuré par la structuration des flux informatifs sous forme de boucles de rétroaction conduisant à la notion d’*homéostasie* (Feher, 2017).

« L’homéostasie est un trait commun aux systèmes complexes. Les rétroactions négatives contrebalancent les effets des perturbations qui auraient sans cela entraîné un changement du système (Ernest, 2008)

D’après la *théorie générale des systèmes* cette autorégulation des constantes d’un système caractérise les systèmes dits « *régulés* » (Le Moigne, 1994). Plus encore, cette complexité de structuration des informations, conduit à des systèmes dits « *coordonnés* » réagissant de façon pertinente face aux situations dans lesquelles ils se trouvent.

2.3.2.4 Une complexité due à l’auto-organisation des systèmes vivants

Parmi les propriétés propres aux systèmes vivants, ceux-ci ont la capacité de s’auto-organiser. Depuis la première cellule d’un organisme jusqu’à l’organisme complet, et de la fécondation jusqu’à sa mort, le système biologique assure sa croissance, puis sa régénération permanente, cette notion est connue sous le nom de *théorie de l’autopoïèse* (Maturana et al., 1980).

« Un système autopoïétique est un système organisé (défini comme une unité) en un réseau de processus de production (transformation et destruction) de composants qui : (i) par leurs interactions et leurs transformations se régénèrent en permanence et reconstituent le réseau de processus (relations) qui les a produit ; (ii) le constituent (le système) comme une unité concrète dans l’espace dans lequel ils (les composants) existent en spécifiant le domaine topologique de sa réalisation en tant que réseau » (Varela, 1989)

Cette particularité impose la production, à partir d’apports issus de l’environnement, des éléments nécessaires à la constitution du système et la conservation d’un plan organisationnel stable. Outre l’équilibre des flux précédemment exposé (Chapitre 2, partie 2.3.2.3), un système vivant est donc également en équilibre dynamique du point de vue de sa composition sous-systémique.

Ce maintien de l’architecture est permis par un réseau informationnel complexe, tels les gènes architectes codant pour l’organisation spatiale de l’organisme lors du développement embryonnaire et de la croissance, les inhibitions de contact, la production de facteurs de transcription et d’hormones conduisant à la différenciation de cellules souches en cellules différenciées.

La cohérence globale des régulations permet aux systèmes vivants de rester fonctionnels tout en assurant, dans le même temps, leur régénération. Les interactions entre les sous-systèmes apparaissent encore une fois au centre du principe d’auto-organisation dans la mesure où bien qu’ils soient relativement autonomes, ils sont coordonnés dans le maintien d’une part de leurs états et du réseau assurant leur cohérence.

2.3.2.5 Une complexité due à l’interactions des systèmes vivants

Le rôle central des interactions a été largement souligné dans les parties précédentes notamment entre les sous-systèmes composants les systèmes vivants. Comme cela apparaît clairement en biologie évolutive, les systèmes vivants sont également en permanente interaction avec leur environnement, qu’il s’agisse d’éléments biotiques (vivants) ou abiotiques (non-vivants).

Cette continuité de la matière et de l’énergie avec le monde qui les entoure fait des systèmes vivants des systèmes « *ouverts* » (Bertalanffy, 1968). Ils échangent de l’énergie, de la matière et de l’information avec leur super-système (environnement) sous forme d’*input* et d’*output*. Les processus internes aux systèmes, telle la dégradation (catabolisme) et synthèse (anabolisme) de molécules, maintiennent l’équilibre en énergie et en matière des systèmes vivants. Ces processus sont nommés *throughputs* (Fayemi et al., 2015) (Figure 2.13).

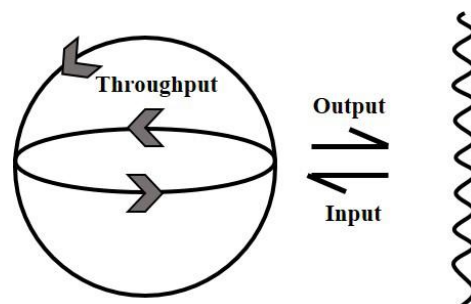


Figure 2.13 Théorie Générale des Systèmes, input, output, throughput, issue de Fayemi (2015)

Du fait de leur activité constante, les systèmes vivants consomment donc de l’énergie en permanence pour maintenir leur organisation complexe. Un système biologique à l’équilibre statique est mort par définition.

« *La vie est un équilibre dynamique dans un système polyphasique* » (Discours à la British Association for the Advancement of Science, Hopkins, 1913)

Les systèmes vivants pouvant être considérés à de multiples échelles, l’environnement est une notion subjective approchant le concept de *super-système*. En effet, l’environnement (*super-système*) d’une cellule (*système*) apparaîtra différent de l’environnement d’un organe ou de celui d’un organisme. On précisera cependant que sans informations spécifiques, le terme d’environnement se réfère au super-système d’un organisme.

Comme présenté en partie 2.3.1.5, les interactions constantes avec l’environnement à l’échelle de l’organisme sont également le moteur des mécanismes de l’évolution. La notion

d’input prise avec une vision systémique conduit à comprendre le lien entre la stabilité des systèmes biologiques et le principe de sélection naturelle : une modification des inputs entrainera une modification du système vivant et ainsi la sélection d’un nouvel équilibre dynamique à l’échelle de l’espèce (*l’évolution dirigée* (Kutschera, 2009)).

2.3.2.6 Synthèse des éléments de complexité des systèmes vivants

À travers leur mécanisme évolutif spécifique, conduisant à leur organisation à de multiples niveaux, leur composition fonctionnelle, leur capacité à s’auto-entretenir et leurs multiples interactions, les systèmes vivants apparaissent comme des systèmes d’une grande complexité. La relation fondamentale entre forme, structure et processus, proposée par Wainwright (Wainwright, 1988), émerge comme une synthèse des apports de cette partie :

- 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 (*throughputs*) 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 qui implique d’autres éléments dans l’environnement du système.

Là où le caractère autopoïétique des systèmes vivants apparaît comme une de leurs principales spécificités, c’est dans la combinaison simultanée et équilibrée de tous ces phénomènes et d’autres encore, telle la cognition, que réside en partie la spécificité du monde vivant.

2.3.3 Synthèse générale sur les sciences du vivant

La présentation de la complexité et de la diversité des mécanismes biologiques rend compte de l’inter-connectivité des êtres vivants et du rôle fondamentale de l’évolution comme le moteur de la génération de solutions biologiques.

Tout comme l’ingénierie de la conception, la biologie apparaît comme une science aux multiples prismes. D’un point de vue conceptuel, un ensemble de théories formalise la biologie moderne telle que la théorie de l’évolution, la théorie chromosomique, la théorie cellulaire, la théorie endosymbiotique, la théorie de l’autopoïèse, etc.

Du point de vue des organismes, ces différentes approches conceptuelles permettent notamment la caractérisation du concept dynamique d’espèce. Les organismes biologiques apparaissent comme des *systèmes complexes* en équilibre dynamique. Une approche

systemique permet d’en faire émerger une modélisation caractérisable sous trois angles principaux, les structures, les fonctions et les modèles d’organisation.

En synthèse de cet état de l’art sur les sciences du vivant et en transition avec l’état de l’art sur la conception biomimétique, ces différentes notions peuvent être replacées dans le cadre de nos travaux sur la conception biomimétique.

2.3.4 Synthèse comparative entre les sciences de la conception et les sciences du vivant

En premier lieu, considérer les théories biologiques comme source d’inspiration peut conduire à approcher l’innovation à travers un cadre conceptuel nouveau. Par exemple, effectuer une analogie avec la théorie cellulaire nous mène à repenser nos systèmes technologiques en les produisant à partir d’une quantité minimale de briques unitaires (parallèle avec les cellules dans le cas des systèmes vivants), facilitant immensément leur compatibilité, réparation, ainsi que leur dégradation et recyclage en fin de vie.

Par ailleurs, on peut considérer les systèmes biologiques, objet de ces théories, comme des sources d’inspiration (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Comparaison des processus de génération de solutions biologiques et techniques

Caractéristiques	Systèmes biologiques	Systèmes techniques
Auto-organisation	Oui	Non
Multifonctionnalité	Oui	Rarement
Organisation pertinente depuis les sous-systèmes vers le système	Oui	Parfois
En interaction active avec son environnement	Oui	Souvent mais limitée
Interaction interne entre les sous-systèmes	Oui	Parfois
Autorégulation	Oui	Rarement
Facilement dégradable	Oui	Rarement
Autonome et résilient	Oui	Rarement
Utilise des sources énergétiques locales et renouvelables	Oui	Très rarement

Afin de faciliter la lecture et centrer notre raisonnement sur l’analogie entre les systèmes vivants et les systèmes technologiques, nous utiliserons dans la suite de ce manuscrit des formulations prenant les êtres vivants comme acteurs des solutions présentées. On utilisera par exemple des formules telles que « les organismes résolvent des problèmes » tout en ayant conscience de la simplification réductrice de cette tournure. On rappelle ici le rôle essentiellement passif des organismes dans l’émergence de ces solutions qui est due aux mécanismes de l’évolution (diversité génétique, sélection, reproduction, etc.) précédemment décrits (Chapitre 2, partie 2.3.1.5).

Le tableau 2.2 souligne ainsi certains axes généraux sur lesquels les systèmes biologiques représentent des sources potentielles d’inspiration. Par l’analyse de 2500 systèmes vivants et de leurs stratégies face à un problème donné (Vincent, 2005), Vincent identifie des spécificités des leviers de résolution biologiques et les compare aux leviers technologiques (Figure 2.14) (Vincent et al., 2006).

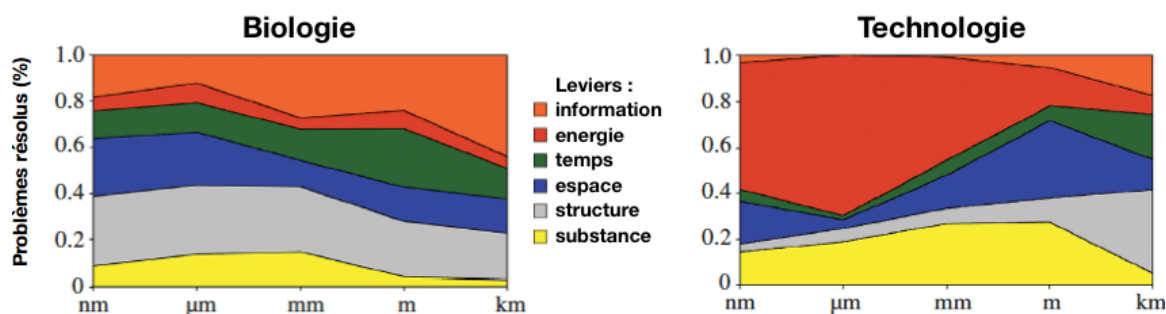


Figure 2.14 Leviers de résolution de problèmes en biologie et technologie, modifiés de Vincent et al. (2006)

Là où la technologie résout principalement les problèmes par l'énergie, l'espace et la matière, le vivant se concentre sur la structure, l'information et le temps. La stabilité relative des leviers de résolution en biologie, indépendamment des échelles considérées, souligne encore une fois la synergie fonctionnelle des différents niveaux d'organisation du monde vivant.

La capacité du monde vivant à résoudre des problèmes complexes et l'interdépendance locale entre les systèmes biologiques et leurs environnements mènent à la mise en place d'un grand nombre de solutions originales pouvant être utilisées comme sources d'inspiration.

2.4 Conception biomimétique

Le développement historique de l'innovation bio-inspirée et l'évolution des tendances scientifiques, industrielles et sémantiques, conduiront à mettre en avant les contributions des 50 dernières années de recherche sur la biomimétique. La synthèse de l'état des connaissances en conception biomimétique ainsi que l'identification des freins et des axes de recherche actuels conduisent par la suite à la formalisation d'un ensemble de questions structurant la réflexion menée à travers ce document (Figure 2.15).



2.4

CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE

2.4.1 Histoire et concepts

2.4.2 Référentiel méthodologique

2.4.3 Freins et axes de résolution

2.4.4 Synthèse et éléments clés

Figure 2.15 Structure de l'état de l'art sur la conception biomimétique

2.4.1 Histoire et concepts

De la bio-inspiration à la biomimétique en passant par la bionique et le biomimétisme, cette partie décrit l’évolution et la structuration des approches modernes inspirées du vivant. Ces différents concepts sont également explicités pour éviter toute confusion sémantique.

2.4.1.1 Origine de la bio-inspiration et dissémination aux divers secteurs d’activité

Tel que décrit par Piaget, au cours de la croissance et de la structuration de son intellect, l’Homme passe par une phase d’apprentissage et de formalisation de concepts par imitation (Piaget, 2007). Se développant à l’origine en interaction permanente avec la Nature, l’espèce humaine a ainsi imité celle-ci depuis l’origine de son développement.

Si la Nature comme objet de comparaison, d’imitation et donc comme source d’inspiration est largement reconnue, il est extrêmement complexe de dater avec précision l’apparition de la conception bio-inspirée (Lenau, 2009; Vincent et al., 2006). Un ensemble d’exemples tels que les filets de pêche potentiellement inspirés des toiles d’araignées, l’utilisation de la soie en Chine impériale (Vincent et al., 2006), ou même la conception de boomerangs aérodynamiques datés de 50 000 ans (Harman, 2014) laisse à penser que l’Homme transfère dès l’antiquité des observations qu’il fait de la nature en innovations techniques.

La tendance se poursuit avec l’émergence des sciences et de la technologie moderne. Elle mène à un grand nombre d’innovations dans des domaines variés : le travail de Léonard de Vinci sur les machines volantes inspirées des oiseaux (Richter et al., 2008), la Tour Eiffel basée sur des modèles mathématiques inspirés de la structure des os (Eggermont, 2015), le Velcro® inspiré de la fleur de bardane, les winglets imaginés après l’observation des ailes des oiseaux de proie (Guerrero et al., 2012), les revêtements Sharklet® antimicrobiens imitant les nano-denticules de la peau de requin (Figure 2.16) (Magyar et al., 2017), etc.

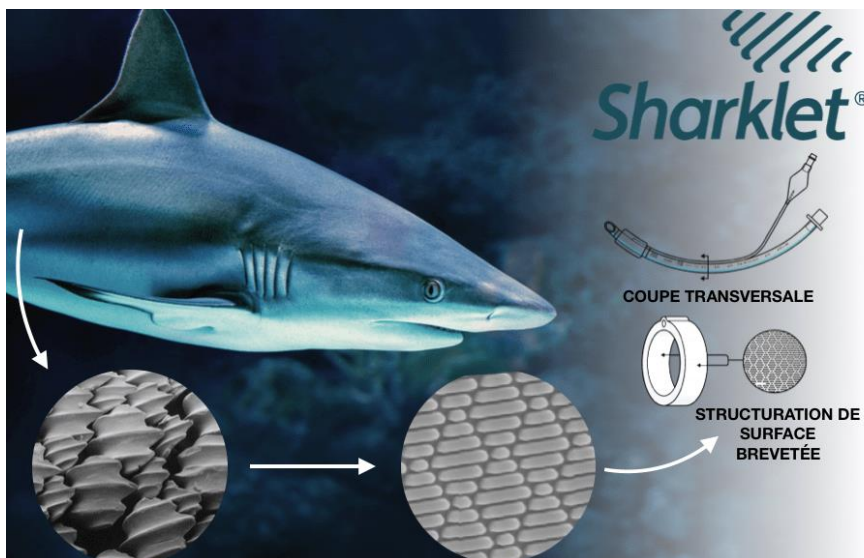


Figure 2.16 Exemple d’innovation biomimétique avec les technologies antimicrobiennes Sharklet®

De l’aéronautique (Bar-Cohen, 2012) au biomédical (Zhang, 2012) en passant par l’architecture (Chayaamor-Heil et al., 2018), le militaire (Pace et al., 2001), l’informatique

(Floreano et al., 2008) ou la robotique (Bar-Cohen et al., 2003), le potentiel de la bio-inspiration est reconnue dans un grand nombre de domaines de conception innovantes.

Outre l’innovation, Gilles Bœuf identifie douze prix Nobel de médecine basés sur la bio-inspiration (Boeuf, 2007), soulignant ainsi son importance en recherche scientifique fondamentale. La bio-inspiration n’est donc pas une stratégie récente d’innovation et touche historiquement un grand nombre de secteurs.

2.4.1.2 Biomimétique, biomimétisme, bionique, un besoin de clarification sémantique

Le terme « *biomimétique* », apparaît officiellement dans une publication d’Otto H. Schmitt en 1969 intitulée « *Some interesting and useful biomimetic transform* » (Schmitt, 1969). Sans avoir le sens qu’il porte aujourd’hui, le terme « *biomimetic* » se concentre déjà sur les éléments techniques générés à partir d’observations du monde vivant.

Avec l’émergence des problématiques environnementales à la fin du XX^e siècle et grâce aux travaux de dissémination de figures emblématiques, comme Janine Benyus (Benyus, 1997), c’est le terme « *biomimétisme* » qui prend ensuite son essor. Celui-ci vise le développement durable comme objectif de l’approche de bio-inspirée.

L’intérêt contemporain croissant pour la bio-inspiration, notamment de la part des ingénieurs, fait émerger un manque d’outils, de processus et de méthodes permettant la mise en place de ces champs d’innovation. L’approche par sérendipité⁶, jusque-là largement majoritaire, ne suffit pas pour répondre aux attentes grandissantes de la recherche et du monde industriel. Ces lacunes conduisent les chercheurs en ingénierie de la conception à questionner le cadre méthodologique permettant la systématisation de son utilisation : comment faire de la bio-inspiration une approche fiable, structurée et accessible aux concepteurs ?

Notamment portées par les équipes allemandes se référant au domaine par le terme de *bionik*, ces recherches voient un premier écueil apparaître : l’harmonisation des concepts sémantiques entourant la bio-inspiration.

Historiquement, la *bionik* allemande se concentre sur l’approche mécanistique du monde vivant afin d’en extraire les « *techniques du vivant* » et d’en déduire les approches pertinentes d’analyse (Fayemi, 2016), rappelant le concept de *biomimétique* porté par Schmitt (Schmitt, 1969). La *bionics* anglo-saxonne s’intéresse en revanche au couplage entre bio-inspiration, électronique et robotique (Fayemi, 2016). Au vu de leur sens varié, la proximité phonétique des deux termes apparaît comme un problème.

Par ailleurs, le *biomimétisme*, par sa diffusion massive et son appropriation dans un sens générique proche de bio-inspiration, porte lui-aussi à confusion en regroupant dans l’imaginaire du grand public tous les concepts précédemment présentés.

En 2015, dans une logique de standardisation à l’échelle internationale, ces termes sont définis à travers une norme (ISO/TC266, 2015) (Figure 2.17).

⁶ « *Capacité, art de faire une découverte, scientifique notamment, par hasard ; la découverte ainsi faite.* » (Dictionnaire Larousse)

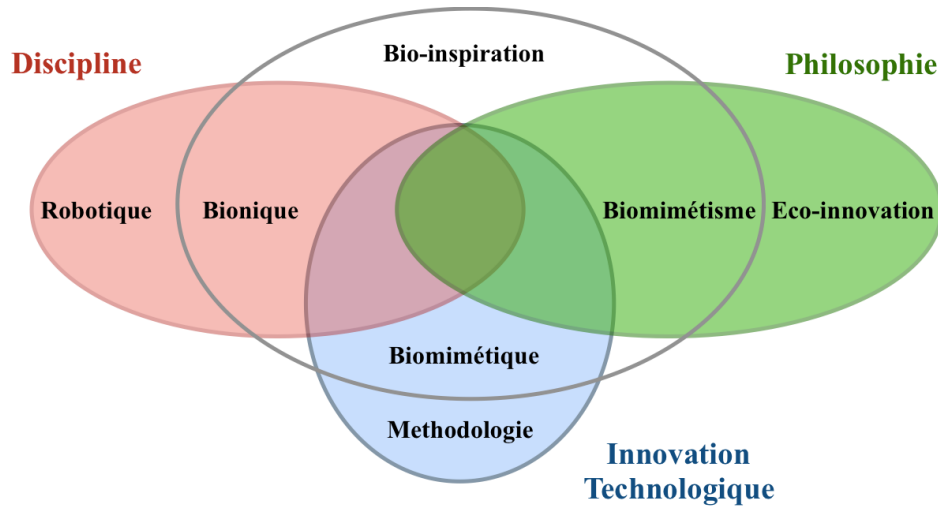


Figure 2.17 Cadre sémantique de la bio-inspiration (ISO/TC266, 2015)

- La bio-inspiration : « *approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques* »
- La bionique (= *bionics*) : « *discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques* »
- Le biomimétisme (= *biomimicry*) : « *philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (social, environnemental et économique)* »
- La biomimétique (= *biomimetics*) : « *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* ».

On soulignera la redondance notable du terme « *biomimétique* » en tant qu’adjectif des innovations issues de la biomimétique ou du biomimétisme sans distinction (Ex. un produit biomimétique/a biomimetic product). Cette redondance est encore plus forte en français dans la mesure où elle reprend également le champ de la biomimétique décrit ci-dessus.

Dans une logique de clarification, la norme précise trois critères permettant de valider le caractère « *biomimétique* » d’une démarche d’innovation. Celle-ci doit, (a) conduire à une analyse fonctionnelle de systèmes biologiques, (b) entraîner une abstraction des systèmes en modèles et enfin (c) transférer et appliquer les modèles abstraits sans avoir recours aux organismes biologiques eux-mêmes. Ces critères mettent notamment en exergue la différence entre l’utilisation d’êtres vivants dit *bio-utilisation*, tel que c’est notamment le cas

en *bio-remédiation*⁷, et les approches décrites ci-dessus, qui visent à extraire et transférer les savoirs issus de la biologie vers la technologie.

Comme représenté sur la figure 2.17, ces concepts ne sont pas incompatibles, une innovation technique robotique suivant les approches de conception biomimétique et ayant pour objectif le développement durable sera considérée comme associée aux champs de la biomimétique, du biomimétisme et de la bionique.

Malgré cet effort de définition à l’échelle internationale, l’acceptation de ces concepts, leur dissémination et leur utilisation suivant le sens de la norme reste encore difficile. Un ensemble d’auteurs s’émancipe de ces distinctions sémantiques et approche l’ensemble des domaines à travers le terme générique de biom* (Hoeller et al., 2016). Le terme de conception bio-inspiré (Bio-Inspired Design) émerge également comme une terminologie intermédiaire définie comme « *la découverte de principes biologiques fondamentaux et le transfert analogique à l’ingénierie humaine pour concevoir, potentiellement, mieux que la nature.* » (Sharma et al., 2019). Dans le cadre des travaux présentés dans ce manuscrit, c’est la biomimétique qui compose le champ de référence.

2.4.1.3 Tendances sociétales et structuration des réseaux clés

Les 20 dernières années voient l’émergence de différents réseaux liés à la bio-inspiration. Ceux-ci partagent essentiellement les mêmes buts : favoriser la dissémination des approches précédemment décrites par l’organisation d’évènements d’animation de réseau, la proposition de formations, l’accompagnement à la mise en place en entreprises et dans une certaine mesure, la coordination de la recherche scientifique.

Le réseau allemand *Biokon* (2001), centre névralgique de la propagation de la biomimétique en Europe est le premier réseau à être créé.

Puis, sous l’élan de Janine Benyus et Dayna Baumeister, l’institut américain à l’origine de la propagation du biomimétisme, le *Biomimicry Institute*, est fondé en 2006. Cet institut établit le *Biomimicry Global Network*, réseau de 36 antennes réparties dans 21 pays.

En France, le Centre d’étude et d’expertise en biomimétisme (Ceebios) voit le jour en 2014, avec la volonté de « *...catalyser la richesse des compétences nationales du monde académique, de l’enseignement et de la R&D industrielle.* » (Ceebios, 2017a). La structure française est aussi coorganisatrice (avec NewCorp Conseil) de la conférence Biomim’Expo (Biomim’expo, 2019) constituant une plateforme d’échange entre le monde de la recherche et de l’industrie ayant rassemblé plus de 2000 participants pour sa quatrième édition en 2019.

La considération du biomimétisme comme un moteur de l’éco-innovation touche également peu à peu les instances décisionnaires françaises, débloquent les premiers investissements et bourses nécessaires à son développement (Ministère de la transition Écologique et Solidaire, 2016; CESE, 2015).

⁷ *Bio-remédiation* : La bio-remédiation est une approche visant à utiliser l’activité naturelle de certains organismes biologiques afin de dégrader ou de rendre inoffensifs différents contaminants (Vidali, 2001)

2.4.1.4 Approches et tendances industrielles de la biomimétique moderne

Malgré cette structuration des acteurs et la tendance à la croissance de ces secteurs, l’utilisation de la biomimétique dans le paysage industriel reste très marginale.

La biomimétique comme une stratégie d’innovation des entreprises

En plus des entreprises de conseil spécialisées, deux principaux types d’entreprises qui innovent par la biomimétique sont à distinguer : celles construites à partir d’innovations biomimétiques et celles souhaitant intégrer une démarche biomimétique a posteriori.

Le premier type d’entreprises est principalement constitué de start-up, TPE ou PME qui développent des produits en interne par l’association de compétences issues du monde de la recherche en biologie et de la conception, telle qu’Hemarina (Hemarina, online), Glowee (Glowee, online), Geckskin® (Geckskin, online), Urban Canopee (Urban Canopee, online), etc.

Les entreprises souhaitant intégrer la biomimétique a posteriori sont souvent des entreprises de taille importante, ayant la possibilité d’investir dans le développement d’une nouvelle stratégie d’innovation. Celle-ci sera alors testée en parallèle de son activité de conception régulière. Le domaine de l’aérospatial et de l’aéronautique sont notamment parmi les domaines les plus porteurs, la NASA (Wade, 2019) ou Airbus (Airbus, 2018; Airbus, 2019) utilisent ainsi la biomimétique comme stratégie d’innovation. Les constructeurs automobiles tels que Mercedes (Gray, 2006) ou Renault (Perrin, 2017) s’y intéressent également.

D’autres entreprises de secteurs variés, telle que L’Oréal, LVMH, EIFFAGE, EDF, ENGIE ou encore Air Liquide, s’associent également aux instituts et réseaux spécialisés, tel que le Ceebios, afin d’évaluer l’impact potentiel d’une stratégie de conception bio-inspirée (Ceebios, 2019).

Le potentiel innovant de la biomimétique

La question du potentiel innovant de la biomimétique apparaît crucial pour les entreprises. En plus des différentes applications précédemment présentées, et faisant figures de *success stories*, les chercheurs se sont également penchés sur la question afin de démontrer scientifiquement l’intérêt de la biomimétique.

À travers une collaboration internationale, notamment basée sur des résultats initiaux soulignant le caractère comparativement plus original des concepts bio-inspirés (Ahmed-Kristensen et al., 2014), les chercheurs de l’Indian Institute of Science (IISc) et de la Technical University of Denmark (DTU), publient une étude soulignant le caractère innovant de la biomimétique (Keshwani et al., 2017). La démarche compare ainsi le résultat de phases de génération d’idée avec ou sans apport de données biologiques, proposées sous forme de Biocards telles que précédemment développées par Lenau (Lenau et al., 2010). L’étude conclut que les idées « *générées à l’aide de biocards ont montré une augmentation progressive de la nouveauté des concepts produits par rapport à celles obtenues lors de l’utilisation de brainstorming pour l’idéation* » (Keshwani et al., 2017).

Outre la validation du potentiel innovant, la question du type d’innovations possibles par la biomimétique émerge également comme un critère permettant aux entreprises de se projeter dans une utilisation concrète de l’approche.

Types d’inspirations biomimétiques

Différentes grandes catégories d’inspiration sont identifiées dans la littérature. Initialement énoncé par le Biomimicry Institute, le triptyque décrivant l’innovation sur la forme, le processus ou le système (Baumeister et al., 2013), est largement repris malgré quelques ajustements (Jacobs, 2014; Jacobs et al., 2014).

Par la suite, l’étude des mécanismes cognitifs sous-jacents au processus analogique, notamment par Nagel, conduit à découper et/ou combiner ces trois grandes catégories en divers sous classes : forme, architecture, surface, matériau, fonction, processus et système (Nagel et al., 2018). Le tableau 2.3, présente un exemple d’application pour chaque catégorie afin de rendre compte du potentiel et de la diversité des applications biomimétiques (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Exemple de concepts biomimétiques pour les catégories d’inspiration, adapté de (Nagel et al., 2015)

Catégorie	Définition	Exemple
Forme	Caractéristiques visuelles, la forme, la géométrie et les caractéristiques esthétiques ; morphologie externe	Voiture Mercedes-Benz, inspirée de la forme hydrodynamique du poisson coffre, la traînée d’un véhicule peut être largement réduite (Chowdhury et al., 2019).
Fonction	Les actions du système ou ce que les systèmes font ; physiologie	Eastgate Center au Zimbabwe, inspiré de la fonction de thermorégulation passive des termitières issue de cellules de convection et de gradients thermiques. Consommation d’énergie réduite de 35 % (Pierce, 2016)
Matériau	Attributs ou substances liées aux propriétés des matériaux	Adhésif PureBond®, inspiré d’un acides aminés de type catécholamine, nommé DOPA, et constitutifs des Marine Adhesive Proteins (MAP) du byssus de moule (Kord Forooshani et al., 2017).
Process	Série d’étapes qui sont effectuées ; comportement	Béton auto-réparant, basé sur le processus de réparation d’un os, (1) réponse inflammatoire (2) prolifération cellulaire (3) remodelage de la matrice, un processus analogue est utilisé (1) déclenchement (2) transport d’agents de réparation (3) réparation chimique (Sangadji et al., 2013).
Architecture	Comment les objets sont interconnectés ou structurés, géométrie conduisant à la forme ; morphologie interne	Matériau pare-balle de haute résistance basé sur les structures multicouches des nacres des mollusques et des écailles de poissons. L’épaisseur et la rigidité croissante de l’intérieur vers l’extérieur des différentes couches conduit à une très bonne résistance aux impacts (Hassan et al., 2018).
Surface	Attributs qui se rapportent aux propriétés topologiques ; morphologie de surface	Surfaces antibactériennes Sharklet®, inspirées des denticules de requin dont la surface est couverte de nanostructures rainurées de taille variable, et formant des losanges. Cette topologie limite l’adhésion des bactéries et demande trop d’énergie pour leur permettre de développer un film bactérien (Magyar et al., 2017).
Système	Principe, stratégie ou fonction de haut niveau ; Lorsque plusieurs sous-catégories sont présentes	Parcs éoliens inspirés de modèles mathématiques représentant les bancs de poissons. Ainsi, une organisation selon ce modèle biomimétique permet l’utilisation des vortex d’air, produits par certaines éoliennes, comme énergie motrice pour d’autres (comme cela est observé avec l’eau chez les poissons) augmentant la production d’énergie (Whittlesey et al., 2010)

Si les distinctions entre ces différentes catégories sont parfois sujettes à discussion, elles ont essentiellement pour but de permettre aux concepteurs d’envisager la diversité des prismes par lesquels s’inspirer du monde vivant.

Une stratégie à forte croissance prévisionnelle

Dans une étude de 2013, réalisée par le Fermanian Business & Economic Institute et mandatée par le Zoo de San Diégo, les apports économiques de la bio-inspiration à l’échelle mondiale sont évalués à près de 1 600 milliards de dollars du PIB en 2030 (Fermanian Business & Economic Institute, 2013). L’étude précise que la limitation de la pollution produite et des ressources consommées rapporterait près de 500 milliards de dollars supplémentaires. Toujours d’après cette étude, les secteurs les plus enclins à intégrer ces stratégies seraient l’industrie chimique et les matériaux avec 15 % de ventes prévisionnelles issues de la bio-inspiration (Fermanian Business & Economic Institute, 2013) (Figure 2.18).

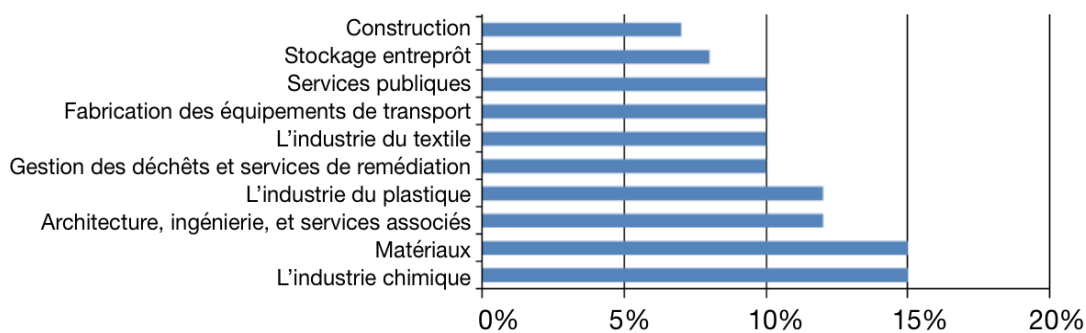


Figure 2.18. Extrait des estimations de l’impact économique de la bio-inspiration sur les secteurs industriels américains (en pourcentages de ventes) par le Fermanian Business & Economic Institute (2013)

En conclusion, le rapport précise que de telles perspectives sont fortement soumises à la capacité de la bio-inspiration à quitter son utilisation de niche pour devenir une véritable stratégie d’innovation.

Par ailleurs, il met en avant le fait que les investissements seront très importants, non pas parce que la démarche est « *green* » mais parce qu’elle est reconnue comme simulant l’innovation.

Sans que de nouvelles études n’aient mis à jour ces chiffres, ces estimations montrent que le potentiel économique associé au développement de la bio-inspiration, et donc par extension celui de la biomimétique, est particulièrement conséquent.

2.4.1.5 Tendances scientifiques de la biomimétique moderne

Outre les instituts précédemment décrits, qui animent les réseaux nationaux et internationaux, les années 2000 voient le monde scientifique s’emparer du sujet.

L’effort de recherche associé à la bio-inspiration en général (représenté par les publications de science direct sur la figure 2.19), et la biomimétique en particulier (restreint aux publications de la Design society sur la figure 2.20), a progressé de façon spectaculaire au cours des 30 dernières années (Figure 2.19, échelle logarithmique).

Chapitre 2 – État de l’art

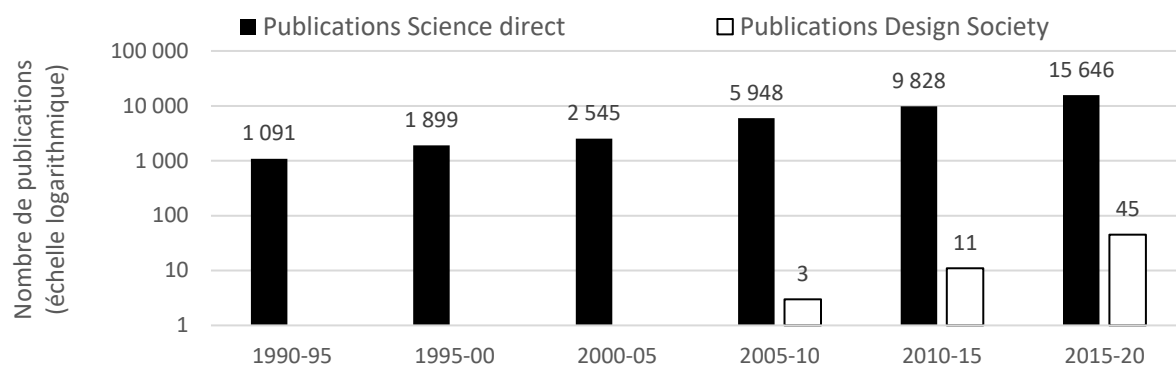


Figure 2.19 Évolution des articles mentionnant « biomimetics » publiés sur Science direct et par la Design Society

Parmi ces travaux, deux approches scientifiques se distinguent. Un premier type de laboratoire étudie la bio-inspiration à travers le prisme des applications, travaillant sur l’axe de la génération d’innovations à proprement parler. Les champs disciplinaires étudiés dépendent des applications, allant de la robotique au *Biomimetic Robotics Lab* du MIT à la médecine au *Laboratory of Immunology and Biomimetics* de la Technical University of Denmark (DTU) en passant par tous types de domaines.

Le nombre de publications dans chacun de ces champs montre un intérêt croissant pour l’approche, notamment en chimie, science des matériaux et ingénierie (Snell-Rood, 2016; Sharma et al., 2019) (Figure 2.20).

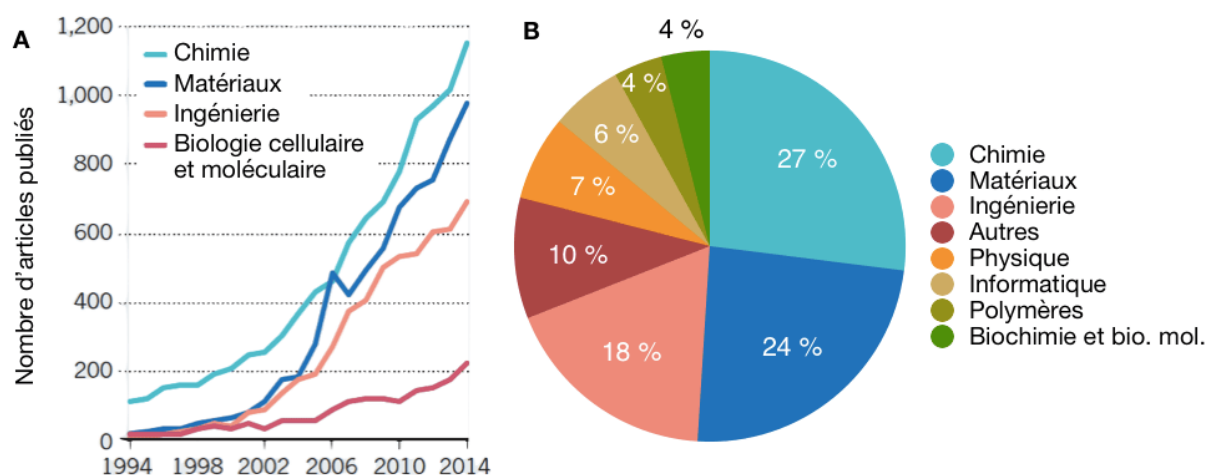


Figure 2.20 Champs scientifiques associés aux travaux sur la bio-inspiration. (A) Évolution des publications jusqu’en 2014, par Snell-Rood (2016), (B) état des lieux actuel (% des articles) issu de Sharma (2019)

Le deuxième type de laboratoire aborde la bio-inspiration du point de vue de l’ingénierie de la conception par la biomimétique. Dans la mesure où nos travaux abordent ce deuxième champ, la suite de cet état de l’art se concentre sur les recherches qui lui sont associées.

Outre les acteurs institutionnels et industriels, les acteurs de la recherche sur la biomimétique sont également de plus en plus nombreux. Le tableau 2.4 présente une liste non exhaustive des structures de recherche constituant l’écosystème scientifique

Chapitre 2 – État de l’art

international sur la biomimétique (Tableau 2.4). Celles-ci promulguent leurs travaux *via* les journaux et conférences scientifiques.

Tableau 2.4 Structures de recherche sur les méthodologies biomimétiques, modifié de Fayemi (2016)

Pays	Structure 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-Brisgau) ; 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) ; Loughborough University (Loughborough) ; Imperial College London (Londres) ; The University of the West of England (Bristol), University college London (Londres)
Autriche	Wiener Neustadt (Vienne) ; Carinthia University of Applied Sciences (Villach)
Canada	University of Guelph (Guelph) ; University of Toronto (Toronto) ; University of Manitoba (Winnipeg) ; École de Technologie Supérieure (Montréal) ; McGill (Montréal)
Danemark	Technical University of Denmark (Lyngby)
Écosse	School of Engineering Heriot-Watt University (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) ; James Madison University (Harrisonburg) ; University of Akron (Akron) ; Arizona State University (Tempe) ;
France	Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (Paris) ; École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers (Paris) ; École Nationale Supérieure des Mines de Paris (Paris) ; Ceebios (Paris) ; Museum National d’Histoire Naturel (Paris) ; École Centrale Paris (Paris) ; Université de Bretagne Occidentale (Brest) ; École Européenne Supérieure d’Art de Bretagne (Brest)
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) ; The Hague University of Applied Sciences (The Hague)
Suisse	Eidgenössische Technische Hochschule Zurich (Zurich), École polytechnique fédérale de Lausanne (Lausanne)
Taïwan	National Cheng Kung University (Tainan City)

Il est à noter que sous l’impulsion du Pr. Julian Vincent et de Norbert Hoeller notamment, la conférence ICED 2019 voit pour la première fois la mise en place d’un groupe de réflexion scientifique sur la biomimétique visant à amorcer la constitution, au sein de la *Design Society* (voir partie 2.2.1.1), d’un *Scientific Interest Group (SIG)* dédié à la thématique.

2.4.1.6 Synthèse sur l’historique et les concepts

La situation actuelle apparaît comme un tournant dans l’histoire de la bio-inspiration. L’émergence de courants modernes à fort impact, comme le biomimétisme, sont des vecteurs de dissémination et d’investissements, bien qu’encore insuffisants. Les attentes sont fortes, et tout l’enjeu des années à venir se pose donc sur la capitalisation de l’effort de communication autour de la pertinence de ces approches.

Là où le monde académique supporte l’effort de recherche sur les applications bio-inspirées, le monde industriel, même s’il en comprend le potentiel, demeure faiblement investi dans la poursuite de ces stratégies d’innovation.

La recherche en ingénierie de la conception sur la biomimétique joue le rôle de catalyseur dans cette dynamique de dissémination. À travers les avancées de ce champ scientifique, l’apport de méthodes et d’outils doit ainsi permettre la bascule depuis le monde de la recherche, qu’il s’agisse de biologie pure ou d’application bio-inspirée, vers le monde de l’industrie.

2.4.2 Référentiel méthodologique

Les difficultés de transition depuis la recherche scientifique vers le monde industriel sont multiples. De manière générale, la modification des processus de conception et la prise en compte de nouvelles stratégies d’innovation est toujours un défi pour les entreprises établies.

Dans le cas de la biomimétique, l’aspect pluridisciplinaire pose un problème supplémentaire dans la mesure où les concepts, le vocabulaire, les savoirs et le savoir-faire requis diffèrent des prérequis usuels.

Pour répondre à ces difficultés, l’ingénierie de la conception doit structurer l’approche biomimétique pour guider les entreprises et les concepteurs.

2.4.2.1 Biomimétique, les approches *biology push* ou *technology pull*

Faisant face aux lacunes méthodologiques précédemment décrites, la recherche en ingénierie de la conception aborde la bio-inspiration par le prisme de la biomimétique. Rapidement, deux approches principales sont mises en évidence.

Soit la phase de conception se base sur une découverte biologique qu’elle transforme en innovation, auquel cas le monde vivant apparaît comme une source de nouveaux axes d’innovation et la biomimétique est approchée comme une méthode directe de transfert et de valorisation de la recherche biologique. D’après la norme précédemment évoquée on parlera de *biology push approach* (ISO/TC266, 2015).

Soit la phase de conception se base sur un problème technologique qu’elle cherche à résoudre, auquel cas le monde vivant apparaît comme une source de solutions et la biomimétique est approchée comme une méthode de résolution de problèmes par analogie (Eggermont, 2011; Fayemi et al., 2014). Toujours d’après la même norme, on parlera de *technology pull approach* (ISO/TC266, 2015).

Dans la mesure où la norme n’est posée qu’en 2015, différents termes précédemment publiés existent dans la littérature (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 Équivalents sémantiques décrivant les deux approches du processus biomimétique

Référence introduisant les termes	Transfert et valorisation de la recherche biologique	Résolution de problèmes par analogie
(ISO/TC266, 2015)	Biology push approach	Technology pull approach
(Badarnah et al., 2015)	Solution-based	Problem-based
(Vattam et al., 2007)	Solution-driven	Problem-driven
(Baumeister et al., 2013)	Biology to design	Challenge to biology
(Speck et al., 2006)	Bottom up	Top down
(Gebeshuber et al., 2008)	Biomimetics by induction	Biomimetics by analogy

Dans la même logique que précédemment, nous utiliserons les termes issus de la norme (ISO/TC266, 2015) dans la suite de ce manuscrit.

Qu’il s’agisse de retours industriels (Jacobs et al., 2014) ou d’analyse de la pratique en conditions contrôlées sur des projets étudiants (Helms et al., 2009), une proportion plus importante de projets suivant l’approche *biology push* se dessine dans la littérature.

Ces résultats semblent d’ailleurs coïncider avec les tendances de déploiement des approches bio-inspirées précédemment présentées. Là où le nombre de publications scientifiques sur les applications biomimétiques augmente considérablement (Chapitre 2, partie 2.4.1.5), témoin d’une appropriation de l’approche *biology push* par les chercheurs, les acteurs industriels demeurent en retrait et nécessitent des apports méthodologiques conséquents pour appliquer une approche *technology pull*.

Par conséquent, c’est sur cet axe que se concentrent les recherches en ingénierie de conception. Les travaux de formalisation du cadre méthodologique conduisent à standardiser l’approche biomimétique par la mise en place de processus de conception permettant de préparer et d’effectuer le raisonnement de résolution de problèmes par analogie avant d’appliquer les solutions issues du monde vivant pour générer des innovations.

Comme vu en partie 2.2.1.4, l’ingénierie de la conception approche l’innovation à travers un ensemble de prismes, dont une classification selon le degré de nouveauté. Sur cet aspect, Chirazi indique que la biomimétique conduit aussi bien à des innovations incrémentales (routinière) que radicales (disruptive, fondamentale) (Chirazi et al., 2019).

2.4.2.2 État de l’art sur les processus biomimétiques *technology pull*

Depuis le début des années 2000, un ensemble de processus de conception biomimétique a été formalisé. À travers une collaboration internationale, Fayemi et Wanieck présentent et comparent 12 de ces processus (Fayemi et al., 2017) pour les harmoniser à travers un processus de conception unifié. En nous référant à ces travaux, un échantillon représentatif des grandes familles de processus est présenté avant d’en effectuer une synthèse comparative.

En suivant la classification des processus de Wynn et Clarkson (Wynn et al., 2005) précédemment établi (Chapitre 2, partie 2.2.2.2) cette partie présente un exemple de

processus analytique, abstrait, procédural outillé sur la modélisation et sur la sémantique, avant de conclure par le modèle unifié proposé par Fayemi et Wanieck (Fayemi et al., 2017).

Afin de structurer cette liste de processus, le prisme de la DRM (Design Research Methodology) de Chakrabarti et Blessing est utilisé (Blessing et al., 2009) (Figure 2.21)

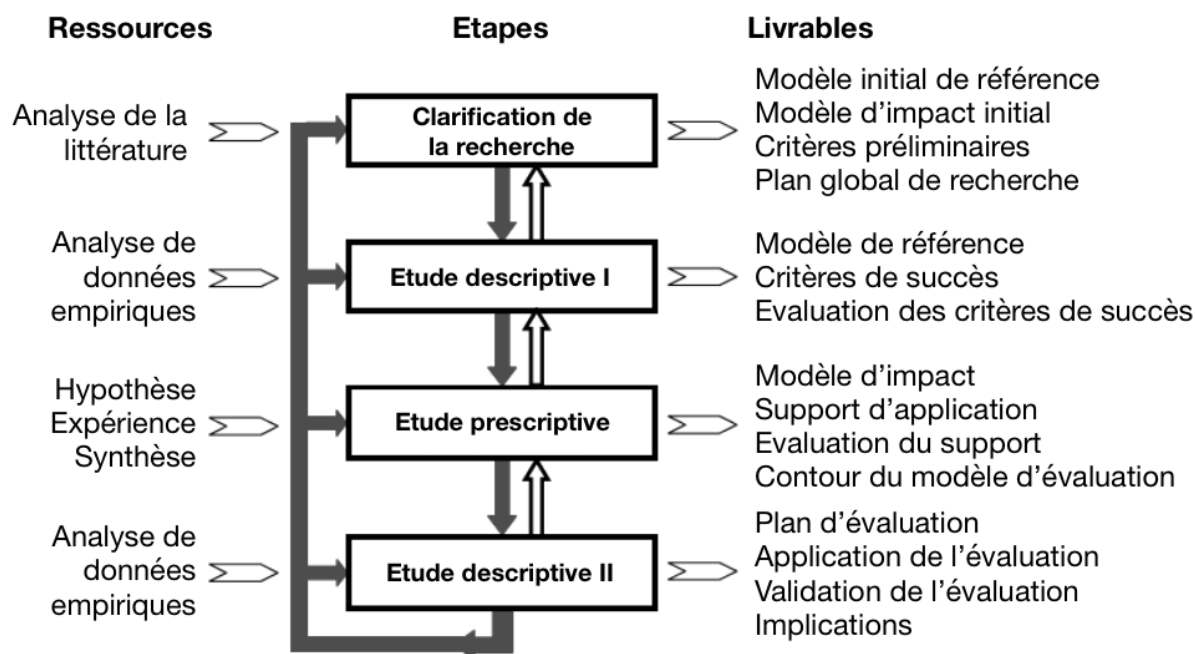


Figure 2.21 Schéma explicatif de la Design Research Methodology (DRM), adaptée de Blessing et al. (2009)

Les approches analytiques, comme la méthodologie de conception biomimétique, Université Technologique du Danemark DTU (Lenau, 2009; Lenau et al., 2010)

Clarification de la recherche

Comme d’autres équipes de recherche (Lindemann et al., 2004), (Helms et al., 2009), (Goel et al., 2014), Lenau approche la formalisation des processus de conception biomimétique avec un angle analytique. L’objectif poursuivi est l’identification des grandes étapes de la démarche à travers l’observation de projets étudiants.

Étude descriptive I

Grace à l’évaluation de sept études de cas conduits par douze étudiants, un processus de conception de 4 étapes est mis en place en 2009 (Lenau, 2009) puis raffiné en huit sous-étapes en 2010 (Lenau et al., 2010).

Étude prescriptive

En combinant ces travaux, le processus suivant est proposé (Figure 2.22).

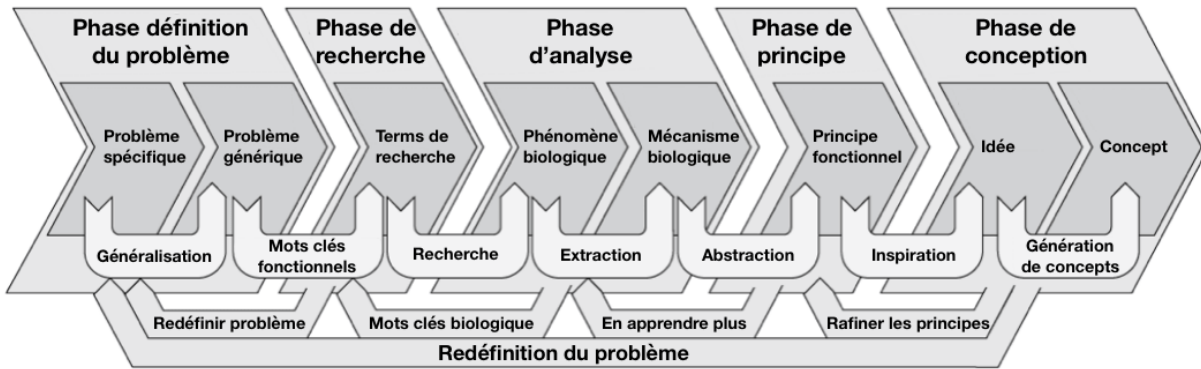


Figure 2.22 Méthodologie de conception biomimétique, adaptée de Lenau et al. (2010)

On retrouve une structure méthodologique classique telle qu’elle existe dans la majorité des processus de conception. À celle-ci s’ajoute les phases de recherche d’organismes biologiques notamment via l’identification de mots-clés, soulignant l’importance de la sémantique. La version de 2010 présentée ci-dessus, détaille également un ensemble de boucles particulièrement nombreuses et structurées, mettant en avant le caractère foncièrement itératif du processus biomimétique.

Étude descriptive II

À travers une étude de cas sur les prothèses, l’équipe du DTU teste le processus et décrit son efficacité. Un ensemble d’outils et d’indications accompagnant les concepteurs est également proposée. L’étude se conclut sur la mise en exergue de la difficulté que représente la recherche de solutions biologiques et le besoin de structuration plus précise des associations entre les mots-clés, les moteurs de recherche et les modèles biologiques.

Les approches abstraites, outillées ou non, comme l’approche biomimétique de l’ingénierie, Université de Bath (Bogatyrev et al., 2008; Bogatyrev et al., 2015)

Clarification de la recherche

Spécialistes de la TRIZ, ces chercheurs abordent la conception biomimétique dans un premier temps à travers le prisme de cette théorie en s’intéressant à l’identification de principes de résolution biologiques associés à des contraintes abstraites. Puis ils formalisent les liens qui existent entre les fonctions biologiques et l’identification d’un jeu de paramètres associé pouvant être optimisés selon les besoins de conception.

Étude descriptive I

Ce processus formalisé par Bogatyrev, Vincent et Bogatyreva est conçu en deux phases distinctes. Dans un premier temps, Bogatyrev et Vincent cherchent à modéliser une approche permettant d’associer des problèmes de conception à des problèmes biologiques afin d’identifier des voies de résolution issues des stratégies biologiques (Bogatyrev et al., 2008). Puis, Bogatyrev et Bogatyreva associent à ce processus un ensemble d’outils adapté de la

TRIZ et formant la méthodologie BioTRIZ permettant de modéliser et d’abstraire les problèmes de conception sous forme de contradictions (Bogatyrev et al., 2014).

Étude prescriptive

Le concepteur est guidé à travers un processus constitué de six étapes, débutant par une description holistique du problème de conception. Celle-ci mène à la recherche d’un ensemble d’organismes répondant à la fonction identifiée comme centrale au problème afin de faire émerger des tendances et des paramètres fonctionnels clés des systèmes biologiques. Ceux-ci sont ensuite amplifiés, organisés et optimisés selon l’objectif de conception (Figure 2.23).

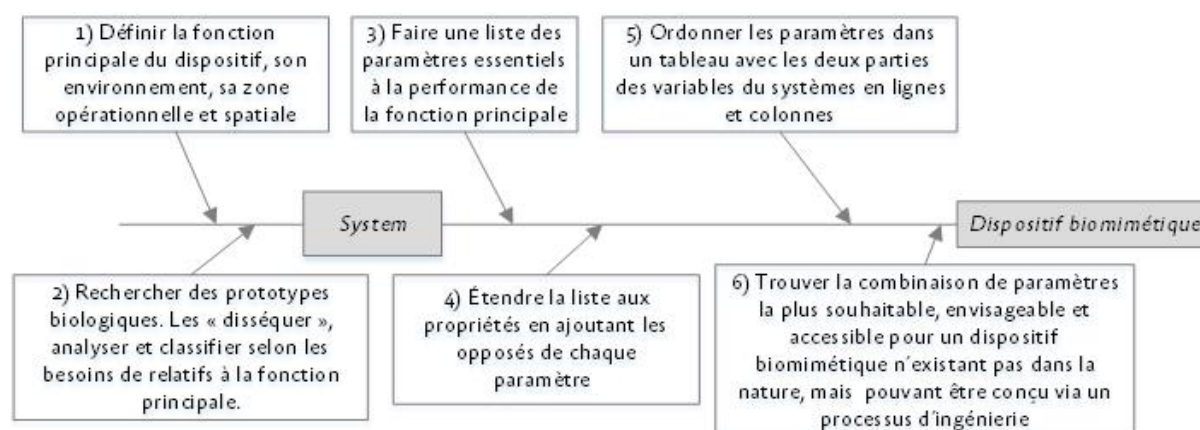


Figure 2.23 Approche biomimétique de l’ingénierie, par Fayemi (2016) basée sur Bogatyrev et al. (2015)

À travers un « *algorithme de résolution* » ils souhaitent notamment éviter les interactions entre concepteurs et biologistes pour prévenir les divergences entre le référentiel technologique et biologique (Bogatyrev et al., 2015).

Étude descriptive II

Ce processus abstrait vise à la mise en place d’une approche fonctionnelle et paramétrée de la biomimétique. Elle préconise l’identification d’éléments clés puis d’extrapolation des stratégies biologiques. La maîtrise des outils issus de la TRIZ et du raisonnement très abstrait apparaît comme une limite de ces processus.

C’est de ces approches initiales que naîtront par la suite les travaux de Vincent sur le concept de *trade-off* (les *compromis*) (Vincent, 2017) et le processus associé centré sur des outils numériques, proposé par Kruiper (Kruiper et al., 2018).

Les approches procédurales outillées sur la modélisation, comme le processus Idea-Inspire développé à l’Institut Indien des Sciences de Bangalore (Chakrabarti et al., 2005; Sartori et al., 2010)

Clarification de la recherche.

En faisant face à la difficulté que représente le transfert d’informations depuis la biologie vers la technologie et inversement, Chakrabarti et son équipe cherchent à développer un outil numérique assistant le concepteur durant le processus.

Étude descriptive I

Devant la difficulté du transfert de connaissances depuis la biologie et de la recherche de solutions, ils s’intéressent à la représentation fonctionnelle des organismes et s’appuient sur les modélisations FBS comme point de départ d’un modèle fonctionnel propre, le modèle SAPPHIRE (Chakrabarti et al., 2005). Celui-ci doit conduire à la génération d’une base de données, nommée IDEA-INSPIRE, rassemblant des modèles biologiques structurées.

Étude prescriptive

Le processus proposé est composé de trois étapes : description du problème par un triplet d’adverbes, traduction en descriptions analogiques et recherche des occurrences au sein d’une base de données regroupant des modèles structurés (Figure 2.24).



Figure 2.24 Processus IDEA-Inspire, par Fayemi (2016) basée sur Chakrabarti et al. (2005)

Le concepteur entre un triplet d’adverbe (ou verbe) / nom / adjectif (ex. coller / solides / temporairement) utilisé par le logiciel pour identifier les modèles SAPPHIRE les plus pertinents, issus de la formalisation des stratégies biologiques de la banque de données IDEA-INSPIRE.

Ces associations permettent l’identification de solutions exactes, partielles ou inspirationnelles depuis un triplet donné

Étude descriptive II

En 2010, Sartori et Chakrabarti évaluent le processus à travers des études de cas avec des étudiants en Inde et en Allemagne. Ils en déduisent un ensemble de recommandations qu’ils implémentent sur une version détaillée du processus afin de guider au mieux les concepteurs (Sartori et al., 2010).

Le logiciel n’étant pas accessible par le grand public, il est impossible d’en décrire l’ergonomie ou à la fonctionnalité, ni même s’il s’agit effectivement d’un outil destiné à la pratique des concepteurs ou au monde de la recherche.

Chapitre 2 – État de l’art

Cependant le problème inhérent à toutes les bases de données qu’est l’approvisionnement en nouvelles stratégies biologiques peut être souligné. Comme mis en évidence par Sartori et plus récemment par Siddharth (Siddharth et al., 2018a), le manque d’itérations, notamment dans la formalisation du problème et la phase de recherche, est également un levier d’amélioration.

Les approches procédurales outillées sur la sémantique comme l’algorithme de traduction des mots-clés biologiques pertinents, Université de Toronto (Cheong et al., 2011; Cheong et al., 2012)

Bien que cette approche soit également une approche procédurale outillée, la spécificité de l’utilisation d’outils numériques d’analyse sémantique et son impact sur les années à venir nous conduit à la décrire à part.

Clarification de la recherche

Depuis le début des années 2000 l’université de Toronto approche la biomimétique à travers sa complexité linguistique (Vakili et al., 2001; Shu, 2011; Chiu et al., 2005; Chiu et al., 2007; Shu, 2010; Cheong et al., 2012). L’objectif poursuivi depuis lors est l’automatisation de l’identification d’articles issus de la littérature scientifique en biologie à partir de requête émise en langage naturel (=non formalisé).

Étude descriptive I

Par l’étude des référentiels sémantiques de la biologie et de la technologie les chercheurs mettent en place un algorithme de génération de mots-clés couplé à des outils d’analyse sémantique.

Étude prescriptive

Cheong *et al.* établissent un processus algorithmique permettant le transfert de requêtes issues du langage naturel en mots-clés biologiques pertinents (Cheong et al., 2011). Celui-ci est composé de cinq étapes manuelles : la catégorisation des mots-clés fonctionnels, la suppression des correspondances inadéquates, l’identification des mots passerelles, l’identification des régions denses de verbes passerelles et l’identification des mots-clés biologiques pertinents (Figure 2.25).

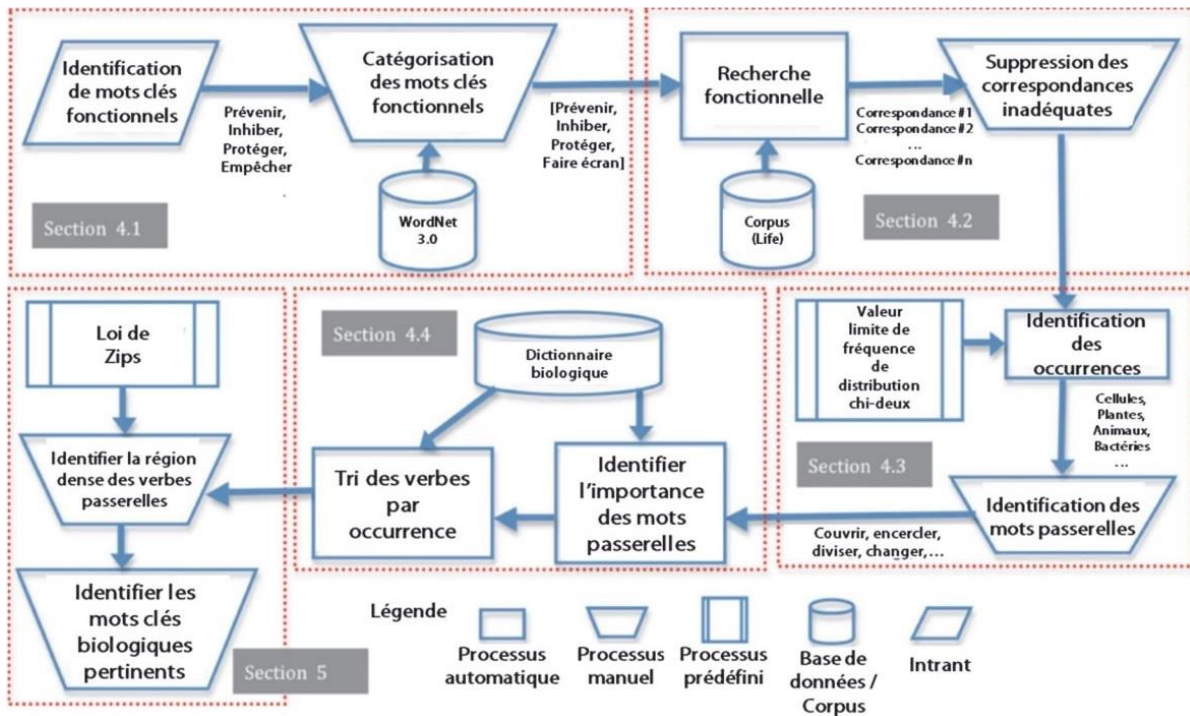


Figure 2.25 Algorithme de traduction des mots-clés biologiques pertinents, par Fayemi (2016) issue de Cheong (2011)

Étude descriptive II

Les travaux de l’université de Toronto apportent une approche alternative de la conception biomimétique, basée sur des outils numériques, d’automatisation et à terme des approches d’intelligence artificielle (Goel, 2015).

Les difficultés qui émergent de ce type d’approche viennent du tri de l’information générée. Face à la quantité d’articles existant en ligne, comment assurer un tri pertinent et permettant aux concepteurs d’accéder aux réponses qu’ils cherchent ?

Processus de conception biomimétique unifié centré problème, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers (Fayemi et al., 2017)

Clarification de la recherche.

L’objectif poursuivi par Fayemi et Wanieck est l’harmonisation des différents processus en une forme accessible par les concepteurs. Ils souhaitent mettre au point un cadre dans lequel chaque processus peut être considéré comme un cas particulier d’un même processus unifié.

Étude descriptive I

L’analyse de 12 processus de conception, mène à l’identification d’un ensemble de points de convergences et de divergences. Ceux-ci sont alors harmonisés sur le cadre (depuis l’identification du problème jusqu’à la phase d’implémentation), la spécificité (seule l’approche *problem-driven* est considérée) et la granularité (huit étapes sont identifiées pour

unifier les processus). Ils effectuent ainsi un tri et une abstraction procédurale des différents processus avant d’en faire une synthèse.

Étude prescriptive

À la suite de cette étude descriptive, le processus de conception *problem-driven* unifié est formalisé. Un axe vertical est mis en place pour représenter la variation du niveau d’abstraction. Le processus est constitué de deux cycles itératifs, la génération du problème d’une part et de la solution de l’autre. Le processus est composé de huit étapes, quatre dites *centrées sur ingénierie* (étapes 1,2,7,8) et de quatre dites *centrées sur la biologie* (étape 3,4,5,6) : (1) Analyse du problème ; (2) Abstraction des problèmes techniques ; (3) Transposition à la biologie ; (4) Identification des modèles biologiques potentiels ; (5) Sélection des modèles biologiques d’intérêt ; (6) Abstraction des stratégies biologiques ; (7) Transposition à la technologie ; (8) Mise en place et test au sein du contexte initial (Figure 2.26).

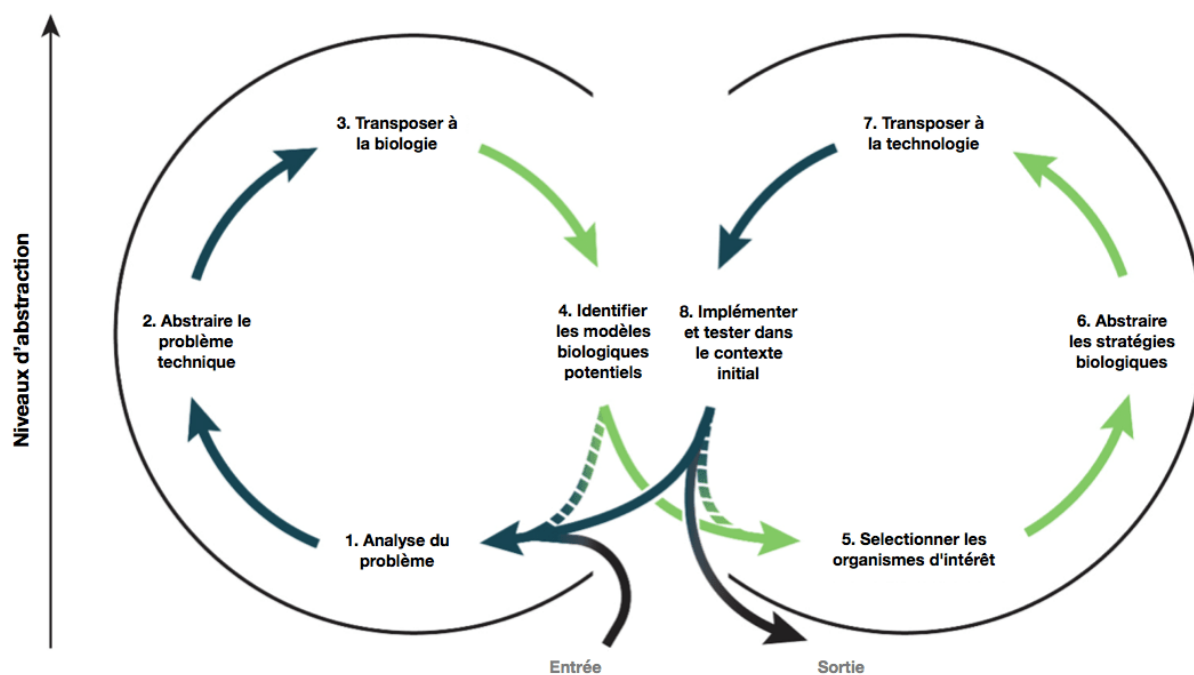


Figure 2.26 Processus de conception biomimétique *problem-driven* unifié, adaptée de Fayemi (2017)

Étude descriptive II

En proposant un modèle unifié, Fayemi pose ici une base méthodologique fondamentale, aussi bien du point de vue théorique, qu’industriel ou éducatif. Accepté par la communauté scientifique comme une synthèse pertinente des études sur les processus, (Nagel et al., 2019a; Kruiper et al., 2018; Bhasin et al., 2018; McInerney et al., 2018; Kennedy et al., 2018; Vincent et al., 2018) celle-ci permet la mise à disposition d’un référentiel de départ sur lequel chaque chercheur peut apporter les modifications nécessaires à son usage spécifique. C’est par exemple le cas de Kruiper sur son processus de conception biomimétique centré sur l’utilisation d’outils numériques (Kruiper et al., 2018).

Du point de vue de la recherche scientifique ce processus est donc très pertinent. Pour les praticiens, là où il permet un aperçu efficace de la démarche à adopter, il n’est pas à même de conduire seul à la résolution des différentes étapes. Sa généralité est donc une force pour le monde académique mais également une faiblesse en pratique.

Synthèse comparative de l’état de l’art sur les processus de conception biomimétique

Afin d’ajouter une facette quantitative et comparative à cet état de l’art, douze critères de comparaison sont choisis pour comparer dix-huit processus issus de la littérature (Tableau 2.6). Trois grandes catégories de critères sont mises en place :

- Les étapes des différents processus sont comparées sur leur nombre total, le nombre dédié à chacune des phases du processus de référence de Masser and Wallace (Massey et al., 1996) utilisé par Fayemi (Fayemi et al., 2017) (Identification, Définition, Génération de solutions, Choix de solution, Implémentation et Test et Étapes supplémentaires par rapport au modèle), ainsi que sur la représentation graphique d’itérations.
- Les types de processus sont comparés d’après la classification proposée par Blessing (Blessing, 1995), étendue par Wynn et Clarkson (Wynn et al., 2005) et synthétisée par Gericke (Gericke et al., 2011).
- La spécificité du processus est comparée, notamment si celui-ci est construit autour d’un ou plusieurs outils donnés et sans lesquels son utilisation apparaît peu pertinente. La spécificité de l’équipe considérée lors de la formalisation du processus est également étudiée. Si celle-ci n’est pas mentionnée dans la publication de référence, elle est considérée par défaut comme une équipe de conception classique (« C »). Les équipes peuvent également être complétées par l’intervention ponctuelle d’experts biologistes (« E »), voir même être interdisciplinaire sur l’ensemble du processus (« I ») tel que c’est le cas pour Goel *et al.* “*we focus on interdisciplinary design teams of biologists and engineers viewed as the unit of analysis*” (Goel et al., 2014).

Les contributions scientifiques sur les processus de conception biomimétiques sont donc nombreuses et variées dans leur nature. De façon générale, on peut noter que les processus proposés se concentrent essentiellement sur la phase la plus en amont du processus de conception, « *l’optimisation du principe* » selon Pahl et Beitz (Pahl et al., 2007). Ils décrivent donc principalement le processus de recherche de solutions, plutôt que la mise en place de ces solutions qui apparaît comme une étape plus « classique » en ingénierie de la conception.

Au cours des avancées du cadre méthodologique, on observe également l’évolution des processus depuis des formalisations basées sur l’analyse et la description de pratiques peu guidées, voir non guidées, vers des processus centrés sur la prescription de procédures épaulant le concepteur dans ses activités (Tableau 2.6).

Chapitre 2 – État de l’art

Par les retours d’expériences successifs on observe également l’importance grandissante de la mise en place de processus itératifs pour faciliter la mise en pratique (Tableau 2.6).

Tableau 2.6 Synthèse comparative de 18 processus de conception biomimétique technology-pull

Référence	Étapes			Classification								Spécificité		
	Nombre	Phases	Itérations	Analytique	Abstrait	Procédural	Descriptif	Prescriptif	Problème	Solution	Activité	Étapes	Outils	Équipe
Université Technique de Munich (Lindemann et al., 2004)	5	4	X	X			X		X		X			E
Institut Indien des Sciences de Bangalore (Chakrabarti et al., 2005)	3	2				X		X	X		X		X	C
Université de Fribourg (Speck et al., 2008)	5	3			X		X		X		X		X	E
Université de Bath (Bogatyrev et al., 2008)	6	2			X		X		X		X		X	E
Université Technique du Danemark (Lenau, 2009; Lenau et al., 2010)	10	4	X	X			X		X			X		E
Georgia Institute of Technology (Helms et al., 2009)	6	4		X			X		X			X		I
Université James Madison et Texas A&M (Nagel et al., 2010b)	6	3		X			X		X		X		X	E
Université des Sciences Appliquées de Brême et Institut Indien des Sciences de Bangalore (Sartori et al., 2010)	7	3				X		X	X			X	X	E
Université de Toronto (Cheong et al., 2011)	5	3				X		X	X		X		X	C
The Biomimicry Institute (=biomimétisme) (Baumeister et al., 2013)	8	4	X			X		X	X		X		X	E-I
Georgia Institute of Technology (Goel et al., 2014)	6	4	X	X			X		X		X			I
École des Mines de Paris (Freitas Salgueiredo et al., 2014)	4	2		X			X		X		X			I
Université Technologique de Delft et MIT (Badarnah et al., 2015)	5	3	X		X			X	X		X		X	E
Université de Bath (Bogatyrev et al., 2015)	6	3				X		X	X			X	X	E
Norme Internationale ISO (ISO/TC266, 2015)	6	4	X		X		X		X			X		E
ENSAM HESAM Université (Fayemi et al., 2017)	8	6	X		X		X		X		X			E
Université James Madison (Weidner et al., 2018)	9	6	X			X		X	X		X			E
Université Heriot-Watt (Kruiper et al., 2018)	4	3	X			X		X	X			X	X	E
Total	-	-	9	6	5	7	9	9	9	9	12	6	10	-

C = Classique, E = Expert ponctuellement intégrés, I = Interdisciplinaire

La question de la spécificité ou de la généricité des processus, caractérisée dans le tableau 2.6 par leur construction autour d’outils spécifiques (comme SAPPPhIRE pour le processus de Chakrabarti *et al.*), apparaît également comme un élément fondamental. Si la majorité des processus sont construits autour d’un ou plusieurs outils conduisant à leur réalisation, leurs champs d’application se réduisent aux cas traités par les outils, rendant particulièrement pertinent l’effort d’harmonisation effectué par Fayemi.

Enfin, l’une des principales difficultés de la biomimétique étant son approche pluridisciplinaire, la question de la composition des équipes considérées lors de la mise en place des processus se pose comme essentielle. Ainsi, une majorité des articles présentant les processus décrits ci-dessus souligne l’importance d’intégrer des experts biologistes à certains moments clés du processus (essentiellement les phases de recherche et d’analyse d’organismes).

Quatre articles mentionnent des biologistes comme partie intégrante d’équipe interdisciplinaire (Helms *et al.*, 2009; Freitas Salgueiredo *et al.*, 2014; Goel *et al.*, 2014; Baumeister *et al.*, 2013). Pour ces processus, les approches descriptives témoignent de l’intérêt porté à l’interdisciplinarité mais n’apporte pas de prescriptions quant à l’activité précise de ces biologistes. Il existe donc un manque de soutien méthodologique à la pratique interdisciplinaire en biomimétique.

Dans les autres cas, c’est l’utilisation d’outils qui vient pallier l’absence des biologistes (Fayemi *et al.*, 2015). Par ailleurs, que les équipes fassent intervenir un biologiste ou non, les processus spécifiques sont structurés autour d’outils poursuivant, avec différentes approches, les mêmes buts : accéder, extraire et transférer les données biologiques. La partie suivante décrit un ensemble représentatif de ces outils de conception biomimétique.

2.4.2.3 État de l’art sur les outils guidant les approches *technology pull*

En 2017, Wanieck et Fayemi répertorient 43 outils dans la littérature et en analysent 22, les 21 restants étant jugés trop peu matures ou uniquement décrits dans la littérature sans matérialisations utilisables (Wanieck *et al.*, 2017).

En ajoutant à leurs travaux un certain nombre d’outils ayant été publiés depuis 2017, cette partie présente quelques exemples représentatifs de chaque classe d’outils existant dans la littérature avant de conclure sur une synthèse comparative.

Les outils seront classés selon 4 catégories définies par Wanieck (Wanieck *et al.*, 2017) :

- Outils d’analyse du problème ou de la solution (étape 1 et 5 du processus unifié),
- Outils de transfert depuis la technologie vers la biologie, comme les étapes de génération de mots-clés, ou depuis la biologie vers la technologie, comme les étapes de génération de solution technique basées sur des principes biologiques (étapes 3 et 7 du processus unifié)
- Outils d’abstraction du problème technique ou de la solution biologique afin de faciliter son transfert (étapes 2 et 6 du processus unifié)

- Outils d’application visant la recherche et l’identification de modèle biologique et la conception du produit final (étapes 4 et 8 du processus unifié)

Outils d’analyse : observation et extraction d’information

Les outils d’analyse doivent permettre au concepteur d’établir le cadre du projet de conception, d’en déterminer les objectifs et les limites. Ils permettent aussi d’offrir aux équipes un prisme à travers lequel interroger les problèmes ou les solutions.

On peut prendre l’exemple *des principes du vivant* et de sa variante étendue *KARIM* (*Knowledge Acceleration and Responsible Innovation Metanetwork*).

Les *principes du vivant* sont des recommandations issues de l’analyse des systèmes vivants (Benyus, 1997). Parmi les 10 principes du vivant répertoriés on peut citer « *La nature est résistante aux perturbations* » ou encore « *La nature utilise la forme pour déterminer la fonction* », rappelant les observations faites dans l’état de l’art sur la biologie (Chapitre 2, partie 2.3.4).

La variante *KARIM* (Mélo et al., 2015) est issue d’un projet européen et vise à expliciter et compléter ces premiers travaux. L’approche distingue 25 principes à considérer selon les propriétés du système (ex. « *concevoir le produit de manière à rendre ces composants modulaires* ») ou selon la capacité du système à gérer des flux d’énergie/de matière/d’information (ex. « *mutualiser les sources ainsi que les circuits de distribution, de transformation et de recyclage* »).

Parmi d’autres outils d’analyse on peut également citer, *l’Analyse des tâches* (Nolan, 1989), *T-chart* (Helms et al., 2014), les *Courbes en S* de la TRIZ (Kucharavy et al., 2011), *BABELE* (Fayemi et al., 2015), *La matrice de comparaison des pinnacles* (Badarnah et al., 2015), etc.

Outils de transfert : passage d’un champ disciplinaire à un autre

Les outils de transfert doivent agir comme des interfaces, permettant aux acteurs de la conception biomimétique de traduire et transférer des concepts depuis la biologie vers la technologie et inversement.

On peut prendre l’exemple du thésaurus de Nagel (Nagel et al., 2010a). Afin de faciliter le transfert d’informations entre les champs de l’ingénierie et de la biologie Nagel structure un thésaurus en quatre niveaux, trois niveaux permettant de préciser le concept technique et un niveau associant le concept technique raffiné à un ensemble de concepts biologiques. Ainsi, on peut préciser le concept « *Connecter* » en « *Coupler* » puis en « *Joindre* » et l’associer avec « *Lier, Adhérer, Coller et Fusionner* ».

Parmi d’autres outils de transfert on peut notamment citer, la *Taxonomie du biomimétisme* (Baumeister et al., 2013), les *Principes inventifs* et *l’Analyse des ressources* issus de la TRIZ (Altshuller, 1984), *BIOPS* (Fraunhofer, 2010), etc.

Outils d’abstraction : modélisation et identification des éléments clés au modèle

L’abstraction est la capacité de passer d’une entité réelle à un concept, les outils d’abstraction permettent donc la description conceptuelle des problèmes techniques ou des stratégies biologiques. À travers cette démarche, le but poursuivi est d’atteindre le cœur de

l’élément étudié et d’en comprendre le fonctionnement par modélisation. Une fois que l’essence de la stratégie ou du problème est comprise, les éléments non essentiels sont éliminés pour ne garder que le principe qui peut, lui, être transféré plus facilement vers la biologie ou la technologie.

On prendra ici l’approche considérant le concept de *trade-off* (= *compromis*) tels que suggérés par Vincent (Vincent, 2017). Dans ces travaux, Vincent met en évidence le fait que, telle la modélisation par contradictions dans TRIZ, les problèmes techniques et leurs analogies biologiques peuvent être décrits sous la forme de *trade-off*. Il se base notamment sur la multifonctionnalité intrinsèque au vivant et au mécanisme de sélection d’équilibre biologique répondant à des contraintes environnementales. Il décrit trois types de *trade-off* : A et B sont voulus tous les deux mais à des instants différents, A et B sont antagonistes il s’agit donc de trouver le bon compromis, ou A et B sont exclusifs auquel cas un choix de conception doit-être fait.

Si l’on prend l’exemple d’une équipe de conception qui s’intéresse à l’innovation automobile, le *trade-off* antagoniste entre la vitesse du véhicule et le contrôle des erreurs semble particulièrement pertinent. Si l’on oublie la notion de véhicule pour ne considérer à présent que le *trade-off* entre vitesse et contrôle des erreurs, celui-ci s’applique aussi bien à des systèmes techniques que biologiques, démontrant la capacité d’abstraction de l’outil.

Parmi d’autres outils d’abstraction on peut notamment citer, les *Contradictions techniques, le Résultat Idéal Final et les 9-écrans* issus de la TRIZ (Altshuller, 1984), *le modèle FBS* (Vattam et al., 2010b), *le modèle SAPPHIRE* (Chakrabarti et al., 2005), *la méthode des 5-pourquoi* (Ohno, 1978), etc.

Outils d’application : passage de l’abstrait au concret

Les outils d’application doivent permettre d’une part l’identification des stratégies biologiques concrètes depuis des problèmes abstraits et d’autre part la mise en place de solutions techniques concrètes depuis des stratégies biologiques abstraites.

Nous nous concentrerons ici sur un outil d’application permettant la recherche et l’identification de stratégies biologique : AskNature (www.asknature.org). Cette base de données développée à partir de 2008 par le Biomimicry Institute est l’outil d’application le plus utilisé (Appio et al., 2017). Regroupant près de 1 750 stratégies biologiques (1 728 le 13.03.20) elle forme la plus grande base de données sur la bio-inspiration librement accessible.

Structurée sur l’architecture de la *taxonomie du biomimétisme* (outil de transfert), elle répertorie de façon ergonomique et dans un langage accessible aux non-biologistes un ensemble de stratégies biologiques et d’idées d’applications issues de projets ou de concours sur le biomimétisme.

Parmi d’autres outils d’application on peut citer, le *Brainstorming* (Osborn, 1953), *E2BMO* (McInerney et al., 2018), *IDEA-INSPIRE V4.0* (Siddharth et al., 2018a; Chakrabarti et al., 2005), *DANE* (Vattam et al., 2011), *BIOPS* (Fraunhofer, 2010), etc.

Synthèse comparative sur les outils guidant les approches technology pull

La nature des différents outils biomimétiques issus des 4 catégories précédemment décrites peut être distinguée en six types (Wanieck et al., 2017) :

- Les *méthodes* formalisent un raisonnement que doit mener l’équipe, comme la *Four-box Method* (Helms et al., 2014).
 - Les méthodes sont particulièrement utilisées durant les phases d’analyse et d’abstraction.
- Les *algorithmes* sont des outils numériques automatisant des étapes, notamment des étapes de recherches itératives, comme *SEABIRD* (Vandevenne et al., 2016).
 - Les algorithmes sont notamment utilisés sur les phases de transfert et d’application.
- Les *ontologies* sont des réseaux de concepts dynamiques et interactifs. Représentées sous la forme d’outils numériques, elles permettent la mise en relation de concepts. Les travaux de Vincent sur les *trade-off* précédemment présentés ont conduit à la formalisation d’une ontologie (Vincent et al., 2018) utilisée au sein de l’algorithme *E2BMO* (McInerney et al., 2018).
 - Les ontologies sont utilisées pour faire de l’association de concepts, qu’il s’agisse des phases d’abstraction, de transfert ou d’application.
- Les *thésaurus* fonctionnent comme des dictionnaires et traduisent des concepts d’un champ disciplinaire à un autre. Ils existent souvent sous la forme de tableau tel que celui de Nagel présenté précédemment.
 - Ils sont particulièrement indiqués pour les phases de transfert.
- Les *taxonomies* permettent de décortiquer des concepts, que ce soit à travers une caractérisation, « Attacher » de façon « Temporaire » ou « Permanente », ou des synonymes plus précis, « Attacher » devient « Coller ». La taxonomie la plus connue en biomimétique est la *taxonomie du biomimétisme* (Baumeister et al., 2013).
 - Celle-ci vise à faciliter l’étape de transfert.
- Les *bases de données, listes principes et heuristiques* sont les outils les plus répandus et visent toutes les étapes du processus.
 - Ils sont particulièrement utilisés sur les étapes d’application vers la biologie (bases de données regroupant des modèles biologiques comme *AskNature*) et d’analyse du problème (*Life Principles* (Baumeister et al., 2013)).

Cette diversité des outils provient notamment de leurs diverses origines, certains ayant été conçus spécialement pour la biomimétique comme la *matrice BioTRIZ* (Bogatyrev et al., 2014), alors que d’autres sont des outils de « conception classique » suffisamment génériques pour s’appliquer au champ de la biomimétique, comme le *brainstorming*.

Dans ses travaux, Fayemi (Fayemi, 2016) précise également qu’un certain nombre d’outils provient de la biologie, comme la *Checklist de transfert pour l’association biologique* (Lindemann et al., 2004). Sur ce point, notre analyse diverge. Là où certains outils apparaissent centrés sur la mise à disposition de savoirs ou de données biologiques, il ne s’agit pas pour autant d’outils originellement utilisés en biologie.

Le grand nombre et la diversité des outils biomimétiques témoignent des difficultés majeures rencontrées par les praticiens lors de ces processus atypiques. En outre, l’augmentation du nombre d’outils mis à disposition pose un autre problème aux concepteurs, celui du choix des outils à utiliser lors des projets de conception biomimétiques. À travers la synthèse générale sur le cadre méthodologique de la biomimétique, la partie suivante apportera une première réponse à cette question.

2.4.2.4 Synthèse sur l’état actuel du cadre méthodologique en conception biomimétique

À travers l’analyse du cadre méthodologique de la conception biomimétique, trois éléments de synthèse peuvent être soulignés : les avancées significatives de la recherche sur les méthodologies encadrant la biomimétique, la diversité des contributions générées et la très faible quantité de travaux centrés sur les équipes de conception biomimétiques.

Par ailleurs, face aux premières études descriptives, la communauté scientifique génère aujourd’hui un ensemble d’outils prescriptifs accompagnant les équipes de conception. L’ingénierie de la conception appliquée à la biomimétique entre alors dans une deuxième phase lors de laquelle deux principaux défis émergent. Les processus deviennent de plus en plus spécifiques et leur accumulation rend difficile le choix des concepteurs. En réaction, une volonté d’harmonisation émerge à travers les travaux de Fayemi et Waniewick soulignant cette tendance.

La diversité des contributions, est considérable pour ce qui est des outils. Face à cette multiplicité des stratégies d’accompagnement, aucun concepteur ne peut maîtriser l’ensemble de la boîte à outils actuellement disponible, ni même choisir lesquels apprendre à utiliser. Deux situations principales peuvent être distinguées.

Dans un premier cas, l’équipe de conception effectue un projet à travers une méthodologie proposant un processus construit autour d’une boîte à outils propre (processus à forte spécificité) auquel cas l’équipe sait quels outils utiliser.

Dans le second cas, l’équipe de conception effectue un projet basé sur une méthodologie générique, abstraite, ou ne suit aucune méthodologie publiée mais formalise sa propre approche hybride. Face à ce cas de figure, le choix des outils apparaît complexe, et ce d’autant plus pour un praticien qui souhaiterait tester l’approche pour la première fois.

Face à cette problématique, Fayemi analyse les outils existant dans la littérature et propose un outil d’aide à la décision le *BiomimeTree* (figure 2.27) (Fayemi et al., 2017). Apportant une première réponse à la complexité du choix des méthodes et outils en biomimétiques, des travaux de mise à jour et de numérisation sont actuellement en cours au sein du LCPI.

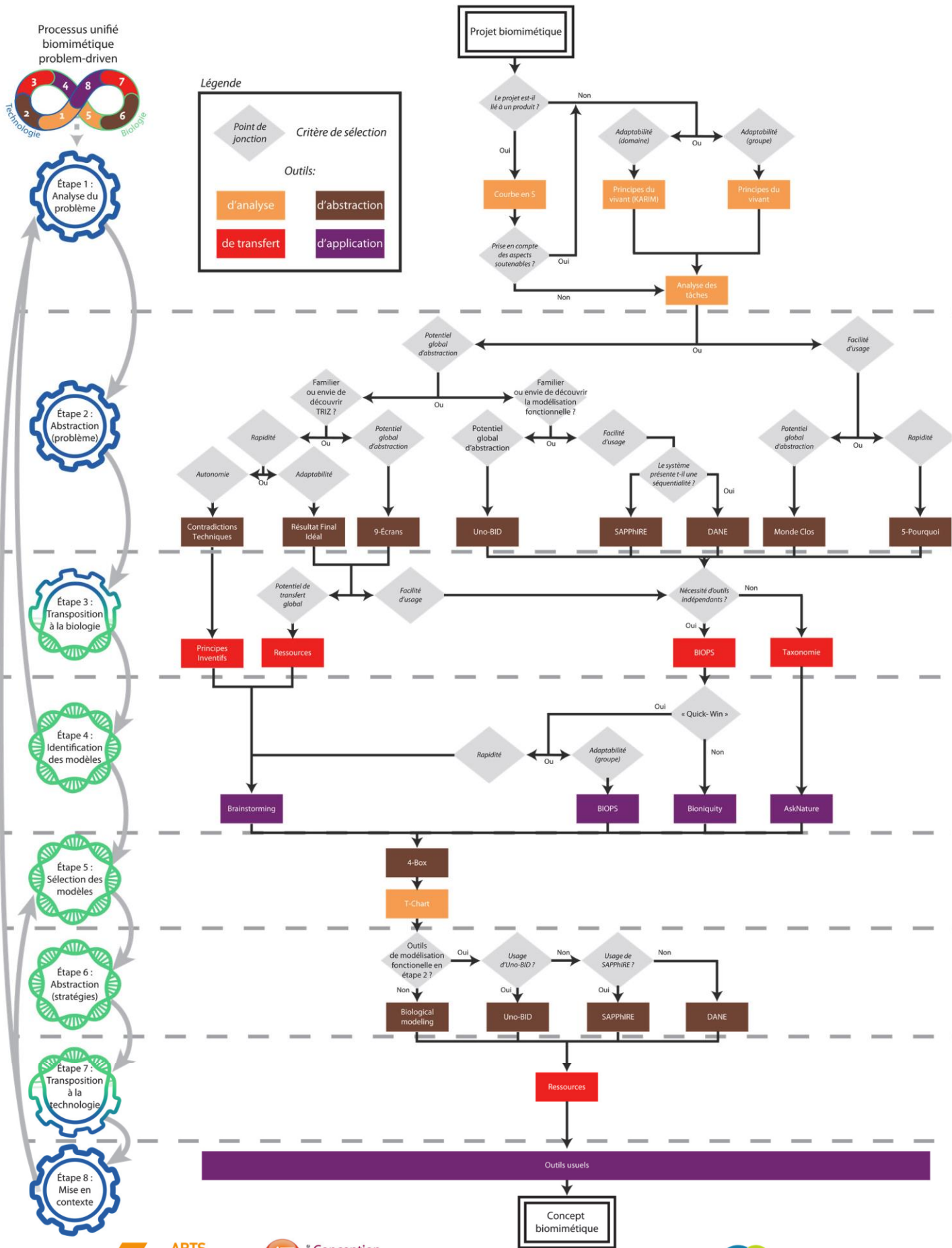


Figure 2.27 Le BiomimeTree, issue de Fayemi (2017)

Enfin, on observe que là où les équipes étaient considérées comme potentiellement interdisciplinaires dans les études analytiques (Chapitre 2, partie 2.4.2.2, tableau 2.6), les processus plus récents relèguent le biologiste à la place d’un expert externe à l’équipe.

Ainsi, si la recherche méthodologique a rapidement pallié le manque d’outils et de processus, l’équipe de conception biomimétique et les prérequis en termes de compétences reste peu étudiés, questionnant la composition optimale des équipes de conception.

En conclusion, bien que le cadre méthodologique de la biomimétique ait considérablement muri au cours des dernières années, la dissémination de l’approche reste marginale dans le contexte industriel.

Après avoir présenté les avancées de la recherche sur le cadre méthodologique, la dernière partie de cet état de l’art sur la biomimétique se concentrera sur les freins pratiques et les axes de résolution étudiés avant de conclure sur les questions de recherches restant en suspens.

2.4.3 Freins actuels en conception biomimétique

Les recherches en ingénierie de la conception appliquées à la biomimétique ont pour objectif commun de favoriser la dissémination, la mise en place, la pratique et le succès des projets d’innovation biomimétique. Dans cette logique, après avoir établi le cadre méthodologique, tel que décrit dans la partie précédente, les travaux de la communauté scientifique visent aujourd’hui à l’identification et à la résolution des freins à l’appropriation du cadre ou aux difficultés d’application des prescriptions.

2.4.3.1 Axes de recherche sur la biomimétique et freins identifiés

Par la jeunesse de l’approche, sa pluridisciplinarité intrinsèque et ses impacts potentiels, la recherche sur la biomimétique interroge des problématiques variées. Le potentiel innovant de l’approche est largement reconnu (Keshwani et al., 2017; Bhasin et al., 2018; Cheong et al., 2010) mais face au manque de diffusion au sein du monde industriel, un ensemble de freins demeure.

Une synthèse des principaux axes de recherche émergeant de la littérature est décrite dans le tableau 2.7. Pour chaque axe, différents freins étudiés par la communauté sont soulignés et associés à un article récent. Le tableau 2.7 identifie ainsi cinq axes de recherche principaux balayant chacune des étapes du déploiement de la biomimétique, de l’enseignement aux retours d’expérience. Il ne s’agit plus seulement d’établir le référentiel conceptuel à la biomimétique mais de répondre à des points précis de difficulté jalonnant le passage d’une théorie scientifique à une pratique d’innovation efficace.

Tableau 2.7 Synthèse sur les axes de recherche sur la biomimétique

Axes de recherche	Freins étudiés	Références
Enseignement	Formalisation de programmes et cursus spécialisés	(Nagel et al., 2019b)
	Adaptation des enseignements selon les champs	(Stevens et al., 2019)
Transfert de la recherche à la pratique	Décalage d’efficacité entre le monde académique et industriel	(Rovalo et al., 2020)
	Utilisation des contributions méthodologiques en pratique	(Rovalo et al., 2020)
	Guider le praticien par les résultats théoriques de la recherche	(Hashemi Farzaneh et al., 2019)
	Implication de la recherche biologique	(Rovalo et al., 2020)
Pratique de la biomimétique	Recherche de la donnée biologique	(Kennedy et al., 2018)
	Sélection de la donnée biologique	(Vincent, 2017)
	Compréhension de la donnée biologique	(McInerney et al., 2018)
	Transfert entre les champs disciplinaires	(Nagel et al., 2018)
	Collaboration interdisciplinaire	(McCardle et al., 2019)
	Choix des méthodologies et processus en pratique	(Fayemi et al., 2017)
Mise sur le marché de produits biomimétiques	Choix des outils en pratique	(Wanieck et al., 2017)
	La « Vallée de la mort »	(Chirazi et al., 2019)
	Identification d’un business model	(Chirazi et al., 2019)
	Passage de la solution technique au produit	(Chirazi et al., 2019)
Évaluation des résultats et retours d’expérience	Validation du caractère durable des produits	(Speck et al., 2017)
	Accès à l’information, notamment aux choix effectués	(Domke et al., 2018)
	Validation du caractère innovant des produits	(Keshwani et al., 2017)
	Validation du caractère multifonctionnel des produits	(Svendsen et al., 2019)
	Identification de domaines d’application préférentiels	(Rovalo et al., 2020)
	Acceptation par le marché	(Chirazi et al., 2019)

Dans le cadre des travaux de recherche du LCPI, la réflexion se concentre sur l’axe *pratique de la biomimétique*. On prendra cependant soin de considérer l’impact de nos contributions sur l’*enseignement* et le *transfert de la recherche à la pratique*, précédemment identifiés comme des enjeux de cette thèse (Chapitre 1, partie 1.5).

2.4.3.2 Freins à la pratique de la biomimétique

Après les travaux menés par Fayemi et Wanieck sur le choix des méthodes et outils, l’effort de recherche du laboratoire se concentre sur les cinq autres freins associés à l’axe *pratique de la biomimétique* (Tableau 2.7) : *Recherche, Sélection, Compréhension des données biologiques, Transfert entre les champs disciplinaires* et *Collaboration interdisciplinaire*.

Recherche des données biologiques

La recherche de modèles biologiques (étape 4 du processus unifié) représente une des difficultés les plus reconnues (Helms et al., 2009; Chirazi et al., 2019; Rovalo et al., 2020). Celle-ci apparaît multifactorielle, les équipes de conception doivent déterminer d’une part (1) ce qu’il faut chercher, mais également (2) où et (3) comment chercher.

- (1) *Que faut-il chercher ?* D’après le processus unifié de Fayemi (Fayemi et al., 2017), les « *modèles biologiques* » sont les objets de recherche. Qu’est-ce qu’un « *modèle biologique* » en biomimétique ? Peut-on identifier plusieurs types de modèles ? Peut-il s’agir d’une fonction, d’un organisme, d’un système biologique ? Quels types de modèles doivent être considérés et pour quels types d’analogie (Mak et al., 2004) ?

Ce « *modèle biologique* » mal défini dans sa diversité représente une première difficulté.

- (2) *Où faut-il chercher ?* La plupart des résultats scientifiques sont stockés en ligne sous forme d'articles de recherche, sur les sites de revues scientifiques, d'éditeurs, d'institutions ou sur des bases de données spécialisés telles que PubMed, (National Center for Biotechnology Information, online). Toutefois, ces plateformes sont conçues pour faciliter l'accès à l'information à des chercheurs utilisant des mots-clés spécifiques à leur domaine, les rendant difficiles d'accès aux concepteurs (Lenau, 2009). De ce fait, de nombreuses équipes biomimétiques s'appuient également sur des supports d'informations grand public, comme les encyclopédies en ligne, des cours en libre accès, des sites de vulgarisation scientifique, etc. Même si beaucoup d'entre eux sont pertinents et scientifiquement vérifiés, certains peuvent être la source d'erreurs, d'informations obsolètes ou de simplifications excessives qui ne seront potentiellement pas détectées. Face à ces différentes possibilités, la question de savoir où chercher, en fonction de l'expertise des équipes et de ce qu'elles cherchent, apparaît cruciale.
- (3) *Comment faut-il chercher ?* Et plus précisément, comment trouver ce qui est réellement cherché ? À travers des requêtes est une première réponse générique. En effet, les utilisateurs saisissent des requêtes sur les moteurs de recherche web ou des bases de données. Comme ces requêtes dépendent de mots-clés, la question est alors de savoir comment identifier les mots-clés appropriés menant à l'information recherchée ? Un deuxième aspect de la réponse est également de lier cette question aux deux aspects précédents. La manière de chercher dépend en effet foncièrement de ce qui est cherché et de la source par laquelle on cherche.

Le deuxième frein est celui de la sélection des données (étape 5 du processus unifié).

Sélection des données biologiques

Il s'agit de rendre compte de la difficulté, pour les équipes de conception, de juger de la pertinence des résultats issus d'une recherche. Ce frein est également un facteur clé à prendre en compte dès la phase de recherche dans la mesure où c'est l'association d'un processus de recherche efficace et d'un ensemble pertinent de choix (sur les mots-clés, sur les articles, etc.) qui conduit à la sélection de modèles pertinents. Que les équipes évaluent les modèles ou des données biologiques brutes, deux sous-questions émergent :

- Comment identifier des critères de sélections (Rovalo et al., 2020) ?
- Comment évaluer les données ou les modèles biologiques sur les critères identifiés (Rovalo et al., 2020) ?

Le troisième frein est beaucoup plus transversal et interroge la compréhension de la donnée biologique.

Compréhension des données biologiques

Le manque de compréhension impacte profondément toutes étapes centrées sur la biologie (Vattam et al., 2013). Les équipes peinent à formuler des mots-clés ou des requêtes biologiques, à tirer les informations pertinentes des articles, à identifier les sites web d'intérêt et peuvent faire des erreurs lors de l'analyse des données biologiques sélectionnées.

Enfin, les choix faits pendant le processus de recherche et pendant l'étape de sélection peuvent être basés sur des critères non pertinents, sur des fixations, ou simplement sur le fait d'avoir un "*apriori positif*" sur une stratégie donnée.

Le quatrième frein touche les étapes 3 et 7, dite de transposition dans le processus unifié (Fayemi et al., 2017).

Transfert de connaissances

Dans le cas du transfert de connaissances, les membres de l'équipe de conception aux profils proches doivent formaliser une information dans des champs conceptuels différents, ici biologique et technique.

Le transfert de connaissances est fondamentalement lié au principe d'abstraction (Vincent et al., 2002) et d'analogie dans la mesure où l'on ne peut pas transférer l'intégralité des connaissances liées à une donnée brute depuis un champ dans un autre (Rovalo et al., 2019). Ceci s'explique dans la mesure où chaque espace conceptuel possède des spécificités n'ayant pas d'équivalents exacts dans le domaine de destination (Ex. le concept de *mammifère* n'a pas d'équivalent direct en technologie).

Le cinquième frein, la collaboration interdisciplinaire, se distingue du frein de transfert dans la mesure où plusieurs acteurs issus de chacun des champs échangent des informations (McCardle et al., 2019).

Collaboration interdisciplinaire

Comme présenté précédemment, les processus biomimétiques supportent majoritairement la mise en place d'interactions ponctuelles avec des experts (Chapitre 2, partie 2.4.2.2, tableau 2.6).

Lors de celles-ci, des acteurs aux profils très différents doivent échanger des connaissances malgré des perceptions, des processus cognitifs et des formats d'informations variables (Fayemi et al., 2017).

La collaboration interdisciplinaire s'avère souvent difficile (Jacobs et al., 2014), notamment à cause d'une mauvaise communication. Les risques sont d'une part la mauvaise compréhension des attentes face à un type de message échangé (comment l'interpréter), et d'autre part la mauvaise compréhension des informations composant le message en lui-même (concepts inconnus).

Les études descriptives sur des équipes interdisciplinaires soulignent les mêmes types d'obstacles (Helms et al., 2009).

Ainsi, qu'il s'agisse de manipuler des données ou d'interagir avec des acteurs spécialisés, les freins pratiques sont majoritairement centrés sur la biologie. Face à ces obstacles, un

ensemble de stratégies de résolution ont été proposés dans la littérature. La partie suivante présente ces travaux en précisant les freins traités par chaque étude. Les atouts et limites de chaque approche sont synthétisés dans le tableau 2.8.

2.4.4 Stratégies actuelles de résolution des freins à la pratique de la biomimétique

Jusqu’à présent, huit principales stratégies de résolution ont été poursuivies : l’intervention d’experts biologistes, l’accompagnement de la génération de mots-clés, l’utilisation d’outils numériques d’automatisation, les approches comparatives, la modélisation, l’aide à l’analogie, la mise en place de bases de données et enfin l’utilisation de principes biologiques génériques.

Intervention d’experts biologistes, solution centrée sur le transfert, la recherche, la sélection et la compréhension des données biologiques

L’intervention d’experts biologistes est reconnue comme un atout précieux lors des projets de conception biomimétique (Hashemi Farzaneh, 2020; Vattam et al., 2010a), et ce indépendamment du développement des outils précédemment décrits (McCardle et al., 2019).

Ces experts sont principalement considérés sur les phases d’explicitation de certains phénomènes (Lindemann et al., 2004; Lenau et al., 2010) et d’évaluation des modèles biologiques (Bianciardi et al., 2016; Nagel et al., 2011).

Ces interventions posent cependant un ensemble de problèmes, notamment sur la disponibilité des experts et leurs motivations (McCardle et al., 2019). Cette solution mène également aux défis de la *collaboration interdisciplinaire* explicités dans la partie précédente.

Dans une récente synthèse de ses travaux sur les phases d’idéation d’équipes interdisciplinaires, Hashemi Farzaneh propose un outil nommé Biold, devant accompagner cette collaboration par le biais d’une méthode de structuration textuelle et graphique de l’information (Hashemi Farzaneh, 2020).

Par ailleurs, les chercheurs en biologie n’ont pas forcément de savoirs précis en physique ou chimie, limitant ainsi leurs connaissances sur les phénomènes sous-jacents aux observations qu’ils effectuent (Lindemann et al., 2004).

Intégration de biologistes dans le processus et l’équipe, solution centrée sur le transfert, la recherche, la sélection et la compréhension des données biologiques

À l’Université Technique de Munich (TUM), Helten effectue en 2011 une étude descriptive d’un projet étudiant interdisciplinaire et apporte un ensemble de premiers retours qui qualifient les apports de biologistes et préconisent leur intégration dans les équipes et les processus. Il propose une approche procédurale qui « *met fortement l’accent sur l’intégration directe des biologistes dans le processus au lieu d’une formalisation des connaissances* » (Helten et al., 2011).

Cette démarche d’intégration de biologistes dans le processus est également soutenue par Fayemi qui identifie le profil du « *biologiste horizontal* » (Fayemi et al., 2015).

Qu’il s’agisse des travaux de Helten ou Fayemi, leur limite principale est qu’ils sont réduits (une unique publication chacun sur le sujet) et demeurent à un stade d’étude préliminaires sans réelle formalisation opérationnelle.

Accompagnement de la génération de mots-clés, centrée sur la recherche, la compréhension, le transfert des données biologiques et l’interdisciplinarité

La génération de mots-clés est notamment assistée par des outils de traduction des concepts (Weidner et al., 2018) tels la taxonomie du biomimétisme (Baumeister et al., 2013) ou le thésaurus de l’ingénierie vers la biologie (Stroble et al., 2009; Nagel, 2014).

Un concept est traduit depuis un champ conceptuel vers un autre. Cette « traduction » s’appuie fortement sur l’analogie entre les concepts et apporte donc une première réponse à l’obstacle du transfert d’information.

La traduction de concepts permet également d’améliorer l’interprétation des données biologiques (compréhension), de générer des requêtes pertinentes dans un champ conceptuel donné (recherche) et potentiellement de mieux préparer les interactions avec un expert (interdisciplinarité).

Avec le même objectif, Kennedy propose également une méthode basée sur des catégories génériques d’espaces de recherche afin de faciliter l’identification des mots-clés pertinents lors des phases de recherche (Kennedy et al., 2018).

Ces approches sont limitées par la taille des outils de traduction, la quantité d’informations extraites depuis un concept traduit et le manque d’ergonomie. Traduire chaque concept peut s’avérer long et fastidieux sans compter qu’un ensemble d’erreurs peut être commis par manque de compréhension.

L’utilisation d’outils numériques d’automatisation, solution centrée sur le transfert et la recherche des données biologiques

Parallèlement, des approches linguistiques numériques sont développées. Tout d’abord, c’est l’identification de mots-clés biologiques pertinents et leur amplification sous la forme d’algorithmes automatisant ces étapes qui sont étudiés (Cheong et al., 2011; Cheong et al., 2012; Vakili et al., 2001). Puis, les recherches s’orientent vers la mise en place d’outils d’associations sémantiques (Kaiser et al., 2014; Vandevenne et al., 2016; Nagel et al., 2012).

Enfin, il s’agit d’extraire et de formaliser automatiquement des modèles biologiques (Rugaber et al., 2016; Kim et al., 2017).

Par ces approches, les phases de transfert et de recherche d’informations sont automatisées et les freins associés sont donc contournés.

L’efficacité de ces approches est limitée à cause d’un « bruit » de fond (identifications non-pertinentes) générant des difficultés de tri (Vandevenne et al., 2016). Un certain nombre de stratégies s’appuyant notamment sur l’annotation de textes menant à la mise en place de systèmes d’extraction d’informations sous forme de réseaux de concepts sont en étude pour régler ces freins liés à la sélection (Cheong et al., 2009; Kruiper et al., 2018; Kruiper et al., 2020).

En outre, même si une information pertinente est identifiée, l’obstacle de la compréhension devra être surmonté par l’équipe.

Représentation par modélisation, solution centrée sur le transfert, la sélection et la compréhension des données biologiques

La représentation de données biologiques selon un format générique doit permettre la mise en relation de concepts issus de différents domaines et la comparaison d’éléments considérés comme analogues.

Les représentations peuvent être peu guidées, c’est le cas des représentations graphiques (dessin, schéma, etc.) (Töre Yargin et al., 2018), ou très codifiées comme dans le cas des modèles de causalité (Chakrabarti et al., 2005).

Outre l’explicitation des flux fonctionnels (Nagel et al., 2011) et la sélection des modèles (Fayemi et al., 2015), la représentation de systèmes biologiques par des modèles de causalité vise aussi à structurer l’information pour faciliter le transfert de connaissances et alimenter des bases de données notamment par les formats FBS (Vattam et al., 2011) et SAPPHIRE (Chakrabarti et al., 2005).

Bien que ces stratégies répondent en partie aux freins précédemment identifiés, ces différentes modélisations prennent du temps et demandent une formation importante pour être maîtrisées (Fayemi et al., 2017). Par ailleurs, il est difficile de savoir laquelle choisir et même si elles doivent être combinées (Baldussu et al., 2012). Enfin, Helms souligne que même une fois modélisée, une information biologique n’est pas forcément mieux comprise par les ingénieurs (Helms et al., 2010).

L’aide à l’analogie, centrée sur le transfert des données biologiques

L’aide à l’analogie passe par la caractérisation du message permettant de clarifier et raffiner ce que l’on cherche réellement à transférer. On peut différencier les types de similarités (implémentation littérale, transfert biologique, analogie, anomalie) pour cibler le raisonnement analogique (Mak et al., 2004) et catégoriser les éléments à transférer (Nagel et al., 2018) comme la forme, l’architecture, la surface, etc.

Cette approche est étroitement liée à celle des représentations précédemment présentées. L’idée sous-jacente est de faciliter le raisonnement cognitif des concepteurs en

leur proposant différents prismes à travers lesquels abstraire l’information (Vattam et al., 2008).

Par ailleurs, dans la mesure où la possibilité d’un transfert direct (utilisation d’une solution parfaitement identique car le problème traité est parfaitement identique) est très rare (Fayemi et al., 2015), plus le niveau d’abstraction choisi est haut et plus il apparaît ensuite aisé d’adapter la solution (Fayemi et al., 2015) et d’effectuer le transfert (Drack et al., 2018).

L’abstraction étant une démarche complexe, les équipes doivent être formées à effectuer ce type de processus. Par ailleurs, là où le format du message est rendu compréhensible, le contenu du message peut, lui, varier avec la montée en abstraction pouvant conduire à une perte d’informations pertinentes.

Les apports de la catégorisation des analogies sont eux aussi limités dans la mesure où ils dépendent de la compréhension initiale des données brutes. En effet, l’équipe doit pouvoir identifier quelles informations affilier à quelles catégories.

Utilisation de principes génériques, solution centrée sur le transfert, la recherche, la sélection et la compréhension des données biologiques

L’utilisation très tôt de la TRIZ comme cadre d’étude de la biomimétique conduit à un ensemble d’outils basé sur des principes biologiques génériques comme la matrice BioTRIZ (Vincent et al., 2006). L’intérêt de l’approche est de limiter la recherche à une liste préétablie permettant une phase de sélection restreinte à un petit nombre de critères (des contradictions pour BioTRIZ). Les informations identifiées sont également formulées de manière suffisamment abstraites pour ne pas dépendre du champ sémantique de la biologie, facilitant ainsi le transfert.

En gardant la même idée mais à travers une formalisation basée sur le concept de *trade-off* (voir partie 2.4.2.3) (Vincent, 2017), Vincent formalise une ontologie (Vincent et al., 2018) par la suite associée à une base de données sous la forme d’un site web : E2BMO (McInerney et al., 2018). La logique de ce nouvel outil est d’abstraire les problèmes techniques soit sous la forme de *trade-off* soit par le biais du thésaurus de Nagel mentionné précédemment (Nagel et al., 2010a).

Face à des concepts très abstraits (exemple issu de E2BMO : « *renforcer adéquatement* ») il est en loin d’être trivial de concevoir réellement une solution technologique. La principale limite de cette approche est la difficulté d’interprétation et d’application des solutions.

Mise en place de base de données, solution centrée sur la recherche, la sélection et la compréhension des données biologiques

Les bases de données, comme AskNature (Biomimicry Institute, 2002), DANE (Vattam et al., 2011) ou IDEA-INSPIRE (Siddharth et al., 2018b; Chakrabarti et al., 2005), rassemblent un ensemble structuré de données biologiques.

Ces outils sont souvent ergonomiques, relativement précis dans leur système de requêtes et présentent des informations biologiques compréhensibles sans formation en biologie.

Leur principale limite est le nombre relativement faible de données disponibles par rapport à la diversité du monde vivant (Deldin et al., 2014; Vandevienne et al., 2014). Par

ailleurs, la quantité d’informations peut être très déséquilibrée selon les domaines d’application visés, la précision des données est variable sur chaque modèle et la plupart des stratégies biologiques décrites ont déjà été utilisées dans le monde industriel.

Ainsi, les utilisateurs risquent de rapidement retrouver les mêmes modèles biologiques ou de n’en trouver aucun, selon si les champs d’intérêt sont traités ou non par la base de données.

Approches comparatives, solution centrée sur la sélection des données biologiques

Afin d’aider les équipes de conception à choisir quels organismes vivants sélectionner, un ensemble d’approches comparatives sont proposés dans la littérature. Elles se composent dans leur majorité des mêmes phases : identification de critères d’intérêt, récolte d’informations sur les critères puis comparaison des résultats obtenus par les différents modèles biologiques.

Il peut s’agir d’outils sous forme matriciel, comme la *matrice d’analyse des pinnacles* (Badarnah et al., 2015), ou de méthodes basées sur des tableaux comparatifs, comme dans la *four-box* méthode (Helms et al., 2014) ou encore d’une combinaison de plusieurs étapes de tris successifs associant tableaux et matrices (Weidner et al., 2018).

Les limites de ces démarches résident dans la capacité des concepteurs à récupérer l’information associée aux différents critères, et ensuite à évaluer ces critères afin d’en tirer un classement le plus pertinent possible et évitant tout biais de fixations.

Toutes les solutions mentionnées ci-dessus offrent donc des réponses partielles aux obstacles auxquels se heurte actuellement le développement des pratiques biomimétiques, leurs avantages et limites sont rassemblés dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 Comparaison des solutions disponibles face aux freins de recherche, sélection et compréhension

Solution	Freins traités	Avantages	Limites
Intervention d’experts	Recherche	Précision et pertinence	Communication interdisciplinaire
	Sélection	Échange, questions-réponses	Disponibilité
	Compréhension	Amplification de la recherche	Motivation
Intégration de biologistes	Recherche	Précision et pertinence de la recherche et de l’analyse.	Très peu d’études
	Sélection		Pas de tests
	Compréhension	Facilite les échanges avec les experts biologistes.	Pas de définition des profils à intégrer
	Transfert		Approche non opérationnelle
Génération de mots-clés	Recherche	Facilité d’utilisation	Manque de précision
	Compréhension	Permet d’améliorer la compréhension du message	Perte d’information
	Transfert		Limité en termes de champs sémantique visé
	Interdisciplinarité		
Outils numériques	Recherche	Quantité de données	Variabilité du format de la donnée
		Sources précises et scientifiques (si articles scientifiques)	Sources imprécises et obsolètes (si sources grand public)
		Identification automatique	Quantité de données et erreurs potentielles lors du tri
Représentations et modélisation	Compréhension Sélection	Modélisation des concepts précis en catégories génériques	Diversité des modèles
		Abstraction	Temps de formation
		Comparaison	Efficacité relative sur la compréhension Pertes potentielles d’informations
Aide à l’analogie	Transfert	Permet de choisir des prismes de transfert analogique	Différents modèles existent Nécessite un temps de formation Potentielle perte d’information
		Associe des concepts spécifiques à des catégories génériques	
		Permet l’abstraction	
Principes génériques	Recherche	Concepts linguistiques abstraits et donc non biologiques	Génération des <i>trade-off</i>
	Sélection	Facilitation de la recherche	Application des principes abstraits
	Compréhension		Fixations lors d’applications successives d’un même principe abstrait
			Pas de données biologiques
Bases de données	Recherche	Informations structurées	Nombre total de modèles disponibles Diversité des modèles selon les champs techniques ou les règnes du vivant visés.
	Sélection	Contenu pré-identifié et vulgarisée	
	Compréhension	Ergonomie	
Approches comparatives	Sélection	Identification de critères de sélection	Récolte et compréhension des informations nécessaires
		Structure la comparaison	Subjectivité des évaluations et fixations

La partie suivante établit une synthèse sur ces différents freins et les solutions envisagées dans la littérature.

2.4.5 Synthèse sur les freins en biomimétique et axes de résolution actuels

Malgré la formalisation d’un référentiel de plus en plus complet, un ensemble d’axes de recherche méthodologique subsiste : l’optimisation pratiques, la facilitation du transfert des avancées scientifiques, l’évaluation et la caractérisation des apports de l’approche, etc. (Chapitre 2, partie 2.4.3.1, tableau 2.7).

Parmi ces problématiques, notre étude porte sur la résolution des freins identifiés durant la pratique de la biomimétique : *Recherche, Sélection, Compréhension des données biologiques, Transfert entre les champs disciplinaires* et *Collaboration interdisciplinaire*. Comme précisé lors de leur analyse, ceux-ci s’avèrent partager le point commun d’être centrés sur la biologie.

S’ils ne sont pas nouveaux, ces freins semblent récurrents et toujours d’actualité dans la littérature scientifique. Différentes contributions visant à les résoudre ont été présentées, précisant leurs avantages et inconvénients respectifs (Tableau 2.8).

Face à cet état des lieux, une synthèse quant aux solutions proposées peut être faite :

- Il s’agit en grande majorité d’outils ou de méthodes, avec notamment l’émergence d’outils numériques automatisant une partie des étapes.
 - Face à cette observation, on peut voir que les compétences des équipes ne sont majoritairement pas questionnées, la tendance est à la proposition d’outils adaptés à des équipes de conception « classique ».
- Les alternatives basées sur de nouveaux profils considèrent les biologistes comme des boîtes noires, presque comme des « outils » validant ou explicitant un concept biologique (intervention d’expert), et sont trop peu matures pour être utilisées (intégration au sein de l’équipe).
 - Les profils issus de la biologie ne sont que très rarement méthodologiquement intégrés.
- Les solutions proposées se concentrent sur la donnée biologique, comment la manipuler, la structurer, la formaliser, la trier, etc.
 - Les mécanismes, le raisonnement et les spécificités du monde vivant (Chapitre 2, partie 2.3) sont délaissés.
- Les approches sont relativement limitées sur leur phase d’utilisation, et peuvent apparaître peu combinables (type de modélisation, bases de données, etc.).
 - Les équipes manquent d’une vision transversale, holistique, des freins dus à la biologie, rendant difficile de choisir quels outils sont pertinents à chaque étape.

Cette synthèse sur les freins en biomimétique nous conduit à présenter dans la partie suivante un ensemble de nouvelles réflexions questionnant les pistes de résolution actuelles et ouvrant la porte à de potentielles nouvelles approches.

2.4.6 Synthèse sur l’état de l’art sur la conception biomimétique

L’approche biomimétique émerge de la volonté de passer de la bio-inspiration historique à une démarche standardisée, reproductible et efficace.

Un besoin méthodologique clair conduit un certain nombre de chercheurs à entreprendre la formalisation, de processus, de méthodes, d’outils d’un référentiel conceptuel propre à la biomimétique.

Bien que le cadre méthodologique soit aujourd’hui largement établi, la biomimétique reste marginale dans les pratiques d’innovation et plusieurs freins demeurent identifiables. Centrés sur les étapes manipulant des données biologiques, ils sont actuellement traités dans la littérature à travers différents outils visant à rendre la donnée biologique plus accessible, plus structurée et plus compréhensible.

Là où cette multiplicité des éléments méthodologiques souligne la tendance globale à l’expansion de cette approche d’innovation, elle pose également un problème car elle finit par perdre l’utilisateur qu’elle est censée aider. Par ailleurs, bien que ces freins aient été identifiés tôt dans le développement du cadre méthodologique et que les différentes approches de résolution aient des intérêts fondamentaux, la littérature souligne qu’ils ne sont pas résolus et donc qu’ils demeurent au centre des problématiques de recherche.

Un ensemble de questions naît de ces constats :

- Comment permettre aux équipes novices de choisir parmi la diversité méthodologique, une approche à la fois générique et suffisamment précise pour limiter les risques associés à l’utilisation d’une nouvelle stratégie de conception ?
- Outre la donnée brute, comment rendre aussi accessible aux équipes de conception le raisonnement, les mécanismes et le cadre de référence propres à la biologie ?
- La majorité des approches de la littérature soulignent le fait de pouvoir être effectuées sans formation en biologie comme un avantage (Fayemi et al., 2015; Nagel et al., 2010a). Pourtant, cet axiome n’est ni prouvé, ni remis en question. Utiliser ces outils ne requérant aucune formation en biologie représentent-ils réellement d’un avantage ? Sur le long terme, ne peuvent-ils pas même devenir une limite ? Voire la cause initiale des freins aujourd’hui observés ?
- Qu’en est-il de la composition de l’équipe de conception biomimétique ? Les études approchent les méthodologies, processus et les outils mais n’interrogent pas le profil de ceux-là même qui vont utiliser ces contributions.

À travers cet état de l’art sur la conception biomimétique, le cadre méthodologique, les questions actuelles de recherche, les tendances de résolution et les problématiques demeurant sans réponse ont ainsi pu être exposées.

2.5 Conclusion sur l’état de l’art

L’état de l’art de cette thèse de doctorat poursuivait deux buts principaux. Tout d’abord, il s’agissait de présenter les concepts fondamentaux structurant notre étude. Des défis modernes de l’ingénierie de la conception (Chapitre 2, partie 2.2) aux mécanismes biologiques de résolution de problèmes (Chapitre 2, partie 2.3), la biomimétique est un champ fondamentalement pluridisciplinaire et l’état de l’art se devait de rendre compte de cette diversité. À travers le raisonnement qui sera développé dans la suite de nos travaux, un ensemble de concepts issus de ce référentiel pluridisciplinaire de connaissances sera utilisé.

La mise en exergue des besoins de l’ingénierie de la conception et des caractéristiques spécifiques des systèmes vivants nous permet de conclure sur la pertinence de l’approche biomimétique (Chapitre 2, partie 2.3.4).

D’autre part, afin de souligner la rigueur scientifique et le caractère original des travaux de thèse présentés dans ce document, ce chapitre présentait également l’état actuel des connaissances en conception biomimétique (Chapitre 2, partie 2.4). À travers la description et la comparaison des principaux processus (Chapitre 2, partie 2.4.2.2), des grands types d’outils (Chapitre 2, partie 2.4.2.3) et de leurs liens intrinsèques, le cadre méthodologique dans lequel se place notre étude est défini.

Outre ce socle scientifique et méthodologique, cet état de l’art souligne les problématiques de recherches actuelles, les freins qui en émergent et les approches choisies pour y répondre (Chapitre 2, partie 2.4.3).

Les approches actuelles, centrées sur les outils, apportent des contributions théoriques certaines mais s’accumulent et n’apparaissent pas permettre le succès pratique attendu. Par ailleurs, elles se concentrent presque exclusivement sur les données biologiques sans prendre en compte ni le référentiel, ni le raisonnement, ni encore la perception propre au monde de la biologie.

Ce deuxième chapitre marque ainsi les fondations de notre raisonnement. À partir de celles-ci, le chapitre suivant décrit la formalisation de la problématique de cette thèse et des hypothèses de résolution développées dans la suite de ce manuscrit.



CHAPITRE 3

PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES



3.1 Formulation de la problématique

Comme souligné dans le chapitre 2, s'inspirer de la nature pour générer de l'innovation apparaît comme une approche au fort potentiel innovant. Face à ce premier constat, la communauté scientifique s'intéresse à la formalisation et la standardisation d'une démarche d'innovation technologique bio-inspirée.

À travers un ensemble de méthodologies, de processus et d'outils, une première série d'études établit un cadre de référence à la biomimétique, différenciant notamment les approches *biology push* et *technology pull*.

Étant donné la difficulté de systématiser la considération de la biomimétique comme une approche fiable de résolution de problèmes (approche *technology pull*), une deuxième phase de développement méthodologique interroge le déploiement de ce type de stratégies.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrons sur l'optimisation des pratiques biomimétiques associée au déploiement de l'approche *technology pull*. Différents freins liés à cet axe de recherche sont identifiés au cours de l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.3). La comparaison des freins (Chapitre 2, partie 2.4.5) souligne que ceux-ci dépendent majoritairement des étapes centrées sur la biologie (étape 3, 4, 5, 6 du processus unifié). Malgré un ensemble de contributions de la communauté scientifique sur ces obstacles, la mise en place de la biomimétique reste encore aujourd'hui très marginale.

Dans la logique d'optimisation de la pratique biomimétique *technology pull*, les travaux présentés dans cette thèse de doctorat traitent de la problématique de recherche suivante :

Comment optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull* ?

3.2 Hypothèses

Face à cette problématique, notre démarche propose un axe de résolution complémentaire aux approches existantes.

3.2.1 Une situation paradoxale

L'axe de résolution menant à nos hypothèses de recherche se base sur trois constats principaux :

- Comme souligné dans la problématique de recherche, les principaux freins à la pratique de la biomimétique sont associés au besoin et à la manipulation de données biologiques.
- Par ailleurs, la littérature souligne que les interactions entre experts biologistes et ingénieurs constituent un levier de résolution pertinent. Par déduction, l'expertise en biologie apparaît ainsi comme insuffisante au sein des équipes de conception.

- Enfin, l'état de l'art nous indique que les approches de résolution sont essentiellement formalisées par des ingénieurs et à destination des ingénieurs composant les équipes de conception. La manipulation des données biologiques est donc essentiellement étudiée du point de vue des savoirs et savoir-faire des acteurs de l'ingénierie de la conception.

Ces trois points conduisent à une situation paradoxale où les freins pratiques sont issus d'une difficulté à appréhender la biologie et où les solutions sont représentées par des outils de plus en plus complexes, centrés sur le référentiel de l'ingénierie de la conception. On notera que ces développements apparaissent analogues avec ceux décrits en partie 2.2.2.3 lors des travaux d'intégration du champ de l'ergonomie. Au vu des freins subsistants dans la littérature, ces outils apparaissent complémentaires sans pouvoir remplacer le savoir ou le savoir-faire issu de la biologie.

Dans la lignée des travaux préliminaires de Helten et Fayemi (Helten et al., 2011; Fayemi et al., 2015), l'intégration, au sein des équipes de conception biomimétique, d'un profil ayant une expertise en biologie apparaît comme un prisme de résolution encore inexploré. Il ne s'agit plus de considérer un chercheur intervenant ponctuellement mais d'un membre de l'équipe à part entière, spécialisé dans l'utilisation de la biologie en conception biomimétique.

Cette conjecture questionne deux axes principaux, un **axe métier** et un **axe processus**, à travers lesquels les hypothèses structurant nos travaux sont formulées.

3.2.2 L'axe métier, formulation de la première hypothèse

L'axe métier nous conduit à formuler une première hypothèse centrée sur le profil :

H.1 : « Les étapes centrées sur la biologie peuvent être optimisées par l'intégration au sein des équipes de conception biomimétique d'un nouvel acteur ayant des compétences en biologie »

Cette première hypothèse interroge alors trois sous-hypothèses :

- **H.1.1 : « Il est possible de démontrer l'apport d'une formation en biologie et donc de justifier le fondement de l'hypothèse 1 »**. Pour faire de cette intégration une voie de résolution réellement appliquée en pratique, l'investissement qu'elle représente doit-être motivé en apportant une réponse au « pourquoi ? ».
- **H.1.2 : « Il est possible d'identifier un ensemble de méthodes et d'outils propres aux savoirs et savoir-faire issus de la biologie et pouvant être utilisés par le nouvel acteur lors du processus biomimétique »**. La résolution des freins qui sous-tendent notre problématique doit ainsi trouver un ensemble de réponses à travers le « comment ? ».
- **H.1.3 : « Il est possible d'identifier un ensemble de compétences spécifiques caractérisant le nouveau profil à intégrer »**. L'intégration du nouvel acteur n'est

possible que si l'on définit « *qui ?* » doit être intégré, et ce notamment grâce aux réponses apportées aux deux points précédents.

Loin d'être cloisonnés, ces trois points validant l'hypothèse 1 se nourrissent les uns les autres.

3.2.3 L'axe processus, formulation de la seconde hypothèse

L'axe processus nous conduit à formuler une seconde hypothèse centrée sur le processus :

H.2 : « Les étapes centrées sur la biologie peuvent être optimisées par la mise en place d'un cadre méthodologique permettant l'intégration opérationnelle d'un nouvel acteur formé en biologie au sein des équipes de conception biomimétique »

Cette seconde hypothèse interroge alors trois sous-hypothèses :

- H.2.1 : « ***Il est possible d'identifier un ensemble de besoins et d'attentes des équipes de conception légitimant l'évolution du cadre méthodologique biomimétique pour intégrer un nouveau profil formé en biologie*** ». La mise en place de cette voie de résolution dépend notamment de l'adéquation entre les contributions proposées et les attentes des équipes de conception. Il s'agit de comprendre les besoins auxquels doit répondre l'intégration de ce nouvel acteur et donc de répondre au « *pour faire quoi ?* ».
- H.2.2 : « ***Il est possible d'adapter le cadre méthodologique de la biomimétique pour favoriser l'intégration d'un nouvel acteur formé en biologie lors des différentes étapes du processus de conception biomimétique*** ». Les modalités d'intégrations pratiques du nouveau profil doivent être explicitées par le processus afin de répondre au « *quand ?* » intégrer ceux-ci.
- H.2.3 : « ***Il est possible de structurer les échanges au sein des équipes de conception pour rendre synergique l'activité des acteurs aux spécialisations variées et prévenir les freins émergeant de l'interdisciplinarité*** ». Le travail fourni par les nouveaux acteurs ne sera pertinent et efficace que si la communication est rendue possible entre des profils aux expertises variées. Il nous faut définir l'espace, le « *où ?* », dans lequel ces acteurs peuvent échanger de manière interdisciplinaire et raisonner ensemble.

De même que pour l'hypothèse 1, ces trois points s'alimentent mutuellement et structurent ainsi la démarche développée dans ce document.

3.2.4 Synthèse sur les hypothèses

Les deux hypothèses élaborées sont en étroite interaction. La réponse apportée à chacune des sous-hypothèses alimente d'une part les réflexions sur l'hypothèse considérée mais apporte également des éléments de réponses à l'autre hypothèse. En effet, il apparaît logique

que la compréhension du « *pour faire quoi ?* » conduira d'une part à définir « *quand ?* » le nouveau profil doit-il être intégré et d'autre part posera le cadre du « *comment ?* » sera-t-il impliqué en pratique.

À travers le prisme ainsi formalisé (Figure 3.1), la résolution de la problématique est envisagée par la définition et l'intégration méthodologique et opérationnelle d'un nouvel acteur au sein des équipes de conception biomimétique.

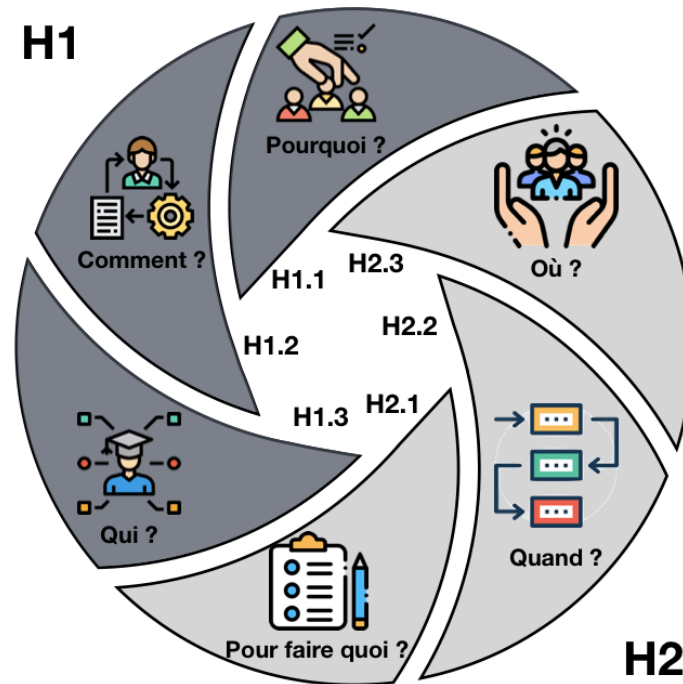


Figure 3.1 Synthèse des deux hypothèses et sous hypothèses

3.3 Structure et approche méthodologique

Le cœur du projet de recherche présenté dans ce mémoire de thèse de doctorat s'articule en trois parties :

- La validation du fondement de nos hypothèses qui conduit à l'identification de recommandations quant à l'intégration du nouveau profil (H.1.1 et H.2.1).
- L'adaptation du processus et l'identification des outils, savoirs et savoir-faire issus de la biologie et permettant de définir de nouvelles stratégies de résolution des freins associés aux étapes centrées sur la biologie (H.1.2 et H.2.2).
- L'identification d'un ensemble de compétences permettant de définir le nouveau profil à intégrer et de guider la communication interdisciplinaire (H.1.3 et H.2.3).

Ces parties forment les chapitres 4, 5 et 6, structurant les apports de nos travaux (Figure 3.2).

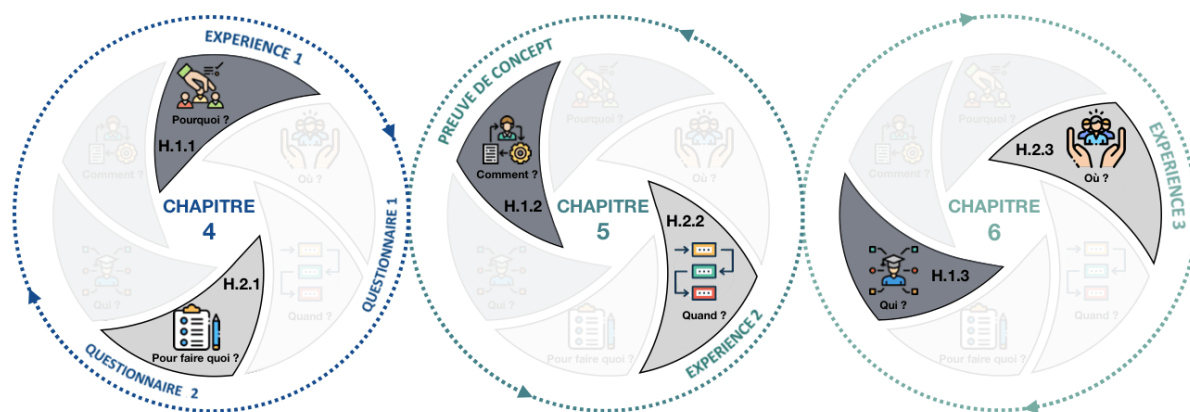


Figure 3.2 Structure du raisonnement explicité dans nos travaux

Afin de valider chaque point précédemment décrit en nous ancrant dans un contexte scientifique établi, l'approche de la Design Research Methodology (DRM) (Blessing et al., 2009), détaillée précédemment (Chapitre 2, partie 2.4.2.2) sera suivie. Elle est synthétisée en une phase descriptive initiale (phase descriptive I, Chapitre 4 et Chapitre 5) conduisant à un ensemble de contributions prescriptives (phase prescriptive, Chapitre 5 et 6) qui sera ensuite testé pour conduire à une seconde phase descriptive (phase descriptive II, Chapitre 5 et 6).

3.4 Conclusion sur le chapitre 3

À partir des constats issus de l'état de l'art, ce chapitre 3 a présenté la formalisation de la problématique de recherche et des deux hypothèses de résolution étudiées dans cette thèse de doctorat.

Nos travaux interrogent ainsi « **Comment optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull* ?** » et proposent d'une part une réflexion sur l'axe métier, « **par l'intégration au sein des équipes de conception biomimétique d'un nouvel acteur ayant des compétences en biologie** » (Hypothèse 1), et d'autre part une réflexion sur l'axe processus, « **par la mise en place d'un cadre méthodologique permettant l'intégration opérationnelle du nouvel acteur au sein des équipes de conception biomimétique** » (Hypothèse 2).

À travers l'identification d'un ensemble de sous-hypothèses structurant le raisonnement scientifique suivi, trois chapitres constituant le cœur de ce manuscrit sont présentés. Le chapitre suivant (Chapitre 4) présente différents apports contribuant à la première phase descriptive de nos travaux de recherche. Puis, le chapitre 5 se concentre sur l'axe processus de la problématique et le chapitre 6 sur l'axe métier. Ces deux chapitres contribueront tous deux aux parties prescriptives et aux retours descriptifs de notre étude, permettant de valider sur nos hypothèses de résolution.

Ce manuscrit sera conclu par les chapitres 7 et 8 présentant respectivement une synthèse des contributions de nos travaux et la conclusion de cette thèse de doctorat.



CHAPITRE 4

LÉGITIMITÉ ET ATTENTES DES PRATICIENS

4.1 Fondements et structuration du chapitre 4

4.1.1 Positionnement du chapitre 4 au sein de la démarche globale

Ce chapitre présente la première étape descriptive de la Design Research Methodology (Chapitre 3, partie 3.3). Il s'agit donc de définir avec précision la situation actuelle afin d'en extraire un ensemble de leviers clés d'amélioration.

Du point de vue de la problématique de ce doctorat, ce chapitre adresse les sous-hypothèses H.1.1 et H.2.1 qui présupposent du fondement des hypothèses 1 et 2. L'objectif est alors de passer de l'estimation logique « *en biomimétique, avoir une formation en biologie doit être pertinente* » à un constat scientifique précisant « *pourquoi ?* » cette formation est pertinente (H.1.1) et « *pour faire quoi ?* », à quelles étapes ? pour quels besoins ? (H.2.1).

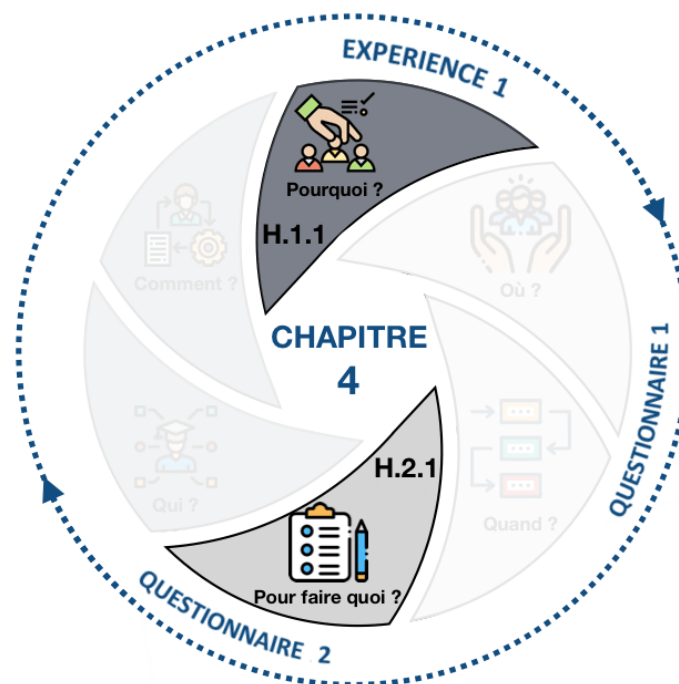


Figure 4.1 Sous-hypothèses traitées dans le chapitre 4

Ces deux sous-hypothèses sont intrinsèquement liées et seront de ce fait traitées de manière transversale au cours de ce chapitre avant que des contributions spécifiques ne soient extraites en synthèse.

4.1.2 Prérequis expérimental : l'intégration de biologistes

L'intervention d'experts en biologie est largement reconnue comme une réponse aux freins listés dans la littérature (Helms et al., 2009; Chirazi et al., 2019; Wanieck et al., 2017; Rovalo et al., 2020) (Chapitre 2, partie 2.4.4). Ces collaborations sont majoritairement recommandées sur un format ponctuel (Nagel et al., 2010b; Lenau, 2009), pour valider la modélisation d'un système biologique par exemple (Nagel et al., 2010b). Nos travaux visent à étendre ces interactions via l'intégration d'un nouveau profil au sein des équipes.

Sur ce point, la littérature sur le biomimétisme, et notamment les contributions du Biomimicry Institute, fait souvent état de collaborations étroites entre concepteurs et biologistes, alors nommés « *scientifiques à la table de conception* » (« *scientific-at-the-design-table* ») (Rowland, 2016). Pour autant, si leur intégration apparaît comme une hypothèse pertinente (Baumeister et al., 2013), les publications ne permettent pas de justifier et d'évaluer l'impact de cette démarche.

En biomimétique, l'intégration d'acteurs formés en biologie est largement soutenue d'un point de vue théorique (Snell-Rood, 2016) mais peu d'études abordent sa mise en pratique.

Ainsi, les équipes de Georgia Institute of Technology basent leurs analyses descriptives sur des échantillons interdisciplinaires, constitués en partie d'étudiants formés en biologie, mais sans quantifier l'impact de la composition des équipes (pas de travaux spécifiques, pas de contrôle, etc.). Ils soulignent, malgré tout, les apports généraux de ces profils atypiques au domaine de l'ingénierie de la conception (Helms et al., 2009; Vattam et al., 2008) et préconisent certains grands axes de recherche « Les étudiants avancés peuvent même apprendre à trouver des exemples pertinents basés sur la relation phylogénétique, l'évolution convergente ou les exaptations » (Yen et al., 2014).

Comme explicité dans l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.4), s'ils supportent l'intégration de biologistes au sein des équipes, les travaux de Helten (Helten et al., 2011) et de Fayemi (Fayemi et al., 2015) n'étudient pas dans le détail les apports potentiels de cette intégration.

La question de la légitimité et de l'acceptation d'un nouveau membre intégré au sein des équipes est donc toujours d'actualité. Valider ces deux aspects par des approches quantitatives et qualitatives apparaît par conséquent fondamental pour crédibiliser la démarche et justifier l'investissement qu'elle représente.

4.1.3 Objectifs et structuration du chapitre 4

Face à ces travaux issus de la littérature spécialisée, notre première hypothèse (H.1) se pose comme une synthèse de l'appel d'une partie de la communauté scientifique (Snell-Rood, 2016; McCardle et al., 2019; Fayemi et al., 2017; Helten et al., 2011), qui vise à l'intégration des biologistes au sein des équipes de conception biomimétique. Cette hypothèse doit cependant faire face à la question de sa légitimité scientifique (H.1.1) qui n'est pas prouvée de manière suffisante dans la littérature (Chapitre 4, partie 4.1.2). Par ailleurs, cette modification de la composition des équipes de conception n'apparaît possible que si le cadre méthodologique le permet, nous conduisant à notre hypothèse 2. Celle-ci doit également faire face à une remise en question initiale, les praticiens d'une part et les scientifiques de l'autre sont-ils prêts à accepter une adaptation de leurs pratiques afin d'intégrer un nouvel acteur ? Si oui sous quelles conditions ? Pour répondre à quels besoins ? Avec quelles attentes ?

À travers deux enquêtes et une série de mises en situations expérimentales présentées dans les parties suivantes, le Chapitre 4 vise à rassembler un ensemble de données expérimentales validant le fondement de nos deux hypothèses. Par ailleurs, les informations récoltées de cette manière auront également pour but d'alimenter le raisonnement prescriptif des chapitres suivant.

Le chapitre 4 se structure en quatre parties, cette introduction (Chapitre 4, partie 4.1), une partie « *matériels et méthodes* » présentant les éléments et protocoles (expérimentaux et analytiques) utilisés dans ce chapitre (Chapitre 4, partie 4.2), une partie décrivant les résultats obtenus lors des enquêtes et de l'expérimentation 1 (Chapitre 4, partie 4.3) et enfin la conclusion de ce chapitre (Chapitre 4, partie 4.4).

4.2 Matériels et méthodes du Chapitre 4

Cette partie présente les différentes démarches expérimentales du chapitre 4 (échantillons, protocole, etc.) et le cadre structurant l'analyse des résultats. Trois sources de données expérimentales sont considérées au cours de ce chapitre :

- Un questionnaire grand public interrogeant les attentes, besoins et perceptions d'étudiants et de professionnels, sur la place des biologistes dans le cadre de projets biomimétiques (Questionnaire 1).
- Un questionnaire destiné à des experts en conception biomimétique issus du monde de l'industrie ou/et de la recherche, interrogeant leur vision sur les freins, l'intégration de biologiste et les modalités de cette intégration (Questionnaire 2).
- Une série de workshops effectuée avec des étudiants afin de caractériser les apports quantitatifs et qualitatifs d'une formation en biologie (Expérimentation 1).

Chaque source est présentée dans la suite de la partie 4.2 et les spécificités ou les points communs sont précisés. Notamment, l'ensemble des démarches expérimentales prennent comme référence le processus unifié développé au LCPI par Fayemi (Fayemi et al., 2017).

4.2.1 Enquêtes descriptives

Afin d'éviter les redondances lors de la présentation des protocoles d'analyse, les questionnaires 1 et 2 sont regroupés dans cette partie.

4.2.1.1 Questionnaire 1 : perception du grand public

Élaboré sur Typeform® (www.typeform.com), ce premier questionnaire avait pour but de rendre compte de la perception de deux communautés, les ingénieurs-concepteurs et les biologistes, sur la biomimétique en général et sur nos hypothèses en particulier. La population étudiée n'avait pas forcément de connaissances en biomimétique. Il s'agissait d'interroger de futurs ou d'actuels professionnels sur l'acceptabilité potentielle de l'intégration de biologistes au sein d'équipes de conception, sur les freins et les besoins pratiques considérés essentiels, et sur les attentes les uns envers les autres. Ces résultats composent notre base initiale de raisonnement, ce sont ces populations que nous souhaitons convaincre d'adopter une approche biomimétique.

Caractérisation de l'échantillon étudié dans le questionnaire n°1

Les publics visés par le questionnaire étaient : des étudiants d'écoles d'ingénieurs spécialisés en conception et innovation, des étudiants d'écoles d'ingénieurs spécialisés en biologie, des partenaires industriels, des chercheurs en ingénierie de la conception et en biologie. Le questionnaire a été rempli par 195 personnes dont la répartition est présentée dans le tableau 4.1 (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Caractérisation de l'échantillon étudié dans le questionnaire n°1

Attributs	Critères	Nombre de participants
Sexe	Femme	88 (45 %)
	Homme	107 (55 %)
Profils	Étudiants	142 (73 %)
	Professionnels (ingénieurs R&D, consultants, chercheurs, etc.)	53 (27 %)
Domaines	Biologie fondamentale	28 (14 %)
	Ingénierie biologique (agronomie, agroalimentaire, pharmaceutique, etc.)	72 (37 %)
	Conception et innovation (industrie lourde, mécanique, électronique, etc.)	95 (49 %)
Connaissances	En biologie	100 (51 %)
	En ingénierie de la conception	95 (49 %)

L'échantillon est proche de la parité (45 % versus 55 %) et montre un équilibre des champs de connaissances en ingénierie de la conception et en biologie (49 % versus 51 %).

L'impact des répondants ayant des connaissances en biologie et diplômés d'école d'ingénierie biologique (37 %), ainsi que du caractère professionnel ou étudiant des répondants, seront discutés lorsque qu'ils conduisent à des résultats significativement différents.

Afin de faciliter la lecture, on parlera dans le texte d'ingénieurs pour faire référence aux répondants ayant des connaissances en ingénierie de la conception, et de biologistes pour faire référence aux répondants ayant des connaissances en biologie.

Enfin, la connaissance médiane en biomimétique de l'échantillon est évaluée à 3 sur 6 sans différences significatives au sein des populations structurant l'échantillon (MWW, p-value : 0,6). Les répondants ont par conséquent une expertise globale moyenne en biomimétique.

Mise en place du questionnaire n°1

20 questions réparties en quatre grandes parties composent ce premier questionnaire (Annexe 1, p. 297) :

- Questions 1 à 7 : caractérisation de l'échantillon (ex. *Age ?*).
- Questions 8 à 10 : questions générales quant à la biomimétique (ex. *Pourquoi faire de la biomimétique ?*).
- Questions 11 à 14 : questions sur le rôle d'un biologiste intégré dans une équipe (ex. *À quelle(s) étape(s) intégrer un biologiste ?*).
- Questions 15 à 20 : questions sur les attentes et besoins spécifiques aux différents acteurs (ex. *Attendez-vous des biologistes un savoir-faire en biologie ?*).

On distingue 3 types de questions, des questions ouvertes, des QCM et des évaluations par échelles de Likert à choix forcé à 6 niveaux. Par ailleurs, une définition de la *biomimétique* est rappelée en début de questionnaire pour prévenir toute confusion sémantique.

4.2.1.2 Questionnaire 2 : perception des experts

Également élaboré sur Typeform®, ce deuxième questionnaire avait pour but de rendre compte de la perception sur la biomimétique en général et sur nos hypothèses en particulier, des concepteurs utilisant des approches biomimétiques et des chercheurs étudiant la biomimétique. De même que pour le questionnaire 1, il s’agissait d’interroger la situation actuelle en biomimétique, l’acceptabilité de l’intégration de biologistes au sein d’équipes de conception et les freins et les besoins identifiés essentiels. Ces résultats s’ajoutent ainsi à notre base de référence, notamment pour comparer les avis d’experts et de non experts.

Caractérisation de l’échantillon étudié dans le questionnaire n°2

17 experts ont répondu au questionnaire, 9 experts français et 8 experts internationaux, le tableau 4.2 présente la caractérisation détaillée de l’échantillon (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Caractérisation de l’échantillon étudié dans le questionnaire n°2

Profils (N=17)	Diplôme			Champs d’expertise (plusieurs sont possibles)				
	Master	PhD	HDR	Biologie	Ingénierie	Méthodologie de conception	Architecture	Autre
Recherche (n= 5)	0	5	0	2	3	3	3	0
Conseil (n = 4)	2	2	0	1	1	2	0	1
Ingénieur industriel (n = 4)	1	3	0	1	1	2	0	0
Recherche et conseil (n = 4)	2	1	1	1	2	4	1	1

Il s’agit d’un panel d’experts composé aussi bien de professionnels du monde de la recherche que du monde industriel, et ayant une grande variété d’expertise.

Mise en place du questionnaire n°2

22 questions organisées en 5 sections sont conçues pour répondre aux objectifs présentés précédemment (Annexe 2, p. 301) :

- Questions 1 à 5 : caractérisation du profil des répondants (ex. *Champ(s) d’expertise ?*).
- Question 6 à 10 : Analyse des utilisations de la biomimétique et de son rapport au développement durable (ex. *D’après votre expérience, quelles sont les principales raisons conduisant les entreprises à utiliser une approche biomimétique ?*).
- Question 11 à 15 : Les modalités d’intégration des biologistes (ex. *À quelles étapes du processus des biologistes devraient-ils être intégrés ?*).
- Question 16 à 20 : Les compétences des biologistes et ingénieurs (ex. *En plus de leurs savoirs, les biologistes intégrés doivent-ils avoir un savoir-faire en biologie ?*).

- Question 20 à 22 : Les freins associés à la mise en place de la biomimétique et à l'intégration des biologistes (ex. *Pourquoi la biomimétique reste une approche peu répandue dans le monde industriel actuel ?*).

Les experts visés par le questionnaire ont été identifiés par leur affiliation au panel d'experts scientifiques présents à la conférence Biomim'Expo 2018 à Paris, ou en tant que membres du Ceebios (Chapitre 2, partie 2.4.1.3).

4.2.1.3 Protocoles associés aux questionnaires 1 & 2

Les questionnaires sont envoyés par mails aux répondants, la phase de réponse n'est pas suivie en environnement contrôlé. On considérera que les répondants sont rationnels et répondent aux questions au mieux de leurs compétences respectives.

Les résultats obtenus aux questionnaires sont analysés *via* les tests statistiques suivants :

- Les échelles de Likert par le test de Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW).
- Les réponses aux QCM par le test du χ^2 (khi-deux) avec modélisation de Monte Carlo.
- Les questions ouvertes sont utilisées sous forme de *verbatim* pour illustrer les résultats obtenus

Dans un souci de lisibilité, seuls les résultats statistiques les plus significatifs seront détaillés et présentés dans le texte, et ce sous un même format générique (biologistes versus ingénieurs, type de test, p-value =). Pour les experts, la population étant réduite, elle est considérée comme homogène et uniquement caractérisée par son expertise, on exprimera les résultats en pourcentage.

4.2.2 Expérimentation 1 : série de workshops

Cette première phase expérimentale pratique était structurée autour d'une série de workshops de 2 heures, dont le sujet, proposé par l'entreprise DHK-SIP consulting (<https://www.dhk-sip.com/>), visait à convertir d'anciens conteneurs de marchandises en habitations confortables en Côte d'Ivoire. La problématique de conception traitée ciblait l'isolation des conteneurs. Afin d'avoir accès à un échantillon conséquent, l'expérience est suivie par des étudiants et non des professionnels. Ce biais sera notamment étudié par la comparaison des résultats avec ceux du questionnaire 2.

Échantillon de l'expérimentation 1

Les résultats de deux populations étudiantes sont comparés, une population ayant une formation en biologie (étudiants d'AgroParisTech) et une, sans formation en biologie, suivant des cursus ingénieurs en conception, et plus largement en génie industriel (étudiants de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers). L'expérience a été menée avec 42 élèves au total (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Caractéristiques de l'échantillon de l'expérimentation n°1

Profil (formation scientifique)	Niveau d'enseignement	Formation préalable en biomimétique	N
Ingénieur en conception (Conception de produit, design d'interaction, créativité, etc.)	Niveau Master (BAC+5)	Aucune	21
Ingénieur en biologie (Agronomie, biologie moléculaire, environnement, etc.)	Niveau Master (BAC+4/+5)	Aucune	21

Malgré un ensemble de biais inhérents à la diversité des participants d'une même population, la variable que l'on a ici souhaité tester est la formation en biologie.

Matériels mis à disposition des participants

Les participants avaient accès à une courte description du projet et à des données basiques sur le contexte environnemental de la Côte d'Ivoire : indice de développement, informations climatiques (type de climat, températures mensuelles et précipitations), caractéristiques des conteneurs et des villages de conteneurs, attente de l'acteur industriel en termes d'esthétique, etc.

Associés à ces fiches descriptives, deux outils ont été utilisés par les participants, la taxonomie du biomimétisme (Baumeister et al., 2013), précédemment présentée comme un outil de transfert (Chapitre 2, partie 2.4.2.3), et AskNature (Biomimicry Institute, 2002), précédemment présentée comme un outil d'application (Chapitre 2, partie 2.4.2.3).

Ces deux outils sont intrinsèquement liés dans la mesure où la taxonomie représente l'architecture structurant AskNature et permet ainsi à l'utilisateur de formuler des requêtes à l'aide d'un cadre linguistique préétabli, reliant directement les problèmes fonctionnels aux données présentes sur AskNature (figure 4.2).

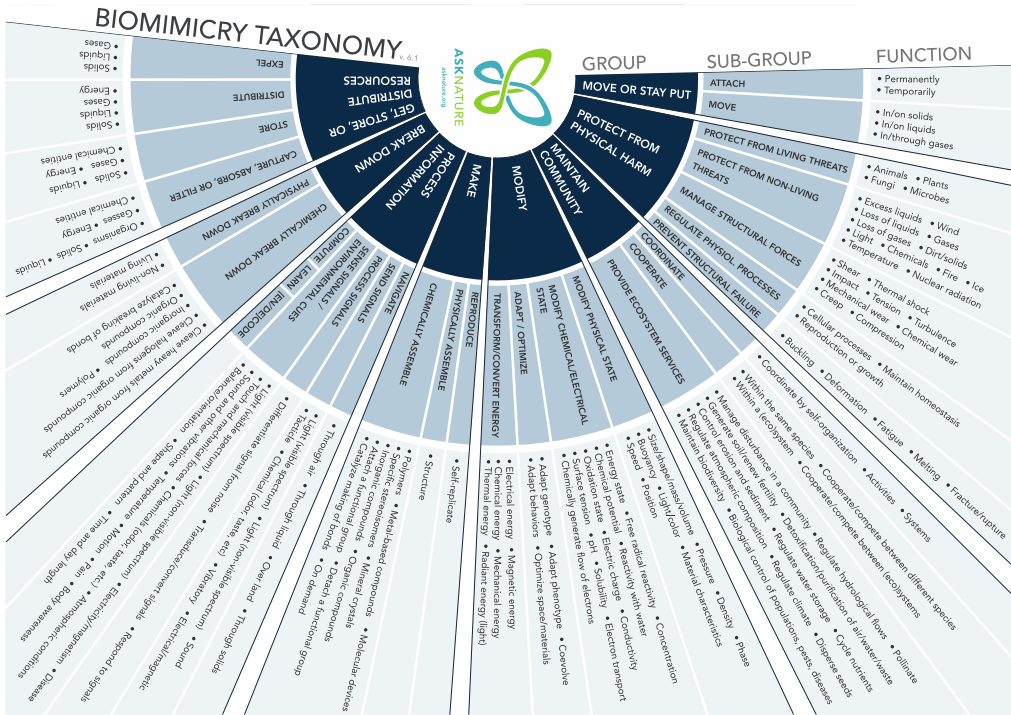


Figure 4.2. La taxonomie du biomimétisme, issue de Baumeister (2013)

AskNature (www.AskNature.org) est une base de données en libre accès, créée par le Biomimicry Institute. Elle rassemble des stratégies biologiques d’une part (en vert sur la Figure 4.3), et des idées d’application issues de ces stratégies d’autre part (en bleu sur la Figure 4.3).

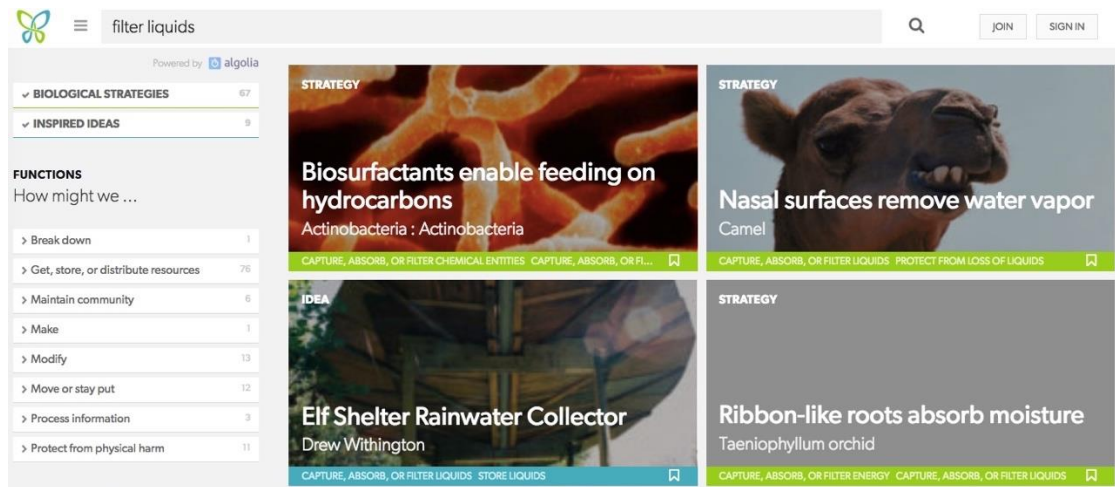


Figure 4.3. Exemple d’une recherche sur AskNature pour la requête « *How does nature filter liquids ?* »

Ces données sont facilement disponibles via un moteur de recherche intuitif fonctionnant avec des requêtes issues de la taxonomie sous la forme générique « *Comment la nature + ...* ».

Protocole expérimental

Le processus de conception utilisé lors des workshops est en grande partie basé sur le processus de conception biomimétique unifié problem-driven formalisé par Fayemi (Fayemi et al., 2017) et présenté dans l’état de l’art (Chapitre 2, partie 2.4.2.2). En raison des contraintes de temps, deux modifications ont été apportées au processus de référence, les étapes 4 et 5 ont été regroupées et la 8^{ème} étape n’a pas été traitée, menant à un processus en 6 étapes (Figure 4.3).

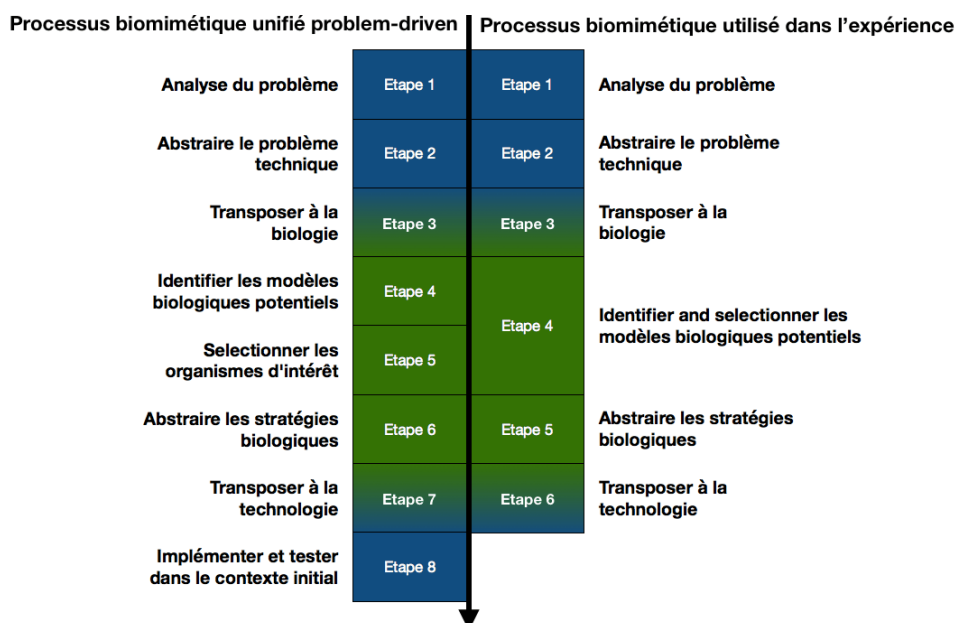


Figure 4.4 Alignement du processus de référence avec celui utilisé dans l’expérience 1

Chapitre 4 – Légitimité et attentes des praticiens

Le protocole suivi était identique pour chaque session de 2 heures. Celui-ci est découpé en 6 phases :

- Présentation de la biomimétique et du sujet (15 min)
- Présentation du processus et des outils (15 min)
- Analyse du problème de conception (étape 1), abstraction des problématiques techniques (étape 2) et transposition à la biologie (étape 3) (30 min)
- Identification et sélection d'organismes biologiques et des stratégies associées sur AskNature (étape 4) (30 min)
- Abstraction (étape 5) et transposition (étape 6) des solutions biologiques en une solution technique (20 min)
- Évaluation des outils et retour d'expérience (10 min)

Pour prévenir un ensemble de biais, tels que ceux de la communication au sein des équipes ou le fait que certains participants puissent se connaître, nous avons minimisé au maximum les variables en considérant un protocole individuel. Chaque participant a donc effectué seul le processus, et rempli seul ses feuilles réponses.

Ce choix conduit à certaines limites associées à la différence entre un travail individuel et un travail d'équipe. Cet aspect sera étudié en profondeur dans le Chapitre 5. Lors de cette première phase descriptive, on considère que si une formation en biologie à l'échelle individuelle a des impacts significatifs sur les résultats obtenus, alors il existe un potentiel à exploiter lors du travail en équipe.

Récolte et analyse des résultats

Les participants rapportent leurs conclusions sur une feuille réponse formée de quatre parties, permettant la récolte des données expérimentales :

- Le profil du participant (ex. *École ?*).
- Le suivi du processus biomimétique (ex. *Lister les problématiques techniques identifiées*).
- L'évaluation des deux outils utilisés par des échelles de Likert à 5 niveaux. Pour chaque outil, l'évaluation est effectuée sur 5 critères basés sur les critères d'utilisabilité de Nielsen (Nielsen, 1993) : la *satisfaction*, la *facilité de prise en main*, le *risque d'erreur*, la *richesse d'informations* (dérivé du critère d'*efficacité* de Nielsen) et la *précision de l'information* (dérivé du critère d'*efficacité* de Nielsen).
- Retour d'expérience des participants (ex. *Quelle étape a été la plus difficile et pourquoi ?*).

L'analyse des résultats est ensuite effectuée sur plusieurs axes :

- Comparaison du nombre d'éléments identifiés par les participants à chaque étape (Les fonctions en étape 1, les problèmes techniques en étape 2, etc.) via une analyse quantitative (t-test) et une analyse des corrélations (test Spearman).
- Analyses détaillées des résultats obtenus étape par étape via une analyse statistique qualitative (test χ^2) et quantitative (t-test).
- Évaluation en aveugle (fiches réponses anonymisées) du nombre d'erreurs d'analyse des stratégies biologiques (erreur dans la compréhension des concepts et stratégie extraite basée sur une interprétation erronée des données) comparée selon les populations (test χ^2).
- Analyse des notations des outils via un test de Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW). Cette évaluation est associée à un ensemble de verbatim issu des retours d'utilisateurs sur le processus et les outils utilisés.

Comme précédemment, les résultats seront toujours formalisés comme suit dans le texte : (résultats biologistes versus résultats ingénieurs, type de test, p-value).

4.3 Résultats du chapitre 4

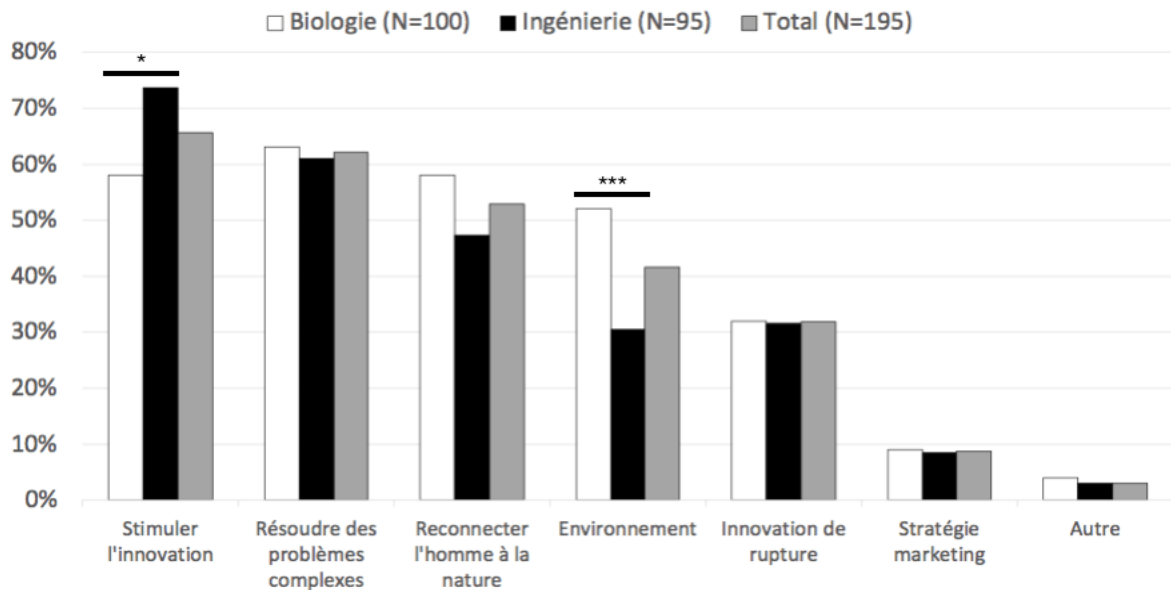
L'ambition de cette partie 4.3 est de comparer les réponses au questionnaire et les résultats de l'expérience 1 afin d'avoir une vision d'ensemble, critique et supportée par des données expérimentales. Par extension, cette partie doit également permettre la caractérisation du champ opérationnel associé au nouveau profil à intégrer et du cadre méthodologique à mettre en place dans cette optique.

4.3.1 Évaluation des perceptions et besoins des acteurs

Cette première partie se base sur les résultats obtenus dans les questionnaires 1 et 2.

Perception de la biomimétique

Afin de comprendre le point de vue des répondants, le regard qu'ils portent sur la biomimétique apparaît crucial (Figure 4.5).



p-value : '***' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05.

Figure 4.5 Quels intérêts ont les entreprises à faire de la biomimétique ? (% des répondants, choix multiples)

Deux raisons expliquant l'utilisation de la biomimétique apparaissent liées au background de l'utilisateur :

- « *Pour stimuler l'innovation* » est ainsi significativement plus sélectionnée par les ingénieurs (58 % versus 73 % ; χ^2 ; p-value = 2.10^{-2*}).
- « *Pour des raisons environnementales* » est significativement plus sélectionnée par les biologistes (52 % versus 30 % ; χ^2 ; p-value = 7.10^{-3**}). Plus précisément, l'éco-innovation apparaît elle aussi préférentiellement visée par les biologistes (résultats non affichés, 69 % versus 41 % ; χ^2 ; p-value = 5.10^{-4***}).

Si l'on considère uniquement les professionnels, les résultats sont équivalents mais ne sont plus significatifs, potentiellement du fait de l'échantillon plus faible. Seule la prise en compte des raisons environnementales demeure significative pour les professionnels.

L'analyse des résultats présentés dans la figure 4.5 nous indique que la prise en compte des problématiques environnementales est presque aussi importante pour les biologistes que l'impact sur l'innovation (58 % versus 52 %). Celle-ci est en revanche largement reléguée au second plan face à l'innovation chez les ingénieurs (respectivement 74 % et 30 %).

Par ailleurs, 100 % des experts considèrent que les projets biomimétiques ont pour objectif l'innovation et seulement 38 % associent la démarche à des questions environnementales.

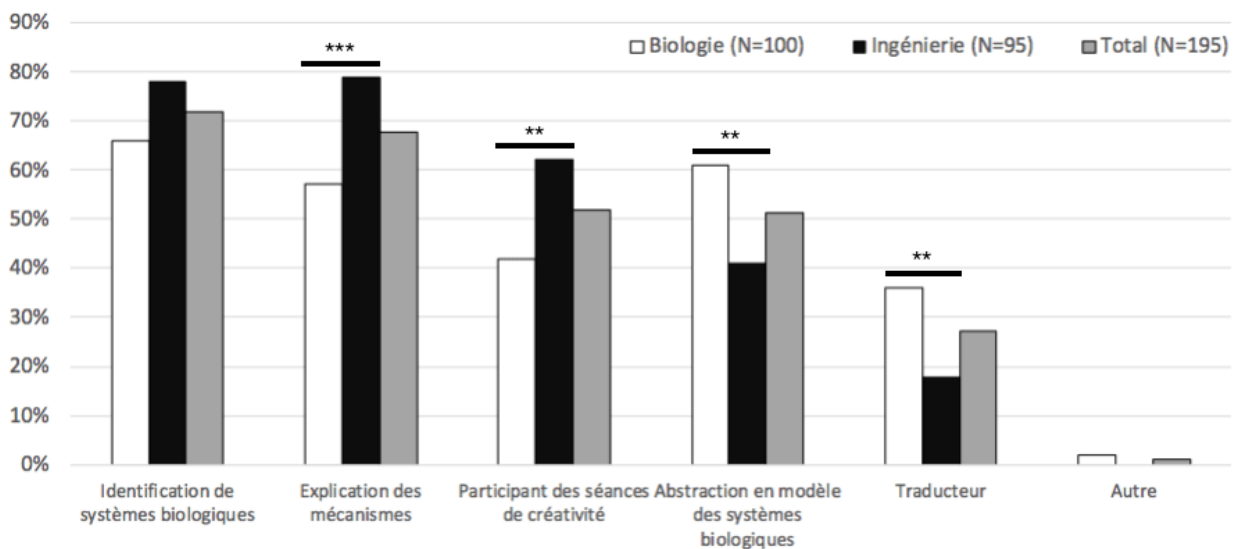
Fortement présentes chez les biologistes, ces attentes devront être prises en compte comme un élément impactant leur motivation à intégrer des équipes de conception et orientant leur raisonnement en pratique. Plus que la biomimétique, c'est le biomimétisme qui apparaît comme leur centre d'intérêt (axe métier).

On notera également que les deux populations ne voient pas la biomimétique comme une stratégie spécifiquement orientée vers l'innovation de rupture. On peut alors supposer que les répondants envisagent une utilisation à des fins d'innovation incrémentale. La question de

l'évaluation des risques et du coup d'une approche biomimétique apparaît ici comme un élément à prendre en compte dans le cadre méthodologique à concevoir (axe processus).

Perception des besoins menant à l'intégration d'un biologiste

La légitimité de l'intégration d'un nouveau profil passe par sa capacité à répondre à un ensemble de besoins. L'identification des dits besoins et l'évaluation des apports anticipés du profil en question apparaissent fondamentales (Figure 4.6).



p-value : '***' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05.

Figure 4.6 Pourquoi intégrer une/un biologiste ? (% des répondants, choix multiples)

On observe sur la figure 4.6 que l'intégration de biologistes est perçue comme une réponse pertinente pour la majorité des freins identifiés dans l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.3.2). Là où la principale réponse de la population totale est destinée à pallier les difficultés d'identification des organismes biologiques, on observe également que :

- Les ingénieurs souhaitent faire intervenir des biologistes afin d'expliquer la données biologiques et les mécanismes identifiés (57 % versus 79 % ; χ^2 ; p-value = 1.10^{-3***}). Ce choix est soutenu par 94 % des experts. Ensuite, c'est l'application des stratégies biologiques lors des séances de créativité qui justifie selon les ingénieurs leur intégration (42 % versus 67 % ; χ^2 ; p-value = 7.10^{-3**}).
- Les biologistes considèrent que la plus-value de leur intégration est particulièrement importante lors de la modélisation des systèmes biologiques (61 % versus 41 % ; χ^2 ; p-value = 1.10^{-2**}). Par ailleurs, ils identifient dans une proportion significativement plus grande le frein linguistique comme un levier sur lequel ils peuvent apporter une contribution (36 % versus 18 % ; χ^2 ; p-value = 2.10^{-3**}), choix soutenu par 81 % des experts.

L'analyse des résultats confirment les freins identifiés dans la littérature et mettent en évidence que les biologistes sont vus comme des intermédiaires par les ingénieurs, des ponts

leur permettant d’appréhender le monde biologique dans sa diversité (l’identification des stratégies) et dans sa complexité (l’explication des stratégies). Les réponses des différentes populations soulignent le besoin de profils transdisciplinaires, capables de maîtriser d’une part le vocabulaire et les concepts biologiques mais également de prendre part à des activités relatives aux processus de conception, telles que des séances de créativité, non familières aux biologistes « classiques ». Par ailleurs, 100 % des experts soulignent l’intérêt global d’intégrer un biologiste au sein des équipes de conception biomimétique.

Perception des modalités d’intégration des biologistes

Les modalités méthodologiques décrivant l’intégration des biologistes au sein des équipes de conception peuvent être décrites selon de premiers paramètres, les étapes lors desquelles celui-ci doit-être intégré (Figure 4.7) et son format, son degré d’intégration (Figure 4.8).

Les réponses au questionnaire montrent un motif d’intégration similaire pour toutes les populations considérées :

- Une forte reconnaissance de l’intérêt d’inclure les biologistes lors des étapes *centrées sur la biologie* (étapes 3 à 6), notamment par les experts.
- Une partie non négligeable des répondants (>30 % des biologistes et des experts) suggère également une collaboration tout au long du processus et pas uniquement sur les étapes en relation directe avec la biologie.

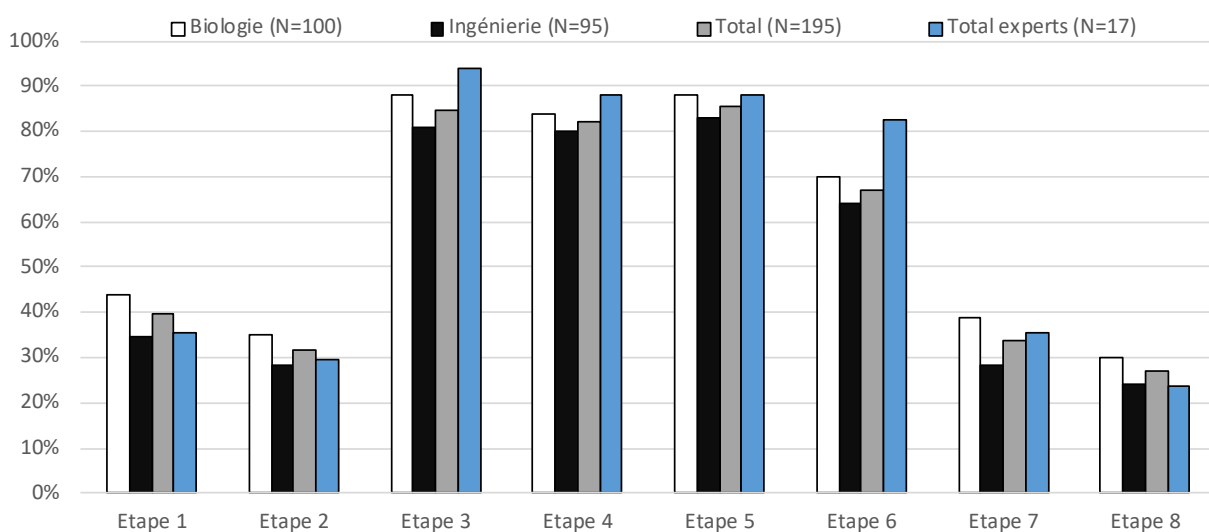


Figure 4.7 À quelles étapes intégrer la/le biologiste ?

Les étapes les plus identifiées sont identiques à celles des approches ponctuelles décrites dans la littérature (chapitre 2, partie 2.4.3.2). On observe donc une cohérence du besoin détecté.

En revanche, là où la grande majorité de la littérature suggère la mise en place d’interactions avec des experts externes aux équipes, plus de 50 % des répondants (81 % des experts) valident la mise en place d’une collaboration plus étroite à travers l’intégration de profils formés en biologie au sein même de l’équipe de conception (Figure 4.8).

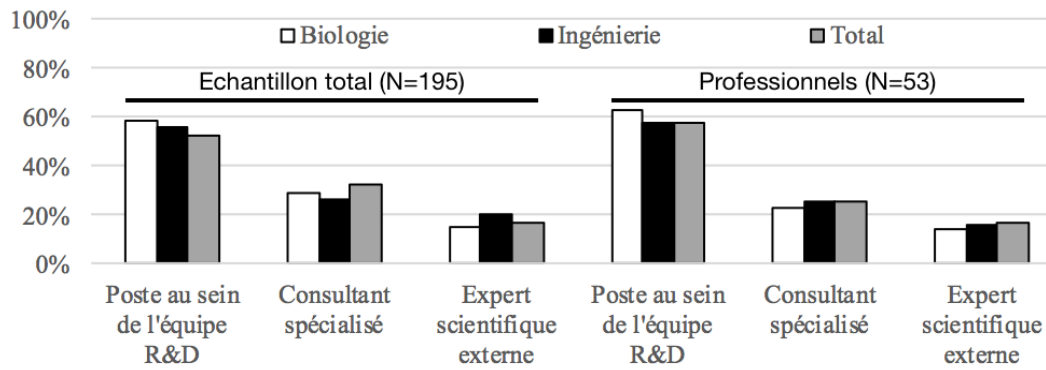


Figure 4.8 Quel cadre d'intégration considérer ?

On peut voir sur la Figure 4.8 que les réponses données par l'échantillon total et professionnel sont très proches. Il est à noter que les biologistes eux-mêmes sont prêts à travailler au sein d'équipes interdisciplinaires de conception biomimétique.

Ces résultats soulignent que plusieurs phases d'activités (Figure 4.7) sont à envisager pour l'intégration de ce nouveau profil aux seins des équipes de conception (Figure 4.8). Qu'il s'agisse de missions variables, d'alternance entre des phases collaboratives et individuelles, ou même de degrés d'intégration évoluant dans le temps, une véritable réflexion sur le cadre méthodologique apparaît nécessaire.

Celle-ci doit en effet structurer l'activité de ce nouvel acteur, et de manière générale, de cette nouvelle « équipe type » spécialisée en conception biomimétique.

4.3.2 Attentes des acteurs sur les compétences à apporter

Là où le lien entre les freins identifiés dans la littérature, les besoins soulevés par les répondants et les étapes d'intégration est ainsi établi, la question des attentes caractérisant ces différentes étapes apparaît cruciale.

Sur le champ d'expertise à apporter

Afin de décrire le profil du biologiste à intégrer aux équipes de conception, les ingénieurs sont questionnés sur le type de savoir attendu et sur leur attente en termes de savoir-faire. En nous basant sur les travaux de Fayemi (Fayemi et al., 2015) la caractérisation des types de savoirs se fera entre deux pôles, le *savoir horizontal* d'une part, très large avec une expertise de base, et le *savoir vertical*, très étroit mais avec une très forte expertise (Tableau 4.4, « *Champ de connaissance* »). En parallèle, les biologistes sont également interrogés sur les attentes en apports méthodologiques et en outils biomimétiques de la part des équipes de conception (Likert de 1 à 6) (Tableau 4.4)

Tableau 4.4 Attentes sur les apports des différents profils

Attentes des ingénieurs (n = 95)			Attentes des biologistes (n = 100)			
Champ de connaissance		Score (Likert)	Savoir faire	Score (Likert)	Apports méthodologiques	Apports en outils
Horizontal (H)	8,42 %	1	2,11 %	1	0,00 %	1 %
H++++ / V+	20 %	2	13,68 %	2	2,00 %	15 %
H+++ / V++	27,37 %	3	21,05 %	3	23,00 %	27 %
H++ / V+++	29,47 %	4	31,58 %	4	34 %	43 %
H+ / V++++	14,74 %	5	26,32 %	5	29 %	12 %
Vertical (V)	0 %	6	5,26 %	6	12 %	2 %
Médiane (SD)	3 (1,18)	Médiane (SD)	4 (1,18)	Médiane (SD)	4 (1,01)	4 (0,99)

En gras la valeur maximale

Les avis quant au type de savoir à intégrer sont très variables (Tableau 4.4). Les ingénieurs attendent un profil ayant à la fois un savoir large, *horizontal*, (besoin d'identification) et un savoir précis, *vertical*, sur les différents organismes vivants rencontrés (besoin d'explication). Là où ces attentes apparaissent logiques face aux freins, elles sont aussi profondément irréalistes, un biologiste ne peut pas avoir une expertise approfondie sur tous les sujets en biologie. Ces résultats, nous conduisent à considérer deux types de biologistes. Un biologiste intégré sur tout le processus, au caractère interdisciplinaire et au savoir biologique large, et un biologiste intégré ponctuellement, ayant un savoir spécialisé, extrêmement précis sur un petit nombre de modèles biologiques. Cette approche à deux profils est proposée aux experts et est validée par plus de 80 % d'entre eux.

On observe également une attente non négligeable sur le savoir-faire des biologistes avec 61,7 % des ingénieurs donnant une note supérieure ou égale à 4. Attente confirmée par 87,5 % des experts donnant une note supérieure à 3. À travers ces résultats, on comprend que les répondants considèrent ce nouveau profil comme un collaborateur actif, pouvant modifier profondément les pratiques de conception biomimétique en y apportant des outils, raisonnements et approches biologiques. Celui-ci n'est pas qu'une « source de savoir biologiques » mais aussi un praticien de la conception biomimétique.

Les répondants biologistes rapportent, eux, des attentes conséquentes sur l'aspect méthodologique avec plus de 40 % des notes supérieures ou égales à 5. Ils reconnaissent ici ne pas maîtriser le cadre méthodologique et considèrent les ingénieurs comme les membres responsables du processus et donc de son adaptation pour leur intégration.

Dans la même logique, ils rapportent aussi un besoin intermédiaire d'outils biomimétiques avec 57 % des notes supérieures ou égales à 4. Ces attentes plus mesurées montrent réciproquement que les biologistes considèrent avoir un ensemble d'outils biologiques pouvant être utilisés pour répondre aux besoins de la biomimétique. Ces réponses correspondent avec les attentes sur leur savoir-faire émises par les ingénieurs.

Le biologiste au savoir vertical, extrêmement précis, apparaît comme le chercheur en biologie. Le biologiste au savoir biologique large et intégré au sein des équipes est précédemment identifié par Fayemi qui le nomme biologiste horizontal (Fayemi et al., 2015). Ni sa définition,

ni sa pratique, ni son intégration ne sont en revanche explicitées. C'est ce nouvel acteur qui cristallise nos hypothèses.

La question de la collaboration interdisciplinaire est reconnue comme une difficulté dans l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.3.2) et composera par conséquent une barrière à la démarche d'intégration (Chapitre 6, partie 6.3). La partie suivante interroge les attentes des deux populations afin de dépasser cet obstacle.

Sur le champ d'expertise croisé

Les attentes liées aux difficultés de la collaboration interdisciplinaire sont tout d'abord questionnées sous l'angle des connaissances croisées et donc sur les potentiels ponts disciplinaires dont sont capables les acteurs : quelles connaissances en ingénierie doivent avoir les biologistes intégrés et quelles connaissances en biologie doivent avoir les ingénieurs ? (Tableau 4.5).

Tableau 4.5 Attentes croisées des acteurs

Score	Attentes des ingénieurs		Attentes des biologistes : Mon interlocuteur doit connaître les bases de la biologie (concepts, vocabulaire, etc.) ?
	Les biologistes doivent connaître les processus de conception ?	Les biologistes doivent connaître les outils de conception ?	
1	6,32 %	21,05 %	9,00 %
2	16,84 %	30,53 %	13,00 %
3	26,32 %	25,26 %	28,00 %
4	29,47 %	16,84 %	38,00 %
5	17,89 %	5,26 %	9,00 %
6	3,16 %	1,05 %	3,00 %
Médiane (SD)	4 (1,23)	2 (1,20)	3,5 (1,18)

En gras la valeur maximale

Les résultats du tableau 4.5 soulignent dans un premier temps des attentes quant à la formalisation d'un référentiel conceptuel partagé, que ce soit chez les biologistes ou les ingénieurs. Les attentes se portent sur les bases théoriques des savoirs respectifs (médianes de 4 et 3.5). Les connaissances sur la partie technique, notamment représentées ici par « *les outils de conception* », n'apparaissent pas aussi attendues (médiane de 2). On interprète ces résultats comme le besoin de pouvoir comprendre le vocabulaire et les concepts lors des phases d'échanges et non d'une connaissance approfondie des pratiques de conception actuelles.

Outre ce besoin d'une base de connaissance partagée, chaque population souligne de forte attente en termes de pédagogie et de vulgarisation des informations. Celle-ci est significativement plus poussée chez les ingénieurs (4 versus 5, WMW, p-value < 2.10⁻¹⁶).

Chaque profil attend de l'autre une ouverture d'esprit menant à l'appropriation des connaissances de bases du domaine complémentaire, ainsi qu'une capacité et une envie d'assurer un transfert d'informations. Ces observations semblent également fondamentales pour définir les besoins en outils centrés sur la communication interdisciplinaire et l'accompagnement du travail collaboratif.

Synthèse des résultats des questionnaires et identification du Biomiméticien

Les résultats de l'enquête de la partie descriptive de notre recherche apportent d'une part une première validation de nos hypothèses, celles-ci apparaissent légitimes par rapport aux besoins rapportés et sont spécifiquement validées par les répondants, et d'autre part caractérisent des critères à prendre en compte lors des phases prescriptives de notre étude.

Par ailleurs, le besoin d'intégrer un acteur différent de celui des chercheurs, principalement étudié dans la littérature, est explicité. Le terme de « *biologiste horizontal* » proposé par (Fayemi et al., 2015) apparaît trop restrictif et porte à confusion. Afin de caractériser plus précisément celui-ci et pour faciliter sa description dans le texte, ce nouvel acteur est nommé *biomiméticien*. De manière générique celui-ci est alors défini comme « *un membre des équipes de conception biomimétique pouvant d'une part manipuler des outils et des concepts biologiques complexes pour créer de nouvelles connaissances, et maîtrisant d'autre part les connaissances biomimétiques pour participer aux pratiques de conception, facilitant notamment le transfert de connaissances d'un champ scientifique à l'autre.* »

À travers les résultats des questionnaires 1 et 2, un certain nombre d'éléments clés sont mis en évidence et synthétisés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 Synthèse des résultats des questionnaires 1 & 2

ID	Axe métier : H.1.1	Axe processus : H.2.1
1	La réduction des impacts environnementaux comme un facteur de motivation pour l'implication des biologistes en biomimétique	L'évaluation des risques associés à un projet biomimétique, et des impacts environnementaux des résultats.
2	Apport sur la recherche, l'analyse, la sélection et l'explication des données biologiques	Intégration particulièrement forte sur les étapes centrées sur la biologie
3	Caractère interdisciplinaire de l'acteur	Intégration sur des étapes centrées sur la conception
4	Savoir horizontal (=biomiméticiens) et vertical (=chercheurs)	Mise en place d'une solution à deux profils de biologistes
5	Un nouveau membre à part entière des équipes de conception biomimétique	Savoir-faire et outil à intégrer
6	Partage d'un référentiel commun de concepts et de processus, besoin de vulgarisation et pédagogie, de traduction des données biologiques	Besoin méthodologique d'aide à la collaboration/communication interdisciplinaire

Afin de compléter ces premiers résultats sur questionnaires, la partie suivante apporte un ensemble de résultats issus des phases pratiques structurées en workshops.

4.3.3 Résultats de l'expérience 1

Cette partie décrit les résultats de la série de workshops décrite dans la partie 4.2.2. Pour rappel, le sujet traité de manière individuelle par les étudiants ayant ou non des connaissances en biologie, est « *Comment concevoir l'isolation de conteneurs afin qu'ils soient transformés en habitations confortables en Côte d'Ivoire* ». Pour chaque étape du processus, on se réfère aux résultats obtenus par les utilisateurs par la formule générique « éléments identifiés ». Par exemple, les éléments identifiés sont des fonctions pour la première étape, des problèmes techniques pour la deuxième étape, des requêtes pour la troisième étape, etc.

4.3.3.1 Impact d'une formation en biologie sur le nombre moyen d'éléments identifiés

D'après l'analyse statistique du nombre d'éléments obtenus au cours du processus, une formation en biologie semble avoir un impact bénéfique à chaque étape (Tableau 4.7), validant les résultats présentés dans la partie précédente (Tableau 4.6, points 3 et 5).

Tableau 4.7 Comparaison du nombre d'éléments identifiés à chaque étape du processus selon les profils

Éléments identifiés	Biologistes (n=21)	Ingénieurs (n=21)	p-value (t-test)	Outil
	Moyenne (σ)	Moyenne (σ)		
1. Fonctions	5,8 (2,00)	4,4 (1,43)	1.10 ^{-02*}	Aucun
2. Problèmes techniques	8,1 (3,16)	5,7 (1,65)	1.10 ^{-03**}	Aucun
3. Requêtes	10,8 (5,66)	8,5 (4,47)	1.10 ⁻⁰¹	Taxonomie
4. Organismes	8,6 (3,26)	6,0 (2,22)	4.10 ^{-03**}	AskNature
5. Stratégies biologiques	8,3 (2,93)	5,5 (2,22)	1.10 ^{-03**}	AskNature
6. Solutions techniques	6,4 (1,43)	4,1 (2,35)	5.10 ^{-04***}	AskNature

Gras : Valeur maximale, p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1**

De façon assez surprenante, les biologistes ont identifié significativement plus d'éléments lors de la toute première étape du processus (5,85 versus 4,42 ; t-test ; p-value : 1.10⁻⁰²). Ces résultats sont interprétés comme la conséquence d'une vision plus systémique du problème.

La question de savoir si les biologistes sont également plus efficaces lors des autres étapes du processus apparaît plus délicate. En effet, les différences significatives observées sur le reste du processus (Tableau 4.7) peuvent être des répercussions de l'écart significatif observé en étape 1, ou venir réellement d'une meilleure efficacité propre à chacune des étapes.

Les résultats obtenus lors de l'étapes 3 n'étant pas statistiquement différents selon les populations, on émet l'hypothèse que la différence du nombre d'éléments identifiés lors de l'étapes 4 est strictement due au travail effectué lors cette étape. Cette interprétation est confortée par une analyse des corrélations qui montre que les étapes 3 et 4 ne sont pas significativement corrélées (corrélation de 0,407, Spearman, p-value = 7.10⁻⁰²). Ainsi, les biologistes ont été meilleurs lors de l'identification des organismes et des stratégies biologiques de résolution (axe métier).

Par ailleurs, si on analyse les écarts moyens du nombre d'éléments identifiés entre les étapes (Tableau 4.8), on observe que là où tous les écarts apparaissent significatifs pour les ingénieurs, les écarts du nombre d'éléments obtenus entre les étapes 3 et 4 et entre les étapes 4 et 5 ne sont pas évalués comme significatifs pour les biologistes.

Tableau 4.8 Évolution comparée des écarts moyen des éléments identifiés

Éléments identifiés	Ingénieurs (n = 21)		Biologistes (n = 21)	
	Écarts moyens	p-value (t-test, apparié)	Écarts moyens	p-value (t-test, apparié)
1. Fonctions	-	-	-	-
2. Problèmes techniques	+1,3	6.10 ^{-04***}	+2,3	4.10 ^{-06***}
3. Requêtes	+2,8	2.10 ^{-03**}	+2,7	5.10 ^{-03**}
4. Organismes	-2,5	8.10 ^{-03**}	-2,2	6.10 ⁻⁰²
5. Stratégies biologiques	-0,5	4.10 ^{-02*}	-0,3	8.10 ⁻⁰²
6. Solutions techniques	-1,4	4.10 ^{-03**}	-1,9	3.10 ^{-03**}

p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1**

En particulier, la différence entre le nombre de stratégies extraites et le nombre d'organismes identifiés n'est pas significative pour les biologistes (-0,3 versus -0,5 ; t-test ; p-value = 8.10^{-02} versus 4.10^{-02}). Lors de l'expérience, les biologistes ont ainsi plus souvent pu extraire une stratégie biologique à partir d'un organisme précédemment identifié, soulignant une meilleure efficacité des biologistes lors de l'analyse et la compréhension des données biologiques.

Cette première analyse quantitative sur les éléments identifiés au cours du processus, a permis de confirmer que les biologistes apparaissent mieux équipés pour faire face aux étapes 4 et 5 du processus biomimétique et apportent une prise en compte plus large du problème en étape 1. Ces résultats valident ainsi les apports potentiels des biologistes sur les besoins et attentes précédemment identifiés, apportant un nouvel argument de validation de l'hypothèse 1 (H.1.1) et confirmant les modalités méthodologiques d'intégration, cœur de l'hypothèse 2 (H.2.1). Afin de mieux comprendre ces contributions potentielles, la partie suivante présente une synthèse qualitative des résultats obtenus par les biologistes.

4.3.3.2 Caractérisation des spécificités des profils

Comme décrit précédemment, les deux populations ont identifié un nombre moyen d'éléments significativement différent, et ce dans la majorité des étapes (Tableau 4.7). Cette partie de l'analyse examine en détail les différences qualitatives, considérées ici comme les témoins des spécificités du savoir, du savoir-faire et du raisonnement des acteurs.

Une approche plus systémique du problème de conception

Tout d'abord, là où chaque biologiste a identifié en moyenne plus de fonctions (Annexe 3, p. 305), de Problématiques Techniques (Annexe 4, p. 306) et de requêtes (Annexe 5, p. 307) lors des trois premières phases du processus, la population globale de biologistes identifie à chaque fois un plus grand nombre total d'éléments. De plus, la population des biologistes identifie à chaque étape une proportion plus grande d'éléments non identifiés par l'autre population (Tableau 4.9).

Tableau 4.9 Proportion des éléments identifiés en commun ou de manière spécifique à chaque population

Éléments considérés	En commun	Juste les biologistes	Juste les ingénieurs	p-value (χ^2)
Fonctions	82,3 %	17,7 %	0 %	Non significatif
Problématiques techniques	61,5 %	30,7 %	7,8 %	3.10^{-2*}
Requêtes	60,0 %	33,3 %	6,6 %	2.10^{-2*}

On interprétera ces résultats comme un nouvel argument concernant une approche en moyenne plus systémique du problème par les biologistes.

Caractérisation des spécificités lors de la recherche et sélection d'organismes et de stratégies

Comme souligné dans le Tableau 4.7, les biologistes ont identifié un nombre moyen d'organismes significativement plus élevé (8,6 versus 6,0 ; t-test ; p-value = $4,10^{-03}$) lors de la phase de recherche.

Afin d'éviter l'effet de lissage causé par la redondance des organismes présentés en premier par AskNature et ayant donc souvent été identifiés par les deux populations, nous avons discriminé deux catégories d'organismes, ceux spécifiquement identifiés par une seule population et ceux identifiés par au moins un membre de chaque population (Tableau 4.10).

Dans certains cas, plusieurs requêtes conduisent au même organisme pour des stratégies différentes, chaque couple (organisme/stratégie) est alors considéré indépendamment.

Tableau 4.10 Comparaison du nombre d'éléments identifié pour chaque catégorie selon la population

Population	Moyenne (σ)	Moyenne Id. spécifique (σ)	Moyenne Id. commune (σ)
Biologistes	9,7 (3,4)	4,0 (2,8)	5,7 (2,0)
Ingénieurs	6,7 (2,7)	2,2 (1,9)	4,4 (2,1)
p-value (t-test)	3.10^{-03**}	3.10^{-02*}	5.10^{-02*}

Gras : Valeur maximale, p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1**

Afin de caractériser le *savoir horizontal*, précédemment identifié comme une attente, l'analyse se poursuit par la comparaison des organismes sélectionnés spécifiquement par chaque population. 6 critères sont établis pour décrire les organismes et les stratégies identifiées sur AskNature :

- La classification biologique des organismes (5 taxons génériques sont considérés : Bactéries, Champignons, Végétaux, Insectes, Autres animaux),
- Le type de stratégie associée selon la classification de Benyus (Benyus, 1997) (Matériel/Processus, Forme, Système),
- Le domaine scientifique affilié à la stratégie (Physique, Chimie, Biologie),
- L'échelle de la stratégie (Macro, Méso, Micro),
- Le type de cinétique suivi par la stratégie (Dynamique, Statique),
- La consommation d'énergie associée à la stratégie (Active, Passive).

Deux paramètres montrent des différences significatives en proportion : l'échelle de la stratégie et la consommation d'énergie. Ainsi la population des biologistes a sélectionné spécifiquement une proportion significativement plus grande de solutions issues du monde microscopique (71 % versus 56 % ; χ^2 ; p-value = 3.10^{-2}), et une proportion significativement plus grande de stratégies passives (90 % versus 75 % ; χ^2 ; p-value = 3.10^{-3}).

En termes de processus cognitif, l'accès au monde microscopique requiert un *savoir* dans la mesure où il n'est pas observable à l'œil nu. Par conséquent, il peut être omis ou volontairement laissé de côté par les participants sans connaissance en biologie. Cet accès au monde microscopique est donc permis par une connaissance plus large (*horizontale*) du

monde biologique, validant certaines attentes reportées dans les questionnaires (Partie 4.3.2, tableau 4.6, point 4) et soulignant le besoin en savoir biologique horizontal.

Par ailleurs, face à l'identification d'un pourcentage significativement plus important de stratégies passives, on peut émettre l'hypothèse que les biologistes prennent plus tôt et plus facilement en compte le caractère environnemental, jugeant les stratégies passives moins coûteuses en énergie. Cette interprétation valide le point 1 du tableau 4.6 (Partie 4.3.2, tableau 4.6), soulignant la réduction des impacts environnementaux comme un facteur de motivation pour les biologistes.

Sur cet aspect, la deuxième interprétation envisagée est que les biologistes ont davantage pris en compte le contexte relativement pauvre de la zone de mise en place, et ont sélectionné des stratégies les plus autonomes possibles. Cette interprétation irait dans le sens du caractère plus systémique de l'approche des biologistes.

Ces observations permettent de mieux comprendre en quoi les attentes mises en évidence dans les réponses aux questionnaires sont satisfaites par les biologistes et en quoi ces apports se sont révélés être des atouts conséquents lors de la mise en pratique.

Caractérisation des apports sur la compréhension des stratégies biologiques

L'analyse de la compréhension des stratégies biologiques mets en évidence que les ingénieurs ont commis plus d'erreurs que les biologistes lors de l'analyse, l'abstraction et le transfert des stratégies biologiques (0,6 % contre 12,3 % ; χ^2 ; p-value = 5.10^{-5}).

Plus précisément, les résultats montrent que 64,2 % des erreurs commises par les ingénieurs touchent des stratégies spécifiquement identifiées par cette population. Ces erreurs représentent 18,7 % du nombre total de stratégies spécifiquement identifiées par les ingénieurs. En revanche, aucun biologiste n'a commis d'erreurs sur des stratégies dites « *spécifiques* ». En conséquence, les stratégies biologiques ayant été sélectionnées par les biologistes semblent plus pertinentes et plus fiables, validant le point 2 du tableau 4.6 (Partie 4.3.2, tableau 4.6).

De manière générale, ces résultats mettent en évidence l'atout que représente une formation en biologie lors des phases d'analyse conduisant à une sélection plus pertinente. Ils soulignent également, qu'un manque d'expérience en biologie peut orienter le processus de résolution vers des stratégies inadaptées, entraînant la perte de ressources et potentiellement l'échec du projet, rappelant la nécessité de prise en compte des risques. Les attentes des répondants aux questionnaires sur les étapes centrées sur la biologie se sont avérées légitimées par les phases expérimentales.

4.3.3.3 Caractérisation des besoins méthodologiques des biologistes

D'après les retours d'expériences des participants et l'évaluation des outils utilisés lors des workshops, les biologistes signalent une faiblesse générale sur la richesse et la précision de l'information mise à disposition. Ainsi, ils se sont sentis restreints par la taxonomie, « *La*

taxonomie limite la réflexion », soulignant un manque de richesse et de précision de celle-ci, « Il est difficile de trouver les requêtes correspondant précisément aux problématiques techniques identifiées ». Ces ressentis conduisent à une évaluation de la taxonomie significativement moins bonne par les biologistes sur sa richesse d'informations (3 versus 4, test WMW, p-value = $2,10^{-3}$). Les biologistes ont par conséquent une vision plus large de la biologie que celle proposée dans la taxonomie.

De même pour AskNature, là où les ingénieurs ont donné des notes élevées sur tous les critères, les biologistes ont noté plus sévèrement la richesse et la précision de l'information (Figure 4.9), atteignant une différence significative sur cette dernière (test WMW, p-value = 2.10^{-3}).

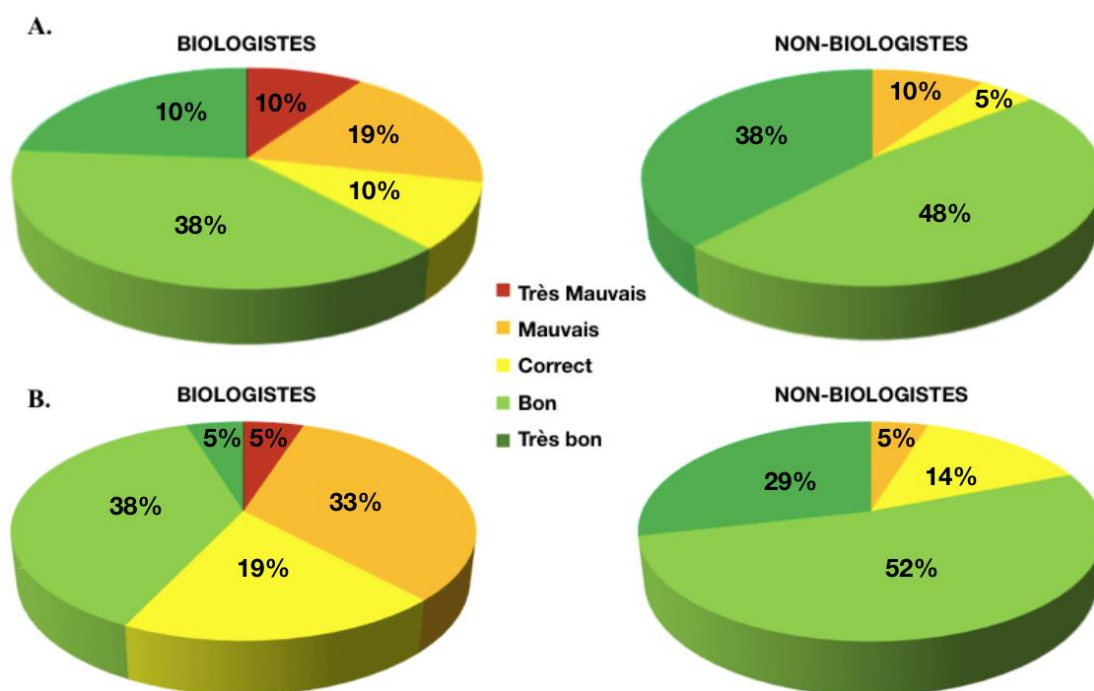


Figure 4.9 Comparaison des évaluations sur la richesse (A) et la précision (B) des informations proposées sur AskNature

Ainsi, les biologistes ont eu les capacités d'appréhender les limites de l'outil en termes de précision et de richesse soulignant par conséquent qu'ils considèrent un référentiel de *savoir horizontal* plus vaste que celui proposé. Ils ne connaissent pas tous les exemples de la base de données mais peuvent en citer qui ne sont pas présents sur celle-ci et la trouve ainsi limitée.

Par ailleurs, les biologistes sont formés à comprendre les stratégies dans le détail, chose qu'ils n'ont pas toujours pu faire. À l'inverse, les ingénieurs sont formés à générer des idées et ont pu considérer les exemples biologiques comme des supports de réflexion à utiliser lors d'étapes de créativité plutôt que comme des sources à partir desquelles extraire de réelles stratégies techniques. La variabilité des attentes, et par conséquent des référentiels cognitifs dans lesquels se sont placés les acteurs, peut donc également expliquer les résultats. Cet aspect accentue la nécessité de prendre en compte ces différences lors des réflexions à venir sur les pratiques et la communication au sein des équipes interdisciplinaires (Partie 4.3.2, tableau 4.6, point 3 et 6).

Les deux populations ont porté des regards variables sur les outils utilisés. La connaissance en biologie semble notamment avoir permis aux biologistes de caractériser avec précision la qualité des outils du point de vue du champ biologique visé et de la précision des données mises à disposition. Ces observations confortent le besoin d'outils potentiellement plus adaptés à la pratique de la biomimétique par des biologistes (Partie 4.3.2, tableau 4.6, point 4).

4.3.3.4 Synthèse sur les apports spécifiques d'une formation en biologie lors de la première phase expérimentale

À travers les résultats des workshops, l'impact d'une expertise en biologie a pu être décrit, caractérisé, et confronté aux attentes précédemment établies dans les questionnaires (Tableau 4.6). Un ensemble d'apports clés permis par cette expertise est ainsi validé par les observations expérimentales au cours de l'analyse :

- La meilleure efficacité lors des étapes centrées sur la biologie (étapes 3, 4, 5 et 6 du processus expérimental) et la vision plus systémique sur les étapes centrées sur la conception.
- La plus grande fiabilité et pertinence lors des étapes centrées sur la biologie (étapes 3, 4, 5 et 6 du processus expérimental) et la maîtrise d'un référentiel biologique plus vaste, permettant notamment l'accès au monde microscopique.
- La prise en compte potentiellement plus importante du caractère environnemental en pratique.
- La validation des besoins en apports de savoirs horizontaux et verticaux, jugés insuffisants dans les outils, soulignant le besoin en nouveaux outils, adaptés à la pratique de la biomimétique par des biologistes.
- La nécessité de prendre en compte la variabilité des approches descriptive et prescriptive dans la mise en place du cadre méthodologique pratique et pour la communication au sein des équipes interdisciplinaires.

Face à ces résultats, on gardera à l'esprit que le cadre expérimental utilisé est largement concentré sur les étapes abordant la biologie, limité dans le temps, avec un sujet d'étude facilement abordable par des biologistes, réduit à une approche purement conceptuelle et sans étude de faisabilité ni passage aux phases de conception dites détaillées.

C'est bien la combinaison des expertises au sein d'une équipe interdisciplinaire que nous soutenons, et non le remplacement des ingénieurs par des biologistes qui serait complètement contre-productif.

Ces résultats valident l'adéquation entre les freins de la littérature, les besoins et les attentes issus du questionnaire d'une part, et les apports observés d'une formation en biologie d'autre part. Cette partie 4.3.3 valide expérimentalement les sous-hypothèses 1.1 et 2.1.

4.3.4 Synthèse générale des résultats du chapitre 4

Les contributions du chapitre 4 permettent de valider tout d’abord qu’« *il est possible de démontrer l’apport d’une formation en biologie et donc de justifier le fondement de l’hypothèse 1* » (H.1.1).

En outre, à travers cette phase descriptive, le profil du biomiméticien est différencié de celui de l’expert externe (le chercheur), et un certain nombre de recommandations sont identifiées pour caractériser sa pratique (H.1.2) et définir plus en détail ce nouveau profil (H.1.3) (Tableau 4.11).

Tableau 4.11 Synthèses des recommandations issues du chapitre 4 sur l’axe métier

ID	Recommandations associées au profil du biomiméticien	Sources	Positionnement
1	Regard extérieur, large, systémique	Questionnaires et workshops	H.1.2 et H.1.3
2	Savoir biologique horizontal	Questionnaires et workshops	H.1.2 et H.1.3
3	Savoir biologique vertical (spécialisation sur certains sujets)	Questionnaires	H.1.2 et H.1.3
4	Identification d’activités spécifiques	Questionnaires	H.1.2
5	Savoir-faire biologique applicable en biomimétique	Questionnaires	H.1.2 et H.1.3
6	Savoir sur les concepts et process biomimétique	Questionnaires	H.1.3
7	Caractère interdisciplinaire de l’acteur, ouverture d’esprit	Questionnaires et workshops	H.1.3
8	Volonté de collaboration, de pédagogie, de vulgarisation	Questionnaires	H.1.2 et H.1.3
9	Établissement d’un poste au sein de l’équipe de conception	Questionnaires	H.1.3

Par ailleurs, à travers la récolte de ces données expérimentales nous avons pu « *identifier un ensemble de besoins et d’attentes des équipes de conception légitimant l’évolution du cadre méthodologique biomimétique pour intégrer un nouveau profil formé en biologie* » (H.2.1). Les résultats présentés au cours de ce chapitre nous permettent ainsi d’établir en synthèse un ensemble de directives traitant de l’adaptation du processus de conception biomimétique (H.2.2) et de l’encadrement méthodologique permettant l’intégration du nouvel acteur au sein des équipes de conception (H.2.3) (Tableau 4.12).

Tableau 4.12 Synthèses recommandations issues du chapitre 4 sur l’axe processus

ID	Recommandations associées au cadre méthodologique	Sources	Positionnement
1	Intégration en continu du biomiméticien	Questionnaires et workshops	H.2.2 et H.2.3
2	Implication forte sur les étapes centrées sur la biologie	Questionnaires et workshops	H.2.2
3	Intégration ponctuelle de chercheurs	Questionnaires	H.2.2
4	Identification de missions spécifiques au cours du processus	Questionnaires et workshops	H.2.2
5	Application d’outils issus de la biologie	Questionnaires	H.2.2 et H.2.3
6	Adaptation des outils et du processus	Questionnaires et workshops	H.2.2 et H.2.3
7	Coordination des activités pour soutenir l’activité synergique de l’équipe	Questionnaires	H.2.2 et H.2.3
8	Génération de supports de communication	Questionnaires	H.2.3
9	Prise en compte des difficultés sémantiques	Questionnaires et workshops	H.2.2 et H.2.3
10	Favoriser l’évaluation des risques	Questionnaires	H.2.2
11	Favoriser l’évaluation des impacts environnementaux	Questionnaires et workshops	H.2.2

La partie suivante conclut ce chapitre 4 en replaçant ces résultats dans la démarche scientifique globale poursuivi dans ces travaux de doctorat.

4.4 Conclusion du chapitre 4

Le chapitre 4 aborde la légitimité de nos hypothèses 1 et 2, visant respectivement « l'intégration au sein des équipes de conception biomimétique d'un nouvel acteur ayant des compétences en biologie » (H.1) et « la mise en place d'un cadre méthodologique permettant l'intégration opérationnelle du nouvel acteur au sein des équipes de conception biomimétiques ».

À travers l'introduction du chapitre 4, la place des biologistes en biomimétique est discutée et la nécessité de valider nos approches apparaît comme un prérequis nécessaire (Chapitre 4, partie 4.1).

Par la mise en place de deux questionnaires, destinés d'une part au grand public et d'autre part à des experts de la biomimétique, et d'une série de workshops étudiants, un ensemble de matériels et méthodes permettant la récolte et l'analyse de données d'intérêt est établi.

Les résultats de cette première phase expérimentale permettent de valider la légitimité des hypothèses H.1 et H.2 (Figure 4.10). Ces observations expérimentales rendent également possible l'identification d'un ensemble de recommandations abordant aussi bien l'axe métier que l'axe processus, inhérents à nos travaux. Celles-ci formalisent alors une première partie des résultats des études descriptives à sur lesquels se basent les apports prescriptifs de ce doctorat.

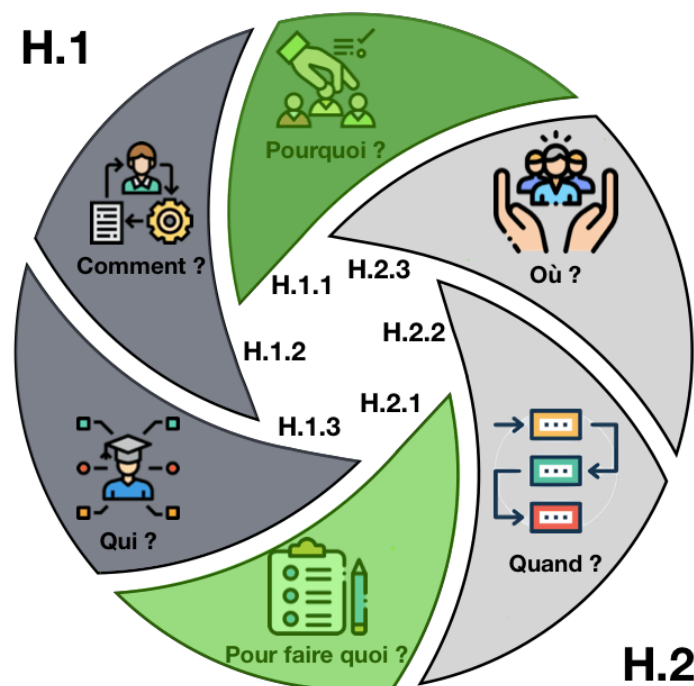
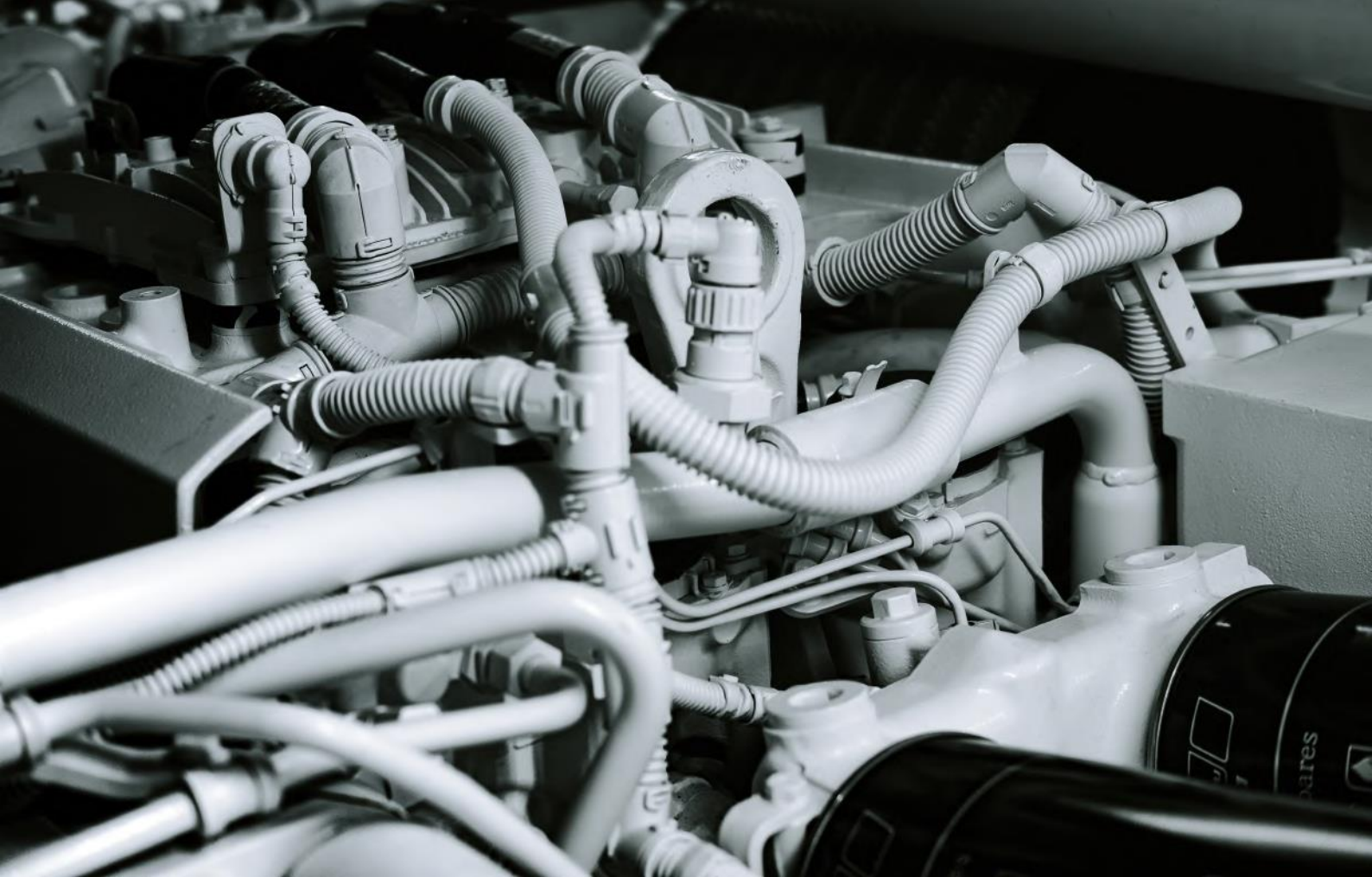


Figure 4.10 Validation des sous-hypothèses H.1.1 et H.2.1

En se basant notamment sur les résultats présentés ci-dessus, le prochain chapitre (Chapitre 5) se concentre sur les pratiques des biomiméticiens et l'adaptation du processus de conception biomimétique permettant de soutenir leur intégration opérationnelle.



CHAPITRE 5

ADAPTATION DU PROCESSUS ET DES PRATIQUES



5.1 Fondement et structuration du chapitre 5

5.1.1 Positionnement du chapitre 5 dans la démarche globale

Le chapitre 5 parcourt les différentes étapes de la DRM (Chapitre 3, partie 3.3), sur deux questionnements clés de nos travaux, l'identification d'un « *ensemble de méthodes et d'outils propres aux savoirs et savoir-faire issus de la biologie et pouvant être utilisés par le nouvel acteur lors du processus biomimétique* » (H.1.2) et l'adaptation du « *cadre méthodologique de la biomimétique pour favoriser l'intégration d'un nouvel acteur formé en biologie lors des différentes étapes du processus de conception biomimétique* » (H.2.2) (Figure 5.1).

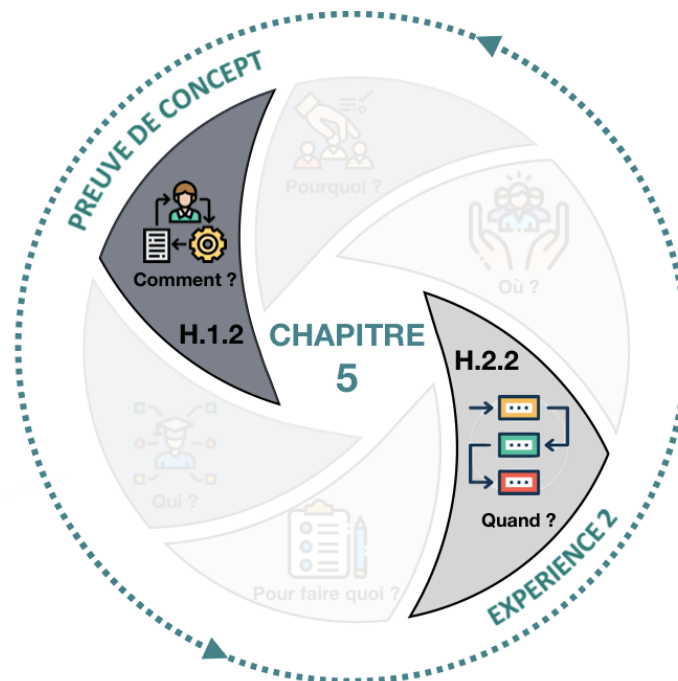


Figure 5.1 Sous-hypothèses traitées dans le chapitre 5

L'application de ces différentes contributions lors d'un exemple basé sur un projet biomimétique étudiant conduira à la mise en évidence d'apports précis rendus possibles par l'intégration des biomiméticiens.

Les différentes contributions du chapitre 5 constituent également de nouveaux éléments clés à considérer dans la formalisation du profil du biomiméticien et de son intégration au sein des équipes de conception (chapitre 6).

5.1.2 Prérequis expérimental du chapitre 5

Comme décrit en détail dans l'état de l'art, un certain nombre de processus existe dans la littérature pour formaliser une approche technologie pull de la conception biomimétique (Chapitre 2, partie 2.4.2.2).

De la même manière que pour les premières phase expérimentales présentées dans le chapitre 4, tous nos travaux prennent comme référence le processus de conception

biomimétique technologie pull unifié développé au LCPI et publié dans la littérature par Fayemi afin d'harmoniser les processus existants (Fayemi et al., 2017).

Sur la place des biologistes, Fayemi indique lors de la présentation de ce processus que « *les biologistes sont nécessaires à plusieurs étapes (étapes 3, 4, 5, 6, étapes dites centrées sur la biologie), surtout si les outils mis à disposition ne fournissent pas une compréhension approfondie de la biologie.* » et précise que « *même à des étapes antérieures, leur contribution peut être nécessaire et est soulignée* » (Fayemi et al., 2017).

Cette tendance à mettre en évidence l'intérêt de biologistes est largement soutenue à travers la littérature (Helfman Cohen et al., 2016; Chirazi et al., 2019) (Chapitre 2, partie 2.4.2.2) et les résultats du chapitre 4 confirment la légitimité d'une telle démarche. Cependant, si elle est soulignée comme pertinente, cette intégration n'a été que très peu étudiée du point de vue de son impact potentiel sur le processus et la pratique de conception biomimétique de ces biologistes intégrés.

Plus précisément, sur les études visant des équipes interdisciplinaires, qu'il s'agisse d'apports descriptifs (Helms et al., 2009) ou prescriptif (Baumeister et al., 2013; Hashemi Farzaneh, 2020; Helten et al., 2011), les biologistes restent des boîtes noires peu caractérisées que l'on ajoute en parallèle du cadre méthodologique. Une raison soulignée dans la littérature est le manque de connaissance quant au champ de la biologie de façon générale et la tendance à effectuer des raccourcis quant aux mécanismes biologiques et à leur spécificité (Fish et al., 2014; Full, 2001; Yen et al., 2011). En résulte un « *angle mort* » méthodologique conduisant à une absence d'intégration malgré son intérêt souligné ci-dessus et à travers le chapitre précédent.

Ce chapitre a pour objectif de répondre à ces besoins méthodologiques, supportant ainsi l'intégration des biomiméticiens.

5.1.3 Objectifs et structuration du chapitre 5

Ce 5^{ème} chapitre interroge les adaptations nécessaires au processus de conception biomimétique afin qu'il prenne en compte l'intégration du biomiméticien au sein des équipes de conception (Chapitre 4, partie 4.3.2).

Par ailleurs, ces adaptations sont également l'occasion de prendre en compte un ensemble de leviers d'amélioration plus généraux, identifiés dans la phase descriptive de nos travaux et dans la littérature. Ce chapitre s'articule autour de trois phases méthodologiques :

- Une phase descriptive initiale, ajoutant aux apports du chapitre 4 un ensemble de nouvelles recommandations. Celles-ci sont basées sur des retours d'expériences issus de projets étudiants et de projets industriels, des interviews avec des chercheurs en biologie et d'une Analyse des Modes de Défaillances, de leur Effets et de leur Criticité (AMDEC) appliquée au processus de conception biomimétique unifié.

- Une phase prescriptive, composée d’adaptations du processus biomimétique ainsi que de l’identification de champs biologiques d’intérêt dont l’application au cours du processus est formalisée.
- Une phase descriptive d’évaluation, composée d’une expérimentation effectuée par 32 professionnels à travers une analyse comparative du processus proposé, et d’une preuve de concept décrivant les résultats de l’utilisation d’outils et de raisonnements biologiques au cours du processus.

Ce chapitre s’articule en 6 parties, l’introduction présentant le contexte issu de la littérature et le positionnement du chapitre (Chapitre 5, partie 5.1), la description des « matériels et méthodes » utilisés dans ce chapitre 5 (Chapitre 5, partie 5.2), l’identification de leviers méthodologiques clés (Chapitre 5, partie 5.3), la proposition d’un ensemble d’adaptations du cadre méthodologie et de pratiques spécifiques aux biomiméticiens (Chapitre 5, partie 5.4), l’évaluation de ces apports (Chapitre 5, partie 5.5) et enfin une synthèse concluant ce chapitre (Chapitre 5, partie 5.6).

5.2 Matériels et méthodes utilisés dans le chapitre 5

5.2.1 Retours d’expérience

Deux types de projets composent le socle des retours d’expériences utilisés dans nos travaux. D’une part, 3 projets étudiants, dont deux avec des phases interdisciplinaires, d’une durée de 1 an chacun. Ces projets sont co-supervisés dans le cadre des enseignements de deuxième et troisième année des cursus ingénieurs de l’École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers (ENSAM) et d’AgroParisTech (APT) (Tableau 5.1)

Tableau 5.1 Projets étudiants faisant partie du retour d’expérience

Retour d’expérience	Année universitaire	Semestre	Partenaire industriel	Étudiants ENSAM	Étudiants APT
Projet 1 : Isolation de conteneurs	2017-2018	1 ^{er}	Oui	2	-
		2 ^{ème}	Oui	6	-
Projet 2 : Stabilisation d’un parapluie	2017-2018	1 ^{er}	Non	8	5
		2 ^{ème}	Non		-
Projet 3 : Réduction de la consommation d’eau dans les toilettes	2018-2019	1 ^{er}	Non	6	6
		2 ^{ème}	Non		-

Au cours des différents projets, quatre questionnaires ont permis de récolter les retours d’expériences des étudiants. Au vu des échantillons considérés, ces résultats ne sont pas quantitativement significatifs mais apportent un ensemble de tendances d’intérêt. Ces résultats seront utilisés à des fins descriptives, pour l’identification de freins méthodologiques, de difficultés pratiques, pour la mise en évidence d’adaptation pertinente, du ressenti des étudiants sur l’interdisciplinarité, etc.

D'autre part, à travers une collaboration avec Anneline Letard et le Ceebios, un ensemble de données clés anonymisées issues de 15 projets industriels est également utilisé. Pour des raisons de confidentialité, uniquement les données ayant donné lieu à des publications seront présentées dans ce manuscrit. Principalement, elles seront utilisées afin d'estimer le temps moyen assigné à chaque étape du processus dans un cadre industriel.

5.2.2 Interviews avec des experts

Des interviews ont été effectuées avec 4 chercheurs en biologie (Tableau 5.2) dans le but de récolter leur perception générale du processus de conception biomimétique, de ces points forts, ces points faibles, des difficultés linguistiques (identifiées dans la littérature et dans le chapitre 4 comme un problème potentiel) et des freins pressentis à son application.

Tableau 5.2 Échantillon des biologistes interviewés

Répondants	Expérience	Domaine biologique d'expertise	Structure de recherche
Répondant 1	4 ans	Neuropathologie, Biologie cellulaire	ENS-CNRS-Inserm
Répondant 2	3 ans	Biologie moléculaire, Nanomédecine	Université Paris Sud-CNRS
Répondant 3	4 ans	Microbiologie	INRA
Répondant 4	> 10 ans	Biochimie	EBI

Dans la mesure où les biomiméticiens n'existent pas encore, la prise en compte de l'avis d'experts en biologie a pour objectif de proposer un processus basé sur les fondements théoriques existants mais adapté à une pratique interdisciplinaire faisant intervenir la biologie.

Les observations récoltées au cours des interviews avec les biologistes seront utilisées de manière transversale dans le texte, sous la forme de *verbatim* illustrant les différents freins considérés et soulignant un certain nombre de leviers d'amélioration.

5.2.3 AMDEC sur le processus biomimétique unifié

Pour compléter la phase descriptive, une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) du processus de conception biomimétique unifié a été effectuée afin d'identifier un ensemble de risques clés. En nous basant sur les travaux de Lipol (Lipol et al., 2011), deux étapes ont été suivies :

- L'identification de scénarios défaillants (modes de défaillances + causes + effets) sur les différentes étapes du processus unifié grâce aux retours d'expériences ainsi qu'à la littérature.
- L'évaluation par 10 étudiants ayant participé aux projets interdisciplinaires (Chapitre 5, partie 5.2.1) et 6 experts (industriels et chercheurs), de ces différents scénarios défaillants sur trois critères, la sévérité (S), la détectabilité (D) et l'occurrence (O), dont le produit définit la criticité ($C=S*D*O$).

Sans prétendre à l'exhaustivité, l'AMDEC (Annexe 6, p. 308) rassemble 21 modes de défaillances identifiés pour un total de 75 scénarios, dont un extrait est présenté dans le tableau 5.3. L'analyse est alors considérée comme représentative des différents risques, parfois même peu fréquents, auxquels peuvent faire face les praticiens.

Tableau 5.3 Extrait de l'AMDEC appliquée au processus de conception biomimétique

Étapes	Modes de défaillance	Causes potentielles	Effets
Étape 1. Analyse du problème	Mauvaise analyse du problème	Pas de communication efficace entre acteurs (dirigeant, client, concepteurs, etc.)	Le problème à traiter n'est pas correctement compris, chute de la pertinence des solutions proposées
		Manque de clarté du décideur donc manque d'informations précises et pertinentes	Difficulté à effectuer l'analyse du problème, ni le décideur ni l'équipe ne sont satisfaits de la résolution.
		Erreur dans d'identification et l'analyse du problème par l'équipe	Si non détectée, résolution hors sujet
Étape 2. Abstraction des problèmes techniques	Incapacité à abstraire les problèmes techniques, l'étape est consciemment sautée.	Le concept d' <i>abstraction</i> est inconnu à l'équipe	Frustration de l'équipe face à la nécessité de sauter l'étape qui apparaît « mal expliquée », voir « inutile » dans la mesure où les effets n'apparaissent que lors des étapes 3 et 4 qui perdent en cohérence et en précision. L'équipe ne sait plus très bien ce qu'elle essaie précisément de résoudre, chute globale de l'efficacité
		Le concept d' <i>abstraction</i> est connu mais son application en biomimétique est inconnue à l'équipe	
		Le concept d' <i>abstraction</i> et son application théorique en biomimétique sont connus mais l'équipe reste incapable de l'effectuer en pratique	
	Abstraction erronée, sans rapport avec le sujet traité	L'équipe de conception fait des erreurs durant l'abstraction de données pertinentes	Pas d'effets immédiats et donc pas de frustrations en étape 2. Répercussion sur les étapes 3 et 4 qui conduisent à des stratégies peu pertinentes pour le problème étudié et à une chute globale de l'efficacité.
Mauvaise compréhension des données techniques, de mauvais éléments sont abstraits			

Basé sur les valeurs de criticité résultant de l'évaluation, un scénario est pris en compte lors de l'adaptation du processus de conception biomimétique si :

- Il est noté comme parmi les plus critiques de manière individuelle par les experts,
- Il est noté comme parmi les plus critiques en moyenne par les experts,
- Il est noté comme parmi les plus critiques en moyenne par les étudiants.

Il s'agissait là de rendre compte de la diversité des expériences des experts tout en identifiant les risques reconnus par tous.

Ceux-ci ont conduit à caractériser en partie l'activité des biomiméticiens, mais également à adapter le processus de manière plus générale afin d'aligner le cadre théorique avec les besoins émergeant de la phase descriptive.

5.2.4 Expérimentation 2 : évaluation des contributions

Dans une deuxième phase descriptive menée en collaboration avec Anneline Letard, les apports prescriptifs sur le processus de conception sont évalués par 32 industriels, majoritairement français, participant au Groupement d'Intérêt Scientifique du Ceebios (Tableau 5.4).

Tableau 5.4. Composition de l'échantillon d'industriel participant à l'expérience 2

Participants (N=32)	Ayant déjà effectué un projet biomimétique			Jamais effectué de projet biomimétique
	Processus Unifié	Processus ISO	Autre	
Consultants (n=3)	0	2	0	1
Designers (n=3)	1	0	1	1
Chefs de projet (n=2)	0	0	0	2
Ingénieurs (n=15)	4	1	1	10
Autre (n=9)	4	1	1	3
Total expérience (N'=33)	9 (27,3 %)	4 (12,1 %)	3 (9,1 %)	17 (51,5 %)

N' = 33 car un des participants avait déjà utilisé deux processus différents lors de projets antérieurs

Cette expérimentation confronte ainsi en aveugle (pas de mention des auteurs des processus) et en individuel trois processus de conception biomimétique, le processus issu de la norme ISO (ISO/TC266, 2015), le processus unifié (Fayemi et al., 2017) et le processus qui sera conçu dans cette partie (Chapitre 5, partie 5.4.4).

Le protocole suivi par les participants est composé de deux étapes, une phase d'appropriation de 10 min, puis une phase d'analyses de 30 min via un questionnaire de 13 questions (Annexe 7, p. 311) :

- Questions 1 et 2 : perception générale (ex. *Je trouve le processus attractif ?*).
- Questions 3 à 5 : La logique de construction (ex. *Je comprends la logique des axes structurant le référentiel dans lequel est représenté le processus ?*).
- Questions 6 à 8 : La sémantique (ex. *Cocher le nom des étapes comprises*).
- Questions 9 à 11 : La gestion du risque (ex. *Classer les processus du plus au moins risqué*).
- Questions 12 et 13 : L'acceptabilité (ex. *Si vous deviez débiter un projet demain, quel processus choisiriez-vous ?*).

Les résultats sont présentés en pourcentage et comparés à l'aide d'un test de Fisher au vu de la taille relativement faible de l'échantillon.

Cette partie 5.2 a donc permis la présentation des principaux matériels et méthodes utilisés dans le chapitre 5. Pour faciliter la lecture, certains éléments plus précis seront ajoutés directement au fil du texte. La partie suivante décrit les résultats de la partie descriptive du chapitre.

5.3 Identification des points clés d'amélioration

L'identification et la prise en compte des risques et des limites du processus biomimétique unifié apparaissent fondamentales pour que l'intégration des biomiméticiens soit vue comme un levier de résolution et non comme un facteur de risque, méthodologique ou financier, et donc une contrainte supplémentaire. Cette partie vise à identifier les différents points clés d'amélioration du processus et les éléments méthodologiques pouvant permettre leurs adaptations.

Trois modalités principales sont considérées, les axes du référentiel dans lequel est représenté le processus, la sémantique et la structuration des étapes ainsi que la présentation des résultats de l'AMDEC. Les deux premiers points se concentrent sur l'appropriation du processus et la capacité de différents acteurs à extraire des informations des éléments graphiques alors que le dernier point se concentre sur les pratiques et le retour d'expérience d'experts. Comme précédemment précisé, nous considérerons sur ces différents points le prisme de l'intégration des biomiméticiens et celui de l'alignement des besoins pratiques avec les contributions méthodologiques théoriques.

5.3.1 Sur les axes et la structuration du processus

Tout d'abord, en l'absence d'un axe horizontal et face à une représentation visuelle formant un signe infini « ∞ » (Figure 5.2, A), le manque d'informations sur le temps et les ressources à considérer émerge rapidement.

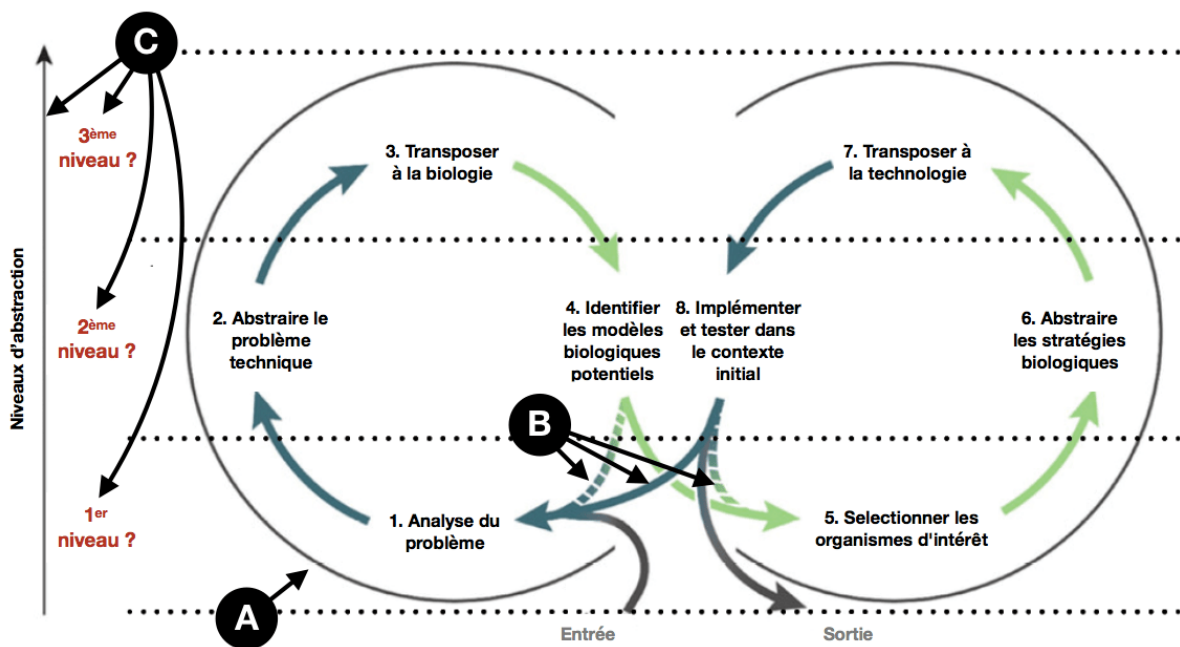


Figure 5.2 Questions sur les axes du processus biomimétique unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017)

Là où la présence de boucles d'itération est perçue par les biologistes comme "profondément logique, elle s'adapte constamment", "logique que les deux cercles soient connectés et qu'il y ait des boucles", "J'aime le raisonnement itératif", la formalisation spécifique du processus est

souvent remise en question "pourquoi les itérations ne semblent possibles qu'entre ces étapes ?", "Pourquoi la ligne entre 8 et 1 n'est-elle pas une ligne pointillée comme les autres boucles ? Avec une ligne complète, on a l'impression que ça ne se termine jamais", "On a l'impression qu'il faut tout recommencer" (Figure 5.2, B).

Deuxièmement, l'axe vertical qui présente les niveaux d'abstraction (Figure 5.2, C) a été identifié comme une difficulté par tous les biologistes interrogés, "*Je ne comprends pas*", "*Je suppose que plus le niveau est élevé et plus le problème est résolu ?*", "*Je ne sais pas ce que cela signifie*". Là où les retours d'expérience des concepteurs montrent une meilleure compréhension du concept d'abstraction "*avoir un axe sur le niveau de l'abstraction est très intéressant*", ils ont toutefois remis en question sa structure "*Je pense que l'échelle n'est pas correctement matérialisée*". Quelques questions émergent rapidement et constituent des leviers d'adaptation du processus :

- Pourquoi considérer trois niveaux d'abstraction ?
- Que représentent réellement ces trois niveaux ?
- Les praticiens savent-ils comment passer d'un niveau à l'autre ?
- Peuvent-ils utiliser cet axe vertical pour extraire réellement des informations ?
- Faut-il abstraire tous les problèmes au même niveau ?

Enfin, sur un élément complémentaire, les couleurs ont été instinctivement comprises par toutes les personnes interrogées comme faisant référence au domaine biologique ou technologique. Pour autant, si elles sont associées au domaine scientifique (centrées sur biologie Vs centrées sur la technologie) elles n'évoquent pas instinctivement l'intégration d'acteurs alors qu'elles sont également censées représenter « *les contributions requises des biologistes ou des technologues* » (Fayemi et al., 2017).

La structure du processus biomimétique unifié conduit donc à un certain nombre d'ambiguïtés qui peuvent mener à une mauvaise compréhension. Notamment, puisque l'objectif final poursuivi est la diffusion de la biomimétique, le premier regard et les premières interprétations de nouveaux acteurs potentiels sont clés pour l'acceptabilité de l'approche proposée. L'explicitation des axes, la restructuration du cheminement et la mise en exergue de l'intervention d'un nouvel acteur apparaissent comme des leviers méthodologiques d'amélioration. Suivant la même logique, la partie suivante étudie la sémantique associée au processus et se concentre sur certaines étapes critiques.

5.3.2 Sur les étapes, leurs sémantiques et leurs mises en pratique

Grace aux retours d'expériences et aux interviews, les sémantiques des différentes étapes sont étudiées (Figure 5.3).

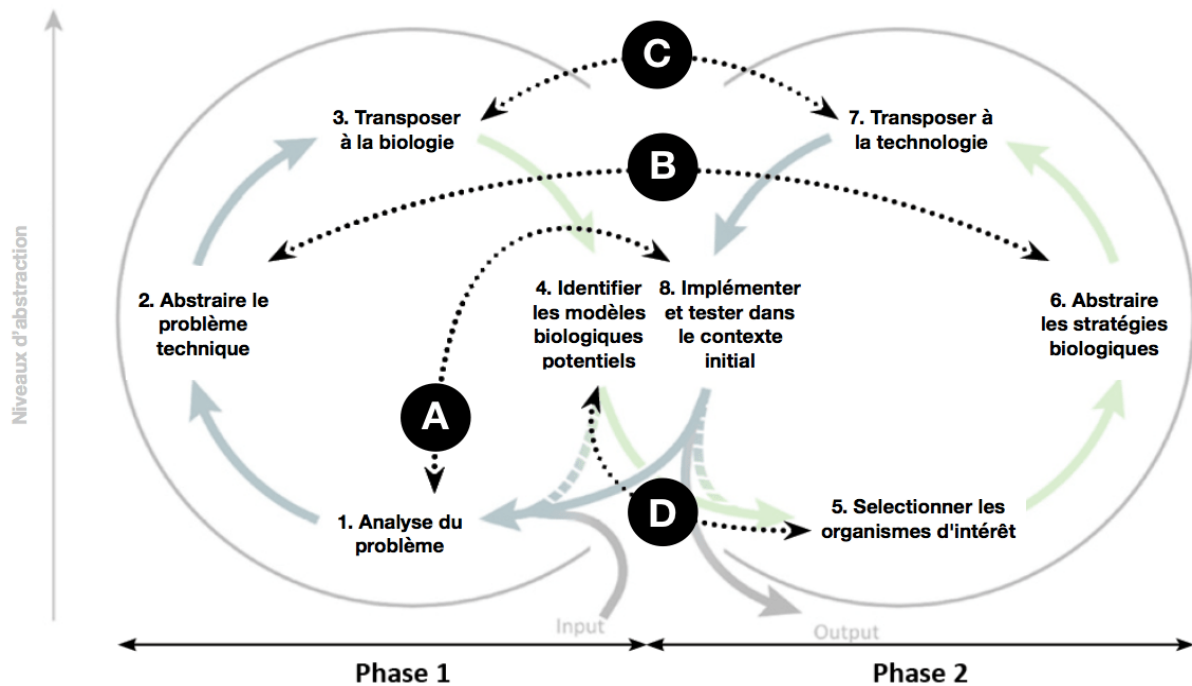


Figure 5.3 Questions sur les sémantiques associées au processus unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017)

Étapes communes aux processus de conception classique et biomimétique (étapes 1 et 8)

La première étape (*analyse des problèmes*) et la dernière étape (*mise en place et test des solutions biomimétiques dans leur contexte initial*), apparaissent facilement reformulées par les interviewés, témoignant de leur compréhension "quelles sont les ressources disponibles, les limites du projet ?", "quelles sont les attentes, les parties prenantes, les ressources ?".

Sur l'aspect sémantique, ces étapes ne semblent donc pas poser de problèmes prépondérants dans les retours d'expérience non plus. Un tel résultat semble logique puisque ces étapes et concepts sont similaires aux processus d'innovation classiques (Kruiper et al., 2018) (Figure 5.3, A).

Étapes d'abstraction (étape 2 et 6)

Les étapes d'abstraction (Figure 5.3, B) sont en revanche identifiées comme des étapes particulièrement difficiles :

- Dans tous les projets étudiants, elles ont été le sujet de nombreuses incompréhensions, difficultés de mise en pratique voir de frustrations.
- Lors des interviews des biologistes, le concept d'abstraction a été considéré comme peu clair, voir inconnu « Cette étape est dure, ce n'est pas clair », « C'est un mot mystérieux pour moi », « Je ne sais pas ce que signifie abstraction ici ». Le

terme *abstraire* est alors souvent remplacé par *identifier*, ce qui apparaît comme une façon réductrice d'effectuer ces étapes.

- L'objectif réel de l'étape n'est pas compris, de même que sa mise en pratique « *je ne saurais pas comment effectuer les étapes d'abstraction* », « *Ce n'est certainement pas simple quand on essaie de le comprendre en détail* », « *En fait, je voudrais sauter cette étape, je trouve logique d'effectuer directement la transposition* ».

Le concept même d'abstraction, tout comme la sémantique qui lui est associée, pose un problème de compréhension, et donc potentiellement d'acceptabilité et de mise en place.

Étape de transposition (étapes 3 et 7)

Une tendance équivalente peut être observée avec le concept de « *transposition* ». Même si celui-ci est perçu comme plus familier et est mieux défini d'un point de vue théorique, « *Passer d'un monde à l'autre* », « *Créer un lien et adapter les éléments* », les personnes interrogées ne savent pas comment effectuer l'étape, « *Je ne sais pas ce qui est concrètement attendu ici* » et extraient peu d'informations du processus.

Par ailleurs, on observe dans les projets et les interviews une confusion fréquente entre la 3^{ème} (transposition à la biologie) et la 4^{ème} étape (identification des modèles) lors de l'anticipation d'une application, « *Je chercherais des organismes, leurs propriétés d'intérêt et des articles publiés* » (décrivant l'étape 3). Cette méprise mène les praticiens à vouloir sauter la troisième étape en pratique.

Enfin, à travers la littérature et les retours d'expériences, une dérive fondamentale peut être remarquée. En pratique, l'étape 3 est toujours guidée par l'outil qui sera utilisé lors de la 4^{ème} étape. L'objectif de la 3^{ème} étape ne correspond alors plus à une transposition, et donc une entrée, dans le monde biologique, mais à la formalisation des problèmes techniques dans un format correspondant aux exigences des outils de la 4^{ème} étape (ex. La taxonomie du biomimétisme et les requêtes sur AskNature). La limite entre l'étape 2 et 3 devient floue dans la mesure où les praticiens vont avoir tendance à directement abstraire les problèmes techniques dans le format requis par l'étape 4, l'étape 3 en vient à disparaître dans un certain nombre de cas où elle est effectuée automatiquement par des outils (ex. SAPPHIRE et INDEA-INSPIRE (Siddharth et al., 2018a)).

Le passage cognitif à la biologie ne semble donc que secondaire, la « *transposition* » n'apparaît ici que comme un changement de formalisation. Les praticiens gardent ainsi un point de vue technologique, même s'ils utilisent des sémantiques biologiques, les rendant particulièrement dépendants aux bases de données. Le décalage entre l'objectif initial et la mise en œuvre pratique représente une dérive complète du processus préconisé.

Pour la 7^{ème} étape « *transposer à la technologie* », le concept est interprété comme « *l'application* » des solutions biologiques à des concepts technologiques « *adapter et modifier comme des mutations en biologie* ». Ce sens de transposition, apparaît beaucoup

mieux compris, notamment car l’objectif et le type de résultat attendu en sortie d’étape, sont facilement identifiés.

Les étapes 3 et 7 apparaissent donc cruciales à re-formaliser, aussi bien d’un point de vue sémantique que du point de vue des pratiques et des objectifs qui leur sont associées, notamment lors de l’étape 3.

Étapes de manipulation de données biologiques (Étapes 4 et 5)

L’identification des modèles biologiques potentiels (étape 4) et leur sélection (étape 5) sont des étapes dont la sémantique est globalement comprise (Figure 5.3, D). En revanche, elles soulèvent beaucoup de questions classiquement étudiées dans la littérature : Où trouver des données biologiques ? Quels scientifiques doivent être interrogés ou intégrés ? Comment choisir les modèles biologiques les plus pertinents ? etc.

Là où un ensemble de mesures ont été identifiées en recherche pour répondre à ces questions (Chapitre 2, partie 2.4.4), leur mise en œuvre dans la pratique reste un défi majeur et un ensemble de limites identifiées dans la littérature demeure à résoudre (Chapitre 2, partie 2.4.4, tableau 2.6)

Synthèse sur l’analyse des étapes

L’analyse des différentes étapes à travers le prisme des retours d’expériences et des interviews de biologistes nous a permis d’identifier un certain nombre de points clés d’amélioration. Le tableau 5.5 met en regard ces premiers éléments avec le degré d’implication du biomiméticien recommandé dans les résultats de la phase descriptive (Chapitre 4, partie 4.3.4).

Tableau 5.5 Tableau de synthèse sur l’analyse des étapes du processus

Étape	Sémantique	Objectif	Pratique	Résultat attendu	Champ	Implication des biomiméticiens
Étape 1	V	V	V	V	Technologie	+
Étape 2	X	X	X	X	Technologie	+
Étape 3	X	X	X	X	Technologie/Biologie	++
Étape 4	V	V	V/X	V	Biologie	+++
Étape 5	V	V	V/X	V	Biologie	+++
Étape 6	X	X	X	X	Biologie	+++
Étape 7	V	V	V	V	Biologie / Technologie	++
Étape 8	V	V	V	V	Technologie	+

X = problème identifié, V = pas de problème identifié dans cette première partie, + = degré d’implication

À part l’étape 2, toutes les étapes faisant face à des problèmes peuvent être associées à celles lors desquelles on identifie un fort potentiel à l’intervention du biomiméticien.

Le processus et la structuration de la pratique biomimétique doivent ainsi pouvoir guider les activités des équipes interdisciplinaires intégrant un biomiméticien, afin d’accroître l’acceptabilité de cette nouvelle approche et la performance des équipes.

Tous ces éléments de difficulté, s’ils ne sont pas traités, constituent des freins supplémentaires à l’intégration des biomiméticiens. Ils conduisent à une augmentation du

risque, aussi bien perçu que réel, associé à la mise en place d'une approche biomimétique. La partie suivante se concentre sur ces risques à travers la présentation des résultats de l'AMDEC appliquée au processus de conception biomimétique unifié.

5.3.3 Un processus risqué

Tel qu'il a été présenté précédemment, le processus biomimétique est perçu, à juste titre, comme un processus risqué. Il s'agit d'une approche coûteuse, aussi bien en termes de temps qu'en termes de main d'œuvre hautement qualifiée dont les biomiméticiens font partie. Ces coûts sont perçus comme financiers du point de vue des décideurs stratégiques ou des investisseurs et sont perçus comme une charge de travail et un engagement du point de vue des équipes de conception.

Sur la base de cette observation initiale, et dans le but d'intégrer les biomiméticiens de manière pertinente, les risques ont été évalués grâce à l'AMDEC du processus de conception biomimétique (Chapitre 5, partie 5.2.3). Les résultats ayant été notés les plus critiques sont présentés dans le tableau 5.6 et sont accompagnés des sources (littérature, retour d'expérience, etc.) ayant conduit à l'identification de ces différents scénarios (Tableau 5.6).

À travers les résultats observés dans le tableau 5.6, trois grandes catégories de causes menant aux scénarios jugés les plus critiques peuvent être identifiées :

- Cause n°1 : Le manque d'accompagnement et de formation sur certaines étapes (Tableau 5.6, R3, R4, R5, R11, R13, R15, R16, R17, R18, R19, R21). Étant donné que le biomimétique est une approche nouvelle dans la pratique, la plupart des praticiens n'ont aucune idée de ce qui est réellement attendu au cours des différentes étapes. Comme mentionné précédemment, les concepts sémantiques de *transposition* et *abstraction*, bien connus des chercheurs, peuvent être tout à fait obscurs pour certains praticiens, expérimentés ou non.
- Cause n°2 : Le manque d'expérience sur le terrain, et donc le manque de recul (Tableau 5.6, R1, R2, R11, R12, R20, R21). Plus précisément, c'est l'incapacité des équipes à détecter leurs erreurs ou leurs mauvais choix qui mettent l'ensemble du projet en danger. Il est également crucial que les chefs d'équipe aient la capacité de prendre du recul sur l'avancement du projet, les besoins de l'équipe en termes de ressources et d'évaluer la pertinence des résultats obtenus.
- Cause n°3 : Le manque de connaissances biologiques (Tableau 5.6, R6, R7, R9, R10, R12, R14, R19, R20). Cette observation confirme une nouvelle fois que le manque d'expertise biologique conduit à de profonds obstacles en termes de recherche, d'évaluation et de compréhension des modèles biologiques d'intérêt.

Dans sa forme actuelle, le processus biomimétique apparaît donc encore comme particulièrement risqué pour les parties prenantes n'ayant pas suivi de formations approfondies.

Tableau 5.6 Scénarios défailants notés les plus critiques

Id	Etape	Mode de dysfonctionnement	Mode de conception	Expert	Littérature
R1	1. Analyse du problème	Problème mal défini	L'équipe de conception ne trouve pas nécessaire de re-questionner et analyser le problème.	X	(Helms et al., 2009) (Chirazi, 2019)
R2			L'équipe de conception manque d'un point de vue systémique et ne tient pas compte de l'ensemble du contexte.	X	
R3	2. Abstraction du problème technique (PT)	Incapacité d'extraire le PT l'étape est sciemment ignorée par l'équipe	Le concept d'« abstraction » est inconnu de l'équipe de conception.	X	"C'est le mot que j'ai trouvé mystérieux"
R4		Abstraction non pertinente	L'équipe de conception fait des erreurs durant l'abstraction	X	(Rowalo et al., 2019)
R5		Incapacité à transposer à la biologie, l'étape est sciemment ignorée	Le concept de « transposition » est inconnu de l'équipe de conception.	X	"Pas clair"
R6	3. Transposition à la biologie	Transposition non pertinente	L'équipe de conception n'a pas de connaissances biologiques préalables et les mots clés choisis ne sont pas pertinents pour les modèles biologiques.	X	(Rowalo et al., 2019) (Yen, et al., 2013)
R7			L'équipe de conception choisit une seule forme sémantique pour chaque mot clé et/ou choisit une forme peu pertinente.	X	(Shu et al., 2010)
R8		Incapacité à trouver un modèle biologique jugé pertinent	L'équipe de conception ne recherche que des analogies directes, les autres types de modèles sont perçus comme non pertinents.	X	(Mak et Shu, 2004)
R9	4. Identification des modèles biologiques	Identification de modèles biologiques inappropriés	L'équipe de conception identifie un modèle biologique sans disposer de suffisamment d'informations (manque de temps pour étudier, données, expertise).	X	(Rowalo et al., 2019) (Yen et al., 2013)
R10		Les modèles identifiés semblent redondants	L'équipe de conception crée des points de fixation.	X	(Helms et al., 2009) (Rowalo et al., 2019)
R11	5. Sélection de modèles biologiques potentiels	Sélection de modèles techniquement pertinents mais inappropriés pour le projet biomimétique	L'équipe de conception a oublié d'examiner certains éléments du contexte (parties prenantes, marché, etc.) conduisant à la sélection de modèles inappropriés pour le projet.	X	(Chirazi et al., 2019)
R12		Incapacité à abstraire le modèle biologique, l'étape est considérée comme ignorée par l'équipe	L'équipe de conception sélectionne un modèle biologique potentiellement pertinent, mais il y a un besoin de recherche biologique avant que toute application soit rendue possible.	X	(Jacobs et al., 2014)
R13			Le concept d'« abstraction » est inconnu de l'équipe de conception.	X	"Je saute cette étape quand je m'imagine faire le processus"
R14	6. Abstraction de stratégies biologiques	Abstraction mal exécutée	Incompréhension des données biologiques, les mauvais éléments sont abstraits.	X	(Rowalo et al., 2019) (Chirazi et al., 2019), (Yen et al., 2013)
R15			L'équipe de conception pense qu'elle a bien effectué l'étape, mais elle a une fausse idée de ce qu'est que l'abstraction.	X	(Rowalo et al., 2019)
R16			L'équipe de conception ne sait pas ce qu'est qu'un niveau d'abstraction ou quel niveau rechercher.	X	
R17	7. Transposition à la technologie	Incapacité d'effectuer l'étape (étape n'est pas validée)	L'équipe ne sait pas ce que signifie la « transposition » dans le contexte de l'étape.	X	(Rowalo et al., 2019)
R18			L'équipe de conception connaît le concept sémantique de « transposition », mais ne sait pas comment effectuer l'étape.	X	
R19		Perte du modèle biologique lors de la mise en œuvre	L'équipe de conception, avec ou sans le savoir, fixe sur des stratégies technologiques existantes et essaye d'adapter le concept à celles-ci, perdant l'intérêt d'une approche biomimétique.	X	(Helms et al., 2009)
R20	8. Mise en place et tests	Capacité à mettre en œuvre le concept, mais les tests montrent un manque d'efficacité	Le prototype généré est basé sur l'incompréhension / erreur d'abstraction du modèle biologique, les résultats attendus ne sont pas observés.	X	(Rowalo et al., 2019) (Helms et al., 2009)
R21		Difficulté à produire le prototype	Les outils nécessaires à la mise en production n'existent pas encore et ont besoin d'être conçus	X	(Chirazi et al., 2019) (Yen et al., 2013)

Cette partie 5.3, a donc permis de compléter la phase descriptive de notre étude. La structure, la sémantique et les risques associés au processus biomimétique unifiés ont été évalués et divers leviers ont été identifiés pour améliorer le cadre méthodologique. La partie suivante présente une synthèse de la phase descriptive composant le socle sur lequel sont construits les apports prescriptifs de ce chapitre.

5.3.4 Synthèse de la phase descriptive

Cette partie 5.3 présente un nouveau volet de la phase descriptive portant sur le processus de conception biomimétique (Hypothèse 2) et la pratique des biomiméticiens (Hypothèse 1) (Chapitre 3, partie 3.2). Afin de structurer ses différentes observations, le tableau 5.7 associe chaque recommandation identifiée à sa source d'identification et à son positionnement par rapport aux sous-hypothèses.

Tableau 5.7 Synthèse des recommandations issues du chapitre 5

ID	Recommandations associées au processus et à la pratique	Sources	Positionnement
1	Caractériser précisément l'axe horizontal	REx et Interviews	H.2.2
2	Expliciter l'axe vertical	REx, Interviews et Cause 1	H.2.2
3	Structurer linéairement et conserver des itérations	REx et Interviews	H.2.2
4	Expliciter l'intégration des biomiméticiens	REx et Interviews	H.2.2
5	Reformuler la sémantique de certaines étapes	REx, Interviews et Cause 1	H.2.2
6	Redéfinir et formaliser la pratique de l'étape 3	REx, Interviews et Cause 1	H.2.2 et H.1.2
7	Accompagner les praticiens durant les étapes	REx, Interviews et Cause 1	H.2.2 et H.1.2
8	Soutenir la prise de recul et la détection des erreurs	REx, Cause 2	H.2.2 et H.1.2
9	Soutenir l'agilité du processus pour limiter les risques	Cause 2	H.2.2
10	Formaliser la pratique des biomiméticiens sur les étapes centrées sur la biologie	REx, Interviews et Cause 3	H.1.2

REx = Retour d'Expérience ; Cause 1, 2, 3 = Causes identifiées dans l'AMDEC (Chapitre 5, partie 5.3.3)

Combinés aux éléments identifiés dans le chapitre 4 (Chapitre 4, partie 4.3.4), ces résultats forment le prisme descriptif structurant la phase prescriptive dont la première étape est présentée dans la partie 5.4. Celle-ci décrit alors les adaptations du processus (H.2.2) et de la pratique (H.1.2) de la biomimétique visant à intégrer les biomiméticiens au sein du cadre méthodologique.

5.4 Adaptation du cadre méthodologique

En nous basant sur les observations issues de la phase descriptive, trois objectifs principaux sont ciblés : l'appropriation du raisonnement notamment grâce à la représentation visuelle du processus, l'accompagnement des équipes par la re-formalisation des étapes et la description de la pratique des biomiméticiens par l'infusion de raisonnement biologique notamment et enfin la réduction des risques par l'implémentation de « *Go/No Go* » (= étape d'évaluation intermédiaire) et de boucles d'itération associées. La partie 5.4 se conclut par une synthèse présentant le processus interdisciplinaire de conception biomimétique

(*Technology Pull Interdisciplinary Biomimetic design process* ou TPIB design process) issus des travaux menés conjointement avec Anneline Letard.

5.4.1 Appropriation du raisonnement : axes et structure

La phase descriptive souligne la nécessité d'une représentation plus informative et plus accessible du processus. On préconise alors de caractériser et graduer les deux axes structurant le référentiel visuel du processus afin de mener l'équipe et les décideurs à raisonner de manière dynamique et prédictive, les conduisant à anticiper les difficultés et les coûts.

Bien qu'elles puissent sembler secondaires face à la problématique de l'intégration des biomiméticiens, ces contributions sur la formalisation du référentiel dans lequel est représenté le processus composent un prérequis fondamental. Comme précisé dans la partie descriptive, les biomiméticiens sont intégrés comme un levier de résolution des freins mais peuvent également être vus comme une contrainte, un coût, un risque supplémentaire. Il est donc essentiel de préparer cette intégration en réduisant au maximum les risques préexistants. Les concepteurs et les décideurs doivent comprendre avec précision la démarche suivie en biomimétique afin que l'intégration des biomiméticiens leur apparaisse pertinente.

5.4.1.1 Axe horizontal : Estimation de la répartition du temps

En tant que ressource, le temps est directement relié à la planification du projet et à l'investissement qui doit lui être associé. Un axe horizontal représentant une estimation des durées de chaque étape est ainsi proposé.

De chaque projet industriel constituant les retours d'expériences (Chapitre 5, partie 5.2.1), le temps consacré aux différentes étapes du processus est extrait lors d'entretiens avec les membres du Ceebios ayant participé aux projets de conception (Tableau 5.8, (1)).

Par ailleurs, à l'issue de la phase descriptive et des Rex des projets étudiants, nous préconisons également une répartition du temps que nous considérons pertinente pour les différentes étapes (Tableau 5.8, (2)).

Par conséquent, ces estimations combinent d'une part des retours descriptifs de projets ayant abouti, et des prescriptions d'amélioration. Dans la mesure où les étapes 1 et 8 sont extrêmement variables selon le cadre des projets (sujet déjà défini ou non ? Innovation de rupture ou incrémentale ? Mission de conseil ou R&D interne ? etc.), elles sont laissées de côté dans notre analyse.

À partir de ces données, un axe horizontal représentant le pourcentage de temps moyen consacré aux six étapes restantes du processus biomimétique est proposé (Tableau 5.8).

Dans l'ensemble, notre préconisation suit la tendance observée dans les retours d'expériences des projets industriels. En nous basant sur la phase descriptive, nous orientons cependant les praticiens vers des étapes de l'abstraction plus longue.

Tableau 5.8 Résultats de l'analyse du cadre temporel

Processus	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 5	Étape 6	Étape 7
	Retours d'expérience industriels (n = 15)					
Durée minimale	4 %	4 %	28 %	4 %	9 %	5 %
Durée maximale	12 %	19 %	60 %	25 %	30 %	24 %
Durée médiane	7 %	11 %	44 %	11 %	15 %	11 %
(1) Durée moyenne Rex (n=15) (Écart-type)	7 % (2 %)	9 % (4 %)	41 % (10 %)	14 % (5 %)	17 % (6 %)	11 % (5 %)
Étape n Vs Étape n-1 p-value (Fisher test)	-	0,146	2.10 ^{-7**}	2.10 ^{-7**}	0,2174	0,5765
	Préconisation issue de la phase descriptive et des retours d'expériences étudiants					
(2) Préconisation des auteurs	19 %	10 %	33 %	5 %	19 %	14 %
	Axe horizontal prescrit					
(3) Moyenne (1) & (2)	13 %	10 %	37 %	9 %	18 %	13 %

p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1. Répartition du temps sur 6 étapes (= 100 %).**

Sur la base de ce nouvel axe, les praticiens ont une estimation rapide du temps moyen qu'ils peuvent consacrer aux différentes étapes des phases de conception générale. Ce nouvel axe doit favoriser :

- Le dimensionnement d'études potentielles,
- La formalisation de diagrammes de Gantt associés aux projets biomimétiques dont la durée est prédéfinie,
- Une fois le projet en cours, estimer le temps des étapes restantes si la durée totale du projet n'est pas prédéfinie,
- Évaluer les avancées ou les retards du projet et ainsi les forces et faiblesses de l'équipe,
- Mieux estimer les coûts et ainsi mieux évaluer les risques et les investissements nécessaires aux différentes étapes.

Loin d'être une vérité absolue ou une représentation statique, cet axe doit être considéré comme une ligne directrice générique. Il est conçu comme une base pouvant être ajustée, pour permettre la prise en compte de retours d'expériences internes, d'avancées à venir issues de la recherche en biomimétique, de préférences des équipes, etc.

Cet axe horizontal, linéaire et chronologique, conduit à la disparition du sentiment d'incertitude quant au temps du processus (durée infinie "*il ne finit jamais*" et frustration "*On a l'impression de devoir recommencer*") mais également de la structuration itérative, largement reconnue comme un des avantages principaux du processus unifié ("*les boucles sont très logiques*" et le "*raisonnement très naturel*"). Par conséquent, une attention particulière sera portée à la mise en place de nouvelles boucles itératives dans la suite des contributions de restructuration (Chapitre 5, partie 5.4.3).

Après l'axe horizontal, la partie suivante se concentre sur la clarification des diverses questions identifiées dans la phase descriptive sur l'axe vertical (Chapitre 5, partie 5.3.1), et sur le concept de niveau d'abstraction.

5.4.1.2 Axe vertical : concept d'abstraction et niveaux d'abstraction

L'étude descriptive souligne la difficulté associée à la maîtrise de l'abstraction, et ce alors qu'il s'agit d'une notion structurant le processus biomimétique unifié (axe et sémantique). Ce concept est en effet considéré comme connu du point de vue de la recherche. Le fossé entre théorie et pratique apparaît ici particulièrement impactant.

Pour guider les praticiens amenés à lire ce manuscrit et pour établir les bases de nos propositions sur l'axe vertical, cette partie apporte dans un premier temps une réflexion explicative quant à l'implication de l'abstraction en biomimétique.

Il semble en effet périlleux d'explicitier nos contributions sur les niveaux d'abstraction sans définir et discuter au préalable le concept d'abstraction en tant que tel.

Abstraction, cognition et analogie

L'abstraction est un processus cognitif qui permet d'extraire l'information issue des perceptions du monde réel pour générer une représentation conceptuelle mentale ; une idée formée de concepts. Il s'agit là d'une compétence humaine naturelle tout particulièrement liée aux capacités d'apprentissage et principalement effectuée inconsciemment (Piaget, 1977). Elle permet aux mécanismes de la cognition de trier les informations captées et de créer des réseaux conceptuels pour modéliser la réalité et la simplifier. Cette représentation mentale nous permet de prévoir, d'anticiper, d'ajuster et de progresser.

Concrètement, lors de l'abstraction d'une information, des choix sont faits sur les éléments à considérer. Ainsi, on représentera le concept d'un couteau comme une lame fixée à un manche. Selon le besoin, on laissera de côté un ensemble de données, comme les matériaux, la couleur, la température, le système de fixation, la forme exacte, etc. Le modèle créé est foncièrement dynamique et s'adapte en permanence avec l'expérience de la personne.

Dans ses travaux, Piaget décrit plusieurs types d'abstractions : l'abstraction empirique et l'abstraction réfléchissante (Piaget, 1977). L'abstraction empirique se concentre sur la classification de la réalité en concepts partageant des traits communs. L'abstraction réfléchissante est un processus cognitif plus complexe qui conduit à la connexion de ces concepts, leur dynamisation et la formalisation des modèles conceptuels qui peuvent produire de nouvelles connaissances (Campbell, 2001).

Pour reprendre l'exemple du couteau, là où l'abstraction empirique nous permet d'établir le concept mental du couteau, l'abstraction réfléchissante permet d'associer au couteau un ensemble de fonctions conduisant un individu à anticiper une utilisation et ainsi à se munir d'un couteau.

Le lien entre l'abstraction et l'analogie émerge alors de l'association de concepts, de réseaux de concepts, de fonctions, d'expériences, etc. basée sur des similarités.

Un couteau est composé d'une lame et d'un manche et conduit l'utilisateur à couper un objet, une épée possède un ensemble d'éléments et de relations entre ces éléments qui apparaissent similaires. Dans une certaine mesure, on peut considérer ces deux concepts comme analogues.

Comme décrite dans la littérature, cette pensée analogique peut alors conduire à résoudre des problèmes (Gentner, 1989). Dans cette optique, il est identifié comme particulièrement pertinent de baser le raisonnement analogique sur des relations plutôt que sur des attributs (Falkenhainer et al., 1989) et donc sur des systèmes interconnectés plutôt qu'isolés (GENTNER, 1983).

En effet, se baser sur le manche seul d'un couteau est assez peu pertinent pour concevoir un objet répondant au problème « *comment couper un objet ?* ». En revanche, considérer l'association entre un manche permettant à l'utilisateur d'appliquer une force, et une lame transférant cette même force sur une surface étroite, le fil de la lame, conduit à l'identification du principe fonctionnel de résolution.

Cette partie permet ainsi d'explicitier pourquoi l'abstraction est centrale dans le raisonnement analogique. On comprend également en quoi elle est complexe. Cette approche maîtrisée instinctivement est paradoxalement particulièrement compliquée à utiliser consciemment, pour poursuivre un objectif particulier. Tout l'enjeu est de décortiquer le processus cognitif permettant l'abstraction afin d'en identifier les paramètres à maîtriser afin de l'utiliser pour répondre aux besoins rencontrés. La partie suivante discute du lien entre les niveaux d'abstraction et la biomimétique.

Niveaux d'abstraction en biomimétique

Plusieurs articles ont été publiés dans la littérature pour définir des niveaux d'abstraction (Keshwani et al., 2015; Cheong et al., 2012; Gentner, 1989). Pour que cette notion soit facilement compréhensible, nous avons synthétisé différentes contributions en trois niveaux (Tableau 5.9). Afin de donner aux praticiens une base de référence, nous avons également ajouté un premier niveau, "*Réalité*", où aucune abstraction n'est effectuée.

En outre, pour éviter toute confusion avec les prismes d'abstraction qui seront décrits dans la partie 5.4.2.2, notamment sur la notion de *Surface* utilisée par Keshwani et Chakrabarti comme un niveau (Keshwani et al., 2015) et par Nagel comme un prisme (Nagel et al., 2018), nous choisissons d'utiliser des termes plus généraux pour représenter l'élévation du niveau d'abstraction. Les niveaux d'abstraction utilisés dans le reste du manuscrit sont définis comme suit :

- **La *Réalité*** : qui représente tellement d'informations qu'il est tout simplement impossible de la considérer entièrement.
- **Le *bas niveau*** : allant d'une extrémité basse, les « *incarnations* », qui représente les concepts aussi proches que possible du réel, à une extrémité haute, les « *attributs spécifiques* », qui réduit les concepts à leurs attributs d'intérêts.

- **Le niveau *intermédiaire*** : allant d’une extrémité basse, les « *attributs génériques* », qui considère des catégories d’attributs spécifiques, à une extrémité haute, les « *motifs dynamiques* », qui ajoute une notion d’évolution et de généralité de type d’évolution.
- **Le *haut* niveau** : allant d’une extrémité basse, les « modèles de causalité », qui vise à formaliser les interactions des éléments entre eux soulignant les causes et les conséquences, à une extrémité haute, les « modélisations génériques », qui vise à extrapoler les modèles de causalité dynamique en se basant sur des lois physico-chimiques génériques, rendant la modélisation conceptuelle autonome.

Tableau 5.9 Niveaux d’abstraction considérés au cours du processus biomimétique

Niveaux d’abstraction proposés	Keshwani and Chakrabarti, 2015	Gentner, 2001	Cheong and Shu, 2012
3. Haut	Profond	Relationnel	Causal
2. Intermédiaire	Peu profond		
1. Bas	Surface	Superficiel	
0. Réalité		-	

Afin d’expliciter les graduations de l’axe vertical, la suite de cette partie caractérise l’évolution des niveaux d’abstraction sur un exemple tout au long du processus biomimétique. Ce faisant, les résultats génériques associés aux différentes étapes seront ajoutés à la représentation du processus afin de permettre aux praticiens de relier les niveaux l’abstraction et leur pratique.

Évolution des niveaux d’abstraction au cours du processus

Dans la pratique biomimétique, l’abstraction est un procédé crucial. En effet, comme explicité précédemment, le mécanisme sous-jacent à la biomimétique, et aux approches analogiques en général, est l’augmentation du niveau d’abstraction afin d’atteindre une représentation conceptuelle. Plus le niveau d’abstraction est élevé, moins la représentation est liée à une incarnation spécifique, plus elle est générique, et plus il est facile d’effectuer une analogie (Drack et al., 2018). La variation du niveau d’abstraction au cours du processus biomimétique peut alors être caractérisée pour décrire ces mécanismes :

- **Étape 1. Analyse du problème** : Dans un premier temps, à partir d’un problème initial, l’équipe cherche à faire face à la réalité, à observer et recueillir des informations sur le projet et son contexte menant à la reformulation du problème. Nous considérons que tout au long de cette étape, le niveau d’abstraction oscille au sein d’un *bas* niveau d’abstraction.
- **Étape 2. Abstraction des problématiques techniques** : L’équipe commence par décomposer le problème en ces composants spécifiques et à les formaliser sous forme générique, conduisant au niveau *intermédiaire* d’abstraction. Dans un deuxième temps, le *haut* niveau est atteint en reliant les différentes informations ensemble (relations de causalité) et avec des principes provenant de leur

environnement (la gravité, les lois de conservation de l'énergie, etc.). Le modèle fonctionne ainsi de manière autonome dans un contexte générique.

- **Étape 3. Transposition à la biologie** : L'équipe entre dans le monde biologique. Même si le niveau d'abstraction diminue légèrement et s'ajuste en fonction de l'identification d'espaces conceptuels biologiques correspondant au problème technique (analogie de contraintes ou de fonctions), on considère que la transposition s'effectue par un pont conceptuel à un *haut* niveau d'abstraction.
- **Étape 4. Identification des modèles biologiques d'intérêts** : L'équipe identifie les modèles biologiques d'intérêt et recueille ensuite autant d'informations spécifiques que possible tout en essayant d'aller à l'essentiel, conduisant à une diminution du niveau d'abstraction jusqu'au *bas* niveau.
- **Étape 5. Sélection des modèles biologiques pertinents** : À partir des différents modèles détaillés, l'évaluation et la sélection conduisent à un choix des informations pertinentes et à une légère augmentation au sein du *bas* niveau d'abstraction. Celle-ci peut s'avérer plus importante dans les faits selon les connaissances de l'équipes.
- **Étape 6. Abstraction des stratégies biologiques** : De même que dans l'étape 2, l'étape 6 conduit à la sélection et au raffinement des éléments spécifiques, et donc à une forte augmentation du niveau de l'abstraction vers le *haut* niveau.
- **Étape 7. Transposition à la technologie** : Cette phase de transposition conduit à une diminution plus forte du niveau d'abstraction que la précédente étape de transposition (l'étape 3). Dans les faits on observe souvent des *fiches idées* en sortie de cette étape.
- **Étape 8. Mise en contexte et tests** : Les concepts technologiques sont prototypés et testés. Le niveau d'abstraction oscille alors entre un faible niveau d'abstraction et la réalité : Prototypage (réalité) / tests (réalité) / optimisation du concept produit (bas niveau) / mise en place des modifications (bas niveau).

La description de l'évolution du niveau d'abstraction au cours des étapes du processus permet la présentation d'un axe gradué, guidant les praticiens au cours de leur pratique. La figure 5.4 présente un exemple issu d'un projet étudiant, ciblant la perte d'énergie d'un fluide causée par des frottements et la solution largement reconnue de la feuille de lotus (Figure 5.4).

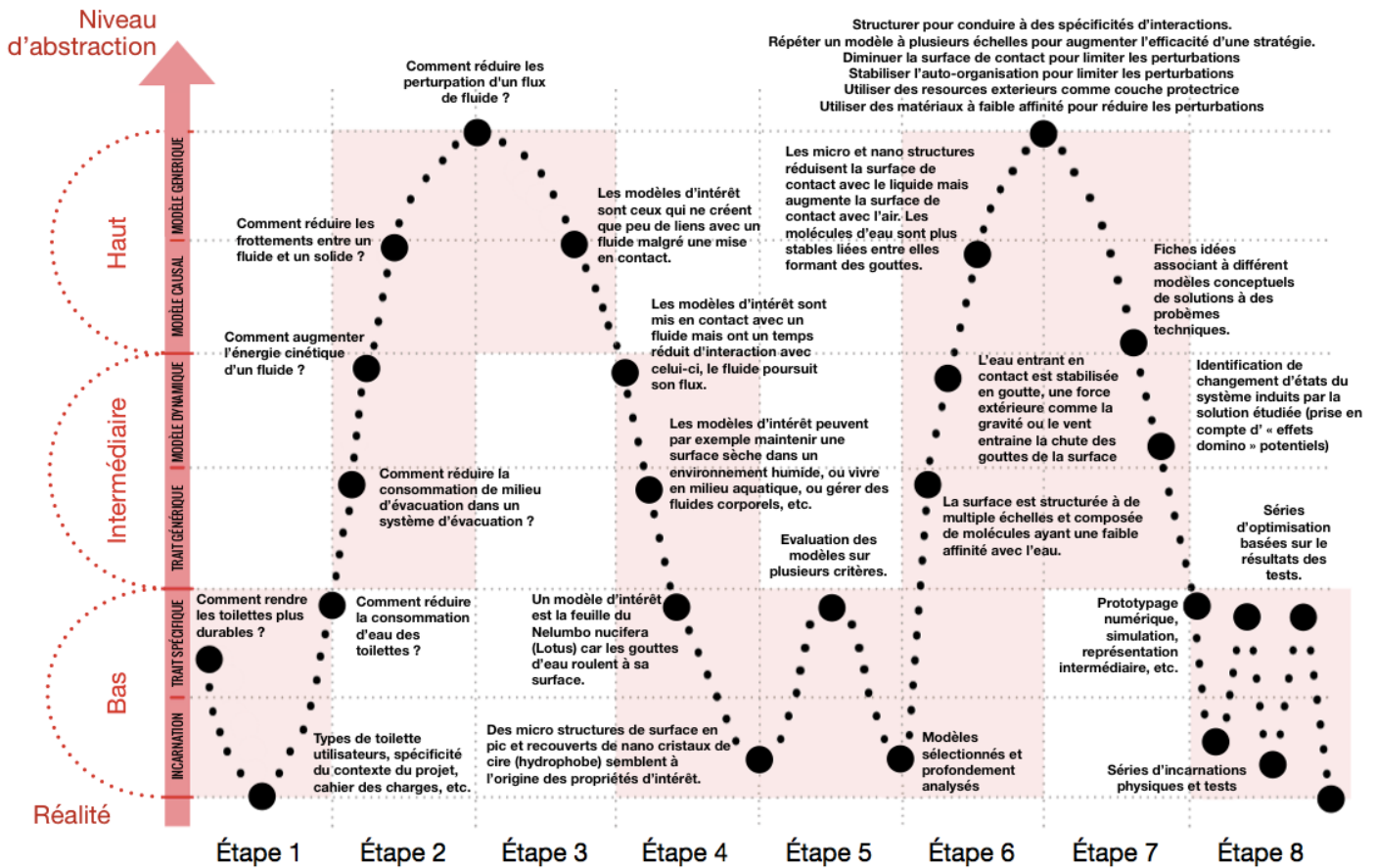


Figure 5.4 Illustration de l'évolution des niveaux d'abstraction au cours des étapes du processus

En synthèse, ces contributions sur l'axe vertical ont pour but de permettre aux praticiens de suivre leurs progrès et de comprendre le lien entre leur pratique et la représentation graphique du processus. Tout comme pour l'axe horizontal, cet axe ne représente pas une règle stricte mais un ensemble de préconisations. Il existe différentes manières d'effectuer un projet biomimétique, les niveaux d'abstraction décrits dans cette partie sont des lignes directrices qui peuvent, et doivent, être adaptées au sujet et aux équipes.

En revanche, quels que soient les niveaux effectivement considérés en pratique, le modèle d'augmentation et de diminution du niveau de l'abstraction entre les étapes est stable dans les observations effectuées dans la littérature (Chapitre 2, partie 2.4.2.2).

De la même manière qu'avec l'axe horizontal, l'idée sous-jacente est de donner à l'équipe de conception un cadre méthodologique structuré mais paramétrable (Figure 5.5).

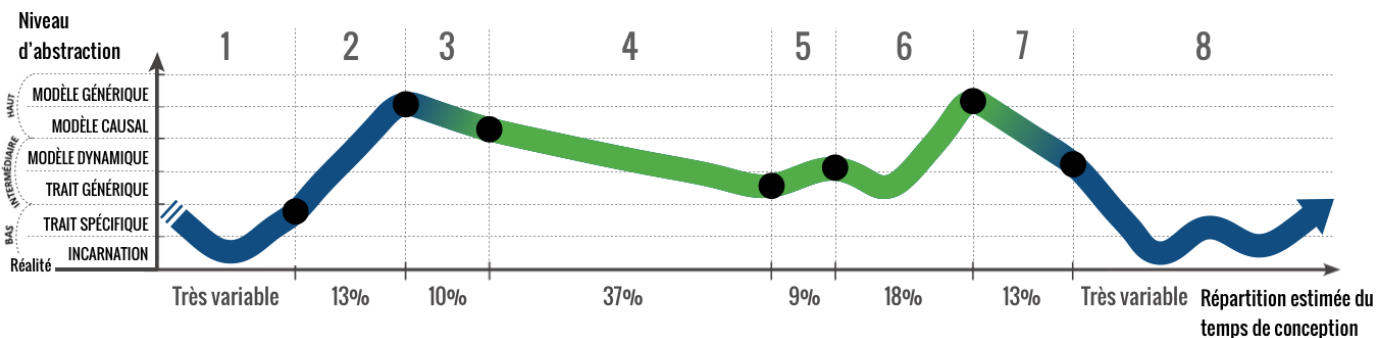


Figure 5.5 Processus de conception biomimétique représenté dans le référentiel préconisé

À travers la présentation des apports prescriptifs sur les axes du processus cette partie visait l'amélioration de la compréhension du processus et l'augmenter de la quantité d'informations extractibles par les équipes. Cette augmentation vise également à conduire les praticiens à mieux comprendre les résultats de la recherche scientifique centrés sur l'abstraction (ex. FBS, SAPPhIRE, TRIZ, etc.) dont le transfert à la pratique a été identifié comme un frein au développement de la biomimétique (Chirazi et al., 2019). La précision du référentiel dans lequel est représenté le processus de conception nous conduit à aborder le processus en lui-même, et la formalisation de l'intégration des biomiméticiens au cours de ses différentes étapes.

5.4.2 Accompagnement : sémantiques, objectifs, pratiques

Cette partie présente étape par étape les modifications apportées au processus de conception biomimétique unifié, aussi bien sur les sémantiques et la redéfinition de certains éléments clés que sur l'intégration pratique des biomiméticiens. Cette dernière sera décrite à travers la préconisation d'activités génériques structurant les missions attribuées à ce nouveau membre des équipes biomimétiques. Dans la mesure où le profil de biomiméticiens n'existe pas dans la littérature, nous considérerons un « *profil idéal* », notamment basé sur les observations de la phase descriptive, qui nous permettra d'identifier a posteriori des éléments pertinents pour sa formalisation précise. Une preuve de concept appliquant un ensemble d'approches présenté dans cette partie sera par la suite décrite en partie 5.5.2.

Afin d'harmoniser le nom des étapes tout en guidant au mieux les praticiens, nous choisissons un format générique d'instructions à l'impératif pour les sémantiques.

5.4.2.1 Étape 1 : Analysez le problème

Définition et sémantique de l'étape 1

Comme la première étape est classique et a été bien comprise dans les phases descriptives, nous reformulons simplement la sémantique pour qu'elle corresponde au format préalablement établi, conduisant au nom suivant : « **Analysez le problème** ».

Pratique et intégration d'un biomiméticien lors de l'étape 1

Même si elle est bien comprise, cette étape reste risquée car fondamentalement structurante pour le reste du projet. Lors de cette phase, nous avons formalisé quatre activités principales pour les biomiméticiens :

- **Activité 1. Questionner et faire préciser** : Dans la mesure où ils constituent une population non spécialisée sur les problèmes d'ingénierie, leur présence va forcer les autres membres de l'équipe à plus communiquer, à formaliser leur raisonnement et à re-questionner les éléments présentés. L'objectif poursuivi est alors la description détaillée du problème afin qu'il soit compris de la même manière par tous et discuté par l'ensemble de l'équipe.

- **Activité 2. Supporter une vision systémique du problème** : En adoptant un point de vue systémique (Chapitre 4, partie 4.3.4), les biomiméticiens devraient permettre à l'équipe de comprendre de manière plus globale du projet. Par ailleurs, ils devraient également favoriser la prise en compte de paramètres associés à la durabilité du projet (circularité, principes du vivant, etc.) dès les premières phases de réflexion, dirigeant les projets vers l'écoconception et le biomimétisme.
- **Activité 3. Apporter de la variabilité de raisonnement** : En raisonnant avec une approche différente et en abordant le problème dans un référentiel conceptuel atypique (biomimétique et/ou biologique), les biomiméticiens peuvent proposer un nouveau point de vue, complémentaire, sur les problèmes abordés. Ils devraient ainsi favoriser la phase de divergence associée à l'analyse du problème et permettre l'identification de nouveaux axes d'innovation.
- **Activité 4. Assimiler autant d'informations que possible** : Enfin, leur activité principale au cours des deux premières étapes sera d'assimiler autant d'informations que possible pour préparer les étapes centrées sur la biologie à venir. L'intégration des biomiméticiens dès cette première étape leur permet de comprendre la complexité du projet, ses différents paramètres clés, les acteurs impliqués, etc. pour favoriser par la suite une résolution pertinente du projet.

De manière transversale, il apparaît essentiel d'assurer la mise en place d'un esprit d'équipe le plus tôt possible. De cette manière, les différents membres de l'équipe sont mis sur un pied d'égalité, reconnus comme des membres légitimes, favorisant leur envie de travailler ensemble pour atteindre un but commun. Cette cohésion s'avèrera être un atout crucial lors des phases de transfert de connaissances qui demandent une confiance mutuelle, une communication efficace et une volonté d'ouverture.

Le résultat préconisé en sortie de cette première étape se termine alors avec une version analysée et reformulée du problème de conception, comprise et supportée par toute l'équipe.

5.4.2.2 Étapes 2/6 : Identifiez les problèmes techniques/les éléments biologiques de résolution, leurs modélisations génériques, leurs causes et leurs effets

Étant donné la proximité des raisonnements et pratiques utilisés lors des étapes 2 et 6, celles-ci seront présentées ensemble.

Définitions et sémantiques des étapes 2 et 6

De la phase descriptive, nous avons observé que le concept d'abstraction, s'il est fondamental, n'est pas correctement compris. Comme présenté dans la partie 5.4.1.2, l'abstraction englobe l'extraction, le raffinement, la structuration et la dynamisation de l'information caractérisant

les problèmes techniques en modèles causals que l'on considère dans un environnement conceptuel formant un modèle générique.

En conséquence, nous renommons la 2^{ème} étape "**Identifiez les problèmes techniques, leurs modélisations génériques, leurs causes et leurs effets**". Selon la même logique, la 6^{ème} étape est également renommée "**Identifiez les éléments biologiques de résolution, leurs modélisations génériques, leurs causes et leurs effets**".

Ce changement de sémantique se concentre sur la *démarche* d'abstraction, au cœur de la deuxième étape. Le lien avec le concept fondamental d'abstraction est par ailleurs toujours maintenu à travers l'axe vertical.

Pratique des équipes et intégration du biomiméticien lors des étapes 2 et 6

L'une des principales difficultés de l'abstraction est de structurer l'approche et les informations à considérer. Là où la partie précédente décrit les *niveaux d'abstraction* permettant de caractériser la généralité des représentations, divers *prismes d'abstraction* sont utilisés pour guider les praticiens dans leur démarche (Gero, 1990; Helms et al., 2009; Mak et al., 2004; Chakrabarti et al., 2005; Vincent et al., 2006; Bhasin et al., 2018; Nagel et al., 2018). Cette notion de prismes est liée au point de vue choisi par l'observateur pour représenter l'idée d'intérêt. Elle est particulièrement importante car certains prismes permettent une avancée conceptuelle plus conséquente que d'autres. Pour cette raison, ils sont souvent présentés sans distinction avec les niveaux.

Afin de guider les praticiens qui n'ont pas une formation spécifique sur de tels concepts, nous avons séparé complètement les prismes des niveaux, et ce même si ces deux modalités sont liées. Le tableau 5.10 (Tableau 5.10) présente un résumé représentatif des prismes issus de la littérature et propose quatre questions génériques pour aider les praticiens à les manipuler, reprenant ainsi l'approche employée par Yen et al. (Yen et al., 2014) et inspirée du modèle SBF tout en explicitant ces questions pour en limiter les erreurs potentielles d'interprétation :

- « **Quoi ?** » : étude de l'incarnation physique des concepts permet l'identification de certains éléments clés associés aux modèles étudiés, et notamment à la structuration à de multiples échelles des matériaux. C'est la première étape à effectuer lors de l'abstraction, observer et identifier quels éléments doivent être étudiés et quels éléments constituent simplement un *bruit informatif*. Ce prisme apparaît au cœur de l'*abstraction empirique* de Piaget (Chapitre 5, partie 5.4.1.2). Pour prendre une analogie simplificatrice, ce prisme peut être vu comme le fait de zoomer, rogner et modifier la résolution d'une image à décrire.
- « **Comment ?** » : description de la manière dont le phénomène observé se produit. Les notions de durée, d'état et de processus sont intrinsèquement liées à ce prisme. Les équipes extraient les interactions causales et leurs conséquences, permettant alors d'augmenter le niveau d'abstraction du prisme « quoi ? » en identifiant les attributs requis au phénomène observé. Ce prisme trouve ainsi sa source dans l'*abstraction empirique* et atteint l'*abstraction réfléchissante* (Chapitre

5, partie 5.4.1.2). Pour poursuivre l’analogie simplificatrice, ce prisme peut être vu comme l’animation de l’image en une vidéo, que l’on peut ralentir, éditer, etc.

- « **Pourquoi ?** » : interroge sur deux aspects, *pourquoi les interactions causales identifiées dans le prisme précédent conduisent-elles aux conséquences observées ?* et *pourquoi le sujet accomplit-il l’action ?* Le premier aspect nous conduit à la notion de principes fondamentaux, scientifiques, "*pourquoi la pomme tombe-t-elle de l’arbre ?*". La seconde interprétation, nous conduit aux besoins fonctionnels sous-jacents, « *pourquoi les dents de requin ont elles cette forme spécifique ?* ». C’est souvent à travers les prismes précédents et leur confrontation avec les lois physiques, naturelles, que le noyau même, ou la cause initiale, des phénomènes émergent enfin (Mak et al., 2004). Ce prisme fait ainsi partie intégrante de l’abstraction *réfléchissante* de Piaget. Pour continuer à utiliser la même analogie, ce prisme est un film avec les commentaires du réalisateur expliquant l’origine technique et l’objectif de chaque séquence.
- « **Où et quand ?** » : ce dernier prisme est moins pris en compte dans la littérature et est souvent partagé entre les autres prismes. Cependant, nous le considérerons à part car il devrait permettre de stimuler une vision systémique et la collecte d’un autre type d’informations, mettant l’accent sur le contexte. Ce prisme oscille entre abstraction *empirique* et *réfléchissante*, c’est l’ajustement des modèles conceptuels variant avec leur environnement. Pour terminer l’analogie, les modes cinématographiques, les mœurs sociales ou les habitudes d’un réalisateur, composent le contexte d’un film et conduisent à l’interpréter correctement.

Tableau 5.10 Principaux prismes d’abstraction préexistants et questions génériques proposées

Référence	Quoi ?	Comment ?	Pourquoi ?	Où et quand ?
Gero, 1980 Goel, 2009 Mak & Shu, 2004	Structure Forme	Comportement	Fonction	
Bhasin & McAdams, 2018	Matériau et structure	Mécanismes processus	Principe	-
Nagel, 2018	Forme, Surface, Architecture, Matériau	Processus	Système, Fonction	
Chakrabarti, 2005	Partie, Organe	État, Ressources (Inputs), Phénomène physiques	Action, Loi physique	
Vincent, 2006	Substance et structure	Énergie et information		Espace et temps

Même si les prismes et les niveaux sont intrinsèquement liés nous postulons que les définir séparément dans un premier temps peut conduire les praticiens à mieux comprendre ces deux modalités de l’abstraction. Cependant, afin de leur permettre également de reconnecter prismes et niveaux, le tableau 5.11 montre comment chaque prisme peut conduire à des niveaux d’abstraction différents à travers l’exemple de la propagation d’électricité dans de l’eau de mer (Tableau 5.11).

Tableau 5.11 Niveaux et prismes d’abstractions pour la conduction électrique dans de l’eau de mer

	Quoi ?	Comment ?	Pourquoi ?	Où et quand ?
Haut	Particule chargée	Par le mouvement de particules chargées	Car la répulsion électromagnétique entre des particules chargées est transformée en énergie cinétique	Tant que la différence de potentiel appliquée sur les particules chargées représente une force supérieure aux forces de résistance au mouvement
Intermédiaire	Solution ionique	Par la modification de la polarité de la solution.	Car la différence de potentiel entre les pôles entraîne l’attraction ou la répulsion des ions en solution.	Tant que l’on applique une différence de potentiel sur des ions libres
Bas	Eau salée	Par l’application d’un courant	Car une différence de potentiel existe entre les deux bornes métalliques de la batterie et que le sel présent dans l’eau ferme le circuit électrique	Tant que la batterie est chargée et le circuit fermé par l’eau
Réalité	Eau de mer	Par la mise en contact avec une batterie	Car l’eau de mer est conductrice et la batterie apporte de l’énergie électrique	Dès la mise en contact et jusqu’à ce que le courant soit coupé

Le processus d’abstraction dépend ainsi de l’information rendue disponible. Il n’est possible d’observer par ces différents prismes que ce qui est connu ou déduit. Comme souligné dans la littérature par Keshwani, le manque de connaissance en biologie des équipes apparaît par conséquent comme une cause de la difficulté des phases d’abstraction (Keshwani et al., 2017).

Les champs de compétences au sein de l’équipe apparaissent donc centraux afin que les membres spécialisés (les technologues dans l’étape 2 et les biomiméticiens dans l’étape 6) puissent :

- **Activité 5. Apporter de la connaissance sur les différents prismes.**
- **Activité 6. Identifier les informations manquantes.**
- **Activité 7. Rassembler les informations manquantes.** S’informer auprès de confrères ou d’un réseau spécialisé et même potentiellement expérimenter (diminution du niveau d’abstraction) pour valider un élément ou déterminer une propriété à considérer (ré-augmentation du niveau d’abstraction).
- **Activité 8. Interpréter correctement les informations mises à disposition.**
- **Activité 9. Évaluer l’importance relative des informations.**
- **Activité 10. Faire des liens entre des concepts.**

Dans un deuxième temps, une fois la quantité et la précision d’informations suffisantes, le niveau d’abstraction doit être adéquat pour permettre le passage à la biologie ou à la technologie respectivement. Les membres n’ayant pas de compétences spécifiques sur le domaine traité (non spécialistes) ont également un rôle crucial :

- **Activité 11. Assurer un niveau d'abstraction adéquat.** Responsables de la transposition à venir, ils doivent être capables de comprendre les éléments abstraits. Cette démarche repose notamment sur l'explicitation des concepts à travers les échanges entre les membres aux connaissances variées sur le domaine considéré. Cette mise à disposition de l'information dans un format générique doit en effet permettre à toute l'équipe d'interpréter les informations.
- **Maintien des activités 1 à 4.**

Le biomiméticien a le rôle de membre questionnant les propositions lors de l'étape 2 (non spécialiste en technologie) et apportant des connaissances lors de l'étape 6 (spécialiste en biologie). Cependant, comme précisé dans la phase descriptive, le savoir du biomiméticien ne peut être absolu. Ainsi, la capacité des biomiméticiens à identifier et échanger efficacement avec des biologistes verticaux (chercheurs, experts externes, etc.) en phase 6 est un atout précieux (activité 7).

Ces activités apparaissent en adéquation avec les préconisations de la littérature quant à l'intégration ponctuelle d'experts, par exemple pour valider les modélisations de systèmes biologiques en étape 6 (Nagel et al., 2010b).

De la même façon, on pourra si nécessaire faire intervenir un expert technique en phase 2, afin d'aiguiller les ingénieurs de l'équipe qui ne peuvent pas non plus avoir un savoir absolu sur tous les sujets techniques.

La synergie des activités et l'alternance du rôle de spécialiste/non-spécialiste constituent un des moteurs de ces étapes d'abstraction. Elles nécessitent par conséquent une bonne communication et une collaboration étroite entre les différents membres de l'équipe.

5.4.2.3 Étape 3 : Projetez les problèmes dans le champ de la biologie pour identifier des espaces de résolution

Définitions et sémantiques de l'étape 3

En nous basant sur la phase descriptive, l'étape 3 est redéfinie. La transposition, dans le contexte de la biomimétique, est le processus cognitif par lequel les modèles conceptuels génériques, et donc indépendants des champs scientifiques, peuvent être associés à des éléments des deux champs scientifiques, technologique et biologique (Figure 5.5).

La transposition apparaît alors comme une projection dans un champ conceptuel, rendue possible par l'abstraction effectuée dans l'étape 2. Cette projection suit les similarités « *dérivées du phénomène biologique sans transférer les acteurs biologiques* » (Mak et al., 2004). On observe ainsi l'établissement de « *points communs relationnels indépendamment des objets dans lesquels ces relations sont intégrées* », c'est l'application d'un raisonnement analogique (Gentner, 1989).

Afin de guider les équipes dans le cadre du processus, les résultats de cette démarche de cartographie analogique sont nommés *espaces de résolution*. On remarque ici que ces espaces sont bien situés dans la biologie (Figure 5.6), démarquant l’approche proposée de la dérive préalablement identifiée (Chapitre 5, partie 5.3.2). La troisième étape est renommée : **"Projetez les problèmes dans le champ de la biologie pour identifier des espaces de résolution"**.

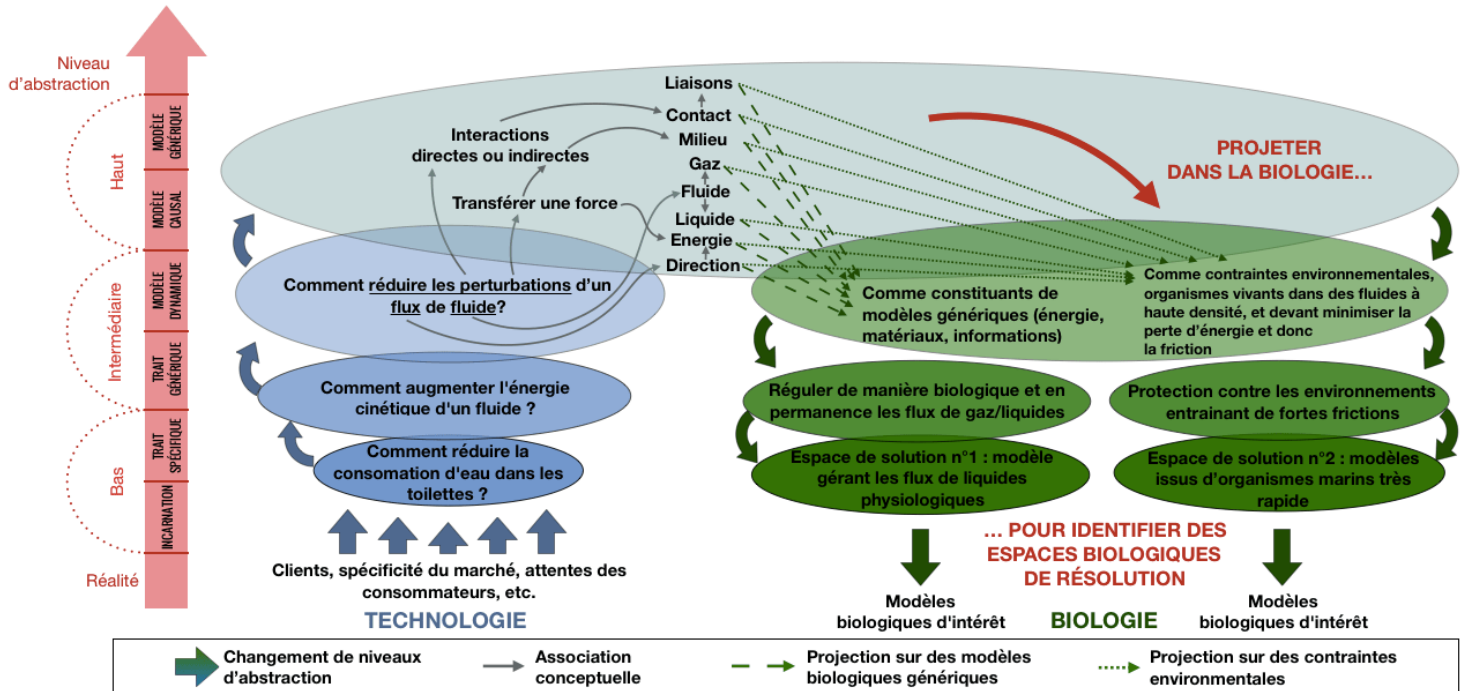


Figure 5.6 Identification d’espaces de résolution par des projections conceptuelles en biologie

À travers cette formalisation, les espaces de résolution apparaissent potentiellement de plusieurs types. Il sera notamment montré par la suite qu’il peut s’agir d’*Espaces Environnementaux de Résolution* (EER) ou d’*Espaces Fonctionnels de Résolution* (EFS). Les acteurs ayant une expertise biologique apparaissent alors centraux au cours de cette étape.

Pratique et intégration du biomiméticien lors de l’étape 3

Indépendamment de leurs types, les espaces de résolution sont identifiés parce qu’à un niveau d’abstraction donné ils présentent des contraintes analogues et contiennent ainsi des organismes adaptés à ces contraintes, c’est-à-dire des solutions potentielles.

Ils définissent une carte délimitant les zones de recherche de hautes potentialités de celles qui semblent moins pertinentes. Cette définition des espaces de résolution s’effectue par l’identification de paramètres caractéristiques et du réseau conceptuel qui leur est associé (mots-clés). Ces éléments permettront ensuite aux équipes de conception d’accéder (requêtes) à des espaces de résolution et d’identifier les modèles biologiques d’intérêt qu’ils contiennent lors de l’étape 4. Outre cette formalisation théorique, cette étape de projection sera concrètement guidée dans la suite de cette partie.

L'intérêt de cette nouvelle formalisation est qu'elle est parfaitement compatible avec les approches fonctionnelles actuelles tout en permettant l'intégration des activités du biomiméticien :

- **Activité 12. Assurer la pertinence de la projection fonctionnelle.** Étant donné sa connaissance du monde et des concepts biologiques il peut ajuster certains éléments sémantiques.
- **Activité 13. Utiliser des outils et raisonnements biologiques pour effectuer la projection.** Des champs biologiques, telle que l'Écologie, peuvent être utilisés comme des moteurs de l'identification d'espaces de résolution.

L'activité 13 est entièrement basée sur un raisonnement biologique et donc sur l'expertise du biomiméticien nouvellement intégré. Ces approches complémentaires, synergiques, d'appréhender la pratique de l'étape 3 sont présentées en détail dans la partie suivante.

Formalisation d'approches biologiques pour la projection des problèmes abstraits

En biologie, l'espace contenant un organisme donné, et donc tous les modèles biologiques qui lui sont associés (un organisme pouvant représenter plusieurs modèles), est appelé son environnement.

Par ailleurs, le champ biologique qui étudie « *l'interaction entre les êtres vivants et leur environnement* » est l'Écologie (British Ecological Society, online). Enfin, comme précisé dans le chapitre 2 (Chapitre 2, partie 2.3.1.5), l'évolution des êtres vivants est intrinsèquement liée aux conditions environnementales, et donc aux contraintes, auxquelles ils sont exposés.

En nous basant sur ces différents concepts, le principe de sélection naturelle sera utilisé comme un moteur de l'identification d'espaces de résolution pertinents. Deux principaux types de problèmes sont distingués.

Les problèmes sous la forme : Comment concevoir un système qui résiste à (+ contraintes)

Tout d'abord, certains problèmes peuvent être associés à la capacité d'un système biologique à résister à des contraintes externes données. Les espaces environnementaux de résolution à considérer sont alors facilement extractibles car ils sont liés à des conditions climatiques et donc des propriétés physicochimiques comme la chaleur, l'humidité, le pH, etc.

Dans ce cas, il est intéressant de considérer à la fois les espaces combinant diverses contraintes et les espaces ne présentant qu'une seule contrainte potentiellement poussée à son maximum. En effet, plus la pression de sélection sur un trait est forte, plus la survie des organismes mal adaptés à ce caractère est affectée. Suivant cette logique il peut être intéressant d'amplifier une contrainte d'intérêt jusqu'à un extrême pour identifier les organismes spécifiquement adaptés (voir les « *champion adapters* » (Helms et al., 2009), ou « *extreme environments* » (Yen et al., 2014)). Cela ne signifie pas que ces organismes sont meilleurs, seulement qu'ils se sont spécialisés au détriment d'autres traits. Bien qu'ils aient leur pertinence, ces environnements extrêmes peuvent par conséquent potentiellement conduire à des solutions plus monofonctionnelles.

Une telle approche basée sur les extrêmes est notamment proposée dans la littérature pour soutenir la recherche de non-biologistes (Kennedy et al., 2018). Elles n'en apparaissent que plus pertinente pour un biomiméticien.

Les problèmes sous la forme : Comment concevoir un système qui (+ fonctions)

Contrairement au type de problème précédent, ces problèmes portent instinctivement à formuler des Espaces Fonctionnels de Résolution (EFR) et il devient alors ici beaucoup plus difficile de formaliser des EER. Le format fonctionnel est largement privilégié dans les méthodologies actuelles, par exemple, « *Comment la nature + fonction* » est la forme générique des requêtes utilisées sur AskNature.

Cette tendance s'explique notamment car elle s'intègre au raisonnement fonctionnel des ingénieurs. Cependant, comme décrit dans l'état de l'art, ces démarches mènent à un ensemble de freins dans la mesure où la biologie n'approche que rarement le monde vivant via un prisme fonctionnel.

D'un point de vue écologique, les liens entre les problèmes abstraits et les EER existent malgré l'orientation fonctionnelle du problème. Dans certains cas, ces projections sont faciles à effectuer. Par exemple, si l'on cherche « *quelles entités biologiques effectuent l'extraction d'oxygène de l'eau ?* » le biotope générique, dans ce cas un habitat aquatique, semble clair malgré le type fonctionnel de la demande.

Dans d'autres cas, les caractéristiques de l'espace ne sont pas facilement déductibles. Le biomiméticien doit alors se rendre compte que, d'un point de vue biologique, la formulation fonctionnelle se concentre sur une solution, et non sur un problème (Vincent, 2017). La confusion entre problème et solution est ici au centre du changement à effectuer.

L'extraction de l'oxygène de l'eau est une solution au problème posé par le manque d'oxygène accessible en milieu aquatique. Par conséquent, extraire l'oxygène de l'eau n'est pas la seule solution à ce problème. Certains chemins évolutifs ont ainsi conduit des organismes à faire surface périodiquement afin de respirer tout en adaptant les mécanismes de d'extraction et de stockage de l'oxygène de l'air (ex. Les baleines).

De cette manière le biomiméticien peut questionner « *Dans quelles circonstances, l'extraction de l'oxygène de l'environnement devient un trait fortement choisi ?* » et donc « *Quels peuvent-être les problèmes qui mènent à une adaptation biologique visant l'extraction d'oxygène ?* ». Un ensemble de scénarios émergent de cette formalisation, l'environnement peut être appauvri en oxygène (ex. en haute altitude), les molécules d'oxygène peuvent être emprisonnées dans la matrice du milieu (ex. dans le sol), l'oxygène peut être dissous dans un milieu dense (ex. milieu aquatique), etc. Des contraintes environnementales peuvent par conséquent être déduites des approches fonctionnelles, « *Quels organismes survivent ou remplissent une fonction donnée pour survivre à des contraintes environnementales données ?* »

Des contraintes environnementales aux Espaces Environnementaux de Résolution

À partir des contraintes environnementales, plusieurs classifications, telles que la classification Köppen-Geiger (Climate Change & Infectious Diseases Group, 2019) ou celle des zones du vivant de Holdridge (Holdridge, 1947), ont été conçues pour diviser la terre en espaces écologiques. Quelle que soit la classification choisie, les préconisations développées s'appliquent.

La classification de Olson est choisie comme référence (Olson et al., 2001; Olson et al., 2002) dans la mesure où elle est basée non seulement sur des paramètres climatiques, mais aussi sur des paramètres provenant de la biogéographie⁸. Selon l'échelle considérée, cette classification divise la terre en 20 écozones⁹ (8 terrestres et 12 marines), 28 biomes¹⁰ (14 terrestres, 7 marins et 7 d'eau douce) et 1 525 écorégions¹¹ (867 terrestres, 232 marines et 426 d'eau douce).

Dans la mesure où les biomes synthétisent les interactions entre les contraintes environnementales et les espèces associées, ils sont identifiés comme des EER d'intérêt.

De plus, étant donné qu'un biotope donné peut être associé à différentes biocénoses en fonction de son emplacement géographique, l'examen dans un deuxième temps d'une phase de divergence basée sur des paramètres géographiques permet au biomiméticien d'identifier un deuxième niveau d'EER. En effet, chaque biome représente un ensemble de toutes les zones géographiques combinant l'association d'une biocénose avec un biotope donné, les écorégions. Par exemple, le biome « Déserts et arbustes xériques » correspond à 99 écorégions à travers le monde (figure 5.7).

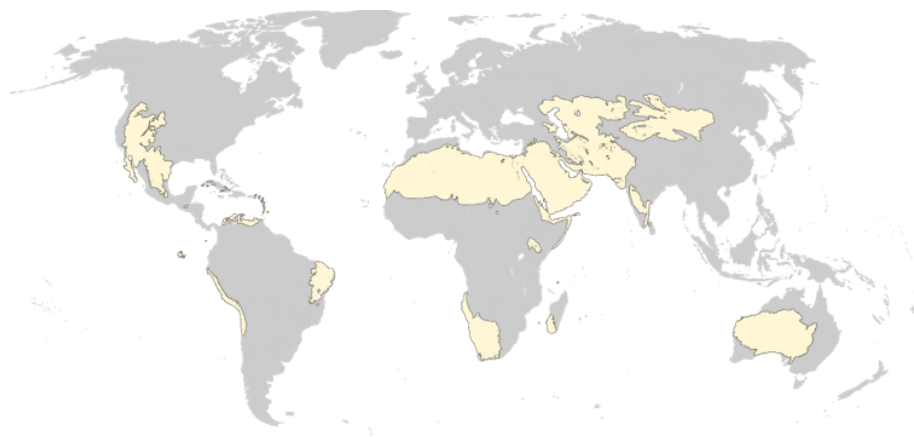


Figure 5.7 Carte des 99 écorégions représentant le biome "Déserts et arbustes xériques".

⁸ La biogéographie est définie comme « l'étude de la répartition géographique des plantes et des animaux. Elle s'intéresse non seulement aux niches écologiques, mais aussi aux facteurs responsables des variations de distribution. » (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 1998).

⁹ Écozones : « représentent des faunes et des flores uniques de différents continents ou bassins océaniques » (Olson et al., 1998)

¹⁰ Biomes : « différentes régions du monde qui partagent des conditions environnementales, une structure d'habitat et des modèles de complexité biologique similaires et qui contiennent des communautés ayant des structures et des adaptations similaires » (Olson et al., 2001)

¹¹ Écorégion terrestre : « des unités de terre relativement grandes contenant un assemblage distinct de communautés naturelles et d'espèces, avec des limites qui se rapprochent de l'étendue initiale des communautés naturelles avant un changement majeur d'utilisation des terres. » (Olson et al., 2001).

Selon le projet, les ressources et l'expertise des biomiméticiens, les biomes, les écorégions, ou même des écosystèmes très spécifiques peuvent être considérés comme des EER.

À travers cette description de la projection de problèmes abstraits en contraintes environnementales puis en EER, les compétences du biomiméticien permettent la proposition de pratiques ouvrant de nouveaux accès à la biologie.

Limites actuelles des approches biologiques lors de l'étape 3

Étant donné que l'utilisation de ces approches en biomimétique sont entièrement nouvelles et originaires adaptées à des utilisations en biologie, les outils écologiques ne sont pas conçus pour être utilisés en biomimétique. Ils ne sont donc pas ergonomiques dans ce type d'utilisation et devront être adaptés. Nous espérons que l'intégration de biomiméticiens dans les équipes de conception conduira à la conception d'une nouvelle génération d'outils biomimétiques sur ces aspects.

Par ailleurs, les préconisations se concentrent sur la formalisation d'une approche liée à l'écologie mais un ensemble d'autres approches biologiques peuvent encore être considérées dans cette phase. Par exemple, le concept de contraintes environnementales peut avoir une signification différente en fonction de l'échelle et du domaine biologique considéré, quelles sont les contraintes environnementales d'une cellule ? d'un organe interne ? Du microbiote intestinal ? Là où l'écologie est pertinente pour explorer une partie de la diversité biologique, la microbiologie (et sa micro-écologie), ou encore la biologie moléculaire et cellulaire, peuvent également être utilisées comme des approches pertinentes lors de l'étape 3.

La présentation des prescriptions méthodologiques pour cette première étape centrée sur la biologie souligne une intégration profonde des biomiméticiens telle que préconisée dans la partie descriptive. Des activités spécifiques à leur formation en biologie, et synergiques avec celles des autres membres de l'équipe, sont notamment identifiés. Ils doivent ainsi permettre à l'équipe d'avoir une meilleure agilité grâce à leur capacité pour formaliser les voies de projection ciblant divers domaines de la biologie et donc divers groupes de modèles composant la diversité du vivant.

5.4.2.4 Étape 4 : Recherchez et identifiez les modèles biologiques potentiels

Définitions et sémantiques de l'étape 4

La 4^{ème} étape a pour but de déterminer des solutions issues du monde biologique. Cette phase nécessite donc de rechercher et d'identifier parmi les résultats des recherches ceux qui sont pertinents. Ces observations sont largement répandues dans la littérature et certains processus choisissent même de séparer ces deux phases de recherche et d'identification (Weidner et al., 2018). Cependant, le caractère continu et le lien intrinsèque entre ces deux phases justifie selon nous leur rassemblement en une seule étape. Par la prise en compte de ces différents éléments et l'harmonisation avec la sémantique utilisée dans le reste du processus, l'étape 4 est renommée : « **Recherchez et identifiez les modèles biologiques potentiels** ».

Par ailleurs, le terme *modèle*, s'il fait écho à l'étape d'abstraction et de ce fait à son sens en analogie, peut porter à confusion dans le cadre de cette étape et ne précise pas par lui-même sa nature biologique. Pour éviter toute incompréhension par les équipes, et assurer une considération commune des concepts utilisés par la suite, un ensemble de définitions utilisées dans ce manuscrit sont précisées :

- **Modèle biologique** : système biologique qui résout un problème donné. Par exemple, les branchies forment un modèle biologique permettant les échanges gazeux passifs entre deux liquides devant être maintenus séparés. On précisera ici qu'un modèle biologique est souvent multifonctionnel.
- **Organisme porteur** : Organisme biologique porteur de tout ou partie du modèle biologique auquel il se réfère. On rappellera également ici que dans ce contexte un organisme est considéré comme le représentant générique d'une espèce donnée.

Les approches biomimétiques actuelles évitent le plus souvent le niveau de l'organisme pour se concentrer sur les modèles biologiques par le prisme fonctionnel. Pourtant, les organismes sont les concepts fondamentaux de la recherche en biologie et sont au cœur même des classifications et raisonnement évolutifs. Il apparaît donc pertinent de prescrire leur revalorisation et de les considérer comme des solutions intermédiaires d'intérêt.

Dans certains cas, le modèle biologique est une partie de l'organisme porteur. Par exemple, tout organisme désertique présente un modèle biologique de résistance à la chaleur. Cependant l'identification de ces organismes porteurs ne représente qu'un premier pas vers l'identification des modèles et par la suite des solutions.

Dans un autre type de cas, l'organisme porteur ne représente qu'une partie du modèle biologique. Celui-ci est alors basé sur la structuration d'un ensemble d'organismes. À nouveau, identifier un organisme apparaît comme une première étape vers l'identification de solutions.

Enfin, un *organisme porteur* peut également être équivalent à un modèle *biologique*, notamment lorsque la stratégie biologique est de nature comportementale.

À travers ces différents concepts et en poursuivant la démarche de l'étape 3, la partie suivante décrit les potentialités pratiques et d'intégration des biomiméticiens.

Pratique et intégration du biomiméticien lors de l'étape 4

Dans la pratique, cette 4^{ème} étape apparaît intrinsèquement itérative. Chaque recherche, représentée par une requête, peut conduire à la création de nouvelles associations conceptuelles et à la génération de nouveaux mots-clés à utiliser dans la phase de recherche à venir. Chaque itération conduit donc l'équipe à préciser les espaces de résolution, voir à en identifier de nouveaux, augmentant au fur et à mesure la pertinence et le nombre de modèles.

Les activités des biomiméticiens lors de l'étape 4 sont formalisées sur deux aspects : l'accompagnement des autres membres de l'équipe dans la manipulation des données biologiques lors d'approches préexistantes et la proposition de nouvelles démarches pratiques. Celles-ci sont regroupées en quatre activités :

- **Activité 14. Expliciter les concepts biologiques clés.** De rapides apports sur des points de vocabulaire et des concepts peuvent permettre d'améliorer considérablement la compréhension de l'équipe.
- **Activité 15. Orienter les recherches.** Il s'agira d'évaluer les résultats en cours de recherche, guider les membres de l'équipes vers les solutions les plus pertinentes pour gagner en efficacité, limiter les frustrations, les fixations sur des pistes inadaptées et par conséquent réduire les risques.
- **Activité 16. Utiliser des approches existantes avec une expertise en biologie.** Grâce à leurs compétences, les biomiméticiens ont accès à des informations biologiques brutes non formalisées, « *unadapted* » (Helms et al., 2015), aux autres membres de l'équipe.
- **Activité 17. Utiliser des outils et raisonnements biologiques pour amplifier ou effectuer la recherche.** Un ensemble de champs biologiques, tels que l'Écologie ou la Systématique, peut apparaître pertinent pour rechercher des modèles issus de données biologiques brutes non triées, « *unfiltered* » (Helms et al., 2015).

De même que dans l'étape 3, l'activité 17, spécifique à l'approche biologique, sera décrite en détail dans la partie suivante. En plus de la poursuite de la démarche basée sur l'Écologie précédemment présentée, les apports potentiels des démarches phylogénétiques, issues du champ de la Systématique (Chapitre 2, Partie 2.3.1.6), sur cette étape de recherche d'organismes sont explicités.

De l'Espace Environnemental de Résolution (EER) aux organismes porteurs

Tout d'abord, par une approche « classique » de la recherche de modèles, les informations caractérisant l'EER précédemment identifié sont susceptibles d'être utilisées pour générer des mots-clés et des requêtes. La recherche peut par la suite être menée sur le Web ou sur les bases de données biomimétiques actuelles.

D'un point de vue écologique, de nombreuses bases de données sur la biodiversité sont spécialisées dans l'évaluation de la biodiversité de zones géographiques spécifiques. Ces bases de données peuvent se concentrer sur un taxon spécifique, comme Avibase sur les oiseaux (Avibase, 2018), une région spécifique, comme la base de données sur la biodiversité du Comité Scientifique de la Recherche en Antarctique (SCAR, 2017), ou rassembler un large éventail d'espèces distribuées dans le monde entier comme la base de données conçue par le GBIF, Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2019). Diverses fonctionnalités, telle que la carte interactive de la base de données GBIF (6 586 578 espèces répertoriées le 29.02.20), peuvent permettre aux biomiméticiens d'identifier les *organismes porteurs* présents dans un EER d'intérêt.

Par ailleurs, la recherche d'articles scientifiques dans la littérature spécialisée en écologie et traitant de la biodiversité d'EER spécifiques peut également permettre d'identifier des *organismes porteurs*.

Outre l'Écologie, le champ de la Systématique apparaît également comme un moteur pertinent de la recherche d'organismes porteurs.

Approches Systématique et recherche d'organismes porteurs

Comme précisé dans l'état de l'art (Chapitre 2, Partie 2.3.1.6), la systématique est le champ biologique classant les êtres vivants. Plus précisément, nous prendrons ici l'exemple de la phylogénie qui étudie la parenté ancestrale de groupes d'organismes, vivants ou éteints.

Les outils phylogénétiques offrent un moyen d'utiliser des données biologiques (notamment moléculaires) pour amplifier la recherche d'organisme. À partir d'un organisme porteur, identifié par des outils biomimétiques classiques ou par des stratégies écologiques, ces approches peuvent conduire à la caractérisation de taxons¹² entiers. Ainsi, un arbre phylogénétique présentant suffisamment d'informations peut permettre aux biomiméticiens d'identifier un ancêtre commun hypothétique et un groupe monophylétique¹³ susceptible de posséder un trait caractéristique d'intérêt (Figure 5.8, A).

Chez certaines espèces de ce taxon, le trait étudié peut avoir changé ou même disparu, conduisant le biomiméticien à identifier des groupes paraphylétiques¹⁴ d'intérêt (Figure 5.8, B). Grâce à leur variabilité, potentiellement associée à des contraintes environnementales différentes, ces groupes présenteront diverses versions du trait original ayant subi des adaptations à d'autres contextes. Même les espèces qui ont perdu le trait peuvent être d'intérêt puisque nous pouvons nous demander pourquoi le trait a disparu et s'il a été remplacé par une autre adaptation, représentant une stratégie de résolution alternative.

Enfin, les biomiméticiens peuvent également baser leur raisonnement sur des études identifiant des groupes polyphylétiques¹⁵ (Figure 5.8, C). Ces groupes associent des espèces en fonction de similitudes de traits non issus d'un ancêtre commun, nommées homoplasies (ex. les ailes des oiseaux et des papillons). Ces ensembles se basent alors sur le principe d'évolution convergente, permettant de sortir d'une branche donnée d'un arbre phylogénétique, et élargissant encore la zone de recherche.

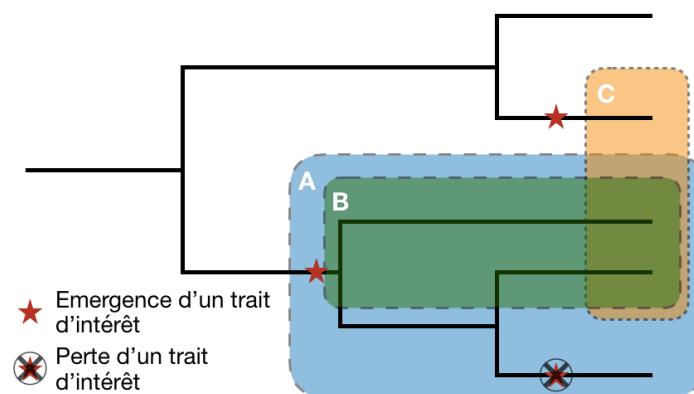


Figure 5.8 Illustration des concepts de groupe monophylétique (A), paraphylétique (B) et polyphylétique (C)

¹² Ensemble d'organismes regroupés en tant qu'unité formelle.

¹³ Se dit d'un groupe comprenant un ancêtre commun hypothétique et la totalité de ses descendants connus.

¹⁴ Se dit d'un groupe comprenant un ancêtre commun hypothétique et une partie seulement de ses descendants connus.

¹⁵ Se dit d'un groupe ne comprenant pas d'ancêtre commun hypothétique. Définition par (Lecointre et al., 2007)

L'application de ces outils biologiques offre ainsi de nouvelles façons d'effectuer la 4^{ème} étape du processus et notamment d'amplifier la recherche en exploitant les données biologiques avec des outils biologiques.

Les taxons émergent de ce fait comme des Espaces Phylogénétiques de Résolution (EPR). Après la projection depuis des problèmes abstraits (étape 3), l'utilisation de ce type de raisonnement lors des itérations de l'étape 4 peut donc mener à la multiplication et au recouplement des espaces de résolution (Figure 5.9).

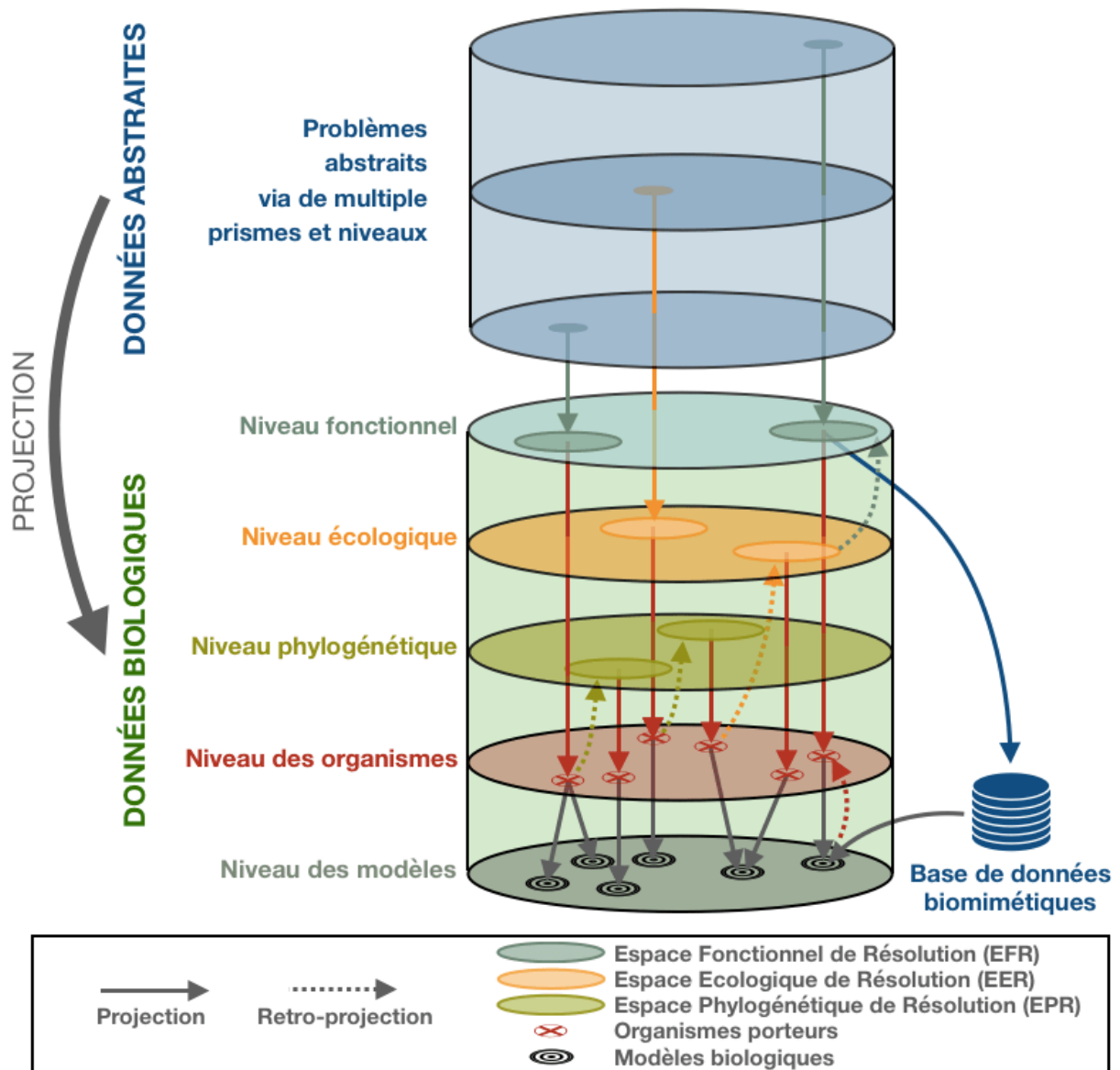


Figure 5.9 Amplification de la recherche grâce à des outils biologiques

Comme expliqué précédemment, ces approches biologiques permettent l'identification d'*organismes porteurs* qui ne sont que des réponses intermédiaires aux problèmes rencontrés. Les *modèles biologiques* associés doivent ensuite être identifiés et extraits.

Des organismes porteurs aux modèles biologiques d'intérêt

Dans le contexte de cette étape de recherche, différentes catégories d'organismes porteurs sont identifiées :

- **Les organismes porteurs intermédiaires**, conduisent par la génération de mots-clés d'intérêt ou par des outils et des raisonnements biologiques à l'identification d'organismes de référence.
- **Les organismes porteurs de références**, associés à des études scientifiques investiguant avec précision un modèle biologique donné. Ils correspondent à la dernière étape vers l'identification des modèles biologiques. Ainsi, les bases de données ne recueillent que des porteurs de référence.
- **Les organismes porteurs de diversification**, proposant des versions alternatives des modèles biologiques décrits dans les porteurs de référence. Ils sont potentiellement moins étudiés et plus éloignés du contexte technique, mais ils représentent la diversité biologique entourant le modèle.

Les définitions de ces trois catégories (Tableau 5.12) offrent aux équipes de conception un cadre d'analyse au cours de la 4^{ème} étape. Celui-ci leur donne la possibilité de nommer les différents types de concepts auxquels elles sont confrontées et les aide à préparer la 5^{ème} étape en évitant la confusion des types d'organismes.

Tableau 5.12 Caractérisation des types d'organismes porteurs

TYPE D'ORGANISME PORTEUR	QUANTITÉ DE DONNÉES	UTILISATION PENDANT LE PROCESSUS
INTERMÉDIAIRE	Faible	Identifier les mots-clés et d'autres organismes porteurs
RÉFÉRENCE	Haute	Extraire des modèles biologiques de référence
DIVERSIFICATION	Moyenne	Compléter les modèles biologiques de référence

Face aux concepts décrits dans cette partie, il faut souligner que le type d'un organisme donné dépend du problème de conception ciblé, des progrès scientifiques, des choix et des compétences de l'équipe.

En permettant aux biomiméticiens de caractériser les informations qu'ils génèrent, cette formalisation des différents types d'organismes devrait soutenir la phase de recherche et l'identification de modèles biologiques pertinents. Alors que la recherche de modèles biologiques a été soulignée comme particulièrement difficile dans la phase descriptive, la recherche d'informations sur une espèce biologique donnée est en adéquation avec la structuration des connaissances biologiques et devrait donc être plus facile.

L'extraction finale des modèles biologiques repose ensuite sur l'existence d'études scientifiques ciblant le modèle biologique de l'organisme porteur étudié et sur les compétences des biomiméticiens à analyser la littérature scientifique.

Enfin, au vu de la structuration des champs biologiques, il sera plus facile d'identifier des laboratoires, équipes ou chercheurs spécialisés sur un organisme que sur un modèle biologique en cas d'absence d'informations suffisantes dans la littérature.

Limites actuelles des approches biologiques lors de l'étape 4

Un ensemble de limites émergent de ces stratégies :

- **Comme pour l'étape 3, les outils existants ne sont pas conçus pour une utilisation biomimétique.** Les articles sur la phylogénétique qui sont les plus susceptibles d'être trouvés traiteront principalement des classifications génétiques, de la distance génétique et des relations de parenté sans nécessairement mentionner leur implication sur les modèles biologiques. Plus que les arbres phylogénétiques en fonction des génotypes, les équipes biomimétiques ont besoin d'accéder aux phénotypes. Alors que ces études existent (Wong et al., 2015), elles sont souvent limitées à une branche spécifique et semblent très incomplètes à l'échelle générale. Un rassemblement et une structuration de ces études, tout en gardant un point de vue biologique, devrait fournir un outil extrêmement précieux pour cette phase 4.
- **Les approches basées sur les mécanismes évolutifs peuvent rapidement mener à des simplifications erronées.** Comme précisé par Fish, Full ou encore Yen (Fish et al., 2014; Full, 2001; Yen et al., 2011), le raisonnement biologique doit être appliqué avec méthode et rigueur pour prendre en compte les contraintes propres à l'évolution des systèmes vivants (section 2.3.2.1). Par exemple, en génétique un gène donné ne peut généralement pas être directement lié à un trait ou à une fonction donnée, l'analyse des arbres phylogénétiques doit donc être effectuée avec précaution.
- **Les approches présentées supposent que les données sont disponibles, ce qui n'est pas toujours le cas.** Si une espèce est identifiée dans une base de données, le biomiméticien pourrait ne trouver que très peu d'études phylogénétiques à son sujet. Ce manque d'informations apparaît comme un obstacle et devra être pris en compte par les équipes lors de la sélection dans l'étape 5.
- **L'extraction des modèles biologiques des organismes porteurs** est actuellement surmontée par la recherche bibliographique (études physiologiques, études fonctionnelles, études comportementales, etc.) et peut demeurer difficile. Cette difficulté est également confrontée lors des démarches classiques, cette limitation n'enlève donc pas l'intérêt de l'approche, mais souligne plutôt l'importance de l'expertise des biomiméticiens et le besoin d'outils adaptés.

Les biomiméticiens devraient permettre l'accès à des outils et raisonnements pratiques issus de la biologie et jusqu'à présent largement laissés de côté. Comme observé dans la phase descriptive, ces étapes centrées sur la biologie sont le lieu d'une implication profonde et

d'apports très importants de ce nouveau profil. De nouvelles voies de résolution du frein associé à la recherche des modèles biologiques sont ainsi préconisées, devant ainsi augmenter les capacités de l'équipe à affronter ces difficultés.

5.4.2.5 Étape 5 : Évaluez et sélectionnez les modèles biologiques pertinents

Définitions et sémantiques de l'étape 5

Cette étape est comprise par les équipes mais la phase descriptive a souligné la difficulté pratique à choisir des modèles biologiques d'intérêt. Pour mettre en évidence la nécessité d'une évaluation d'une part puis d'un processus de sélection approprié, cette étape est renommée « **Évaluez et sélectionnez les modèles biologiques pertinents** ».

Pratique et intégration du biomiméticien lors de l'étape 5

Le concept d'évaluation est directement associé à l'idée de juger les modèles biologiques sur un ensemble de critères. L'étape de sélection repose ensuite sur la comparaison de ces évaluations pour identifier les modèles ayant les meilleures chances de conduire à une solution applicable. Différents critères et outils de sélection existent déjà dans la littérature et ne seront pas précisés dans cette partie (Helms et al., 2014; Fayemi et al., 2015; Weidner et al., 2018).

Malgré ces différentes études, cette étape reste perçue comme difficile et l'intégration du biomiméticien peut alors apporter plusieurs pratiques d'intérêt :

- **Activité 18. Identifier de nouveaux critères à considérer.** Prise en compte de la multifonctionnalité des systèmes biologiques, du contexte environnemental, des différentes versions d'une même modèle, du fait que les modèles soient ou non sujet à une évolution convergente, croisement des informations fonctionnelles, écologique et phylogénétiques, potentiellement de critères sur les impacts environnementaux.
- **Activité 19. Récolter les données correspondantes aux critères identifiés.** Grâce à leur capacité à analyser la littérature en biologie, à leur maîtrise des concepts biologiques et à leurs connaissances.
- **Activité 20. Apporter un point de vue biologique sur les phases de sélections.**

Sur les supports pratiques de cette étape, les études existantes, préconisent l'utilisation de matrices (Badarnah et al., 2015) ou de tableaux comparatifs (Helms et al., 2014).

La capacité des biomiméticiens à récolter et à analyser de l'information biologique devrait permettre à l'équipe d'améliorer la pertinence des modèles choisis. L'étape 6 étant traitée en même temps que l'étape 3, la prochaine partie décrira l'étape 7 du processus

5.4.2.6 Étape 7 : Projetez les solutions en principes de conception et en solutions technologiques conceptuelles

Définitions et sémantiques de l'étape 7

De manière similaire avec l'étape 3, l'étape est renommée « **Projetez les solutions en principes de conception et en solutions technologiques conceptuelles** ». On distinguera ici deux éléments clés :

- **Les principes de conception**, formalisant les solutions abstraites en instructions guidant les phases de design conceptuel (ex. Structurer la surface du système technique pour assurer une variabilité d'interactions avec son environnement, Considérer des éléments de l'environnement du système technique comme des ressources, etc.). Il s'agit donc ici de la projection des solutions abstraites dans le domaine de la technologie mais à un haut niveau d'abstraction. Dans leur format, ces principes correspondent ainsi aux principes innovants des approches dérivées de la TRIZ (Chapitre 2, partie 2.4.2.2).
- **Les solutions conceptuelles**, résultats des séances de créativité appliquant les différents principes de conception aux sujets du problème étudié. Le raisonnement créatif permet alors le passage à une solution produite concrète, à un niveau d'abstraction beaucoup plus faible même s'il s'agit toujours de concepts.

Pratique et intégration du biomiméticien lors de l'étape 7

L'étape 7 voit les biomiméticiens passer du rôle de spécialiste à celui de non-spécialiste (passage à la technologie). Les équipes « classiques » de conception sont habituées aux étapes de créativité et semblent donc à même d'effectuer ces démarches.

En pratique, ces habitudes peuvent potentiellement conduire à sauter le passage par les principes de conception pour directement effectuer des étapes de créativité. Nous préconisons ici aux équipes de prendre le temps de définir ces principes pour éviter un certain nombre de fixations sur les premières idées d'application.

Les activités du biomiméticien sont alors formalisées comme suit :

- **Activité 21. Assurer que la projection est cohérente avec la solution abstraite.** Lors de la phase de projection, les biomiméticiens peuvent participer à la bonne prise en compte des éléments fondamentaux abstraits de la stratégie biologique dans la formalisation des principes de conception.
- **Activité 22. Proposer une variabilité d'approche lors des phases de créativité.** De même que pour l'activité 3, les biomiméticiens raisonnent dans un référentiel conceptuel et cognitif différent de celui des autres membres de l'équipe. La variabilité dans les idées qu'ils peuvent apporter lors des séances de créativité peut ainsi permettre de favoriser la divergence de solutions atypiques.

- **Activité 23. Supporter une vision systémique dans les concepts générés.** De même que dans l'activité 2, approcher la génération de solutions avec une vision systémique peut permettre à l'équipe de formaliser des axes de résolution mieux intégrés, prenant potentiellement en compte les impacts environnementaux notamment.
- **Activité 24. Valoriser la multifonctionnalité.** Les systèmes vivants étant principalement multifonctionnels, les biomiméticiens peuvent pousser l'équipe à générer des systèmes combinant plusieurs principes de conception et plusieurs fonctions, limitant une approche considérant un système pour chaque fonction.
- **Activité 25. Limiter la fixation technologique.** Un des risques de cette étape de projection est l'interprétation des principes de conception selon des concepts technologiques préexistants, conduisant à des fixations technologiques. Si l'utilisation de ces concepts n'est pas en soit un problème, elle risque cependant de réduire les potentialités innovantes de l'approche si elle est considérée dès le début des séances de créativité. Dans la mesure où ils ne connaissent pas ces concepts préexistants, les biomiméticiens auront tendance à casser ces points de fixation.

L'intégration des biomiméticiens sur les étapes de créativité peut par conséquent apporter un ensemble de leviers de résolution aux freins précédemment identifiés.

5.4.2.7 Étape 8 : Appliquez les principes de conception et les solutions conceptuelles dans le contexte initial et les testez

Définitions et sémantiques de l'étape 8

Les équipes de conception doivent remettre les solutions conceptuelles générées dans leur contexte initial et effectuer des phases de prototypage (simulations numériques d'abord, puis prototypages physiques) et de tests afin de s'assurer de l'efficacité réelle des solutions choisies. L'étape 8 est alors renommée : « **Appliquez les principes de conception et les solutions conceptuelles dans le contexte initial et testez les** ».

De même que précédemment, les notions de principes de conception et de solutions conceptuelles coexistent. En effet, certains principes de conception ne seront pertinents que dans le contexte du projet (ex. circularité de l'information et de la matière), ou dans les moyens de production envisagés (ex. concevoir à partir d'unités élémentaires simples), et devront donc être incarnés et testés spécifiquement sur ces étapes.

Pratique et intégration du biomiméticien lors de l'étape 8

Comme anticipé dans les phases descriptives, l'intégration des biomiméticiens préconisée dans cette dernière phase du processus est plus ténue. Les phases de modélisations numériques et de prototypages n'intégreront ainsi probablement pas de biomiméticiens.

Les phases de tests peuvent en revanche être le lieu d’une évaluation par le biomiméticien de l’impact environnemental des solutions finales envisagées (**Activité 26**).

5.4.2.8 Synthèse sur l’adaptation des étapes du processus permettant l’intégration des biomiméticiens

Cette partie 5.4.2 a permis la présentation d’un ensemble d’apports prescriptifs sur la pratique des biomiméticiens à travers 26 activités réparties sur l’ensemble du processus. Celles-ci permettent d’apporter de nouvelles approches pour faire face aux freins associés aux étapes centrées sur la biologie, cœur de notre problématique. Les connaissances en biologie des biomiméticiens rendent en effet possible un ensemble de pratiques et de raisonnements issus de la biologie, comme l’utilisation d’approches basées sur l’Écologie et la Systématique (Figure 5.10).

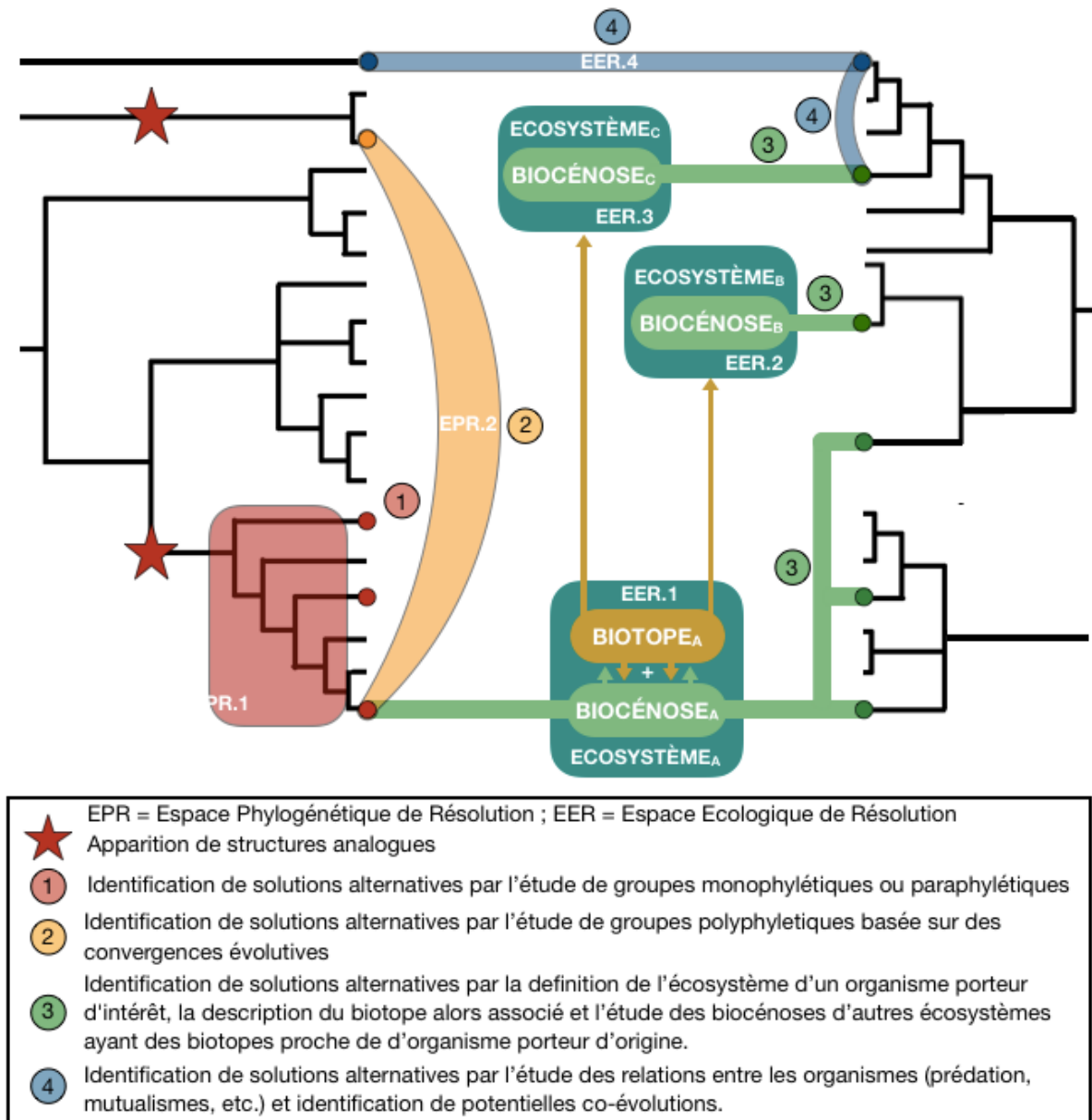


Figure 5.10 Synthèse des apports des champs de l'Écologie et de la Systématique pour la pratique biomimétique.

La formalisation de l'intégration opérationnelle des biomiméticiens au cours du processus permet également de caractériser leur degré d'implication en fonction des différentes étapes (Figure 5.11).

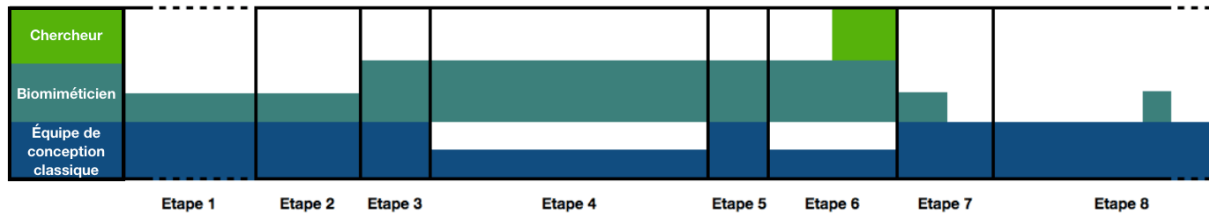


Figure 5.11 Implication des membres des équipes au cours du processus de conception biomimétique

Les définitions et sémantiques d'une part et les préconisations pratiques d'autre part nous conduisent à étoffer la première version du processus présentée en Figure 5.5 pour représenter d'une part le caractère interdisciplinaire du processus préconisé, mais également les nouvelles sémantiques visant à mieux guider les praticiens (Figure 5.12)

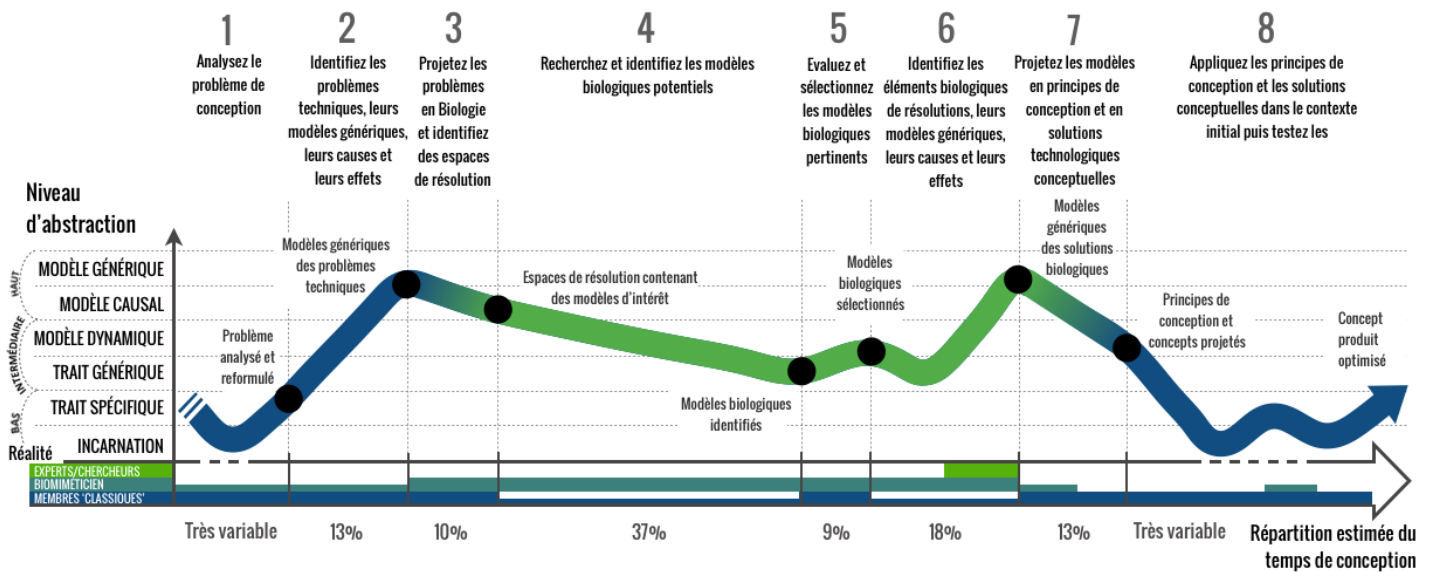


Figure 5.12 Le processus interdisciplinaire de conception biomimétique : les sémantiques

La partie suivante aborde alors la question du manque de recul identifié dans la partie descriptive, notamment comme la cause globale n°2 des risques considérés dans l'AMDEC. Pour faire face à ces risques, des jalons « Go/No Go » sont préconisés et mis en place sur trois étapes clés du processus biomimétique. Ces étapes de validations intermédiaires conduisent également au rétablissement et la proposition de nouvelles boucles d'itération, répondant aux attentes soulevées dans la partie 5.4.1.1.

5.4.3 Réduire les risques : prise de recul, évaluation, agilité

Les étapes de validation intermédiaire, nommées « *Go / No Go* », étudient si les éléments requis ont été rassemblés au cours des étapes réalisées et si les conditions sont en place pour effectuer correctement les étapes à venir.

De manière transversale, ces jalons sont également des moments de regroupement de tous les membres du projet afin d'assurer une cohésion d'équipe, une reconnaissance du travail mené et un temps de communication avec les décideurs.

5.4.3.1 Quand effectuer les « *Go / No Go* » ?

La préconisation de ces jalons est notamment soutenue par les conclusions des travaux de Fu « Quelles sont les étapes clés des méthodes biomimétiques afin d'établir des temps de réflexion ? » (Fu et al., 2014). L'identification des étapes clés à considérer est ici permise grâce à la phase descriptive de nos travaux (Chapitre 5, partie 5.3.4).

Les parties du processus qui sont les plus risquées (en termes de temps, d'expertises et donc de coûts) sont identifiées et trois « *Go/No Go* » sont mis en place.

La première phase considérée rassemble les étapes 1, 2 et 3, représentant 7 des 21 risques clés identifiés dans l'AMDEC. La deuxième partie regroupe les étapes 4 et 5, représentant environ 39 % de la durée du processus de conception conceptuelle et 5 des 21 principaux risques identifiés. La troisième partie est composée uniquement de la 6^{ème} étape, représentant par elle-même 14 % de la durée de conception conceptuelle, 4 des 21 principaux risques identifiés et comportant un besoin potentiel d'intervention d'experts externes. La quatrième partie rassemble les étapes 7 et 8, ce qui représente une durée très variable et 5 des 21 principaux risques identifiés. Ces quatre phases ont également été identifiées parce qu'elles se terminent toutes à des points où l'évaluation est particulièrement pertinente.

La mise en œuvre de trois « *Go/No Go* » à la fin des étapes 3, 5 et 6 devrait alors permettre d'imposer aux équipes de conception des temps de prise de recul, de valider les progrès du projet et de décrire si, sur la base des résultats obtenus, les ressources disponibles sont suffisantes pour effectuer les étapes restantes.

De plus, les étapes 3, 5 et 6 proposent des résultats intermédiaires pouvant être utilisés même si le projet doit être arrêté. Il s'agit alors d'une occasion pour les décideurs de choisir s'ils souhaitent continuer à utiliser une approche biomimétique ou revenir à une stratégie d'innovation plus « classique » tout en capitalisant sur les résultats déjà obtenus. Cette approche vise ainsi à améliorer l'agilité du processus.

En prenant en compte les risques au cours du processus, l'objectif poursuivi est de permettre aux praticiens d'assimiler peu à peu la démarche jusqu'à ce qu'ils atteignent la confiance, le savoir-faire et le recul nécessaires à la mise en place de la biomimétique comme une stratégie d'innovation considérée de manière systématique.

5.4.3.2 Comment effectuer les « Go / No Go » ?

Afin de guider les praticiens, cette partie offre diverses instructions sur la façon d’effectuer ces « Go/No Go » notamment par la formalisation d’arbres de décision qui proposent des critères à considérer.

De la même manière que pour les éléments précédemment préconisés il s’agit essentiellement ici de faire évoluer le cadre méthodologique. Les propositions décrites n’ont pas valeur de vérités et constituent une base à adapter aux spécificités de chaque équipe et projets puisque les paramètres à considérer peuvent être très variables en fonction du contexte et du champ d’application.

Premier Go/No Go : Validation du cadre technologique et biologique du projet

Pour effectuer le premier « Go/No Go » (fin de l’étape 3), six critères ont été identifiés couvrant les trois principaux points clés identifiés dans l’ADMEC (Chapitre 5, partie 5.3.3) : les progrès du projet, la pertinence des résultats obtenus et l’évaluation des ressources requises dans les étapes à venir. Pour aider les équipes de conception à effectuer cette étape, un arbre de décisions présente les différents critères et les conséquences (arrêt ou boucles itératives) d’un défaut de validation (Figure 5.13).

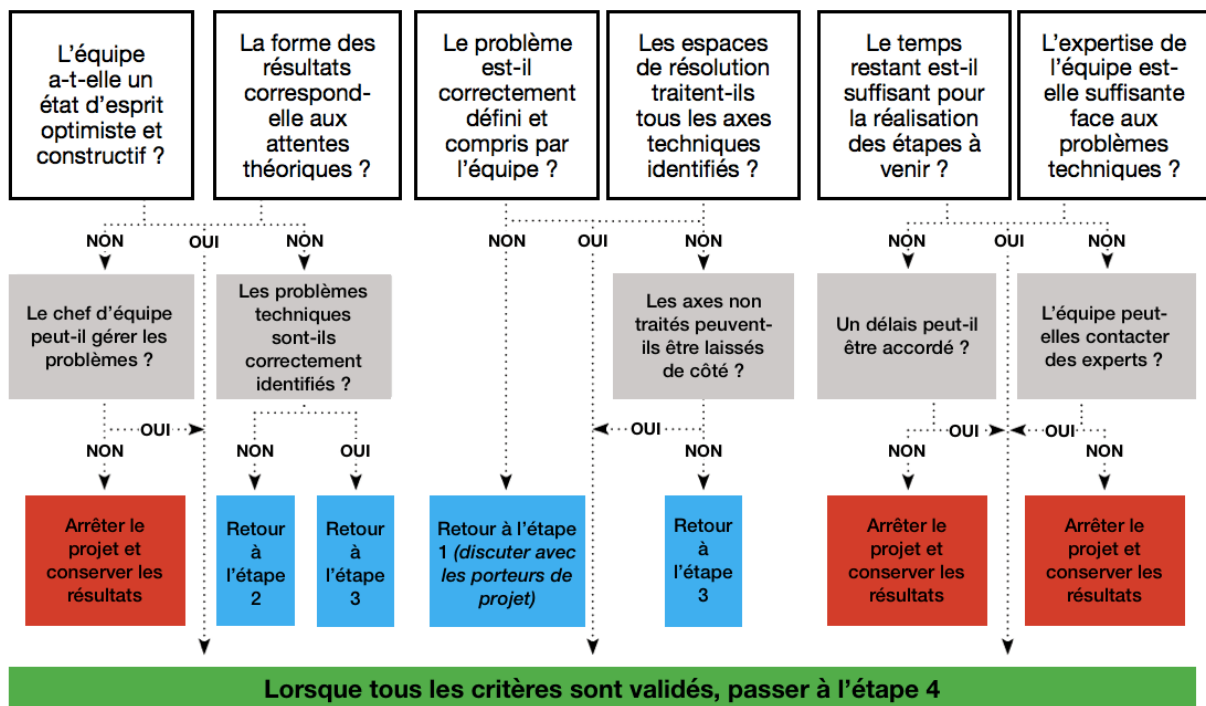


Figure 5.13 Arbre de décisions du premier Go/No Go

Cette première évaluation est cruciale puisque cette phase du processus représente relativement peu d’investissements spécifiques à la biomimétique (l’analyse des problèmes doit être effectuée indépendamment de la stratégie innovante choisie) mais elle définit l’ensemble du projet.

Deuxième Go/ No Go : Validation de la compatibilité entre les stratégies sélectionnées et le contexte du projet

Pour effectuer le deuxième « Go/No Go » (fin de l'étape 5), cinq critères ont été identifiés selon la même logique que pour le premier « Go/No Go » et sont présentés dans un arbre de décisions (Figure 5.14)

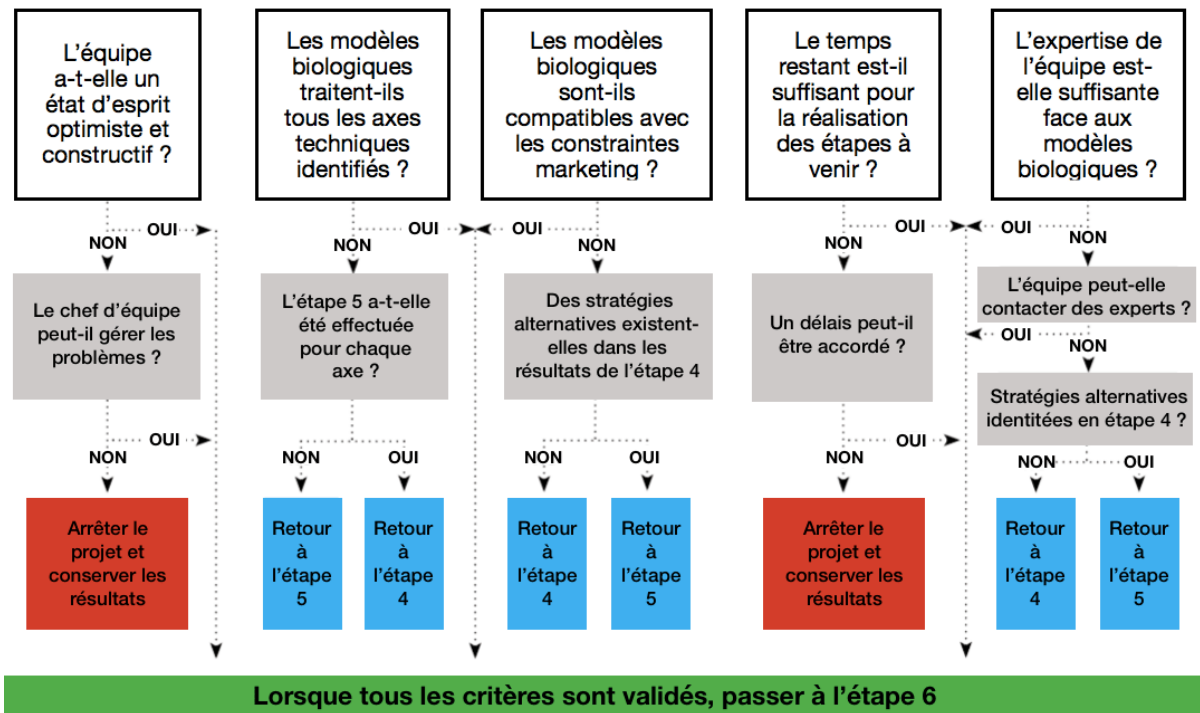


Figure 5.14 Arbre de décisions du second Go/No Go

La présence des biomiméticiens apparaît particulièrement pertinente lors des évaluations traitant des modèles biologiques.

Troisième Go / No Go : Validation de la compatibilité entre les stratégies abstraites et le contexte du projet

Le dernier « Go/No Go » est structuré en 6 critères et implémenté à la fin de la 6^{ème} étape (Figure 5.15).

De même que précédemment, la présence des biomiméticiens émerge également d'un grand intérêt lors de ce troisième « Go / No Go » pour valider la pertinence des solutions biologiques abstraites.

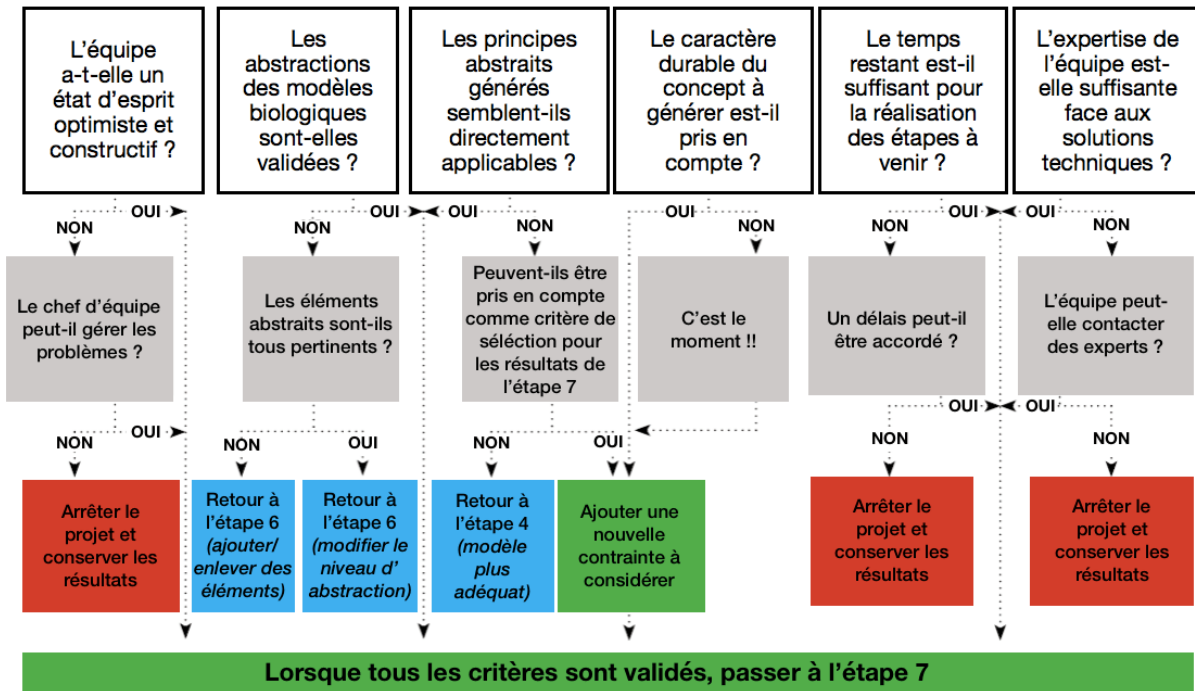


Figure 5.15 Arbre de décisions du troisième Go/No Go

Les travaux prescriptifs présentés dans cette partie ont permis de formaliser des évaluations intermédiaires et de proposer différents arbres décisionnels permettant d'accompagner le raisonnement des équipes lors de ces phases de réflexion. Ce dernier apport prescriptif sur le processus de conception vise à faciliter la prise de recul, la considération des risques et la détection des erreurs en s'appuyant sur les expertises des différents acteurs.

5.4.4 Synthèse des contributions prescriptives du chapitre 5

La partie 5.4 formalise un ensemble de contributions prescriptives répondant aux différents freins identifiés dans la partie descriptive initiale (Chapitre 5, partie 5.3.4). Associée à ces différentes préconisations pratiques, l'adaptation du cadre méthodologie de la biomimétique pour permettre une meilleure gestion des risques et une meilleure appropriation de la démarche par les équipes conduit à la proposition d'un processus final nommé « processus interdisciplinaire de conception biomimétique *technology pull* », ou « processus TPIB » (Figure 5.16). Une version du processus TPIB comportant un degré d'accompagnement encore plus fort est également présenté en annexe (Annexe 8, p. 314). Par la proposition de différentes versions de ce processus (Figure 5.5, 5.12, 5.16 et Annexe 8), sa logique de construction est explicitée et les équipes peuvent choisir l'accompagnement qui leur est le plus adapté.

Les préconisations présentées dans cette partie seront partiellement testées dans la partie suivante (partie 5.5), à travers une évaluation par des professionnels et une preuve de concept.

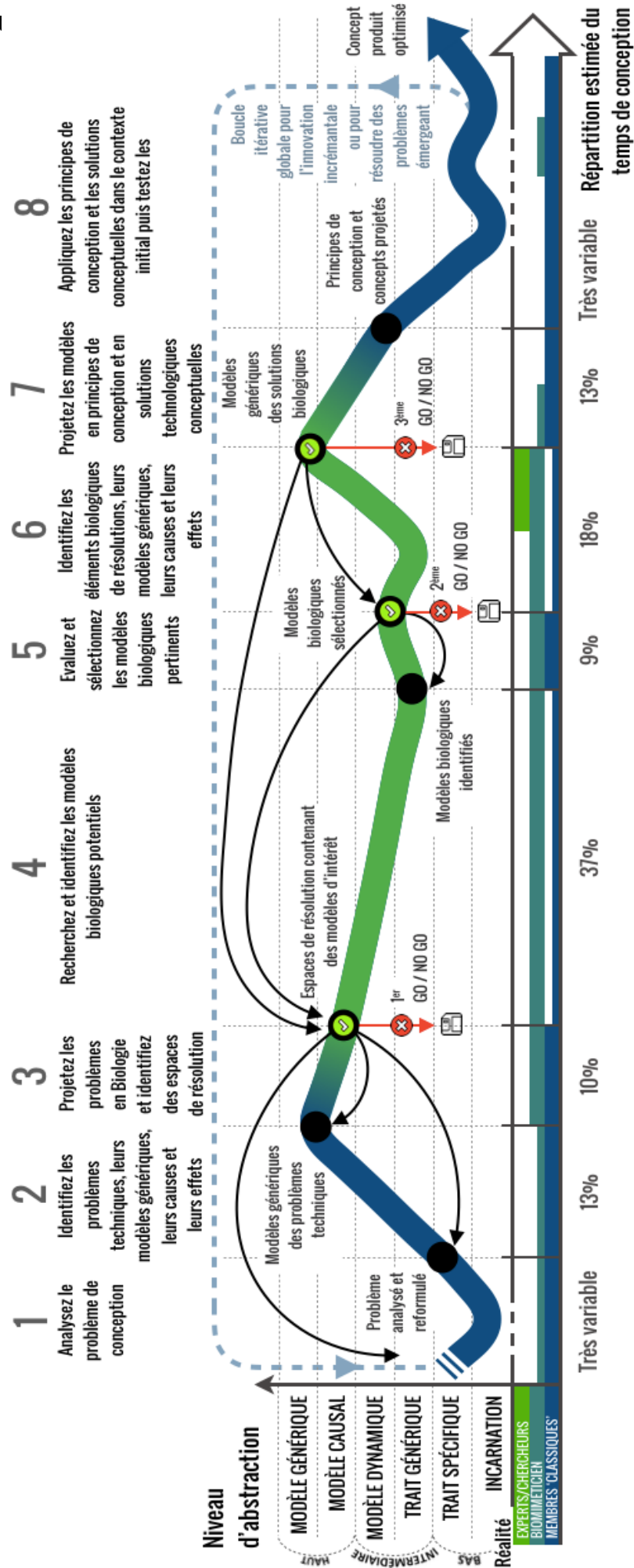


Figure 5.16 Le processus interdisciplinaire de conception biomimétique technology pull

Chapitre 5 – Adaptation du processus et des pratiques

Ce chapitre présente un ensemble de contributions prescriptives répondant à différents freins précédemment établis. Le tableau 5.13 explicite ainsi quels apports sont liés à quelles recommandations issues de la phase descriptive (Chapitre 4 et 5), soulignant les contributions du chapitre 5.

Tableau 5.13 Adéquation entre les recommandations de la phase descriptive et les apports du chapitre 5

	Axe horizontal	Axe vertical	Sémantique des étapes	Pratique des étapes	Ajout de Go No Go	Arbre de décision	Boucles itératives	Représentation processus
Recommandations sur le processus et à la pratique (Tableau 5.7)								
1 Caractériser précisément l'axe horizontal	V							V
2 Expliciter l'axe vertical		V						V
3 Structurer linéairement et conserver des itérations	V					V	V	V
4 Expliciter l'intégrations des biomiméticiens				V	V			
5 Reformuler la sémantique de certaines étapes		V						V
6 Redéfinir et formaliser la pratique de l'étape 3			V	V			V	V
7 Accompagner les praticiens durant les étapes	V	V	V	V	V			V
8 Soutenir la prise de recul et la détection des erreurs	V				V			V
9 Soutenir l'agilité du processus pour limiter les risques						V	V	V
10 Formaliser la pratique des biomiméticiens sur les étapes 3, 4, 5 et 6				V			V	
Recommandations associées au profil du biomiméticien (Tableau 4.17)								
1 Regard extérieur, large, systémique						V		
2 Savoir biologique horizontal				V		V		
3 Savoir biologique vertical (spécialisation sur certains sujets)				V				
4 Identification d'activité spécifiques				V		V		
5 Savoir-faire biologique applicable en biomimétique				V				
6 Savoir sur les concepts et process biomimétique								
7 Caractère interdisciplinaire de l'acteur, ouverture d'esprit				V				
8 Volonté de collaboration, de pédagogie, de vulgarisation				V	V	V		
9 Établissement d'un poste au sein de l'équipe de conception								
Recommandations associées à l'intégration du biomiméticien sur le processus biomimétique (Tableau 4.18)								
1 Intégration en continu du biomiméticien				V				V
2 Implication forte sur les étapes centrées sur la biologie				V				V
3 Intégration ponctuelle de chercheurs				V		V		V
4 Identification de missions spécifiques au cours du processus				V				V
5 Application d'outils issus de la biologie				V				
6 Adaptation des outils et du processus				V			V	V
7 Coordination des activités pour soutenir une activité synergique	V			V	V	V		
8 Génération de supports de communication						V		V
9 Prise en compte des difficultés sémantiques		V	V			V		V
10 Favoriser l'évaluation des risques	V			V	V	V		V
11 Favoriser l'évaluation des impacts environnementaux				V	V	V		

V = ciblé au moins en partie par un des apports prescriptifs décrits dans le chapitre 5

Après cette synthèse des apports de la phase prescriptive, la partie 5.5 vise à fournir une première évaluation correspondant à la phase descriptive II de la DRM (Chapitre 3, partie 3.3).

5.5 Évaluation des apports prescriptifs

Cette phase descriptive est composée de deux parties. Une évaluation de la représentation graphique du processus TPIB et une preuve de concept sur certaines approches biologiques proposées pour la pratique des biomiméticiens.

5.5.1 Expérimentation 2 : évaluation par des professionnels

Les sémantiques du processus interdisciplinaire de conception biomimétique *technology pull* évaluées lors de cette expérience sont différentes de celles présentées dans ce manuscrit. En effet, à partir des résultats obtenus et présentés ci-dessous, le processus a été amélioré. L'évolution des sémantiques est précisée dans la présentation des résultats ci-dessous (Tableau 5.16).

Objectifs

L'objectif poursuivi lors de cette expérimentation 2 est de faire évaluer la représentation du processus TPIB par un panel de professionnel sur son esthétisme, la logique des axes structurant le processus, les sémantiques utilisées sur le processus, la gestion des risques et l'acceptabilité globale.

D'une part ces retours doivent apporter des premiers éléments de validation de nos apports (sentiment d'accompagnement, compréhension, etc.), d'autre part ils doivent permettre d'identifier des leviers d'amélioration du processus proposé.

Évaluation de l'aspect visuel général

Le premier élément évalué lors de l'expérimentation 2 est l'aspect visuel général du processus. En effet, l'apriori des professionnels dû à l'esthétisme apparaît comme un facteur pouvant avoir un impact sur l'acceptabilité finale du processus. Celle-ci est évaluée sur une échelle de Likert à 5 niveaux. Afin d'éviter les biais dus à la variabilité des notations plus ou moins sévères des participants, les résultats présentés comparent le ou les processus ayant obtenu le meilleur score (Tableau 5.14).

Tableau 5.14 Comparaison des trois processus sur leur aspect visuel (n=32)

Processus	Identifier comme le plus esthétique
P1 : Processus unifié	74,2 %
P2 : Processus ISO	12,9 %
P3 : Processus TPIB	48,4 %
p-value (Fisher test) P1 vs P3	6.10 ^{-02*}
p-value (Fisher test) P2 vs P3	5.10 ^{-03**}

p-value : '***' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1.

Le processus TPIB a été mieux noté que le processus ISO mais le processus unifié apparaît comme celui considéré comme le plus esthétique par les professionnels. Même si ces résultats ne semblent pas strictement significatifs, les résultats montrent ici une tendance claire.

Axes structurant le processus

Le deuxième élément sur lequel les professionnels sont interrogés vise la validation de la logique proposée par l'axe horizontal et l'axe vertical ajoutés au processus (Tableau 5.15).

Tableau 5.15 Comparaison de la perception de la logique des axes (n=32)

Process	Je trouve l'axe horizontal logique	Je trouve l'axe vertical logique
P1 : Processus unifié	75,0 %	84,4 %
P2 : Processus ISO	87,5 %	53,1 %
P3 : Processus TPIB	96,9 %	87,5 %
p-value (Fisher test) P1 vs P3	2.10 ^{-02*}	1
p-value (Fisher test) P2 vs P3	0,5	5.10 ^{-03**}

p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1.**

Sur la base des résultats, les axes verticaux et horizontaux ont reçu le taux plus élevé de réponses positives sur la logique de leur structure. Malgré des significativités que partielles, ces résultats valident en partie (au moins un des axes significativement mieux perçus pour les deux processus comparés) le fait que la restructuration des axes améliore la compréhension de la logique de construction du processus.

Sémantique utilisée sur le processus

La sémantique des axes a été évaluée sans montrer de différences significatives et ne permettant donc pas de valider tel quel ce paramètre sur le processus testé. Sur les étapes, les sémantiques proposées ont même été moins bien comprises que sur le processus initial (nombre moyen d'étapes mal comprises ; P1 vs P3 ; - 0,71 vs - 1,4 ; p-value (t-test) = 0,02).

La sémantique présentée dans ce manuscrit prend alors en compte les commentaires obtenus lors de cette évaluation et propose une version améliorée du processus TPIB. Des sémantiques ont notamment été ajoutées pour caractériser les niveaux d'abstraction et les noms des étapes ont été modifiés (Tableau 5.16).

Tableau 5.16 Évolution des sémantiques des étapes à la suite de l'expérience 2

Processus	Processus TPIB V1	Processus TPIB V2
Étape 1	Analysez le problème	Analysez le problème de conception
Étape 2	Identifiez les interactions clés et extraire les contraintes sous-jacentes	Identifiez les problèmes techniques, leurs modélisations génériques, leurs causes et leurs effets
Étape 3	Identifiez les espaces de solutions biologiques	Projetez les problèmes en Biologie pour identifier des espaces de résolution
Étape 4	Recherchez et identifiez des solutions biologiques potentielles	Recherchez et identifiez les modèles biologiques potentiels
Étape 5	Évaluez et sélectionnez les stratégies biologiques pertinentes	Évaluez et sélectionnez les modèles biologiques pertinents
Étape 6	Caractériser les solutions biologiques et extraire les principes clés	Identifiez les éléments biologiques de résolution, leurs modèles génériques, leurs causes et leurs effets
Étape 7	Incarnez les stratégies biologiques très abstraites dans des concepts	Projetez les solutions en principes de conception et en solutions technologiques conceptuelles
Étape 8	Mettre en œuvre et tester	Appliquez les principes de conception et les solutions conceptuelles dans le contexte initial et les tester.

Gestion du risque

Le dernier aspect évalué était la perception du risque ainsi que les orientations apportées par les étapes Go/No Go nouvellement intégrées et les boucles itératives (Tableau 5.17).

Tableau 5.17 Comparaison de la capacité du processus à détecter les risques et à corriger les erreurs

Process	Le mieux noté sur la gestion de la détection des risques	Le mieux noté sur la possibilité de réduire les risques en corrigeant les erreurs
P1 : Processus unifié	58,6 %	60,7 %
P2 : Processus ISO	3 %	14,2 %
P3 : Processus TPIB	82,7 %	75,0 %
p-value (Fisher test) P1 vs P3	1.10 ^{-02*}	4.10 ^{-02*}
p-value (Fisher test) P2 vs P3	2.10 ^{-08***}	1.10 ^{-11***}

p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1.**

Tant les Go/No Go que les différentes boucles itératives ont été reconnus comme des leviers permettant de mieux gérer les risques. Ces résultats permettent donc d'apporter un premier élément de validation sur ces deux contributions.

Choix final

Enfin, les répondants ont choisi le processus qu'ils préféreraient utiliser dans le cas d'un projet (Tableau 5.18).

Les résultats obtenus montrent que les processus 1 et 3 sont significativement plus sélectionnés que le processus 2. Le processus TPIB est le processus le plus choisi malgré des résultats non significatifs.

Les commentaires sur la raison de ce choix final soulignent un compromis entre, d'une part, l'accessibilité, l'esthétique visuelle, la facilité d'utilisation, et d'autre part, l'accompagnement des équipes, la gestion des risques et la planification de projets biomimétiques. Le processus 1 est considéré comme « *plus facile à appréhender* », « *plus intuitif* », « *clair et simple* », « *représentant la pensée circulaire requise en biomimétique* » tandis que le processus 3 est perçu comme « *plus précis et détaillé* », « *plus complet* », « *moins risqué* », « *intégrant l'aspect planification et gestion de projet* ».

Tableau 5.18 Comparaison de l'acceptabilité finale des processus

Processus	Quel processus choisiriez-vous ? (Échantillon total, n = 27)	Quel processus choisiriez-vous ? (Échantillon ayant déjà utilisé P1 ou P2, n = 11)
P1 : Processus unifié	44,4 %	36,5 %
P2 : Processus ISO	7,4 %	9,0 %
P3 : Processus TPIB	48,2 %	54,5 %
p-value (Fisher test) P1 vs P3	1	0,6
p-value (Fisher test) P2 vs P3	8.10 ^{-04***}	6.10 ^{-02.}

p-value : '*' < 0,001 ; '**' < 0,01 ; '*' < 0,05 ; '.' < 0,1.**

En concentrant l'analyse sur les répondants ayant déjà utilisé P1 ou P2, la proportion de personnes choisissant le processus 3 augmente. Si la chute du nombre de répondants dans

l'échantillon ne permet pas d'atteindre des différences significatives, les professionnels du panel ayant déjà fait face aux difficultés décrites dans la phase descriptive sont plus enclins à choisir le processus TPIB. Les contributions prescriptives proposées sur la représentation du processus ont donc tendance à être accueillies de manière positive par les professionnels.

Dans l'ensemble, cette première partie de la phase d'évaluation (phase descriptive II) a permis d'apporter une première validation sur un ensemble de préconisations (Axes, Go/No Go, boucles itératives) et de proposer des leviers d'amélioration, notamment sur le nom des étapes. Ces résultats ont ainsi permis la formalisation d'une seconde version du processus, dont la sémantique modifiée est présentée dans ce manuscrit.

5.5.2 Preuve de concept : potentiel des approches biologiques

Les approches biologiques présentées en partie 5.4.2.4 seront ici étudiées à travers une preuve de concept.

L'objectif poursuivi est de témoigner de la faisabilité et de la pertinence des approches préconisées en partie 5.4.2, et ce malgré les lacunes en termes d'outils et les limites précédemment identifiées. Pour cela, nous nous sommes concentrés sur les approches phylogénétiques, qui peuvent paraître comme les moins instinctives pour des praticiens sans connaissance en biologie.

Le deuxième intérêt à effectuer cette preuve de concept sur l'approche phylogénétique est sa compatibilité avec les méthodes existantes. Elle est basée sur des organismes, peu importe qu'ils soient issus d'outils classiques ou bien d'approches Écologiques. La preuve de concept ciblera donc plus précisément les itérations de l'étape 4 à travers l'amplification du nombre d'espaces de résolution, l'identification d'organismes porteurs et l'extraction de modèles biologiques d'intérêt.

Afin d'illustrer de la manière la plus efficace possible les pratiques cibles, le problème générique de la protection thermique est utilisé. Le point de départ de la réflexion part d'un premier organisme d'intérêt *Atta vollenweideri*, une espèce de fourmis décrite dans AskNature.

Pour plus de clarté, la démarche utilisée s'est restreinte aux approches phylogénétiques, mais comme décrit précédemment, une fois qu'un nouvel organisme est identifié, son environnement peut également être déterminé, conduisant à combiner des approches écologiques et phylogénétiques (Figure 5.12). Au cours de trois itérations visant la recherche de taxon d'intérêt à travers des outils phylogénétiques (<http://tolweb.org/tree/> et <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/taxonomy>) et dans la littérature, divers mots-clés, articles, *organismes porteurs* et *modèles biologiques* sont identifiés (Tableau 5.19).

Tableau 5.19 Résultats de la phase d’amplification par les outils phylogénétiques

Itération	Espace de résolution : mot-clé	Outils	Organisme porteur : modèle biologique
1 ^{ère}	EFR.1 : Protéger de la température	- Taxonomie - AskNature	- <i>Atta vollenweideri (sp)</i> : Tourelles d’aération de la fourmilière.
2 ^{ème}	EPR.1 : Fourmis coupe-feuilles	- Arbres phylogénétiques	- <i>Vespidae (f)</i> - <i>Myrmicinae (sub.f)</i> - <i>Hymenoptera (o)</i>
3 ^{ème}	EFR.1.1 : Ventilation + EPR.2 : <i>Myrmicinae</i> EPR.3 : <i>Hymenoptera</i> EPR.4 : <i>Vespoidea</i>	- Google Scholar & ResearchGate - Arbres phylogénétiques - Littérature	- <i>Acromyrmex heyeri (sp)</i> : Adaptation de l’épaisseur et de la porosité des composants de la fourmilière (Bollazzi et al., 2010a; Bollazzi et al., 2010b). - <i>Atta sexdens (sp)</i> : Ventilation des fourmilières / déplacement sous la protection de canopées (Gils et al., 2012). - <i>Macrotermes bellicosus (sp)</i> : Radiation thermique et gradients thermiques grâce à des structures en crêtes / potentiel mécanisme de thermosiphon (Korb, 2003; Korb, 1999). - <i>Cataglyphis bicolor (sp)</i> : Cycles de ventilation discontinus pour limiter la perte d’eau (Lighton et al., 1993). - <i>Miliponini (tribes)</i> - <i>Vespiniae (sub.f) / Vespa (g) / Wasps (v.n.)</i>
4 ^{ème}	EFR.1.2 : Thermorégulation + EPR.4 : Wasps EFR.1.1 : Ventilation + EPR.2.1 : <i>Macrotermes bellicosus</i> EPR.3.1 : <i>Meliponini</i>	- Google Scholar & ResearchGate - Arbres phylogénétiques - Littérature	- <i>Vespa crabro (sp) / Vespa simillima (sp) / Vespa tropical (sp) / Vespa analis (sp)</i> : (Problème opposé) Utilisation de multiples couches de protection et de cavités extérieures isolant le nid / transfert de chaleur depuis l’extérieur par le biais des organismes habitant le nid / métabolisme générant de l’énergie thermique par l’activité musculaire (Martin, 1990). - <i>Geotrigona subterranean (sp)</i> : Utilisation du sol comme un tampon thermique / mise en place de gaines à plusieurs couches autour du nid (Barbosa et al., 2013). - <i>Apis mellifera (sp)</i> : Ventilation active du nid / porosité modifiée en fonction de la température / cavité isolante remplies d’air (Darchen, 1973). - <i>Dictyoptera (sup.o.)</i>

Organisme porteur de référence ; Organismes intermédiaires ; sp: espèces ; f: famille ; o: ordre ; sup: super; v.n. : nom vernaculaire ; g : genre ; EF/PR : Espace Fonctionnel / Phylogénétique de Résolution.

Les résultats du tableau 5.19 montrent qu’à partir d’un organisme porteur, 4 EPR et 2 sous-EFR ont été identifiés, conduisant à l’identification de 7 organismes porteurs de références supplémentaires répartis sur 4 familles desquelles sont extraits 15 modèles biologiques (dont 10 différents). Chaque boucle d’itération a conduit à l’amplification du nombre de solutions.

Un cas particulier peut être souligné, le mot-clé *thermorégulation* utilisé dans la quatrième itération traite de la régulation de la température, dans un sens ou dans l’autre (homéostasie thermique). Ainsi, un des modèles identifiés vise l’augmentation de la température à l’intérieur du nid. Étant donné que le problème ciblé est la « *protection contre la chaleur* », comprendre comment la chaleur augmente offre une autre façon de voir le problème qui peut apparaître tout à fait pertinente.

La preuve de concept présentée sur les pratiques biologiques souligne un premier type d’apport permis par les approches biologiques. Loin d’être une présentation exhaustive de la

pratique de biomiméticiens intégrés, elle permet de montrer dans un contexte simple en quoi ces nouveaux profils permettent de sortir du cadre méthodologique classique. L'implémentation de nouveaux outils devrait permettre à terme d'optimiser ces approches biologiques en se nourrissant des raisonnements et des concepts propres à ce champ scientifique.

5.5.3 Synthèse et limites des évaluations

Ces deux premières évaluations de la seconde partie descriptive de nos travaux permettent de valider en partie nos préconisations.

La représentation du processus TPIB est perçue comme mieux structurée, plus informative et réduisant les risques. De cette manière, elle répond à un ensemble de freins identifiés dans la partie descriptive.

La preuve de concept sur l'intégration d'outils biologiques a permis de montrer qu'il était effectivement possible d'utiliser des approches phylogénétiques simples afin de générer de nouveaux espaces de résolution et d'amplifier la phase de recherche et d'identification.

Un ensemble d'autres contributions restent à évaluer telles que les apports des raisonnements écologiques, les arbres de décision ou encore la mesure des impacts des différentes activités préconisées pour le biomiméticien.

Ces deux évaluations composent les premières phases de validation. Il s'agit essentiellement ici de s'assurer de leur pertinence par rapport à leur contexte. D'un point de vue scientifique il est à souligner qu'elles ne permettent pas pour l'instant de prédire du véritable impact sur le long terme de nos contributions.

Dans la mesure où le biomiméticien est encore un profil en construction, la difficulté de ce type d'évaluation apparaît évidente. Celles-ci ne pourront être effectuées en profondeur qu'au cours du temps, à travers l'utilisation des contributions méthodologiques présentées dans ce manuscrit par différentes équipes intégrant des biomiméticiens sur des projets variés.

5.6 Conclusion sur le chapitre 5

Ce chapitre 5 débute par l'analyse descriptive ciblée sur le processus de conception biomimétique et les pratiques qui lui sont associées (Chapitre 5, partie 5.3). À travers les observations et les recommandations émergeant de ces analyses, un ensemble de préconisations et de contributions prescriptives quant à la modification du processus et des pratiques ont été formalisées (Chapitre 5, partie 5.4).

Avec pour objectif de valider la pertinence de ces contributions, de premiers tests ont également été effectués (phase descriptive II). À travers une évaluation par des professionnels dans l'expérimentation 2 et une preuve de concept sur les approches biologiques préconisées, un ensemble d'éléments ont ainsi été testés (Chapitre 5, partie 5.5).

Ces travaux, et plus spécifiquement la description de l'intégration des biomiméticiens, ont montré d'une part qu'il « **est possible d'identifier un ensemble de méthodes et d'outils propres aux savoirs et savoir-faire issus de la biologie et pouvant être utilisés par le nouvel acteur lors du processus biomimétique** » (H.1.2) et d'autre part qu'il « **est possible d'adapter le cadre méthodologique de la biomimétique pour favoriser l'intégration d'un nouvel acteur formé en biologie lors des différentes étapes du processus de conception biomimétique** » (H.2.2).

Par conséquent, les apports du chapitre 5 valident les deux sous-hypothèses H.1.2 et H.2.2 développées dans cette thèse de doctorat (Figure 5.17).

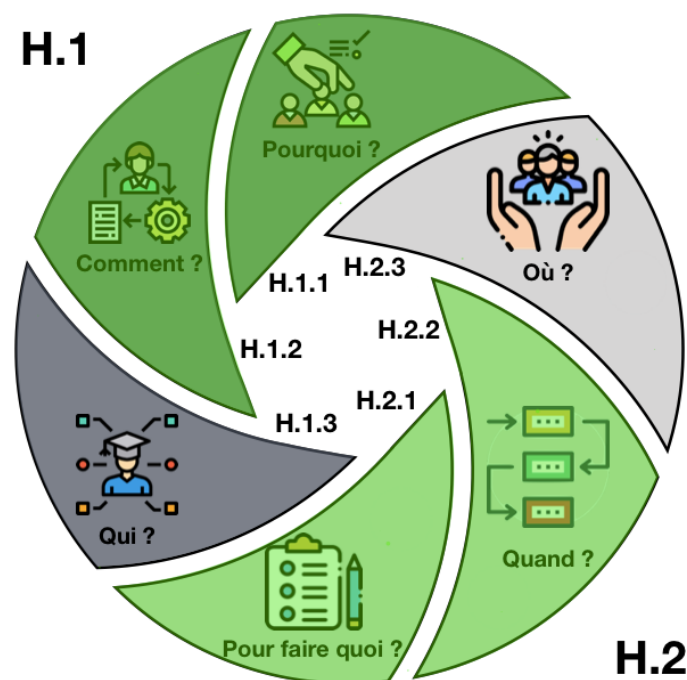


Figure 5.17 Validation des sous-hypothèses H.1.2 et H.2.2

Les approches formalisées et les limites soulevées dans ce chapitre ouvrent la voie à de nouveaux axes de recherche sur la méthodologie biomimétique. Centrés sur l'adaptation d'outils et de pratiques issus de la biologie, ceux-ci s'appliqueront ainsi à mettre à disposition des biomiméticiens les éléments leur permettant d'utiliser pleinement leur potentiel.

Chapitre 5 – Adaptation du processus et des pratiques

Le chapitre 6 présentera la dernière phase prescriptive de nos travaux sur le biomiméticien. Il s'agira de formaliser son intégration au sein des équipes de conception biomimétique, notamment par la résolution des difficultés ayant attiré à la communication interdisciplinaire.

Enfin, ce dernier chapitre de résultats synthétisera l'ensemble des contributions de ce manuscrit pour proposer une première définition des savoirs, savoir-faire et savoir-être caractérisant dans le détail le profil des biomiméticiens.



CHAPITRE 6

FORMALISATION ET INTÉGRATION DU BIOMIMÉTICIEN



6.1 Fondement et structuration du chapitre 6

6.1.1 Positionnement du chapitre 6 dans la démarche globale

À travers les précédents chapitres, il a été montré que l'expertise en biologie peut être considérée comme une réponse à différents freins identifiés dans la littérature (H.1.1), et que la « boîte noire » formée par le profil du biologiste en biomimétique peut être caractérisée. Cette démarche conduit à la formalisation du biomiméticien comme une synthèse des besoins et attentes des praticiens (H.2.1).

Sur ce même axe de réflexion, les différentes contributions prescriptives proposées au cours de ce manuscrit ont permis de mieux définir ce nouveau profil, modéliser son implication, ses impacts sur le processus (H.2.2) et décrire ses pratiques (H.1.2). Ces adaptations méthodologiques forment alors une énergie motrice d'évolution, le processus et les pratiques recommandent à présent l'intégration d'un nouveau membre au sein des équipes de conception biomimétique : le biomiméticien.

Basé sur ces premières contributions, le chapitre 6 montre qu'il « *est possible de structurer les échanges au sein des équipes de conception pour rendre synergique l'activité des acteurs aux spécialisations variées et prévenir les freins émergeant de l'interdisciplinarité* » (H.2.3).

Enfin, grâce à l'ensemble des observations et formalisations présentées dans ce manuscrit, le chapitre 6 propose une synthèse des premiers éléments de caractérisation du profil de biomiméticien tel que préconisé dans ces travaux. Ces recommandations prescriptives soulignent qu'il « *est possible d'identifier un ensemble compétences spécifiques caractérisant le nouveau profil à intégrer* » (H.1.3) (Figure 6.1).

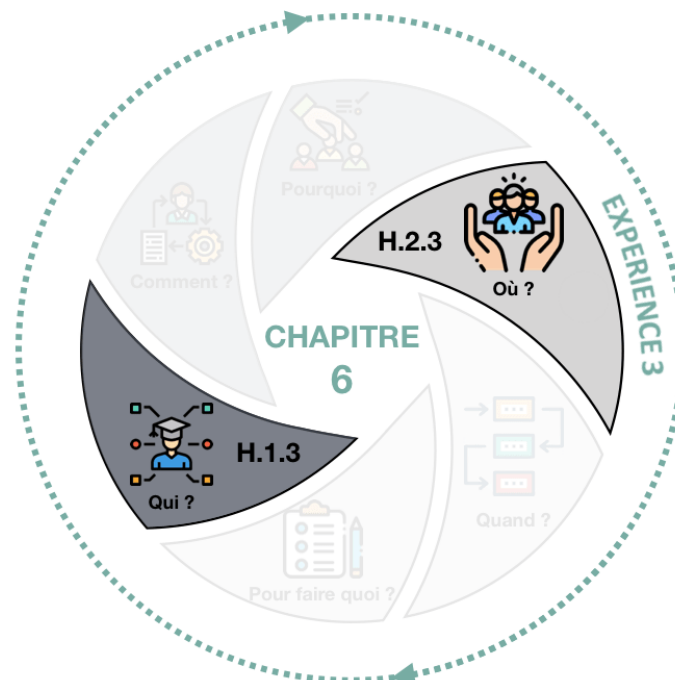


Figure 6.1 Sous-hypothèses traitées dans le chapitre 6

6.1.2 Prérequis expérimental du chapitre 6

6.1.2.1 Collaboration et communication interdisciplinaire en biomimétique

De manière générale, la collaboration interdisciplinaire est reconnue comme posant un certain nombre de difficultés (Chown, 2017; Nancarrow et al., 2013). Comme souligné dans l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.3.2), la biomimétique ne fait pas exception et un des principaux freins apparaît comme la communication entre les acteurs (Yen et al., 2014; Chirazi et al., 2019; McCardle et al., 2019; Waniecek et al., 2017; Jacobs et al., 2014).

Dans ses travaux, Helms souligne trois éléments d'explication, « *les biologistes et les ingénieurs parlent généralement un langage très différent, créant des défis de communication* », « *ils utilisent généralement différentes méthodes d'investigation et ont souvent des perspectives différentes sur la conception* » (Helms et al., 2009).

Trois freins sont également identifiés par Fayemi, freins qu'il caractérisera comme des différences « *de perception, de langages et de styles de pensée* » (Fayemi et al., 2017).

Ces observations peuvent être synthétisées en quatre obstacles à la communication :

- La linguistique : chaque champ scientifique possède un vocabulaire et des habitudes sémantiques spécifiques entraînant la formalisation d'un langage propre.
- Le référentiel conceptuel : la variabilité linguistique mène à une divergence des référentiels conceptuels et donc à des perceptions et des styles de pensée différents. Un concept donné n'est pas perçu de la même manière selon le référentiel dans lequel il est interprété pouvant conduire à des difficultés de compréhension.
- La pratique : chaque champ scientifique approche la pratique de recherche et de conception avec des processus, méthodes et outils propres.
- Le référentiel cognitif : les trois points précédents mènent à une divergence de la manière dont les concepteurs et les biologistes raisonnent. Face à une situation donnée, l'interprétation des informations mène à un raisonnement basé sur les concepts, les habitudes, les heuristiques et les pratiques (savoir-faire). Effectuer une tâche en commun peut mener à des difficultés de communication si les approches cognitives face au problème sont complètement différentes.

Face à ces difficultés, ce prérequis expérimental approche le problème par le prisme des sciences de la communication et permettra ainsi l'application de théories et de modèles de communication aux équipes interdisciplinaires de conception biomimétique. De cette manière, un ensemble de freins et de leviers formalisant les observations de la littérature décrites ci-dessus est considéré dans ce chapitre.

6.1.2.2 Les théories de la communication comme un prisme d'analyse

Concepts et modèles

Aussi connue sous le nom de théorie de l'information, la première théorie de la communication est proposée par Shannon en 1948 (Shannon, 1948). Cette théorie décrit la communication d'un point de vue statistique, à l'origine sur les systèmes techniques de communication. Selon ces travaux précurseurs, les systèmes de communication comprennent cinq éléments :

- Une source d'information, qui est à l'origine d'un message ou d'un groupe de messages à transmettre. Ces messages représentent l'information d'intérêt telle qu'elle est comprise par la source.
- Un émetteur qui convertit le message en signal (encodage) adapté à un canal de transmission donné.
- Un canal, le milieu qui transmet le signal.
- Un récepteur, qui interprète le signal pour reconstruire le message (décodage).
- Une destination, l'entité à qui le message est destiné.

Un sixième élément, les « *sources de bruit* », altère le signal à son émission, lors de sa transmission ou/et à sa réception, modifiant de manière transversale le message encodé. Suivant cette théorie fondatrice, un ensemble de contributions et d'optimisations sont apportés pour étendre le modèle de Shannon.

En particulier, Berlo adapte le modèle à la communication entre deux personnes (sortant d'une approche sur les systèmes techniques) (Berlo, 1960), Schramm intègre la rétroaction ainsi que le rôle crucial du contexte (Schramm, 1954) et Devito caractérise quatre types de bruits : le bruit physique, le bruit physiologique, le bruit psychologique et le bruit sémantique (Devito, 2013). Ensemble, ces études constituent une partie représentative des fondements conceptuels de la communication sur lesquels nos travaux s'appuient.

Application à une équipe de conception

Appliquées aux équipes interdisciplinaires de conception, ces théories peuvent être utilisées pour identifier l'émergence des problèmes de communication. La figure 6.2 présente un modèle de communication, basé sur le modèle de Shannon et combinant les différents apports postérieurs, appliqué à un ingénieur-concepteur (Source/récepteur) et à un biomiméticien (Source/Récepteur) parlant (Canal/Signal) d'une solution biologique (Message/Feedback).

Selon les théories de la communication, beaucoup de facteurs interdépendants peuvent empêcher une bonne communication. Notamment à cause de bruits psychologiques (Devito, 2013) tel que le manque de contexte commun (communauté, cadre social et culturel de référence, etc.), un défaut de la source/récepteur (mauvaises compétences en

communication, attitudes, connaissances, etc.) et un mauvais encodage/décodage du message (mauvais code, mauvaise structure).

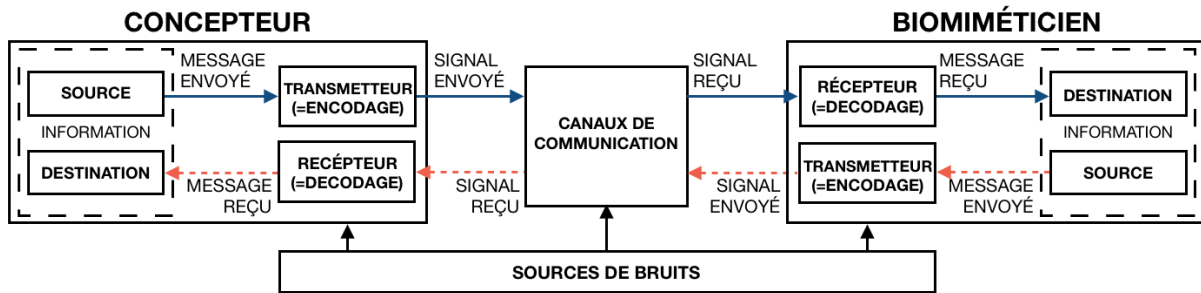


Figure 6.2 Application de la théorie de la communication aux équipes interdisciplinaires de conception biomimétique, inspirée du modèle de Shannon (1948)

À travers ces concepts, les observations issues de la littérature peuvent être formalisées selon deux types de bruits :

- Les *bruits sémantiques*, plus spécifiquement le format du signal (les différences de langages et de représentations).
- Les *bruits psychologiques*, plus spécifiquement l'encodage/décodage du signal et le contexte d'interprétation (dépendante du référentiel conceptuel et du référentiel cognitif) ainsi que le raisonnement généré par le message décodé (variabilités de pratique et de référentiel cognitif). Ces éléments sont regroupés sous le terme de *dissonances cognitives*.

On notera que ces *dissonances cognitives* entre les membres de l'équipe peuvent venir de leur différence d'expertise (Cummings et al., 2005), mais aussi d'une perception variable des objectifs du projet (Bruneel et al., 2010). S'ils ne partagent pas le même modèle mental de contraintes, d'attentes et d'objectifs, le projet est susceptible d'échouer (Nagel et al., 2018; Siegel et al., 2004).

Comme notre étude se concentre sur les aspects méthodologiques, les bruits physiologiques de type « défauts de la source/récepteur » seront abordés uniquement sous la forme de préconisations dans la description du profil du biomiméticien.

Pour résumer, les équipes interdisciplinaires ont besoin d'être guidées pour limiter les bruits sémantiques et psychologiques et permettre aux acteurs de conserver leurs spécificités tout en communiquant efficacement.

Dans la littérature, les approches se centrent presque exclusivement sur des équipes de conception classique, et guidaient leur manipulation des données biologiques. Plus que la communication, il s'agissait ici de la formalisation et de la transposition conceptuelle regroupées sous la terminologie de « transfert de connaissances ».

Les récents travaux d'Hashemi Farzaneh (Hashemi Farzaneh et al., 2015; Hashemi Farzaneh, 2020) interrogent la collaboration et la communication entre ingénieurs mécaniciens et biologistes, se positionnant tout à fait dans la même démarche que celle soutenue dans ce chapitre. Cependant, là où son approche se concentre sur la phase

d'idéation (Chapitre 5, partie 5.4.2.6, figure 5.16, étape 7 du processus TPIB), notre démarche vise à traiter de manière transversale la communication et la collaboration avec le biomiméticien.

6.1.3 Objectifs et structuration du chapitre 6

Ce chapitre 6 se positionne donc dans la tendance actuelle de la communauté scientifique à interroger la communication au sein d'équipes interdisciplinaires. Étant donné les spécificités de notre approche, l'intégration continue d'un profil formé en biologie (H.1) et la modification du processus de conception (H.2), ces travaux apportent une réponse nouvelle au frein de la communication interdisciplinaire.

Deux objectifs principaux sont poursuivis, d'une part la caractérisation du profil du biomiméticien comme un pont entre les champs de la biologie et de l'ingénierie de la conception (H.1.3) et d'autre part la formalisation d'un outil accompagnant les équipes interdisciplinaires (H.2.3) pour traiter les bruits psychologiques limitant la communication.

La partie suivante de ce chapitre aborde les matériels et méthodes utilisés (Chapitre 6, partie 6.2). Puis, la description des référentiels cognitifs et des représentations graphiques en biologie et en ingénierie de la conception conduira à la préconisation d'un référentiel cognitif commun à l'équipe. Ce nouveau référentiel permettra le développement d'un outil structurant le raisonnement des équipes. Celui-ci sera ensuite présenté et testé avec des équipes interdisciplinaires au cours de l'expérimentation 3 (Chapitre 6, partie 6.3). Enfin, le profil du biomiméticien sera décrit à travers un ensemble de compétences basées sur les différentes études menées au cours de ce doctorat (Chapitre 6, partie 6.4).

6.2 Matériels et méthodes utilisés dans le chapitre 6

6.2.1 Concepts associés au chapitre 6

Comme décrit dans le modèle de la figure 6.2, la communication interdisciplinaire est strictement entendue dans ce chapitre comme un processus bidirectionnel entre les acteurs ayant des champs d'expertises différents. Dans ce contexte, on rappellera que l'interdisciplinarité est une approche qui « *analyse, synthétise et harmonise les liens entre les disciplines en un ensemble coordonné et cohérent* » (Choi, B, Pak, 2006).

Pour faciliter la communication au sein des équipes interdisciplinaires, et donc leurs pratiques « *coordonnées et cohérentes* », notre approche s'appuie sur la conception d'un référentiel commun. D'un point de vue générique, le référentiel est ici compris comme un « *ensemble d'idées, de conditions ou d'hypothèses qui déterminent comment quelque chose sera abordé, perçu ou compris* » (Merriam-Webster Dictionary, 2020). On comprend ici que le *référentiel cognitif* a attrait au mécanisme de réflexion encadrant la perception, compréhension et manipulation des concepts, là où le *référentiel conceptuel* correspond aux définitions des concepts, de leur interaction et de leur structuration en réseau cohérent.

Le but de cette construction méthodologique est de donner un ensemble de lignes directrices à travers lesquelles les informations des différents champs scientifiques peuvent être correctement interprétées et assimilées. Les représentations mentales des informations par les parties prenantes, et donc les sujets de la cognition, sont définies comme des « *modèles mentaux* » (Gentner, 2002). Nous postulons ainsi que la mise en place d'un référentiel conceptuel commun lors des projets biomimétiques devrait permettre aux acteurs de se positionner dans un espace de raisonnement cognitif commun. L'objectif est de les rendre capables d'utiliser des prismes d'analyse similaires et/ou complémentaires (Mathieu et al., 2000).

Un outil intégrant les différentes lignes directrices conduisant à l'établissement de référentiels communs est alors conçu pour créer une interface à travers laquelle l'équipe peut établir un référentiel partagé et raisonner de manière synergique.

L'objectif de cet outil est de soutenir la communication pour parvenir à une pratique biomimétique transdisciplinaire. Le modèle mental partagé par l'équipe n'est ni un modèle d'ingénierie ni un modèle biologique, mais « *transcende chacune de leurs frontières traditionnelles* » (Choi, B, Pak, 2006). Dans cette nouvelle conformation, les acteurs partagent une « *interdépendance réciproque motivée par des objectifs, qui inclue l'intégration de flux et affectant les autres disciplines par leur réorientation* » (Lotrecchiano, 2010).

6.2.2 Méthodologie suivie dans le chapitre 6

6.2.2.1 Formalisation d'un outil de communication et de collaboration interdisciplinaire

Établissement d'axes structurant la mise en place d'un référentiel commun

La formulation d'un cadre commun suit une méthodologie inspirée des travaux de Hashemi Farzaneh (Hashemi Farzaneh et al., 2015) et Fayemi (Fayemi et al., 2015), et synthétisée comme suit :

- Étape 1 : Analyse des référentiels cognitifs spécifiques au champ disciplinaire sur deux éléments principaux, les processus et les représentations graphiques. Celle-ci est basée sur la littérature, l'expertise de notre équipe de recherche pluridisciplinaire et des discussions avec des experts.
- Étape 2 : Comparaison de critères clés tels que les concepts, objectifs, contraintes, hypothèses, étapes, etc.
- Étape 3 : Sélection et/ou combinaison de critères et formulation d'axes structurant le référentiel. Cette étape est effectuée en suivant les théories de la communication, les spécificités des pratiques biomimétiques et un ensemble de préconisations propres aux hypothèses développées dans nos travaux
- Étape 4 : Synthèse des axes permettant la préconisation d'un référentiel cognitif partagé.

Mise en place d'un outil permettant la génération d'un référentiel commun

L'outil LINKAGE (*Life's INherited Knowledge Applied to Generate Emulations*) est ensuite conçu à travers l'intégration des axes structurant le référentiel cognitif commun. Ainsi le raisonnement suivi par l'équipe doit conduire à un encodage commun de l'information et à la génération de modèles mentaux partagés tel que préconisé dans la littérature (Takai et al., 2017; Mathieu et al., 2000).

À travers l'outil, l'équipe doit pouvoir établir un référentiel conceptuel propre au projet et commun à tous les membres de l'équipe (Figure 6.3).

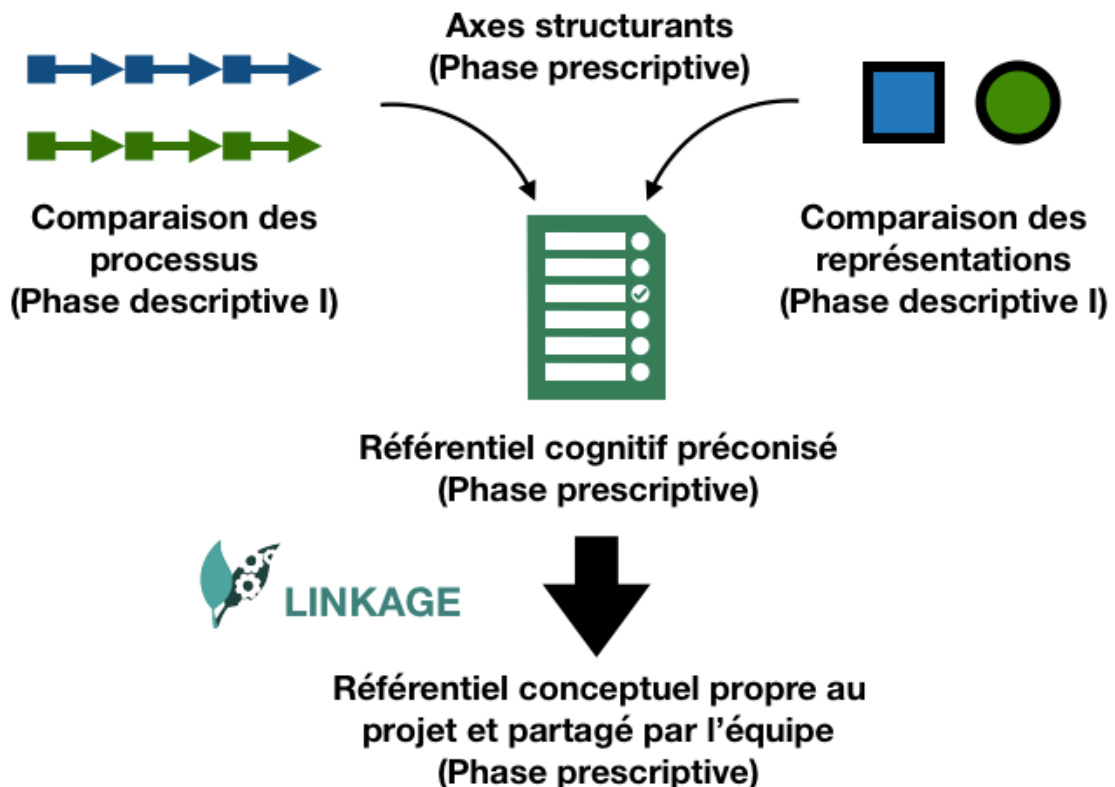


Figure 6.3 Méthode de formalisation d'un référentiel (cognitif et conceptuel) partagé

Le développement théorique de l'outil a été permis par un ensemble de tests effectué lors des suivis de projets étudiants interdisciplinaires. Ceux-ci ont permis l'intégration des différents axes du référentiel cognitif préconisé au sein de l'outil.

Le développement informatique de l'outil a ensuite été permis à travers la supervision des travaux de stage de Martin Marx, dont la contribution a été essentielle à la mise en place de l'outil dans sa forme actuelle : <https://linkage-lcpi.com>

6.2.2.2 Expérimentation 3 : évaluation de LINKAGE

Les phases de test de LINKAGE ont débuté en janvier 2020 et sont actuellement toujours en cours. Deux expérimentations ont été effectuées, la première, ayant été effectuée sur une des premières versions de l'outil, ne sera pas présentée dans ce manuscrit mais nous a conduit à améliorer un certain nombre de points d'ergonomie.

Chapitre 6 – Intégration et formalisation du biomiméticien

La deuxième expérimentation effectuée avec LINKAGE, et décrite dans ce chapitre, a été effectuée avec des équipes interdisciplinaires de professionnels (tous diplômés d'un master ou plus) dans le cadre du Mastère Spécialisé Manager de l'Innovation et du Développement d'Activités du LCPI.

L'échantillon expérimental était composé de 19 participants répartis en 5 équipes, les plus homogènes possibles (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 Échantillon de l'expérimentation 3

	Auto-évaluation maximale du savoir en biologie par un membre de l'équipe (0-4)	Expertise en Ingénierie de la conception
Équipe 1 (n=3)	4	Au moins un professionnel diplômé en ingénierie et travaillant dans le domaine de la conception (innovation, aéronautique, automobile, etc.)
Équipe 2 (n=4)	2	
Équipe 3 (n=4)	3	
Équipe 4 (n=4)	1	
Équipe 5 (n=4)	3	

Le protocole expérimental utilisé est basé sur le processus TPIB présenté dans le chapitre 5 :

- Introduction à la biomimétique et présentation de l'expérimentation (45min). L'outil en lui-même n'est pas présenté dans le détail, son autonomie et ergonomie sont ainsi testées en particulier.
- Protocole TPIB condensé : Étape 2 (1h), Étape 3 (30min), Étape 4 (2h), Étape 5 (30min), Étape 6 (1h), Étape 7 (1h).
- Retour d'expérience (15 min).

Chaque équipe a travaillé sur un sujet de conception spécifique, correspondant au projet fil rouge du cursus. Les résultats sont récoltés via un questionnaire ciblant trois points clés :

- Les critères d'utilisabilité de Nielsen (Nielsen, 1993), déjà utilisés en chapitre 4, par des échelles de Likert à 5 niveaux (0-4) : la *satisfaction*, la *facilité de prise en main*, le *risque d'erreur*, l'*intérêt du raisonnement* (dérivé du critère d'*efficacité*) et la *précision du modèle* (dérivé du critère d'*efficacité*).
- Des questions précises sur l'ergonomie de l'outil, afin d'assurer que celui-ci puisse être effectivement utilisé de manière autonome une fois publié.
- Des questions précises visant à valider les différents objectifs poursuivis par l'outil (structuration du raisonnement de l'équipe, communication, compréhension commune des concepts, etc.)

Les résultats du questionnaire seront présentés comme première tendance dans la mesure où la taille de l'échantillon ne peut mener à des résultats statistiquement significatifs.

6.2.2.3 Formalisation du profil de biomiméticien

Afin de poser un cadre structurel permettant l'établissement de ce nouveau profil, le format des fiches métiers du Répertoire Opérationnel des Métiers et des Emplois (ROME), présentant la description officielle des métiers en France, est pris comme référence. Les éléments suivants seront par conséquent considérés pour formaliser la fiche métier du biomiméticien : Définition, Accès à l'emploi métier, Condition d'exercice de l'activité, Compétence de base et spécifique.

Enfin, pour compléter ces critères, et notamment au vu de l'évolution actuelle des compétences des ingénieurs (Passow et al., 2017; Shuman et al., 2005), un ensemble de « Savoir-être » seront également préconisés.

6.3 Communication et collaboration au sein d'une équipe de conception biomimétique interdisciplinaire

Cette partie présente la dernière étude de la phase descriptive I (DRM) de nos travaux. Par la caractérisation des différences entre les référentiels cognitifs en biologie et en ingénierie de la conception, celle-ci conduira à la prescription d'un outil, LINKAGE, qui sera ensuite testé dans la dernière étude de la phase descriptive II.

6.3.1 Établissement d'un référentiel conceptuel et cognitif commun

Pour identifier les caractéristiques clés et concevoir des axes structurant un référentiel commun, les processus générant les données utilisées dans les projets biomimétiques sont étudiés.

Pour la biomimétique, le processus de conception biomimétique unifié (Fayemi et al., 2017) sera pris comme référence.

Pour la biologie, un processus générique de recherche biologique tel que décrit par Claude Bernard (Bernard et al., 2018) est considéré comme référence.

6.3.1.1 Analyse des référentiels par la comparaison des éléments clés des processus

L'idée générale de la conception en ingénierie réside dans la capacité des équipes à créer un système technique exécutant un ensemble de fonctions données. Une fonction est définie comme la « *relation générale d'entrée/sortie d'un système dont le but est d'accomplir une tâche* » ou, aux stades amonts du processus, comme la « *formulation abstraite de la tâche, indépendamment de toute solution particulière* » (Pahl et al., 1996). Le terme « *système* » est considéré après la définition de De Rosnay, « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but* » (De Rosnay, 1975).

Les processus de conception de produit guident l'équipe, depuis un brief (problème à résoudre, contexte, utilisateur, cahier des charges, etc.) jusqu'à un produit qui répond aux exigences initiales. Ces attentes initiales sont fondées sur la compréhension que le client/entreprise a du marché et par extension des produits qui seraient les plus susceptibles

d'être achetés par les consommateurs. À plus large échelle, Fayemi parle des « *besoins/défis humains* » (Fayemi et al., 2014). La pratique de la conception est donc subjective et profondément dépendante de la perception de besoins clients.

L'approche dépend alors intrinsèquement des choix de conception fait par l'équipe, menant à une variabilité des produits conçus pour effectuer une même tâche. D'un point de vue technique le principal paramètre de validation de ces choix est le respect des exigences du cahier des charges du produit. D'un point de vue stratégique et économique, c'est l'acceptation des consommateurs, et donc le succès commercial qui peut être vu comme la validation des choix effectués.

Qu'ils résolvent un problème ou offrent de nouvelles fonctionnalités sans problème à résoudre à l'origine, la raison d'être des produits apparaît comme le service fourni et par conséquent les fonctions mises à la disposition des utilisateurs. Comme explicité par H. Simon : « *L'ingénieur, et plus généralement le concepteur, se préoccupe de la façon dont les choses devraient être (...) afin d'atteindre des objectifs et de fonctionner* » (Simon, 1969).

En revanche, « *les sciences naturelles sont concernées par la façon dont les choses sont* » (Simon, 1969). Les raisonnements *prescriptifs* et *descriptifs* sont largement reconnus dans la littérature comme l'une des principales différences entre les approches en biologie et en conception (Bogatyrev et al., 2015).

Dans la recherche biologique, les projets émergent de *l'observation* et de l'identification de connaissances biologiques manquantes. Le choix entre les axes de recherche est subjectif dans la mesure où il dépend fortement du financement, mais les résultats du processus de recherche sont censés être intrinsèquement objectifs.

Le processus de recherche biologique a ainsi pour objectif fondamental de répondre à une *question* de recherche, selon les mots de Claude Bernard, « *L'esprit d'un expérimentateur doit être actif, c'est-à-dire remettre en question la nature.* » (Bernard et al., 2018). Les travaux en biologie sont « *à la recherche de la vérité et l'approche aussi près que possible* » (Bernard et al., 2018). Face à une question de recherche, les choix sont appelés hypothèses et sont *testés* par des *expériences*.

La raison d'être derrière la recherche en biologie apparaît comme la connaissance, la compréhension des êtres vivants.

À la suite de cette comparaison introductive, les processus de référence sont comparés en détail sur la base de treize critères, que nous avons considérés représentatifs des spécificités des deux processus (Tableau 6.2).

Tableau 6.2 Analyse comparative sur les processus en conception biomimétique et en biologie

Critères	Conception biomimétique	Biologie
1. Origine du projet	Succès commercial potentiel du produit	Absence de connaissances biologique et financement associé
2. Données initiales	Brief client / marketing	Un système ou un phénomène biologique
3. Orientation du projet	Subjective	Objective
4. Type de problème	“Comment concevoir un système qui effectue”+ fonction ?	“Comment” + Système biologique + effectue une fonction ?
5. Type de raisonnement	Prescriptive	Descriptive
6. Système étudié	Conceptuel : Le système n'existe pas encore	Concret : Le système étudié est observé
7. Données d'entrée de la résolution de problèmes	Fonction abstraite et problèmes techniques associés.	Des concepts biologiques abstraits associés à un ensemble d'attributs et de principes biologiques.
8. Processus de résolution de problèmes	Raisonnement analogique par l'identification de modèles biologiques partageant les mêmes fonctions/problèmes techniques	Résolution dans l'espace conceptuel par l'interaction des concepts et des principes biologiques associés. Le raisonnement analogique peut également être utilisé.
9. Résultats de la résolution de problème	Solution identifiée	Hypothèses générées
10. Application des solutions	Génération de modèles numériques et de prototypes pour vérifier que les exigences sont remplies.	Conception d'un protocole et d'une expérience basés sur les hypothèses.
11. Phase de tests	On teste si la solution remplit efficacement la fonction et quelles sont les retours des utilisateurs.	On teste si le modèle (in vitro/in vivo) réagit selon les prédictions de l'hypothèse.
12. Fin du projet	Concept produit optimisé, la phase de conception détaillée et d'industrialisation peut commencer.	Sur la base des résultats, l'hypothèse est ou n'est pas validée, le chercheur génère un rapport ou un article pour expliquer ses résultats
13. Résultats final	Un produit (ou au moins un concept produit)	De nouvelles connaissances

Cinq axes sont formalisés au moyen de l'analyse comparative présentée dans le tableau 6.2 :

Axe A : Intégrer les éléments subjectifs comme des contraintes externes. Ce faisant, les biologistes peuvent aborder le problème avec des questions objectives (critère 3, tableau 6.2), en essayant de comprendre comment un système biologique (critère 2, tableau 6.2) réagirait face aux contraintes données (critère 1 et 2, tableau 6.2).

Axe B : Combiner des approches prescriptives et descriptives. Des phases de raisonnement prescriptif (critère 5, tableau 6.2) peuvent permettre la génération de scénarios fonctionnels (critère 4, tableau 6.2) décrivant le système à concevoir (critère 6, tableau 6.2) comme s'il était réel (critère 6, tableau 6.2). Dans une deuxième phase, les biologistes peuvent décrire dans ce même scénario, comment le système biologique effectue une fonction cible (critère 4, tableau 6.2).

Axe C : Exposer les liens entre les concepts abstraits fonctionnels, structurels, matériels et comportementaux. Nous suggérons aux coéquipiers d'expliquer leur raisonnement (critère 8, tableau 6.2) sur une représentation partagée, pour permettre aux différents acteurs de faire

le lien avec leur propre cadre conceptuel lié à leur expertise (critère 7, tableau 6.2) et de générer des solutions potentielles à tester (critère 9, tableau 6.2).

Axe D : Présenter les problèmes et les solutions dans leurs contextes spatio-temporels. Dans les deux domaines, le contexte est essentiel. Tout d’abord, il dicte les exigences du projet de conception et les contraintes environnementales biologiques (critère 10, tableau 6.2). Deuxièmement, il assure la validité de la solution (critère 11, tableau 6.2) et souligne enfin les potentielles évolutions des conditions, remettant en question l’adaptabilité des systèmes biologiques/techniques (critère 12, tableau 6.2).

Axe E : Consacrer des espaces pour la conception de produits et la collecte de connaissances tout en soutenant leur contribution synergique. Le système de récompense des biologistes est basé sur les connaissances et le système de récompense des ingénieurs est basé sur les produits conçus (critère 13, tableau 6.2). Par conséquent, il apparaît essentiel de mettre en œuvre une stratégie de gestion des connaissances en parallèle de l’implémentation d’une stratégie d’innovation biomimétique. Les membres de l’équipe doivent se sentir reconnus, via le résultat de l’équipe d’une part mais également dans leur champ spécifique afin d’éviter la frustration et maintenir un esprit d’équipe collaboratif, non concurrentiel.

La sous-partie suivante présente l’analyse de plusieurs représentations graphiques biologiques comparées aux représentations intermédiaires de l’ingénierie de la conception (Bouchard et al., 2005). Dans la mesure où le processus de recherche biologique est similaire à la plupart des processus scientifiques, l’étude complémentaire de ces représentations graphiques conduit à l’identification de recommandations plus spécifiques.

6.3.1.2 Analyse des référentiels par la comparaison des représentations graphiques

En recherche, la communication se fait principalement par le biais de conférences ou par la formalisation des résultats sous forme d’articles scientifiques. Dans ces publications, les figures représentant les systèmes biologiques synthétisent les connaissances et jouent un rôle fondamental dans la communication. Les figures ne représentant pas des systèmes biologiques mais des résultats de mesures expérimentales, tels que des graphiques, des matrices, etc. ne seront pas ici étudiées.

Trois types de représentations biologiques communes, que nous avons qualifié d’observationnelles, d’imbriquées et de dynamiques, ont ainsi été étudiées.

Représentation observationnelle

Ce premier type de représentation reflète les observations des biologistes. Parmi ces représentations, le dessin d’observation (au microscope ou à l’œil nu) permet aux biologistes de décrire des formes, de présenter des résultats et de caractériser les espèces nouvellement découvertes. La figure 6.4 donne un exemple d’un dessin d’observation décrivant les spécificités anatomiques des ailes de *Pantarbes*, un genre d’abeille.

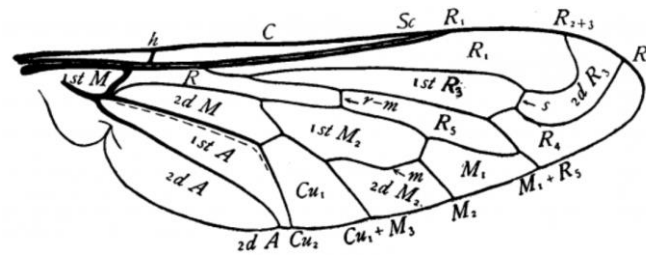


Figure 6.4 Dessin d'observation d'une aile de *Pantarbes*, un genre d'abeille, issue de Metcalf (Metcalf, 1918)

Les dessins d'observation sont aujourd'hui fortement complétés par des alternatives numériques, les photographies, la microscopie électronique, l'imagerie 2D ou 3D, etc. Entre autres domaines, les représentations observationnelles sont notamment utilisées en anatomie animale ou végétale, histologie et morphologie.

Au niveau conceptuel, ce type de représentation souligne la nécessité pour les biologistes de communiquer sur le concept biologique de *forme* (Wainwright, 1988).

Représentation imbriquée

Le deuxième type de représentation vise à décrire les structures biologiques à plusieurs niveaux organisationnels et plusieurs échelles. Ces schémas représentent ainsi différents grossissements, zoomant au sein d'une structure biologique afin de souligner son organisation hiérarchique complexe. La figure 6.5 présente l'exemple des branchies d'un poisson.

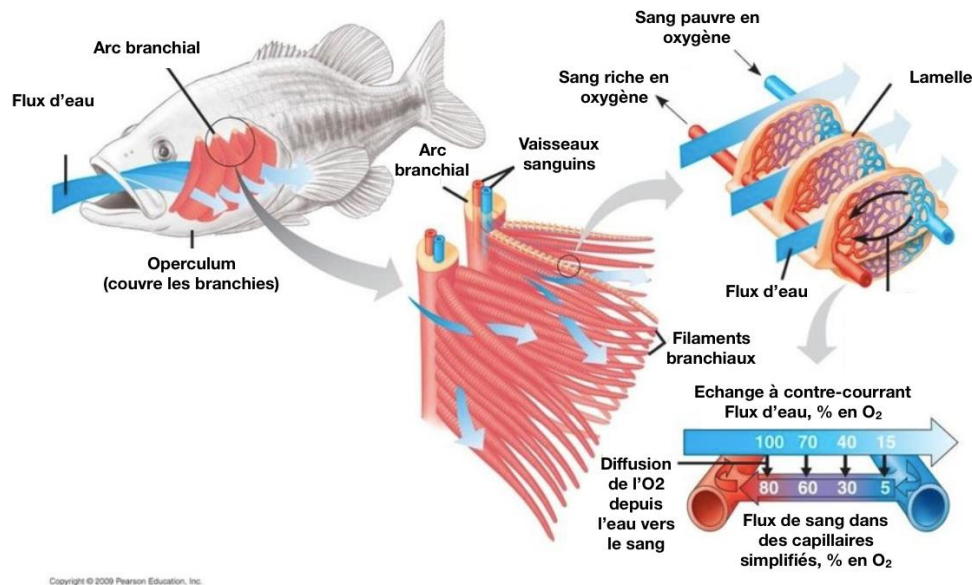


Figure 6.5 Echanges gazeux au niveau de branchies, issu de (Reece et al., 2015) cité par (Kumar et al., 2018)

Au niveau conceptuel, ces représentations décrivent le concept biologique de *structure* (Wainwright, 1988).

Représentation dynamique

Les représentations dynamiques peuvent être divisées en au moins deux catégories. La première catégorie décrit les entités biologiques dans des états successifs, modélisant alors explicitement les phénomènes dynamiques. En analysant ces représentations, quatre

modèles dynamiques principaux peuvent être distingués : des motifs d'évolutions cycliques, acycliques, mixtes et multi-cycliques.

Lors de processus cycliques, les systèmes biologiques retrouvent leur état d'origine à chaque cycle. La figure 6.6 présente un exemple de processus cyclique avec le comportement des canaux ioniques lors de la propagation d'un potentiel d'action. La séparation des ions, leurs flux spécifiques et leurs transports combinés permettent la propagation d'un potentiel d'action.

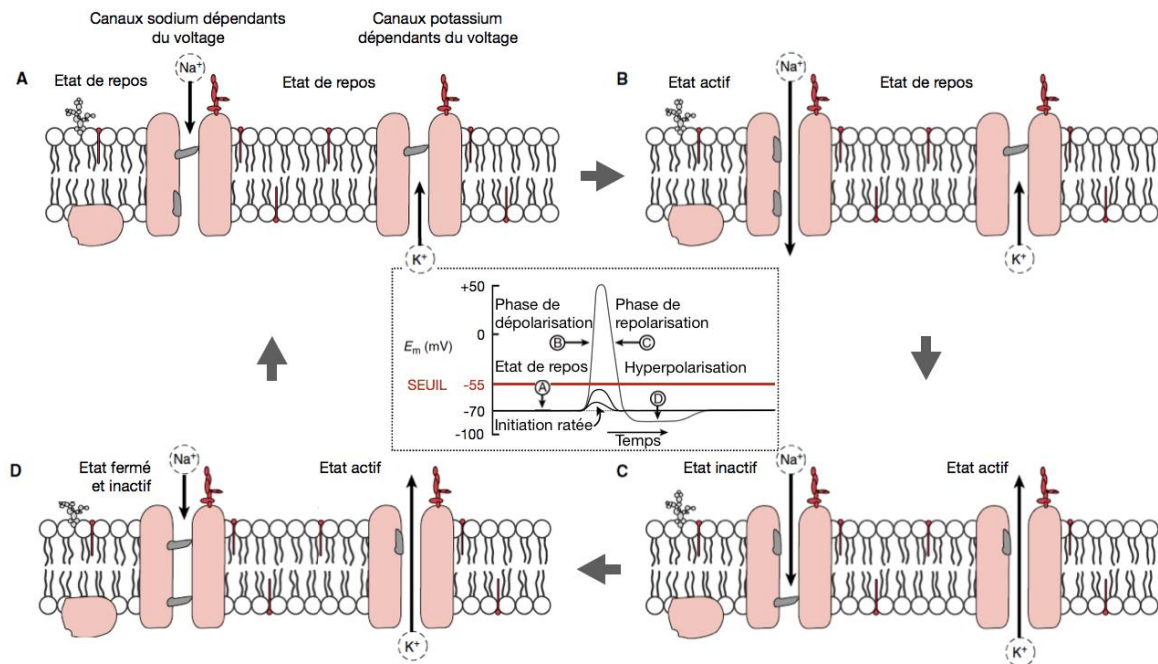


Figure 6.6 Exemple d'un processus cyclique, comportement des canaux ioniques lors de la propagation d'un potentiel d'action, modifié de (J. Forehand, 2009)

On peut également observer des représentations avec des motifs multi-cycliques. Lors de la phase de génération d'un potentiel d'action, un premier type de cycle peut se produire lorsque la stimulation reste sous un seuil (initiation ratée au centre de la figure 6.6). Une fois le seuil dépassé, un potentiel d'action est généré, et le deuxième type de cycle émerge tel qu'il a été présenté précédemment. De ce fait, le phénomène global est multi-cyclique.

Dans les processus acycliques, les systèmes biologiques subissent des changements irréversibles (processus évolutif des espèces, croissance d'un individu, différenciation cellulaire, etc.) et ne reviennent généralement pas à leur état d'origine (figure 6.7).

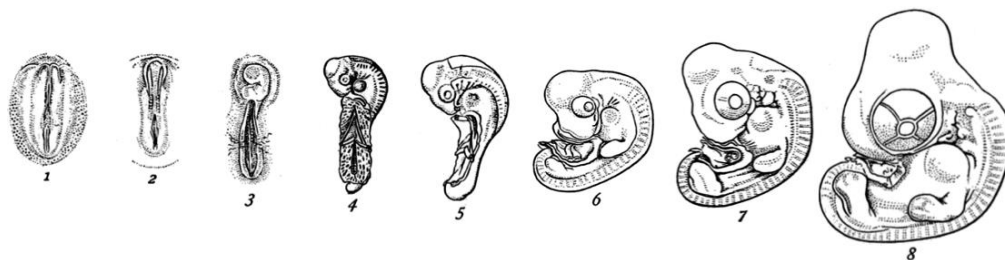


Figure 6.7 Exemple d'un processus acyclique, dessin de dix étapes du développement embryonnaire d'un poussin, adaptée de (Minot, 2011)

Ces processus sont souvent le résultat de plusieurs unités biologiques fonctionnelles qui induisent des modifications profondes et synchronisées des entités biologiques : croissance, différenciation, évolution, etc.

Enfin, des processus mixtes sont identifiés. Par exemple, un processus cyclique, comme le cycle cardiaque, peut se renforcer progressivement grâce à des exercices ou évoluer d'une manière plus soudaine dans le cas d'un infarctus cardiaque. Comme la majorité des processus cycliques évoluent en raison du vieillissement, la combinaison de modèles cycliques et acycliques est la plus complexe, mais la plus proche de la réalité.

Étant donné qu'une structure biologique peut être différente entre deux individus au même âge, la notion de temps peut apparaître relative en biologie. Par exemple, un poumon très endommagé peut être causé par 20 ans de tabagisme ou par 40 ans de conditions de travail extrêmes. Ce qui est considéré ici, c'est l'état du processus de dégradation des poumons, pas son âge *en soi*, même si celui-ci sera un facteur. Pour cette raison, les biologistes se réfèrent plutôt à des états lorsqu'ils décrivent un processus biologique. Cependant, les durées entre ces états peuvent être critiques dans les processus. Par conséquent, les biologistes déterminent artificiellement un point de départ ($t=0$). Le fait de considérer des états et des durées plutôt qu'un temps absolu permet également de s'émanciper de la linéarité temporelle et de favoriser la considération de processus cycliques.

Dans la deuxième catégorie de représentation dynamique, les différents états ne sont pas explicitement représentés, mais sont suggérés dans les schémas, principalement par des flèches (figure 6.8).

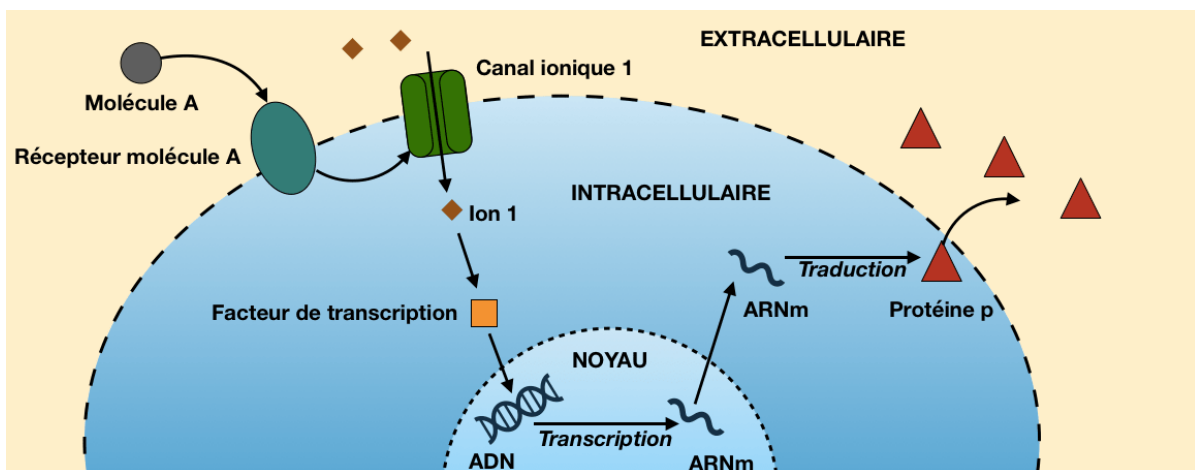


Figure 6.8 Voie moléculaire générique, depuis la fixation d'une molécule A à la sécrétion d'une protéine p

Ces représentations se concentrent sur la dynamique des interactions entre différents éléments au sein de systèmes biologiques (moléculaires, organismes vivants, paramètres externes, etc.). Ce type de représentation permet la modélisation de voies moléculaires ou de relations écosystémiques par exemple. Ces schémas décrivent alors des changements successifs d'états, comme les réactions en chaîne en biologie moléculaire ou en biologie

cellulaire. Les représentations dynamiques témoignent du concept biologique de *fonction* (Wainwright, 1988).

Il faut souligner que d'autres formes de représentations existent en biologie, tels que les arbres phylogénétiques, les modèles en biologie des systèmes (Haefner, 2005), etc. Néanmoins, grâce à cette description synthétique de trois types de représentations, l'importance d'un prisme à plusieurs paramètres (échelles, interactions, états) apparaît comme un aspect clé des représentations biologiques.

Les représentations mentionnées ci-dessus conduisent les biologistes à structurer des formes spécifiques afin d'étudier des fonctions (Wainwright, 1988), telles que « *gérer de l'énergie interne et externe* » ou « *transférer de l'information* » (Waterman, 1968).

En ingénierie, les types d'encodage sont strictement caractérisés, ils suivent des structures bien définies en fonction des phases du projet et du niveau d'abstraction requis. Afin de valider les changements cognitifs précédemment identifiés, les caractéristiques de ces représentations intermédiaires (Bouchard et al., 2005) sont comparées aux observations faites sur les représentations biologiques.

Comparaison des représentations en biologie et en ingénierie de la conception

De la même manière que pour la comparaison des processus, le tableau 6.3 compare les représentations sur plusieurs critères clés explicitant les *dissonances cognitives* potentielles (Tableau 6.3).

Tableau 6.3 Analyse comparative des représentations graphiques en conception et en biologie

Critères	En conception	En biologie
1. Objectif de la représentation	Expliquer les objectifs à atteindre et prescrire la génération d'un système ou d'une partie du système exécutant des fonctions déterminées.	Représenter les caractéristiques, les structures et le fonctionnement d'un système/phénomène biologique pour décrire des observations, des hypothèses ou des résultats.
2. Concept de fonction	Représente la légitimité d'un produit (brief client, diagramme pieuvre, etc.)	Représente les conséquences de l'évolution des formes et des structures à travers des états (différents types d'évolution).
3. Concept de structure	Association de sous-unité fonctionnelle de différents sous-systèmes (diagramme FAST, etc.)	Association profondément intriquée des éléments unitaires du système biologique (Karsenti, 2008) développé au cours du processus évolutif.
4. Concept de forme	Incarnation finale des éléments techniques exécutant les sous-fonctions (CAO, etc.) (étapes finales)	Observation initiale d'une entité biologique dans le monde réel (représentation observationnelle, etc.) (étapes initiales)
5. Approche systémique	Adopter un point de vue systémique augmente le nombre de contraintes et donc la complexité fonctionnelle	La résolution d'un problème biologique est fondamentalement liée à l'examen de divers niveaux systémiques et d'éléments environnementaux (Jacob, 1976). Les systèmes vivants sont des systèmes complexes.

Quatre nouveaux axes structurants sont formalisés :

Axe F : Considérer l'évolution des systèmes à travers un raisonnement par états successifs décomposant les fonctions, afin d'utiliser les mêmes canaux de communication visuelle et les mêmes formes d'encodage des signaux que ceux des informations biologiques que les équipes seront amenées à manipuler (critère 2, tableau 6.3).

Axe G : Considérer les systèmes à travers des structures imbriquées, pour soutenir la communication en alignant *les canaux visuels* et en créant un *lien conceptuel* entre les sous-unités fonctionnelles et les sous-systèmes biologiques à diverses échelles organisationnelles (critère 3, tableau 6.3).

Axe H : Décrire précisément les formes. Là où les biologistes peuvent interpréter les formes comme des caractéristiques biologiques, les ingénieurs peuvent les analyser d'un point de vue technique. Ce faisant, ces derniers peuvent apporter une expertise complémentaire, en dynamique des fluides par exemple, et identifier des propriétés fonctionnelles jusqu'alors ignorées. Ces réflexions synergiques devraient conduire à la création de nouveaux espaces de communication en permettant aux praticiens d'identifier quels *messages* et types de *signaux* sont pertinents pour les différents acteurs (*destination*) (critère 4, tableau 6.3).

Axe I : Soutenir un point de vue systémique, afin d'aligner les *modèles mentaux* des coéquipiers par un nombre croissant de liens conceptuels caractéristiques et ce sur un ensemble de prismes (critère 5, tableau 6.3).

6.3.1.3 Synthèses des axes du référentiel cognitif préconisé

Grâce aux analyses comparatives sur les processus et les représentations, neuf axes ont été formalisés pour structurer un référentiel cognitif commun aux membres des équipes de conception interdisciplinaire (Tableau 6.4).

Tableau 6.4 Synthèse des axes formalisant le référentiel cognitif prescrit

Axe	Formalisation de l'axe
Axe A	Intégrer les éléments subjectifs comme des contraintes externes.
Axe B	Combiner les approches prescriptives et descriptives.
Axe C	Exposer les liens entre les concepts abstraits fonctionnels, structurels, matériels et comportementaux.
Axe D	Présenter les problèmes et les solutions dans leurs contextes spatio-temporels.
Axe E	Consacrer des espaces pour la conception de produits et la collecte de connaissances tout en soutenant leur contribution synergique.
Axe F	Considérer l'évolution du système à travers un raisonnement par états successifs décomposant les fonctions.
Axe G	Considérer les systèmes à travers des structures imbriquées.
Axe H	Décrire précisément les formes.
Axe I	Soutenir un point de vue systémique.

Basé sur ce référentiel cognitif commun, LINKAGE, un nouvel outil destiné à l'équipe interdisciplinaire biomimétique est conçu.

6.3.2 Conception d'un outil collaboratif : LINKAGE

LINKAGE est un outil destiné à concevoir des référentiels conceptuels partagés par les équipes de conception interdisciplinaires par l'incarnation des 9 axes structurant le référentiel cognitif partagé et précédemment décrits (Tableau 6.4).

6.3.2.1 Objectifs poursuivis

Le premier objectif de LINKAGE est d'accompagner la communication au sein des équipes interdisciplinaires. Pour cela, l'outil est conçu comme une plateforme de travail collaboratif et permet la mise en place d'équipes projet rassemblant un ensemble d'utilisateurs.

Son deuxième objectif est d'optimiser la pratique biomimétique en guidant le raisonnement des équipes interdisciplinaires.

Enfin, LINKAGE vise à offrir un moyen de stocker des informations structurées (modèles détaillés, contexte environnemental, association entre problème et solutions, etc.) et ainsi de capitaliser sur les études biomimétiques pour maximiser la rentabilité de ces approches coûteuses en ressources. Il s'agit également par là de conduire l'équipe à reconnaître l'augmentation des connaissances comme un objectif, tel que préconisé dans le référentiel cognitif préétabli (Axe E).

L'objectif de cet outil sur le long terme est d'accroître l'efficacité des équipes de conception biomimétique, de contribuer à la mise en place et à la propagation des stratégies d'innovation biomimétiques.

6.3.2.2 Formalisation d'un référentiel conceptuel partagé grâce à LINKAGE

LINKAGE est formalisé par l'application du référentiel cognitif préconisé, à différentes étapes du processus de conception TPIB. Afin de mettre en évidence en quoi l'outil permet d'établir un référentiel conceptuel partagé, l'exemple d'un projet étudiant interdisciplinaire traitant la problématique « *comment réduire la consommation d'eau dans les toilettes de l'université ?* » est considéré comme fil rouge.

Utilisation lors de l'étape 1

Afin de représenter le problème, les utilisateurs sont amenés à considérer les contraintes de conception comme faisant partie de l'environnement du système (Axe A). Ils étudient alors de manière descriptive les problèmes émergents.

L'outil conduit l'équipe à considérer le projet selon un ensemble de scénarios représentant l'évolution du système à travers différents états caractérisant le problème (Axe F).

Dans le cas de l'exemple étudié, le raisonnement est le suivant : l'eau étant le milieu d'évacuation, une quantité plus faible risque de limiter la performance de la fonction d'évacuation, conduisant à des toilettes sales et ce même après déclenchement du système d'évacuation.

Par conséquent, les quatre états suivants sont définis : « État initial », « Toilette en utilisation », « Toilette en évacuation », « Toilette sale après utilisation ». L'outil pousse les

utilisateurs à décrire en quelques mots chaque état et à caractériser s'il s'agit d'un état d'équilibre que l'on souhaite retrouver, un état transitoire (lors de l'utilisation) ou un état de problème, que l'on souhaite donc éviter.

L'outil permet également à l'équipe d'associer à chaque état un ensemble de fonctions issues du cahier des charges ou des étapes d'analyse fonctionnelle ayant pu être effectuées au préalable. Il s'agit là d'assurer une cohérence du raisonnement proposé avec les approches classiques de conception (Figure 6.9).

Identifier	Function
F2	Permet à l'utilisateur de rassembler des déchets biologiques sans contamination
F3	Respecte les normes sanitaires en vigueur

Figure 6.9 Description des états composant le problème de conception (image LINKAGE)

Afin de représenter les différents scénarios compris dans ce problème, LINKAGE permet aux utilisateurs de générer jusqu'à cinq états différents (Axe F) liés par des motifs d'évolution (Figure 6.10) sur un modèle rappelant les représentations biologiques dynamiques (Figure 6.6).

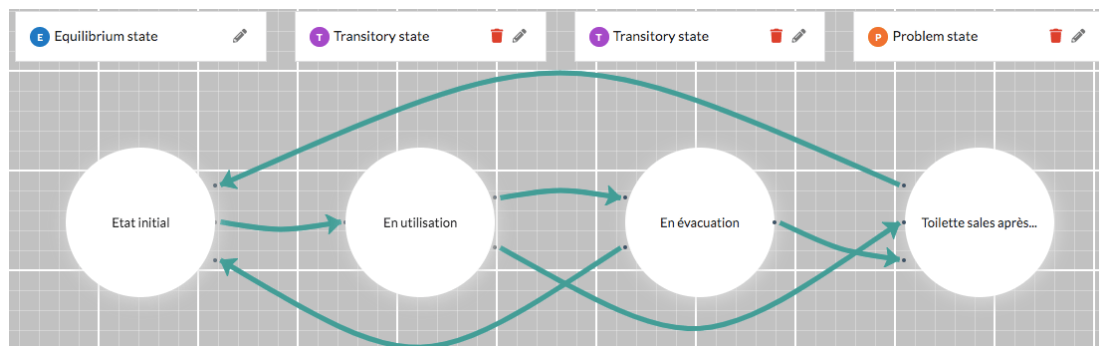


Figure 6.10 Définition des états et des scénarios du problème de conception (image LINKAGE)

On peut ainsi observer sur la figure 6.10 que l'équipe étudiante a pris en compte un ensemble de scénarios alternatifs au problème, tel que le fait qu'un utilisateur puisse ne pas déclencher

le système d'évacuation ou que malgré une réduction de la quantité l'eau, le système soit efficacement nettoyé.

Face à ces scénarios, l'équipe de conception peut aborder le problème d'un point de vue objectif puisque l'orientation subjective est déjà imposée par les états. Dans cette première étape, le système lui-même n'est pas encore caractérisé, c'est le problème de conception qui l'est (Étape 1 du processus TPIB).

L'équipe établit donc un cadre commun à son référentiel conceptuel, chaque membre connaît la logique d'évolution du système à concevoir, les états que l'on souhaite atteindre et ceux que l'on souhaite éviter. Sur cette phase, la communication au sein de l'équipe est notamment supportée par le feedback visuel, chaque nouvel état ou évolution est ajouté au modèle et la cohérence du problème peut être réfléchi et remise en question par les différents membres de l'équipe pour assurer une compréhension commune des objectifs.

Utilisation lors de l'étape 2 et 6

Les étapes 2 et 6 du processus visent toutes deux à modéliser des systèmes, techniques et biologiques respectivement. LINKAGE utilise le même référentiel cognitif pour effectuer ces modélisations et les étapes 2 et 6 seront de ce fait présentées en même temps.

Dans un premier temps, l'outil conduit les utilisateurs à décrire l'environnement dans lequel se trouve le système considéré (*Axe D et I*). Cet environnement est amené à évoluer selon les états considérés, représentant de cette manière des causes ou des conséquences de l'état du système. Pour limiter au maximum les redondances lors de l'utilisation, une fois établi dans l'état d'équilibre, l'environnement est automatiquement pré-rempli sur tous les états, seules les modifications sont ainsi à être apportées par l'utilisateur (Figure 6.11).

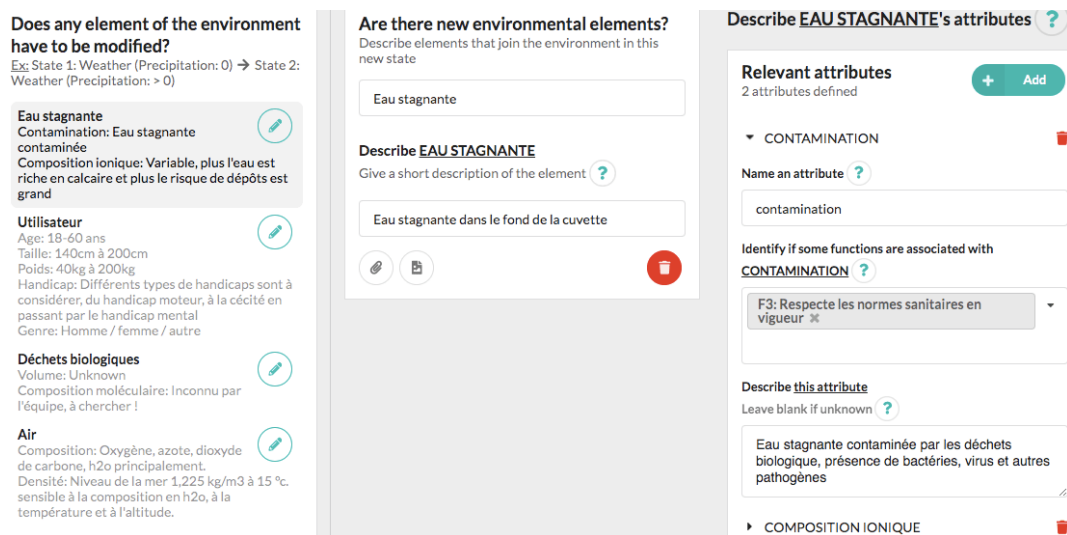
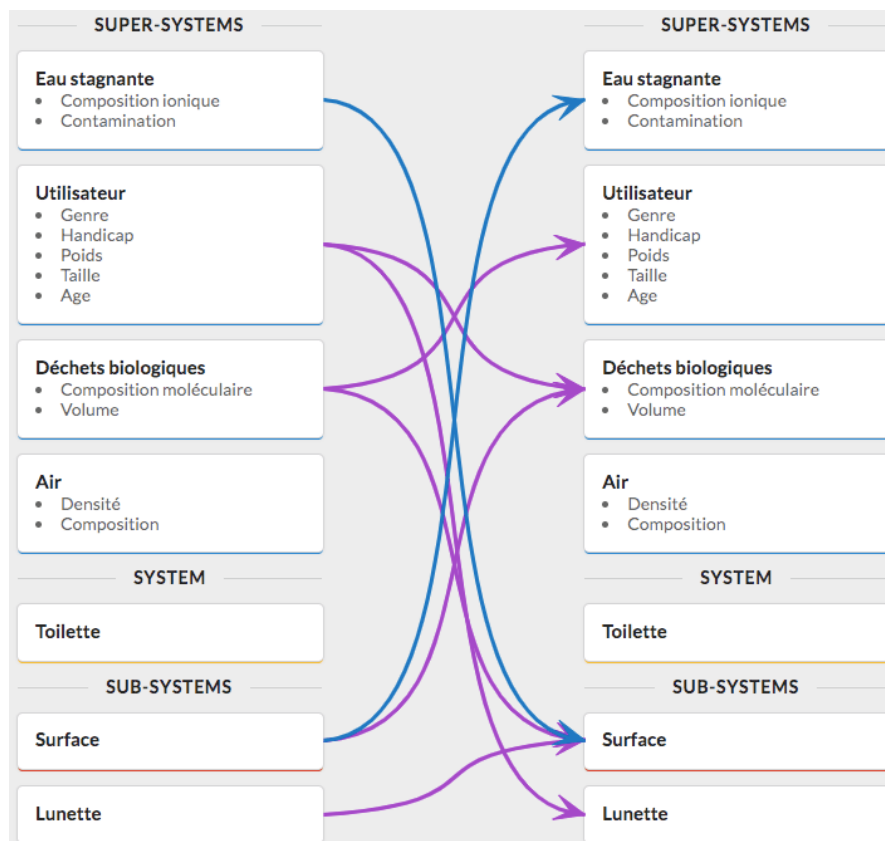


Figure 6.11 Définition de l'environnement spécifique aux différents états du système (image LINKAGE)

L'équipe décrit donc un champ de connaissances qui caractérise l'environnement du système, lui permettant de raisonner sur des fondations communes. Les éléments de l'environnement considérés essentiels sont identifiés, leurs attributs impactants sont précisés, et peuvent être associés à des fonctions propres à l'état considéré.

Les informations rassemblées permettent à l'équipe de comprendre les différents concepts utilisés et de potentiellement souligner un ensemble d'informations manquantes. De cette manière, le référentiel est construit peu à peu via l'outil et est accessible par l'ensemble des utilisateurs de l'équipe connectés au site. Cette modélisation en langage naturel permet d'effectuer une première abstraction de l'environnement du projet (choix des éléments et des attributs les plus pertinents).

Une fois l'environnement défini, l'équipe s'interroge sur les interactions au sein de l'environnement et entre les éléments de l'environnement et le système étudié (*Axe I*) (Figure 6.12).



En bleu/violet les interactions établies lors d'un état d'équilibre/de transition

Figure 6.12 Génération des interactions (image LINKAGE)

Sur la figure 6.12, on peut voir que chaque interaction générée interroge les utilisateurs sur l'impact de l'élément de la colonne de droite sur l'élément de la colonne de gauche. Dans la mesure où une interaction est par définition bidirectionnelle, les deux sens sont à établir pour chaque couple d'éléments.

Une rapide description de l'impact observé et du sous-système responsable de celui-ci est permise, de manière textuelle ou par l'importation d'images et de documents PDF (*Axe H*). Celui-ci est également caractérisé par un ensemble d'attributs conduisant à établir les liens conceptuels considérés par les différents membres de l'équipe (ex. L'attribut X de l'élément 2 entraîne l'impact étudié) (*Axe C*). La mise en place du référentiel conceptuel et l'abstraction des éléments à considérer se poursuit alors de manière coordonnée (Figure 6.13).

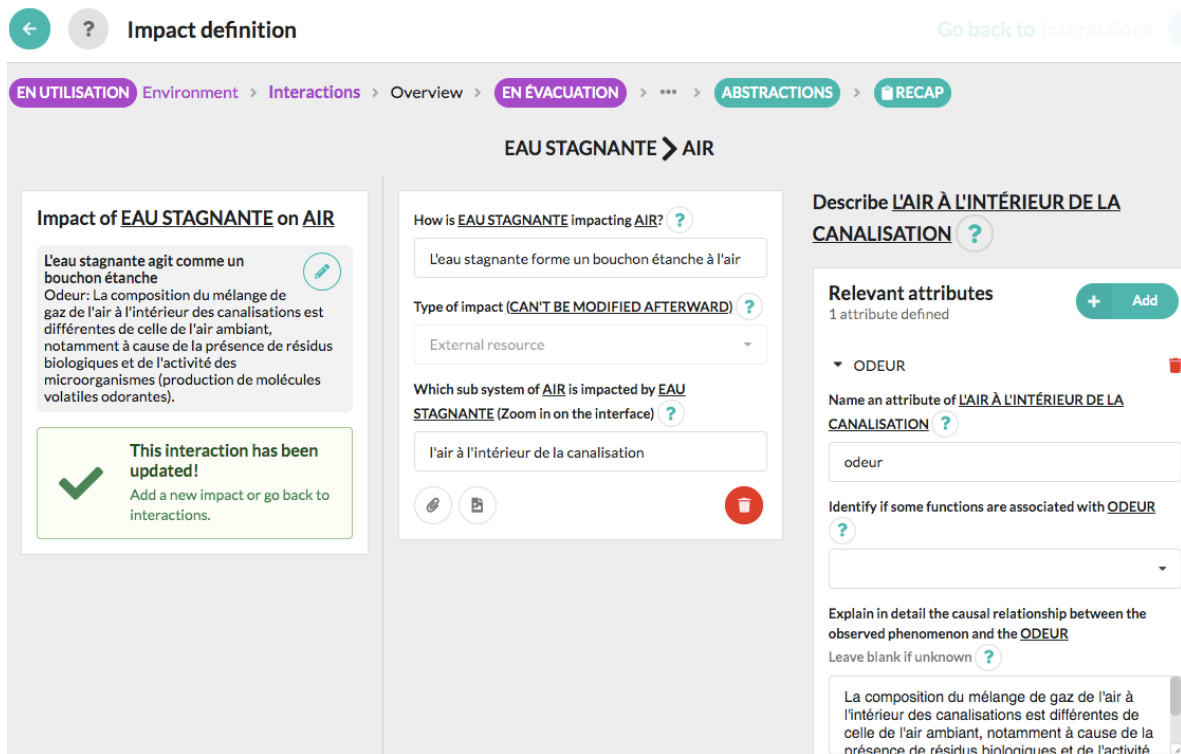


Figure 6.13 Exemple d'un impact de l'eau stagnante sur l'air (image LINKAGE)

On soulignera une spécificité des interactions impliquant l'élément *système*. Celles-ci entraînent en effet la génération automatique de sous-systèmes imbriqués (représentés avec un liseré rouge sur la figure 6.12) au sein du système (Axe G).

Dans la pratique, LINKAGE présente trois niveaux systémiques visibles : le super-système, le système et le sous-système (Axe I). Il pousse cependant à envisager d'autres niveaux en questionnant les sous-systèmes des sous-systèmes, etc. qui seront uniquement visibles sur la liste des interactions et non directement sur le modèle graphique.

À travers l'évolution des éléments du modèle (environnement, système, sous-systèmes) entre les états étudiés, les différents problèmes techniques sont identifiés et leurs causes ou conséquences sont décrites.

L'outil guide ensuite l'équipe afin de finaliser l'abstraction selon trois types d'éléments, les contraintes extérieures, les ressources extérieures et les interactions structurant le système. Pour cela, l'outil concentre l'attention des utilisateurs sur un ensemble d'éléments clés issu du modèle (les sous-systèmes, les attributs et les interactions).

Les éléments étant jugés pertinents sont manuellement sélectionnés et reformulés (Figure 6.14). Un ensemble de conseils est également proposé pour effectuer au mieux l'abstraction (ex. Dessiner les systèmes à abstraire pour faire émerger les éléments clés).

FEUILLE DE LOTUS Biological model	de l'épiderme	formées.
3 Sale et moui...	air piégé (composition): Les gaz composant l'air sont assez peu affines de l'eau et donc les molécules d'eau ont tendance à rester fixées entre elles étant donné leur tension superficielle, l'eau est maintenue en sphère.	Utiliser des fluides ambiants (comme l'air) comme levier de stabilisation ou pour transférer de l'énergie (vitesse de l'air) à d'autre fluide ambiant.
4 Propre et mo...	air piégé (surface de contact): L'air piégé par les micros et nanostructures permet de maintenir physiquement les (comme un coussin) les gouttes en surface	Piéger des fluides ambiants pour en faire des ressources permettant un soutien physique
ABSTRACTED SOLUTIONS	gouttes d'eau en surface (volume): Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	Récolter de l'énergie mécanique issue de la masse de fluide (comme l'eau) de l'environnement (énergie potentielle de pesanteur).
External constraints	gouttes d'eau en surface (vitesse): L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	Récolter de l'énergie mécanique issue de la vitesse du fluide (comme l'eau) de l'environnement (énergie potentielle de pesanteur).
External resources	gouttes d'eau en surface (fluide): La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	Utiliser les propriétés des fluides comme la poussée d'Archimède comme moteur d'évacuation.
Internal organizations	gouttes d'eau en surface (organisation): Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	Le milieu d'évacuation doit être le plus affine possible des éléments à évacuer.

Figure 6.14 Exemple d'un tableau d'abstraction basé sur les interactions (image LINKAGE)

En sortie, l'outil propose un récapitulatif présentant de bas en haut les informations du plus abstrait (éléments abstraits) au plus détaillé (connaissances rassemblées lors de la modélisation). Un exemple sur la feuille de Lotus est proposé en annexe (Annexe 9, p. 316). L'outil présente par ailleurs et une synthèse graphique interactive de chaque état du projet (figure 6.15), ou de tous les états, pouvant servir de support de réflexion et de présentation aux équipes. Celle-ci est accessible à tout moment et est également ajoutée au document récapitulatif en sortie de l'outil (Annexe 9, p. 310).

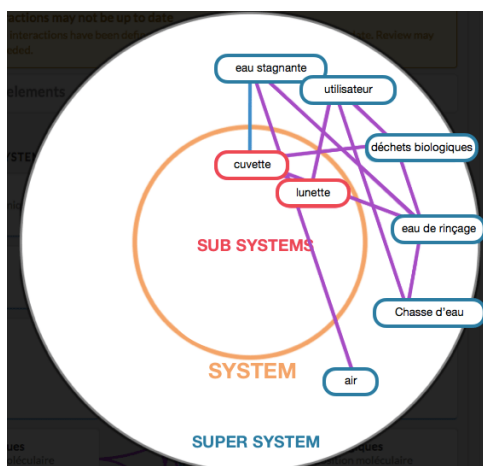


Figure 6.15 Exemple d'une synthèse graphique (image LINKAGE)

Impact sur les autres étapes du processus

Un des objectifs de l'outil est de soutenir la pratique de la biomimétique sur l'ensemble de son processus. Là où les étapes 1, 2 et 6 sont aujourd'hui principalement ciblées, les modèles générés par l'outil sont conçus pour permettre d'accompagner les équipes interdisciplinaires sur un ensemble de points demeurant à développer sur la plateforme :

- La description précise de l'environnement et de son évolution avec le problème peut potentiellement mener plus facilement à la projection dans des Espaces Écologiques de Résolution (Chapitre 5, partie 5.3.2) (Étape 3).
- La description du problème en états peut potentiellement conduire l'équipe à identifier des scénarios biologiques équivalents lors des phases de recherche d'organismes (Étape 4).

- L'identification de différents scénarios et différents éléments composant l'environnement peut potentiellement conduire à l'établissement de nouveaux critères de sélection approchant les modèles biologiques de manière multifonctionnelle (Étape 5).
- La comparaison des scénarios et systèmes biologiques et techniques peut potentiellement accompagner l'équipe lors de la transposition des modèles biologiques à la technologie (Étape 7).
- L'approche systémique supportée par l'outil peut potentiellement aider à la mise en place de tests pertinents et la prise en compte d'éléments environnementaux nécessaires à la validation des stratégies technologiques élaborées (Étape 8)

Après cette description de l'outil LINKAGE comme support à la pratique de la biomimétique, la partie suivante souligne les correspondances qui peuvent être établies entre les modèles existants dans la littérature et celui proposé dans l'outil.

6.3.2.3 LINKAGE, un outil intégré au contexte biomimétique actuel

Le cadre conceptuel encadrant la modélisation des systèmes biologiques et technique a été décrit dans le chapitre 5 à travers la description et comparaison des différents prismes d'abstraction existant dans la littérature (Chapitre 5, partie 5.3.2). Afin de mettre en évidence la cohérence de l'outil vis-à-vis de nos observations initiales, le tableau 5.9 est repris et positionne LINKAGE en décrivant ses différents éléments caractéristiques selon les quatre prismes précédemment établis (Chapitre 5, partie 5.3.2) (Tableau 6.5).

Tableau 6.5 Positionnement de LINKAGE par rapport aux éléments constitutifs des modèles de la littérature

Référence	Quoi ?	Comment ?	Pourquoi ?	Où et quand ?
Gero, 1980 Goel, 2009	Structure	Comportement	Fonction	
Mak & Shu, 2004	Forme		Principe	
Bhasin & McAdams, 2018	Matériau et structure	Mécanismes, processus		
Nagel, 2018	Forme, Surface, Architecture, Matériau	Processus	Système, Fonction	
Chakrabarti, 2005	Partie, Organe	État, Ressources (Inputs), Phénomène physiques	Action, Loi physique	
Vincent, 2006	Substance et structure	Énergie et information		Espace et temps
LINKAGE	Description des éléments du modèle sur différents niveaux systémiques	Scénarios d'évolution entre les états et mise en place des interactions	Pourquoi les éléments causent-ils l'impact observé ?	Description de l'environnement et des états

LINKAGE s'intègre donc de manière logique au sein du cadre existant. La partie suivante synthétise le cœur de ces apports sur la communication et la répartition des tâches au sein de l'équipe de conception biomimétique interdisciplinaire.

6.3.2.4 Synthèse sur les apports de l’outil quant à la communication

Le fondement de la démarche présentée dans ce chapitre est l’étude de la communication au sein des équipes interdisciplinaires. À travers la mise en place d’un référentiel cognitif visant à harmoniser le raisonnement de l’équipe au cours du processus, et par conséquent réduire les dissonances cognitives entre les acteurs, l’objectif poursuivi est l’établissement d’un référentiel conceptuel partagé par l’équipe projet, dont la formalisation est structurée par LINKAGE.

Le raisonnement porté par l’outil conduit ainsi à limiter les bruits psychologiques :

- **L’encodage/décodage du signal et le contexte d’interprétation (dépendante du référentiel conceptuel et du référentiel cognitif).** Par le biais de l’outil, chaque membre peut extraire dans le détail les objectifs du projet, les raisons pour lesquelles les différents éléments sont identifiés et peut raisonner sur des liens conceptuels explicités dans un référentiel partagé.
- **Raisonnement généré par le message décodé (variabilités de pratique et de référentiel cognitif).** La mise en place d’un espace partagé de communication doit permettre aux différents membres de l’équipe d’appliquer les approches propres à leur raisonnement tout en comprenant les démarches entreprises par les autres acteurs. La variabilité de pratiques est valorisée par leur reconnaissance et leur association à travers la poursuite d’un but commun.

Par ailleurs, d’un point de vue pratique, les apports synergiques des phases prescriptives (description des scénarios des états, choix des éléments à considérer, choix des interactions, abstraction des éléments identifiés pertinents) et des phases descriptives (identification des éléments potentiels, identification des interactions potentielles, caractérisation des différents éléments considérés, abstraction des éléments identifiés pertinents) sont permis par l’activité des différents membres de l’équipe.

Afin d’accompagner ce travail collaboratif de l’équipe, LINKAGE est également muni d’un ensemble de « Pop-up » et de boutons d’aide conseillant les équipes sur la répartition des rôles des différents membres (Axe B) (Figure 6.16).

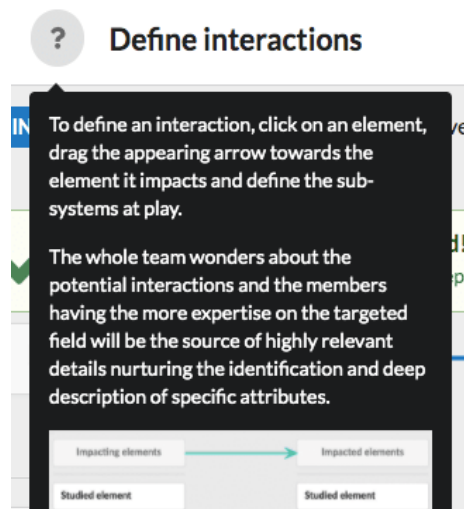


Figure 6.16 Exemple de fenêtres d'aide guidant les équipes

6.3.2.5 Synthèse sur LINKAGE

Au cours de la présentation de l'outil dans les parties précédentes, les axes structurant le référentiel cognitif sont intégrés au fur et à mesure afin d'accompagner les équipes dans leur raisonnement, leur pratique et leurs échanges (Tableau 6.6).

Tableau 6.6 Incarnation du référentiel cognitif à travers LINKAGE

Référentiel cognitif préconisé	Éléments structurant LINKAGE
Axe A : Intégrer les éléments subjectifs comme des contraintes externes.	Caractérisation des différents états du système et de son environnement associé.
Axe B : Combiner les approches prescriptives et descriptives.	Pop-up et boutons d'aide guidant les équipes.
Axe C : Exposer les liens entre les concepts abstraits fonctionnels, structurels, matériels et comportementaux	Réseau de concepts conçu à différentes échelles et à divers états du (de la) problème (solution), et formé de relations causales.
Axe D : Présenter les problèmes et les solutions dans leurs contextes spatio-temporels.	Lien entre l'évolution du système générant le problème/la solution (scénario/états) interagissant avec leur environnement.
Axe E : Consacrer des espaces pour la conception de produits et la collecte de connaissances tout en soutenant leur contribution synergique	Capitalisation des résultats par le biais d'une base de données personnelles basée sur les modèles déjà établis, celle-ci peut être explorée via une barre de recherche sur la page d'accueil de l'outil.
Axe F : Considérer l'évolution du système à travers un raisonnement par états successifs décomposant les fonctions.	Modèles d'évolution à travers les états
Axe G : Considérer les systèmes à travers des structures imbriquées	Génération automatique de sous-systèmes imbriqués lors de la mise en place d'interactions
Axe H : Décrire les formes avec précision	Un espace spécifique est dédié à chaque niveau pour caractériser les attributs des éléments impliqués, le « quoi » du tableau 5.10.
Axe I : Soutenir un point de vue systémique	Les interactions peuvent être associées à l'axe ontologique (ressources, contraintes, etc.), les scénarios d'évolution à l'axe téléologique, les états et leur durée à l'axe génétique, les fonctions associées aux différents états et interactions à l'axe fonctionnel (Le Moigne, 1994).

LINKAGE est ainsi conçu pour accompagner les équipes interdisciplinaires de conception biomimétique en structurant leur raisonnement et leurs échanges. La partie suivante décrit l'expérimentation 3, menant à l'évaluation de l'outil sur son utilisabilité et ses apports perçus par des utilisateurs professionnels.

6.3.3 Expérience 3 : évaluation de l'outil linkage

Comme décrit en partie 6.2.2.2, l'expérimentation est menée avec 19 professionnels traitant 5 projets variés allant de la formalisation d'innovations dans le traitement du diabète à l'identification d'alternative face à la disparition des objets à usage unique (paille, couverts en plastique, etc.). Sur les 19 professionnels, 12 ont répondu au questionnaire d'évaluation dont les résultats sont présentés dans cette partie.

Évaluation sur les critères de Nielsen

Dans un premier temps, les répondants sont interrogés sur les critères d'utilisabilité de Nielsen (Tableau 6.7) tels que décrits dans la partie « Matériels et méthodes » de ce chapitre (Chapitre 6, partie 6.2.2.2).

Tableau 6.7 Évaluation de LINKAGE sur les critères d'utilisabilité de Nielsen

Échelle de Likert à 5 niveaux	0	1	2	3	4	Médiane
Satisfaction	0 %	0 %	16,7 %	41,7 %	41,7 %	3
Prise en main	0 %	0 %	16,7 %	41,7 %	41,7 %	3
Erreurs générées	0 %	0 %	50 %	33,3 %	16,7 %	2,5
Détection et correction des erreurs	0 %	8,3 %	8,3 %	75 %	8,3 %	3
Précision de l'outil	0 %	8,3 %	8,3 %	50 %	33,3 %	3
Intérêt du raisonnement	0 %	0 %	8,3 %	41,7 %	50 %	3,5

En gras la valeur maximale

Les retours des participants sont globalement très positifs malgré un certain nombre d'erreurs générées au cours de l'utilisation. On soulignera notamment que 50 % des avis donnent la note maximale sur l'intérêt du raisonnement proposé par l'outil, « *il guide le travail* », « *permet d'avoir de nouvelles idées grâce à une démarche construite* », « *mise en place de bases solides de réflexion* ».

Essentiellement, les participants ont mis en évidence un manque de temps pour s'approprier pleinement l'outil « *Pas assez de temps pour finir chaque phase* », « *Une demi-journée supplémentaire sur un cas particulier pourrait être utile* ».

Évaluation sur l'ergonomie

Les participants n'étant pas préalablement formés à l'utilisation de l'outil, la question de l'ergonomie de celui-ci était centrale à l'expérience. En effet, à terme, LINKAGE sera rendu disponible en libre accès et son utilisation doit donc être possible de manière autonome afin que les équipes puissent effectivement l'utiliser en pratique (Tableau 6.8).

Tableau 6.8 Évaluation de LINKAGE sur des critères d'ergonomie

Échelle de Likert à 5 niveaux	0	1	2	3	4	Médiane
L'outil est-il intuitif ?	8,3 %	0 %	25 %	50 %	16,7 %	3
La structure de l'outil est-elle logique ?	0 %	8,3 %	8,3 %	33,3 %	50 %	3,5
Les pop-ups / aides sont-ils suffisants ?	0 %	0 %	8,3 %	41,7 %	50 %	3,5

En gras la valeur maximale

Au vu des résultats du tableau 6.9, l'utilisation de l'outil est perçue comme guidée de manière pertinente. En synthèse, 66,7 % des répondants considèrent que l'outil est suffisamment ergonomique tel quel et 33,3 % indiquent que l'ergonomie doit être améliorée, « *certaines projets semblent plus ou moins adaptés* », « *l'outils devrait être plus expliqué/vulgarisé afin d'être compris de manière autonome par des non-initiés* », « *ajouter une définition des différents termes utilisés* ».

Cette phase expérimentale a également permis de détecter un certain nombre de bugs informatiques impactant alors négativement l'expérience utilisateur durant la phase pratique mais permettant dans le même temps leur correction a posteriori.

Évaluation des apports

Enfin, la dernière partie du questionnaire interrogeait les différents apports de l'outil sur le travail de l'équipe, la gestion de l'information (Tableau 6.9) et les contributions principales perçues (question ouverte).

Tableau 6.9 Évaluation des apports de l'outil LINKAGE

Échelle de Likert à 5 niveaux	0	1	2	3	4	Médiane
Travail de l'équipe						
Guide le raisonnement de l'équipe ?	0 %	0 %	8,3 %	66,7 %	25 %	3,5
Stimule la communication entre les acteurs de discipline différente ?	0 %	8,3 %	8,3 %	50 %	33,3 %	3
Pousse à participer aux échanges au sein de l'équipe ?	0 %	8,3 %	0 %	66,7 %	25 %	3
J'ai le sentiment que mon avis a été écouté au cours de la séance ?	0 %	0 %	0 %	66,7 %	33,3 %	3
Gestion de l'information						
Permet de structurer des informations techniques ?	0 %	0 %	8,3 %	66,7 %	25 %	3
Permet de structurer des informations biologiques ?	0 %	0 %	8,3 %	58,3 %	33,3 %	3
Permet d'identifier des informations techniques manquantes ?	0 %	0 %	16,7 %	41,7 %	41,7 %	3
Permet d'identifier des informations biologiques manquantes ?	0 %	0 %	8,3 %	66,7 %	25 %	3
Facilite la compréhension du système étudié ?	0 %	0 %	0 %	66,7 %	33,3 %	3

En gras la valeur maximale

Sur les apports principaux de l'outil, les répondants indiquent qu'il permet de mieux « visualiser les interactions », d'avoir « une vue d'ensemble » du système et de « l'impact des environnements extérieurs » et qu'il conduit à la « mise en place de la réflexion "d'abstraction" d'une fonction ».

Par ailleurs, là où la plupart des résultats ne peuvent pas être significativement discriminés par population au vu du faible échantillon considéré, une simulation de Monte Carlo souligne une différence significative sur l'implication des acteurs. Les membres de l'équipe étant les plus spécialisés en biologie (expertise en biologie autoévaluée à 4 ou 3, n=5) notent significativement mieux le critère « L'outil m'a poussé à participer aux échanges au sein de l'équipe » (médiane 4 vs 3, χ^2 , p-value = 4.10^{-2*}).

Enfin, sur une échelle de Likert à 7 points (0-6), la question finale qui est posée est : « Recommanderiez-vous l'utilisation de l'outil LINKAGE à d'autres équipes de conception biomimétique ? ». Les réponses obtenues montrent une médiane de 5,5 avec 50 % des répondants donnant la note maximale de 6.

De manière générale, l'outil est donc reconnu comme pertinent, utile et apportant un ensemble de contributions structurant d'une part le raisonnement de l'équipe (référentiel cognitif) et les informations manipulées par celle-ci (référentiel conceptuel). Plus précisément, notre objectif d'harmonisation des référentiels pour faciliter la communication au sein de l'équipe est partiellement validé dans les conditions de l'expérience dont les limites seront précisées dans la partie suivante.

6.3.4 Synthèse, limites et perspectives

Ce 6^{ème} chapitre aborde la troisième sous-hypothèse de l'hypothèse 2, « il est possible de structurer les échanges au sein des équipes de conception pour rendre synergique l'activité des acteurs aux spécialisations variées et prévenir les freins émergeant de l'interdisciplinarité » (H.2.3).

Les travaux sur la communication présentés dans cette partie nous ont tout d'abord conduit à caractériser la manière dont les biologistes et les concepteurs raisonnent et représentent des informations.

À travers le prisme des théories de la communication, un ensemble d'obstacles aux échanges entre les profils issus des différents champs scientifiques d'intérêt ont été soulignés. À partir de ces observations, un référentiel cognitif partagé est préconisé afin de réduire les bruits psychologiques potentiels.

Par rapport aux approches existant dans la littérature, la notion de l'équipe interdisciplinaire est replacée au centre de nos prescriptions lors de l'accompagnement des phases de raisonnement et de modélisation des systèmes étudiés.

L'outil LINKAGE, représentant l'incarnation de nos préconisations, se différencie des outils actuels car son fondement théorique est issu des référentiels cognitifs des deux champs scientifiques d'intérêt. Ajouté à cela, il est disponible sous la forme d'un site web libre d'accès, qui porte une attention particulière au passage de la recherche à l'application pratique par son ergonomie et son accompagnement des équipes lors de son utilisation. L'outil permet ainsi la génération de projets collaboratifs, pouvant rassembler chacun plusieurs utilisateurs, travaillant sur plusieurs modèles (technologiques ou biologiques), et capitalisant sur l'ensemble des connaissances stockées via un moteur de recherche interne.

Les retours expérimentaux d'un échantillon pluridisciplinaire de professionnels ont conduit à une première validation des apports de LINKAGE. L'outil est reconnu comme structurant le travail de l'équipe (raisonnement, communication, pratique) et la représentation des informations issues de la biologie et de la technologie (H.2.3). Cette phase de test a également permis de mettre en évidence un ensemble de leviers d'amélioration ergonomique et de bugs informatiques, permettant une amélioration de l'outil.

Ces premiers tests possèdent de nombreuses limites et doivent être vus comme une première validation de la démarche utilisée et de l'acceptabilité d'utilisateurs professionnels. Ainsi, le manque d'équipe contrôle, la variabilité des équipes et des sujets ne permettant pas de comparer les résultats de la modélisation en tant que telle ou encore la taille restreinte de l'échantillon considéré sont autant de biais limitants.

Cette deuxième phase descriptive se poursuivra par d'autres phases de tests, et grâce à la récolte d'un ensemble de données d'utilisation anonymisées, et de retours d'expériences permettant l'amélioration continue de l'outil.

Enfin, le développement de l'outil sur les autres étapes du processus, notamment sur les étapes de projection, et à terme sur l'ensemble du processus de conception TPIB, représente la perspective principale de cette partie de nos travaux. Cette démarche a pour objectif de faciliter les échanges entre les mondes académiques et industriels à travers une plateforme

ergonomique et évolutive. L'outil permet ainsi le transfert des travaux académiques du LCPI vers les praticiens dans un sens, et la récolte de données d'utilisation nourrissant la recherche en méthodologie biomimétique de l'autre.

Au cours des travaux présentés, le biomiméticien, cœur transversal de notre réflexion, a été reconnu légitime (chapitre 4), a été intégré dans le processus et dans la pratique (chapitre 5), et a été inclus au sein des équipes de conception (chapitre 6.3).

La méthodologie utilisée pour conduire à la mise en place du biomiméticien de manière effective passe par la création d'un déséquilibre moteur. En effet, nos préconisations adaptent le cadre méthodologique à une équipe interdisciplinaire ayant une expertise en biologie, rendant ainsi nécessaire, ou du moins très favorable, la considération d'un nouvel acteur. De cette manière, là où le cadre méthodologique apparaissait comme un carcan dans la partie descriptive initiale (outils et processus faits pour des ingénieurs par des ingénieurs), il devient à présent un levier d'évolution par la mise en place d'une nouvelle place à pourvoir au sein des équipes.

Jusqu'à présent, le concept de biomiméticien est manipulé sous le format d'un profil considéré *idéal*, laissant de côté sa définition précise pour nous concentrer sur ses apports potentiels. Grâce à cette démarche, et à partir des contributions spécifiques rassemblées au fil de nos travaux, une première définition précise de ce profil peut être proposée dans la dernière partie de résultats de ce manuscrit.

6.4 Le biomiméticien

Face à la problématique traitée dans nos travaux, la première hypothèse émise est « **l'intégration au sein des équipes de conception biomimétique d'un nouvel acteur ayant des compétences en biologie** ». La définition de ce nouvel acteur apparaît par conséquent comme un prérequis à la résolution du problème au cœur de notre réflexion. Afin de différencier ce nouveau membre des équipes de conception biomimétique au cours de nos études, le terme de « biomiméticien » a été posé. Sans apporter de description précise, celui-ci établit par sa construction sémantique qu'il s'agit d'un acteur atypique, spécialisé en conception biomimétique. Cette partie 6.4 vise à synthétiser l'ensemble des apports présentés dans les parties précédentes, avec comme objectif d'apporter un premier ensemble d'éléments définissant ce profil nouvellement intégré. Dans cette optique, trois points sont étudiés :

- Les rôles, missions et activités, visant à caractériser les biomiméticiens en rassemblant les préconisations pratiques de nos travaux
- Les savoirs, savoir-faire et savoir-être, découlant du point précédent et correspondant au cadre de caractérisation des professionnels du Répertoire Opérationnel des Métiers et des Emplois (ROME).
- L'impact des deux points précédents sur la génération de cursus de formation, perspective clé pour conduire à la formalisation d'un nouveau métier.

Ces contributions doivent permettre d'établir un cadre de réflexions autour de ce nouveau professionnel de la conception biomimétique. Sans prétendre poser une définition finale de ce dernier, cette formalisation vise à ouvrir un nouvel axe de recherche méthodologique, centré sur les professionnels en conception biomimétique.

6.4.1 Rôles, missions et activités des biomiméticiens

Quels rôles pour les biomiméticiens

Le rôle sera ici défini comme « l'ensemble des fonctions attribuées » à un professionnel (Dictionnaire Larousse). Plus qu'une définition précise, nous proposons ici quatre scénarios dans lesquels nous préciserons des fonctions génériques et des difficultés pouvant être rencontrées :

- **Intégré comme membre d'une équipe de conception biomimétique préétablie.** Son rôle apparaît ici principalement caractérisé par des fonctions opérationnelles (pratique de la biomimétique et apports en biologie), il s'agit d'accompagner les démarches de l'équipe préexistante. Une des difficultés principales pouvant être observée vient de l'intégration comme membre nouveau, dans un cadre méthodologique potentiellement fixé au préalable. Dans ce type de scénario, il peut également représenter un apport transversal de compétences à l'échelle d'un département de R&D permettant de mutualiser les coûts mais limitant

potentiellement la profondeur d'intégration sur chaque projet et dans chaque équipe.

- **Intégré comme membre d'une nouvelle équipe de conception biomimétique.** Au rôle opérationnel s'ajoute une potentielle fonction structurante. Dans la mesure où l'équipe n'est pas encore établie, le biomiméticien peut se poser comme un spécialiste des méthodes biomimétiques et influencer en partie la manière dont le projet est approché. De cette manière, le caractère interdisciplinaire de l'équipe peut être établi dans les fondements de son fonctionnement.
- **Intégré comme moteur externe de transition vers une stratégie de conception biomimétique.** Dans le cadre particulier, mais actuellement très répandu, d'une intégration via une mission de conseil visant à accompagner une transition vers la conception biomimétique, le rôle de formateur s'ajoute aux rôles précédents. Avec pédagogie, le biomiméticien doit transmettre un ensemble de savoir et savoir-faire pratique et méthodologique aux équipes. Des concepts fondamentaux en biologie peuvent également être présentés.
- **Intégré comme moteur interne de transition vers une stratégie de conception biomimétique.** Enfin, les biomiméticiens peuvent être intégrés comme acteurs de la transition vers la conception biomimétique. Ils se poseront de ce fait en chefs d'équipe, de projet, ou de pôle d'innovation, ajoutant aux fonctions précédemment identifiées celle de manager. Ce rôle laisse les biomiméticiens libres de composer des équipes interdisciplinaires, de tester et d'implémenter des méthodologies adaptées à la pratique de la biomimétique dans le contexte visé. Dans ce scénario, le biomiméticien a également la fonction de convaincre les décideurs du bien-fondé de l'approche et des résultats apportés.

Ce nouvel acteur peut donc être intégré de diverses manières dans le contexte professionnel actuel, le conduisant à un ensemble de rôles plus ou moins impactant sur l'activité de l'équipe.

Différentes fonctions explicitées ci-dessus dépendent du mode d'intégration sans être spécifique au profil du biomiméticien (gestion d'équipe, formation de professionnel, etc.) et seront par conséquent laissées de côté dans la suite de cette partie.

En nous concentrant sur le cœur opérationnel des biomiméticiens, la partie suivante établit une liste de missions et d'activités spécifiques.

Quelles missions et activités pour les biomiméticiens

Au cours des chapitres précédents, et notamment la description des contributions des biomiméticiens dans la pratique de la biomimétique (Chapitre 5, partie 5.4.2), différentes activités ont été préconisées (A.1 à A.26), conduisant à la formalisation de 10 missions pouvant être associées au rôle opérationnel du biomiméticien (Tableau 6.10). Ces missions se répartissent ainsi sur les différentes étapes du processus et correspondent à la réponse aux attentes identifiées dans la phase descriptive. On précisera ici que les activités A.1 à A.26 sont

Chapitre 6 – Intégration et formalisation du biomiméticien

identifiées par étape dans la partie 5.4.2, et non par mission, causant l'absence de continuité de la numérotation des activités dans le tableau 6.10.

Tableau 6.10 Missions et activités des biomiméticiens

Missions	Activités
M.1 : Apporter de nouveaux axes d'innovation	A.1 : Questionner et faire préciser en tant que non-spécialiste A.2 : Supporter une approche systémique du problème et durable de la solution A.3 : Apporter une vision différente, une variabilité de raisonnement
M.2 : Favoriser la compréhension commune du problème	A.1 A.2 A.6 : Identifier les informations manquantes.
M.3 : Participer à l'analyse et l'abstraction des systèmes techniques	A.1 A.2 A.11 : Assurer un niveau d'abstraction adéquat.
M.4 : Participer à la projection des problèmes techniques au sein de la biologie	A.4 : Assimiler autant d'informations que possible sur les phases centrées sur la technologie A.12 : Assurer la pertinence biologique de la projection fonctionnelle. A.13 : Utiliser des outils et raisonnements biologiques pour effectuer la projection dans des espaces biologiques de résolution. A.14 : Expliciter les concepts biologiques clés.
M.5 : Participer à la recherche de modèles biologiques	A.7 : Rassembler les informations issues de la littérature spécialisée A.15 : Orienter les recherches effectuées par l'équipe via les outils classiques A.16 : Utiliser des outils biomimétiques classiques A.17 : Utiliser des outils et raisonnements biologiques pour amplifier ou effectuer la recherche.
M.6 : Participer à la sélection des modèles biologiques clés	A.2 A.3 A.14 A.18 : Identifier de nouveaux critères de sélection à considérer. A.19 : Récolter les données correspondant aux critères de sélection. A.20 : Apporter un point de vue biologique sur les phases de sélection.
M.7 : Participer à l'analyse et l'abstraction des systèmes biologiques	A.6 A.7 A.5 : Apporter de l'information biologique sur les différents prismes d'abstraction A.8 : Assurer la bonne interprétation des informations biologiques rassemblées par l'équipe. A.9 : Évaluer l'importance relative des informations biologiques pour épurer l'analyse. A.10 : Établir des liens entre les concepts biologiques clés pour permettre à l'équipe d'approcher le modèle biologique de manière pertinente A.21 : Assurer que la projection est cohérente avec la solution abstraite
M.8 : Participer à la projection à la technologie	A.22 : Proposer une variabilité d'approche lors des phases de créativité. A.23 : Supporter une vision systémique dans les concepts générés. A.24 : Valoriser la multifonctionnalité. A.25 : Limiter la fixation technologique.
M.9 : Phase de tests	A.26 : Évaluation de l'impact environnemental des solutions finales envisagées
M.10 : Favoriser les échanges avec le monde de la recherche biologique	A.27 : Établir un réseau de chercheurs intéressés par l'approche A.28 : Assurer le bon échange d'informations entre les chercheurs et l'équipe A.29 : Apporter au chercheur en biologie une vision nouvelle sur son objet d'étude

À travers l'ensemble des activités listées dans le tableau 6.10 et les apports des travaux sur la communication, présentés dans la première partie de ce chapitre, les compétences permettant aux biomiméticiens de mener à bien leurs missions sont identifiées dans la partie suivante.

6.4.2 Caractérisation des savoirs, savoir-faire et savoir-être

Le profil d'un professionnel est caractérisé par des compétences, compétences dont l'acquisition par la formation permet l'accès à un métier (ABET, 2013; Passow et al., 2017).

Ces compétences sont séparées en deux catégories (Shuman et al., 2005), d'une part les « *hard skills* » *anglo-saxonnes*, regroupant les savoirs et les savoir-faire :

- **Savoir** : « *Ensemble cohérent de connaissances acquises au contact de la réalité ou par l'étude* » (Dictionnaire Larousse) qui représente ici les compétences théoriques du biomiméticien
- **Savoir-faire** : « *Compétence acquise par l'expérience dans les problèmes pratiques, dans l'exercice d'un métier* » (Dictionnaire Larousse) qui représente ici les compétences pratiques du biomiméticien.

D'autre part les « *professional skills* », encore nommées « *soft skills* », associées aux savoir-être :

- **Savoir-être** : la définition exacte reste discutée et nous considérerons dans nos travaux qu'il s'agit des « *éléments constituant la personnalité, les aspirations, le référentiel de valeur et de manière générale impactant le comportement d'un professionnel* ».

À partir des différentes missions et activités, un ensemble de compétences est identifié comme clé, nous permettant d'apporter une première description précise des compétences du biomiméticien.

Les savoirs et savoir-faire sont présentés associés afin de correspondre au format des Fiches Métiers du Répertoire Opérationnel des Métiers et des Emplois (ROME). À ceux-ci s'ajoute la maîtrise de la langue Anglaise qui apparaît comme un prérequis fondamental dans la mesure où les travaux de recherche sont publiés en anglais (Tableau 6.11).

Du fait de leur nature transversale, les savoir-être sont listés à part. Au vu des freins identifiés dans la phase descriptive et des attentes décrites dans le chapitre 4, nous soulignons leur impact central dans la capacité des biomiméticiens à mener à bien leurs missions, et donc dans leur définition (Tableau 6.12).

Tableau 6.11 Compétences du biomiméticien : savoir et savoir-faire

Savoir-faire (S.F.)	Savoir (S.)
S.F.1 : Réaliser/Remettre en question une analyse de problème/solution à travers un prisme propre, systémique, multifactoriel.	S.1 : Outils d'analyse systémique (LINKAGE, effets dominos, 9-écrans, cycle de vie, etc.) S.2 : Connaissances générales en ingénierie de la conception (concepts, vocabulaire, etc.) S.3 : Connaissances transversales en Biologie (théories, concepts, classification, etc.) S.4 : Évaluation environnementale (indicateurs, mesures, normes, etc.) S.5 : Écoconception (théorie, approches, processus, concepts, outils)
S.F.2 : Transférer des connaissances entre les champs scientifiques	S.2 S.3 S.6 : Outils biomimétiques de transfert (LINKAGE, thésaurus, Biold support, etc.)
S.F.3 : Présentation de données biologiques à différents types de public	S.2 S.3 S.6
S.F.4 : Collecter, classer, et analyser des informations scientifiques (notamment en biologie)	S.3 S.7 : Outils biomimétiques de recherche de modèles (base de données, mots-clés, etc.) S.8 : Approches et outils d'étude bibliographique S.9 : Connaissances spécifiques en Écologie et Systématique (raisonnement, outils, etc.)
S.F.5 : Évaluer l'adéquation entre un modèle biologique et un modèle technique	S.2 S.3 S.9 S.10 : Outils de sélection, critères d'intérêt, etc.
S.F.6 : Modéliser des systèmes biologiques	S.3 S.11 : Outils biomimétiques de modélisation (LINKAGE, SAPPPhIRE, FBS, etc.) S.12 : Concept d'abstraction, démarche, prismes et niveaux S.13 : Spécificités des systèmes biologiques
S.F.7 : Apporter une assistance scientifique en biologie	S.3 S.8 S.9
S.F.8 : Élaborer des propositions d'applications techniques	S.14 : Outils de créativité, idéation, représentation graphique, etc. S.2 S.5
S.F.9 : Évaluer les impacts environnementaux	S.1 S.5
S.F.10 : Coordonner des partenariats avec des chercheurs en biologie	S.3 S.15 : Organisation de la recherche biologique S.16 : Apports d'une vision biomimétique sur une recherche biologique S.17 : Réseau d'experts à même de participer à des projets biomimétique
S.F.11 : Mettre en place, adapter et/ou concevoir un processus de conception biomimétique	S.2 S.18 : Connaissances des différents processus biomimétiques S.19 : Prérequis à la mise en place d'une équipe biomimétique (expertises, rôles, etc.) S.20 : Connaissances des risques principaux associés à la démarche biomimétique

La présentation des compétences formalisant ce nouveau profil permet également d'aborder la question des formations et des cursus universitaires menant au métier de biomiméticien. L'ensemble de nos travaux repose sur la mise en place de ce profil atypique et par extension, nos hypothèses reposent sur la capacité du système éducatif à évoluer pour permettre la formation de ces nouveaux acteurs. Sans pouvoir apporter de réponse finale, la partie suivante ouvre un certain nombre d'axes de réflexion et propose ainsi plusieurs modèles d'accompagnement afin de poser un cadre à la construction de cursus adaptés.

Tableau 6.12 Compétences du biomiméticien : savoir-être

Savoir-être (S.E)	Savoir-faire (S.F.) associés
S.E.1 : Facilité à communiquer, à transmettre de manière pédagogique et à adapter son discours	S.F. n° 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11
S.E.2 : Attrait pour le travail en équipe	S.F. n° 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11
S.E.3 : Attrait pour l'interdisciplinarité	S.F. n° 2, 3, 4, 5, 8, 10
S.E.4 : Curiosité, volonté de questionner, comprendre et d'apprendre	S.F. n° 1, 4, 5, 6, 9, 10
S.E.5 : Ouverture d'esprit, prise en compte d'avis variés sur des référentiels différents	S.F. n° 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11
S.E.6 : Vision systémique, conscience des impacts du système produit	S.F. n° 1, 5, 8, 9, 10, 11
S.E.7 : Sens de la responsabilité professionnelle et éthique	S.F. n° 1, 5, 7, 8, 9
S.E.8 : Sens de l'analyse et de la synthèse	Tous
S.E.9 : Prise d'initiatives, apporte une vision propre et casse les fixations	S.F. n° 1, 4, 5, 6, 8, 9, 11

6.4.3 De nouveaux cursus de formation pour un nouveau métier

Au cours de nos travaux, le biologiste intégré ponctuellement au processus biomimétique dans la littérature (*biologiste vertical*) est caractérisé comme un chercheur. La distinction d'un deuxième profil formé à la biologie et intégré en continu au cours du processus au sein des équipes, mène à la conception et la mise en place d'un profil transdisciplinaire, le biomiméticien.

Celui-ci n'est en effet plus vraiment biologiste dans la mesure où son objectif premier n'est pas la production de nouvelles connaissances biologiques. Par ailleurs, il peut difficilement être considéré comme pleinement concepteur dans la mesure où il ignore en grande partie les champs techniques et la mise en place concrète des concepts lors des phases de conception détaillée.

Celui-ci est vu comme un pont entre les sciences, il dépasse les limites de chacune des pratiques pour se positionner comme le professionnel de la phase conceptuelle de la biomimétique.

En nous basant sur les compétences précédemment explicitées, on observe qu'il s'agit d'un profil ayant de fortes connaissances en biologie, notamment afin de répondre aux difficultés pratiques de la recherche, l'identification et la sélection des modèles biologiques (S.3, 9, 10, 16, 17, 18).

Ainsi, un cursus centré sur la biologie et proposant une spécialisation en biomimétique apparaît comme un premier type de formation possible. Étant donné le caractère interdisciplinaire des équipes (S.E.3), les attentes en termes de vision systémique (S.E.6) et le besoin d'ouverture à des référentiels de connaissance variés (S.E.5), le cadre pédagogique proposé par les écoles d'ingénieurs en sciences du vivant semble tout particulièrement approprié. L'atout de ce type de cursus est d'assurer une formation complète et généraliste dans le domaine de la biologie, permettant l'acquisition d'un savoir biologique horizontal tel qu'attendu en interne par les équipes. La formation au métier de biomiméticien pourra alors se constituer d'une part d'enseignements théoriques en ingénierie de la conception, créativité, processus et outils biomimétiques et d'autre part par la mise en place de projets interdisciplinaires appliquant ces enseignements.

Au-delà de son apport en biologie, le biomiméticien possède également un ensemble de compétences propres au concepteur (S.2, 5, 13, 15) ouvrant ainsi une deuxième voie de

formation par le biais d'écoles d'ingénieurs généralistes. À l'inverse du cursus précédent, c'est la connaissance profonde des sciences de l'ingénieur, et notamment des sciences fondamentales physiques et mathématique, qui feront la force de ces types de formations. La difficulté majeure auquel il faudra cependant faire face est l'apprentissage des connaissances biologiques (S.3), qui nécessite un référentiel conceptuel large, et des raisonnements cognitifs associés (notamment S.10). Encore une fois l'un des atouts du biomiméticien est de pouvoir apporter une vision fondamentalement originale (S.E.9), cassant les points de fixation existant et stimulant l'innovation par un raisonnement issu de la biologie. Il faudra donc assurer une immersion particulièrement forte en biologie et en biomimétique pour permettre la mise en place de ce point de vue chez des étudiants préalablement formés aux approches « classiques » de conception.

Dans ce cadre, le développement de partenariats entre les établissements d'enseignement supérieur en ingénierie de la conception et en science du vivant est un levier particulièrement favorable.

Les formations sur la biomimétique, si elles sont nouvelles en France, se développent déjà depuis plusieurs années en Allemagne ou aux États-Unis notamment, menant à des publications et des retours d'expérience sur lesquels prendre appui (Yen et al., 2011; Yen et al., 2014; Nagel et al., 2016; Nagel et al., 2019a; Hashemi Farzaneh et al., 2019; Wanieck et al., 2020). La formalisation du rôle et de la place des biomiméticiens apparaît alors d'autant plus pertinente pour la poursuite de la construction de ces parcours pédagogiques innovants. La formation est aujourd'hui l'un des éléments clés du développement des approches bio-inspirées. La mise en place de nouveaux métiers spécialisés, tels que le biomiméticien, représente ainsi le prochain palier dans la croissance de la biomimétique comme stratégie d'innovation opérationnelle.

6.4.4 Synthèse sur le biomiméticien

À travers la description des missions, activités et compétences du biomiméticien, cette partie 6.4 a permis d'établir un premier cadre de réflexion sur sa définition. Répondant ainsi à la sous-hypothèse H.1.3, la synthèse des résultats apportés au cours de ce manuscrit démontre qu'il « *est possible d'identifier un ensemble de compétences spécifiques caractérisant le nouveau profil à intégrer* ». Afin de formaliser ces apports dans un référentiel cohérent avec le monde professionnel français, une fiche métier sur le modèle des fiches du Répertoire Opérationnel des Métiers et des Emplois (ROME) est proposée en annexe comme support de réflexion (Annexe 10, p. 335).

Il est à souligner que cette description ne représente qu'une première étape dans la formalisation de ce nouveau métier. Un ensemble de champs biologiques reste notamment à étudier et à incorporer (anatomie comparée, biologie des systèmes, génétique, etc.).

Par ailleurs, l'apport de compétences issues d'autres champs d'expertise comme celui du design (Letard et al., 2018), apparaît prometteur.

La question des formations a également été abordée afin de mettre en avant son caractère fondamentalement essentiel. Si celles-ci font face à un ensemble d'obstacles, notamment sur

la question de la mise en place de champs d'enseignements entièrement nouveaux, de l'établissement de programmes de formations et enfin de la maturité du marché face à l'arrivée de ces nouveaux professionnels, elles n'en demeurent pas moins le principal moteur de mise en place de la biomimétique sur le long terme.

6.5 Conclusion sur le chapitre 6

Le chapitre 6 présentait la part de nos travaux centrée sur les acteurs de la biomimétique. Plus spécifiquement il s'agissait d'apporter une réponse aux deux sous-hypothèses H.1.3 et H.2.3, interrogeant respectivement l'identification d'un « *ensemble de compétences spécifiques caractérisant le nouveau profil à intégrer* » et la structuration des « *échanges au sein des équipes de conception pour rendre synergique l'activité des acteurs aux spécialisations variées et prévenir les freins émergeant de l'interdisciplinarité* ».

À travers la dernière partie de la phase descriptive initiale étudiant les théories de la communication, un ensemble d'obstacles génériques ont permis l'analyse des freins dus à l'interdisciplinarité (Chapitre 6, partie 6.1.2) identifiés au cours de l'état de l'art (Chapitre 2, partie 2.4.3). Le besoin d'une harmonisation du référentiel cognitif des membres des équipes biomimétiques nous a conduit à étudier d'une part les processus et d'autre part les représentations spécifiques de l'ingénierie de la conception et de la recherche en biologie. Différents axes structurants ont pu être identifiés, formalisant un référentiel cognitif partagé par les différents acteurs et incarné à travers un outil accessible en ligne : LINKAGE.

Celui-ci guide les équipes interdisciplinaires au cours des phases 1, 2 et 6 du processus biomimétique, phases lors desquelles les concepts clés du projet sont établis. En guidant les équipes dans leur réflexion et dans la gestion des informations, l'outil vise à faciliter la communication et la pratique collaborative de l'équipe par l'établissement d'un référentiel conceptuel partagé soutenant une compréhension commune du projet.

Les apports de l'outil (Chapitre 6, partie 6.3.2) sont ensuite évalués lors de l'expérimentation 3, apportant une première validation de l'approche utilisée et soulignant un ensemble de leviers d'optimisation (Chapitre 6, partie 6.3.3). Ces premiers apports du chapitre 6 permettent ainsi d'apporter une réponse à l'hypothèse H.2.3.

Après avoir utilisé le concept générique du biomiméticien au cours des chapitres précédents (Chapitres 4 et 5), et l'avoir intégré aux équipes de conception biomimétique au cours de la partie 6.3 de ce chapitre, la synthèse de nos différentes études nous a conduit à en proposer une première définition. À travers la description de ces rôles potentiels, de ces missions, de ces activités et de ces compétences, le biomiméticien passe d'un concept flou à un profil caractérisé, pouvant être formé et associé à un métier (Chapitre 6, partie 6.4). La sous-hypothèse H.1.3 est ainsi validée. Les apports du Chapitre 6 permettent de compléter la réponse du Chapitre 5 aux besoins identifiés dans le Chapitre 4 (Tableau 6.13).

Tableau 6.13 Synthèse des apports prescriptifs du chapitre 6

	Chapitre 5 (dont activités)	Référentiel cognitif commun	LINKAGE	Rôles du biomiméticien	Compétences du biom.
Recommandations associées à la communication interdisciplinaire (Chapitre 6, partie 6.1)					
1	Harmoniser le format du signal échanger	-	V		V
2	Harmoniser le processus d’encodage/décodage des signaux	-	V	V	
3	Structurer les raisonnements suivant l’interprétation des signaux	-	V	V	V
Recommandations associées au processus et à la pratique (Chapitre 5, tableau 5.7)					
1	Caractériser précisément l’axe horizontal	2V			
2	Expliciter l’axe vertical	2V			
3	Structurer linéairement et conserver des itérations	4V			
4	Expliciter l’intégration des biomiméticiens	2V			
5	Reformuler la sémantique de certaines étapes	2V			
6	Redéfinir et formaliser la pratique de l’étape 3	4V			
7	Accompagner les praticiens durant les étapes	6V	V		V
8	Soutenir la prise de recul et la détection des erreurs	3V	V		V
9	Soutenir l’agilité du processus pour limiter les risques	3V			
10	Formaliser la pratique des biomiméticiens sur les étapes 3, 4, 5 et 6	3V			V
Recommandations associées au profil du biomiméticien (Chapitre 4, tableau 4.17)					
1	Regard extérieur, large, systémique	1V	V		V
2	Savoir biologique horizontal	2V			V
3	Savoir biologique vertical (spécialisation sur certains sujets)	1V			V
4	Identification d’activités spécifiques	2V	V		V
5	Savoir-faire biologique applicable en biomimétique	1V		V	V
6	Savoir sur les concepts et process biomimétiques	X			V
7	Caractère interdisciplinaire de l’acteur, ouverture d’esprit	1V		V	V
8	Volonté de collaboration, de pédagogie, de vulgarisation	3V	V	V	V
9	Établissement d’un poste au sein de l’équipe de conception	X		V	V
Recommandations associées à l’intégration du biomiméticien sur le processus biomimétique (Chapitre 4, tableau 4.18)					
1	Intégration en continu du biomiméticien	2V	V		
2	Implication forte sur les étapes centrées sur la biologie	2V	V		V
3	Intégration ponctuelle de chercheurs	3V			V
4	Identification de missions spécifiques au cours du processus	2V	V		V
5	Application d’outils issus de la biologie	1V			
6	Adaptation des outils et du processus	3V	V	V	
7	Coordination des activités pour soutenir une activité synergique	4V	V	V	V
8	Génération de supports de communication	2V	V	V	
9	Prise en compte des difficultés sémantiques	4V	V	V	V
10	Favoriser l’évaluation des risques	5V			
11	Favoriser l’évaluation des impacts environnementaux	3V			V

Les deux sous-hypothèses abordées dans ce chapitre sont vérifiées, conduisant à la validation des hypothèses 1 et 2 présentées dans cette thèse de doctorat (Figure 6.17).

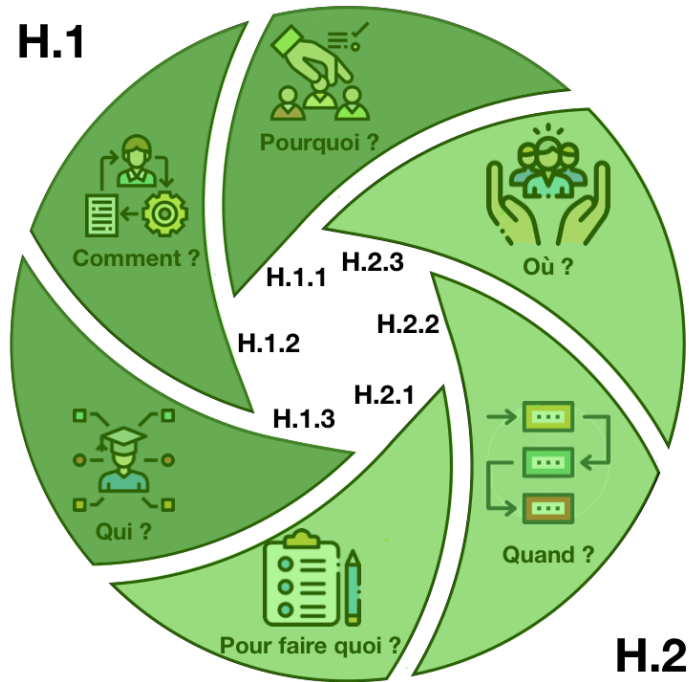


Figure 6.17 Validation des hypothèses H.1.3 et H.2.3

Le chapitre suivant présente une synthèse des contributions de ce doctorat et les perspectives soulevées par nos travaux avant de conclure cette thèse.

6.6 Conclusion sur les phases expérimentales

Au cours de ce travail de doctorat, 3 expériences, complétées par 2 questionnaires et une preuve de concept, ont été présentées.

Celles-ci ont permis de valider une partie des différentes contributions prescriptives construites au cours de la réflexion présentée dans ce manuscrit. Dans la mesure où ces apports visent à répondre à la problématique à travers le prisme de nos hypothèses, les phases expérimentales permettent de juger de la validité de nos hypothèses.

Ainsi, l'expérience 1, constituée d'une série de workshops, souligne par des analyses qualitatives et quantitatives l'atout que représente une expertise en biologie. Par conséquent, elle valide la sous-hypothèse H.1.1, fondement de notre hypothèse 1.

Les sous-hypothèses H.1.2 et H.1.3 représentent alors des étapes dans la conception d'un profil spécialisé. Cette démarche doit permettre d'optimiser l'utilisation de la biologie dans le contexte de la biomimétique et d'identifier les compétences requises pour l'élaboration de ce nouvel acteur. D'un point de vue expérimental, le biomiméticien apparaît comme le sujet de notre étude. Dans un cas idéal, il nous faudrait avoir accès à un grand nombre de biomiméticiens auxquels on imposerait différents protocoles pratiques afin de comparer les résultats et valider expérimentalement les pratiques les plus efficaces. Dans la mesure où ces acteurs n'existent pas encore et les pratiques ne sont majoritairement pas formalisées, une validation expérimentale optimale apparaît compromise. Ainsi, les hypothèses H.1.2 et H.1.3 n'interrogent pas directement l'efficacité des solutions proposées mais se concentrent sur leur faisabilité et leur formalisation.

Il s'agissait de montrer qu'il était possible de concevoir des pratiques spécifiques au biomiméticien pour répondre aux freins identifiés dans la phase descriptive (H.1.2) et d'identifier les compétences faisant du biomiméticien un acteur unique (H.1.3) capable de remplir des missions nouvelles. Une preuve de concept sur certaines pratiques spécifiques à ce nouveau praticien permet de souligner la cohérence de notre approche et de valider qu'elles sont applicables en pratique.

L'identification des rôles, des missions et des compétences du biomiméticien, apporte en elle-même une validation à l'hypothèse H.1.3. Le test expérimental de ces apports ne semblera possible que lorsque des biomiméticiens seront effectivement formés et intégrés selon les différentes modalités préconisées.

Ainsi, si la sous-hypothèse H.1.1 requérait une validation expérimentale, les sous-hypothèses H.1.2 et H.1.3 sont, elles, validées par les contributions auxquelles elles mènent (Tableau 6.14).

Tableau 6.14 Retour sur la démarche de validation de l’hypothèse 1

Hypothèse 1	H.1.1	H.1.2	H.1.3
Démarche de validation	Expérience 1	Préconisation des pratiques + Preuve de concept	Biomiméticien + Fiche métier
Critères de validation	Expertise en biologie est un atout détectable qualitativement et quantitativement.	Il est possible de mettre en place des activités spécifiques dont des pratiques issues de la biologie	Il est possible d’identifier un ensemble de compétences caractérisant un nouvel acteur spécialisé
Résultats	Plus grande efficacité, et plus grande fiabilité des modèles biologiques	26 activités formalisées dont des approches écologiques et phylogénétiques. Preuve de concept présentée.	4 rôles potentiels, 10 missions sur la pratique biomimétique, 11 savoir-faire, 20 savoirs et 9 savoir-être identifiés.
Validation	Oui	Oui	Oui

La validation de cette hypothèse 1 a certaines limites. Notamment, l’hypothèses H.1.1 est validée dans un cadre individuel, avec un sujet facilement accessible à n’importe quel acteur. Les participants étaient des élèves d’une école d’ingénierie en biologie, et malgré leur absence de connaissances en ingénierie de la conception, le caractère pluridisciplinaire de leur enseignement a pu avoir un impact important, sans que celui-ci n’ait été considéré dans notre analyse.

Les hypothèses H.1.2 et H.1.3 sont validées grâce aux contributions et posent ainsi un cadre ouvrant la voie à de prochaines études sur l’axe métier. Notamment, l’efficacité des préconisations par rapport aux approches actuelles pose une autre question scientifique qui devra être validée dans des études à venir. Dans la mesure où l’objectif n’est pas de remplacer mais de compléter les démarches existantes, cette question apparaît dans un second temps.

Parallèlement, deux questionnaires permettent l’identification de besoins menant à légitimer l’adaptation du cadre méthodologique et valident l’hypothèse H.2.1.

Le processus TPIB est par la suite proposé comme une réponse à la nécessité de mieux gérer les risques et pour intégrer le biomiméticien. L’expérience 2 rassemble la perception de 32 professionnels sur le processus proposé, en comparaison avec deux processus existants. Les résultats obtenus conduisent à une première validation de l’adéquation des apports méthodologiques avec la réduction des risques. Sur la base des besoins identifiés et des adaptations préconisées, les modalités d’intégration du biomiméticien sont explicitées (H.2.2).

Face aux difficultés des collaborations interdisciplinaires décrites dans la littérature et notamment sur la communication au sein des équipes, l’outil LINKAGE est conçu pour accompagner l’intégration des biomiméticiens et la pratique collaborative (H.2.3). L’expérience 3 teste alors les apports de cet outil dans le cadre d’équipes interdisciplinaires formées par des professionnels. Les résultats obtenus viennent valider la pertinence de l’outil, son ergonomie et ses apports (Tableau 6.15).

Tableau 6.15 Retour sur la démarche de validation de l'hypothèse 2

Hypothèse 2	H.2.1	H.2.2	H.2.3
Démarche de validation	Questionnaire 1 Questionnaire 2	Processus TPIB + Expérience 2	LINKAGE + Expérience 3
Critères de validation	Un ensemble de besoins et attentes rend légitime l'adaptation du cadre méthodologique.	Formalisation de l'intégration du biomiméticien. Le processus est perçu comme moins risqué, plus d'informations sont extractibles.	L'équipe se sent accompagnée, la communication est facilitée et les praticiens se sentent intégrés.
Résultats	Un ensemble de besoins et d'attentes sont identifiés.	Intégration du biomiméticien au cours du processus. Le processus TPIB est mieux noté sur la structure et la gestion des risques.	Les notes obtenues par l'outil sont très positives sur l'ergonomie, l'accompagnement, la communication, et l'intérêt global.
Validation	Oui	Oui	Oui

Différentes limites peuvent également être soulignées dans le cadre des validations expérimentales de l'hypothèse 2. De manière générale, les contributions (processus et outil) ont été testées séparément et devront donc être testées à travers un projet industriel complet, avec une équipe interdisciplinaire intégrant un biomiméticien. Comme pour l'hypothèse 1, le fait que les biomiméticiens ne soient pas actuellement disponibles compromet ce type d'expérience dans le cadre de ces travaux. La généralité de ces apports doit également être testée. Seule l'utilisation répétée au cours du temps de ces différentes approches, sur un grand nombre de projets et d'équipes, assurera cette validation.

Les phases expérimentales permettent ainsi de valider le fondement des hypothèses 1 et 2 et d'évaluer une partie des contributions qui en découlent. Cœur de notre étude, ces contributions sont d'ordre industriel, scientifique et pédagogique. Le chapitre suivant en offre une synthèse et souligne leurs limites.



CHAPITRE 7

CONTRIBUTIONS ET LIMITES



7.1 Contributions industrielles

Les contributions industrielles rassemblent l'analyse des risques et l'outil LINKAGE. Le processus TPIB, qui apparaît comme une contribution à la fois industrielle et scientifique, est présenté dans la partie sur les contributions scientifiques.

7.1.1 Identification des principaux risques associés à la pratique de la biomimétique

À travers la phase descriptive des travaux de ce doctorat, différents obstacles à la pratique d'innovation biomimétique ont été identifiés.

Notamment, une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC) a été appliquée au processus biomimétique (Chapitre 5, partie 5.2.3). Celle-ci apporte ainsi une liste des principaux risques à considérer et un cadre de lecture structurant l'adaptation du processus et des pratiques (Chapitre 5, Figure 5.16). D'un point de vue industriel, c'est l'anticipation, l'évaluation et la gestion des risques qui sont alors facilitées.

L'accompagnement des équipes dans cette démarche via la proposition de trois arbres décisionnels lors d'étapes d'évaluation intermédiaire ou « *Go/No Go* » vise à limiter ces risques, à mener à l'identification de leviers d'optimisation et à une meilleure maîtrise des coûts engagés. Un ensemble de limites peuvent être soulignés quant à ces contributions :

- Considération d'un unique prisme de lecture méthodologique, celui du processus de Fayemi (Fayemi et al., 2017), orienté vers une approche de conception de produits.
- Évaluation de l'AMDEC majoritairement effectuée par des experts français.
- L'exhaustivité de l'analyse ne peut être assurée, il est d'ailleurs à prévoir que de nouveaux freins émergent avec l'évolution des pratiques.
- Les arbres décisionnels n'ont pas encore été testés dans un contexte industriel et leur adéquation d'un point de vue opérationnel doit donc être validée.

Ces risques semblent aujourd'hui bloquer la dissémination de la biomimétique. Leur évaluation et leur réduction, notamment par l'intégration d'un biomiméticien, apparaît comme un aspect crucial dans l'application des stratégies biomimétiques d'innovation.

7.1.2 LINKAGE, outil soutenant la communication et le travail synergique au sein des équipes interdisciplinaires

LINKAGE est un outil en libre accès (<https://linkage-lcpi.com>) (Figure 7.1) présentant la biomimétique, les travaux de l'équipe de recherche du LCPI sur la conception biomimétique et permettant l'accès à la plateforme de travail collaboratif (Chapitre 6, partie 6.3.2).



Figure 7.1 Logo de l'outil LINKAGE

Cet outil permet notamment à des membres d'équipes potentiellement éloignées géographiquement, comme des experts internationaux, de collaborer sur un même projet, répondant ainsi à certains problèmes organisationnels liés à l'interdisciplinarité.

Cette plateforme web incarne nos préconisations et guide les équipes dans leur analyse du problème de conception et leurs approches des systèmes techniques et biologiques, facilitant la structuration de l'information en un référentiel conceptuel partagé.

Répartissant les tâches à travers un ensemble de phases descriptives/prescriptives et d'aides à la pratique, l'outil accompagne les équipes et offre un support de communication pour favoriser la collaboration des différents acteurs.

LINKAGE se veut être un outil utilisable sur le long terme dans la mesure où il permet de capitaliser les connaissances générées par chaque modèle via un stockage structuré des informations, qui peuvent être aisément accessibles à travers un moteur de recherche interne.

Même s'il est opérationnel dans sa version actuelle, LINKAGE est amené à poursuivre son développement dans le futur. Notamment, un ensemble de limites ont été détectées lors des premières phases de test :

- Bugs informatiques mineurs impactant essentiellement l'ergonomie.
- Manque de définitions assurant la compréhension des démarches.
- Absence de tests à grande échelle.
- Outil fait pour faciliter l'intégration des biomiméticiens mais les biomiméticiens n'existent pas encore dans les faits, les tests sont donc aujourd'hui biaisés par défaut.
- Dans sa version libre d'accès, l'outil est fait pour permettre la récolte de données d'utilisation par les équipes de recherche pour poursuivre les études méthodologiques, ce qui peut conduire à de potentiels blocages en termes de confidentialité.
- L'outil n'est aujourd'hui conçu que pour les étapes 1, 2 et 6.

LINKAGE doit être testé et optimisé en continu afin de maintenir sa pertinence dans le temps.

7.2 Contributions académiques et scientifiques

D'un point de vue de la recherche académique, nos travaux se concentrent sur la formalisation du concept du biomiméticien et de l'évolution du cadre méthodologique conduisant à son intégration au cours du processus de conception biomimétique.

7.2.1 La démarche du déséquilibre moteur

La première contribution académique de nos travaux correspond à la stratégie sous-jacente à l'implémentation du biomiméticien. Face à la situation paradoxale décrite dans l'état de l'art (intégration du biologiste largement soutenue mais non accompagnée méthodologiquement) (Chapitre 2, partie 2.4.6) la rigidité du cadre méthodologique préexistant ainsi que la difficulté d'intégrer un profil encore non défini sont apparues comme les difficultés clés. Pour résoudre ces obstacles une méthode en 6 étapes a été formalisée au cours de nos travaux (Figure 7.1) :

- a. Identification des freins et besoins pratiques.
- b. Infusion d'apports potentiels de la biologie sur les pratiques biomimétiques sous la forme d'un profil transdisciplinaire *idéal* formé en biologie et parfaitement intégré.
- c. Adaptation du processus et des outils à ces nouvelles équipes interdisciplinaires (qui sont purement théoriques dans la mesure où le profil du biomiméticien n'existe pas encore).
- d. Définition précise du profil du biomiméticien en se basant sur une vision systémique et descriptive du profil idéal théoriquement intégré.
- e. Publication et dynamique de transfert depuis la recherche vers la pratique (notamment via LINKAGE) afin de créer un déséquilibre entre le cadre méthodologique adapté à la présence d'un biomiméticien et la réalité pratique sans biomiméticien.
- f. Ce décalage doit à terme générer un élan moteur dans l'intégration en pratique d'acteurs formés en biologie, et à la formation de biomiméticiens.

Cette démarche de recherche partant de la pratique pour retourner à la pratique (Figure 7.2) propose ainsi une solution à la rigidité du cadre méthodologique et la difficulté à intégrer un profil non défini.

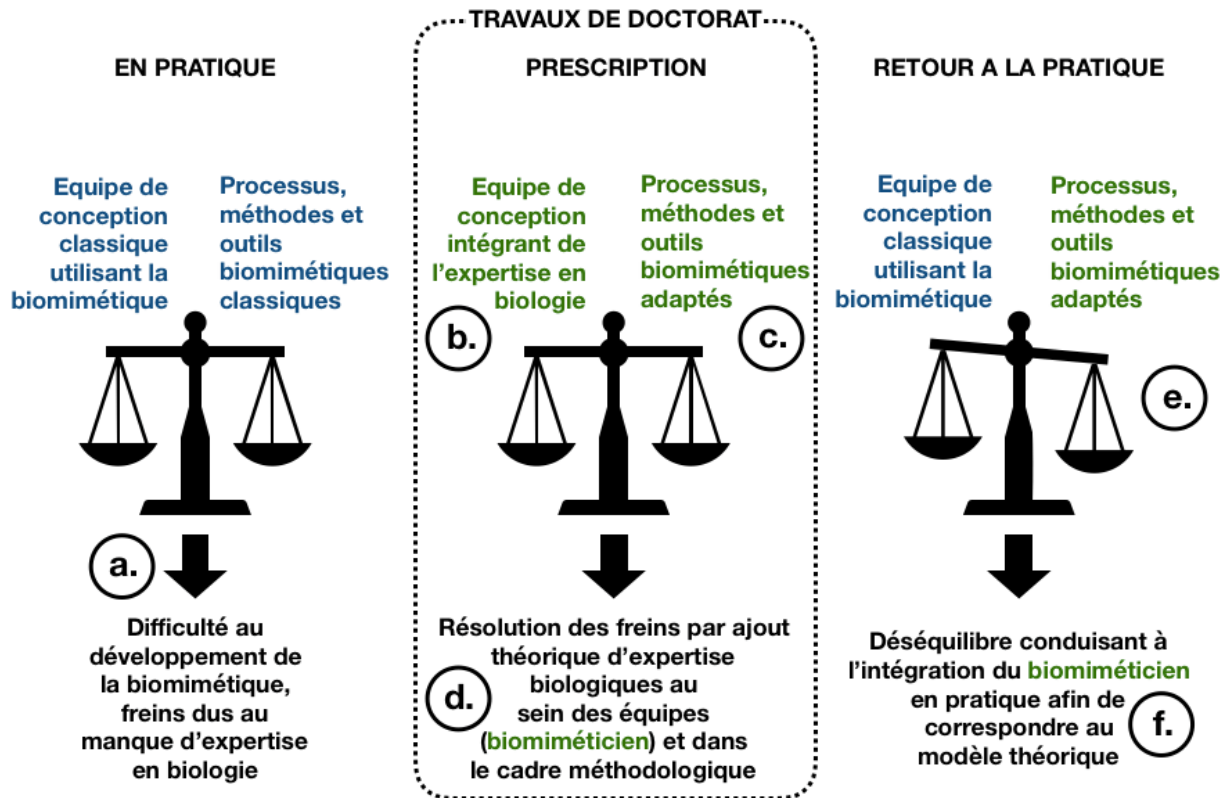


Figure 7.2 Méthode quant à l'implémentation en pratique des apports de ce doctorat

Ces travaux ont été développés avec le point de vue d'un biologiste. Il s'agissait de décrire le phénomène de conception biomimétique d'une manière holistique pour le comprendre et pour pouvoir faire évoluer le système de conception (les équipes et leur pratique) en modifiant son environnement (le cadre méthodologique). Cette démarche fait écho aux processus de biologie évolutive desquels on peut abstraire le principe suivant : *considérer les éléments de l'environnement comme des contraintes menant à l'évolution du système*. Dans une certaine mesure le raisonnement appliqué intuitivement au cours de ce doctorat apparaît alors bio-inspiré.

Étant donné sa généricité, cette méthode devrait pouvoir être facilement applicable à d'autres domaines interdisciplinaires. Un des prérequis apparaissant cependant essentiel est la pluridisciplinarité de l'équipe de recherche, associant une expertise dans le domaine à intégrer (ici en biologie) ainsi que la maîtrise du cadre méthodologique de conception préexistant (ici en biomimétique).

La principale limite de cette approche est que son impact dépend de sa mise en place pratique et donc de l'évolution réelle des méthodologies utilisées par les professionnels. Si le cadre méthodologique n'est pas modifié, la porte sur l'intégration du biomiméticien reste fermée. L'absence de débouchés conduira à un blocage du développement de cursus spécialisés dans la formation de biomiméticien, ne permettant alors plus l'adaptation de l'équipe.

7.2.2 Concept de « *biologiste* » et de « *biomiméticien* » en biomimétique

L'une des contributions scientifiques de notre étude correspond à la validation de l'intérêt d'une expertise en biologie. Il ne s'agit plus d'une hypothèse estimée vraie uniquement par le biais d'un raisonnement logique mais d'une hypothèse ayant été testée et expérimentalement validée (expérience 1) et sur laquelle peut se construire la recherche scientifique traitant de la place d'une expertise en biologie lors d'un projet biomimétique.

Par ailleurs, nos travaux contribuent à l'explicitation de la boîte noire du « biologiste » jusqu'à présent utilisé dans la littérature spécialisée en conception biomimétique. Plus spécifiquement, ils différencient deux types d'acteurs ayant une formation en biologie, l'expert (souvent un chercheur), intégré ponctuellement, et le biomiméticien, intégré en continu au sein des équipes (Chapitre 4, partie 4.3.1) (Figure 7.3).

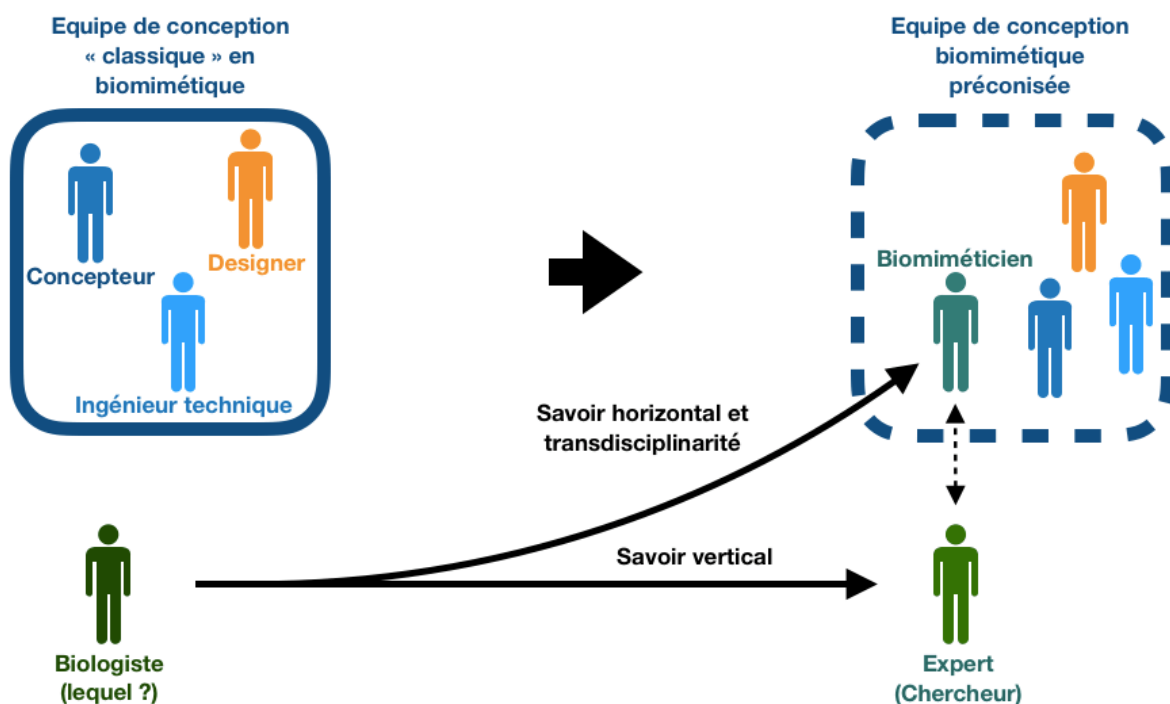


Figure 7.3 Résumé graphique des contributions apportées à l'explicitation du « biologiste » en biomimétique

Le biomiméticien est défini de manière générale à travers nos travaux comme : « un membre des équipes de conception biomimétique pouvant d'une part manipuler des outils et des concepts biologiques complexes pour créer de nouvelles connaissances, et maîtrisant d'autre part les connaissances biomimétiques pour participer aux pratiques de conception, facilitant notamment le transfert de connaissance d'un champ scientifique à l'autre ». La définition détaillée du biomiméticien représente alors l'une des contributions académiques majeurs de notre étude. Celle-ci est préconisée à travers la partie 6.4 (Chapitre 6), explicitant ce profil nouveau à travers la formalisation de compétences, missions et rôles (Figure 7.4).

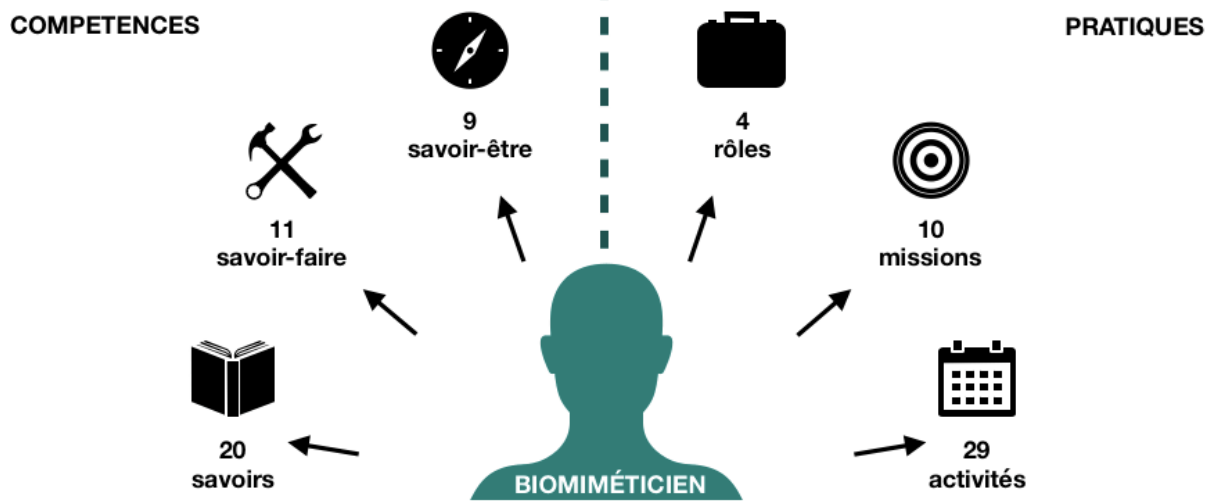


Figure 7.4 Résumé graphique des contributions apportées à la définition du biomiméticien

Loin d'apporter une réponse définitive à la caractérisation de cet acteur, nos travaux possèdent un ensemble de limites ouvrant de nouveaux axes de réflexion :

- Les travaux présentés dans ce manuscrit se limitent à l'étude de deux champs biologiques, l'écologie et la systématique, parmi la multitude existante.
- L'étude de la systématique et de l'écologie comme des champs d'expertise d'intérêt pour le biomiméticien reste à un stade préliminaire. Seuls quelques concepts et outils ont été discutés et ne représentent qu'une petite partie de ce que ces champs peuvent offrir à la biomimétiq
- Seul les domaines de la biologie et de la biomimétiq
- Ces préconisations faites sur le profil du biomiméticien restent pour le moment théoriques et devront être testées et adaptées à la réalité du terrain.

Nos contributions permettent ainsi d'ouvrir un nouvel axe de recherche en conception biomimétiq

7.2.3 Formalisation d'un référentiel cognitif partagé par les équipes

Basé sur l'analyse des référentiels cognitifs issus de la biologie et de l'ingénierie de la conception appliquée à la biomimétique, un référentiel cognitif composé de neuf axes est préconisé pour favoriser l'activité collaborative de l'équipe (Chapitre 6, partie 6.3.1).

Si celui-ci est utilisé pour la formalisation de l'outil LINKAGE dans nos travaux (Figure 7.5), il peut être utilisé comme un cadre structurant le développement d'autres outils adaptés aux équipes de conception faisant intervenir un biomiméticien ou interagissant avec des biologistes.

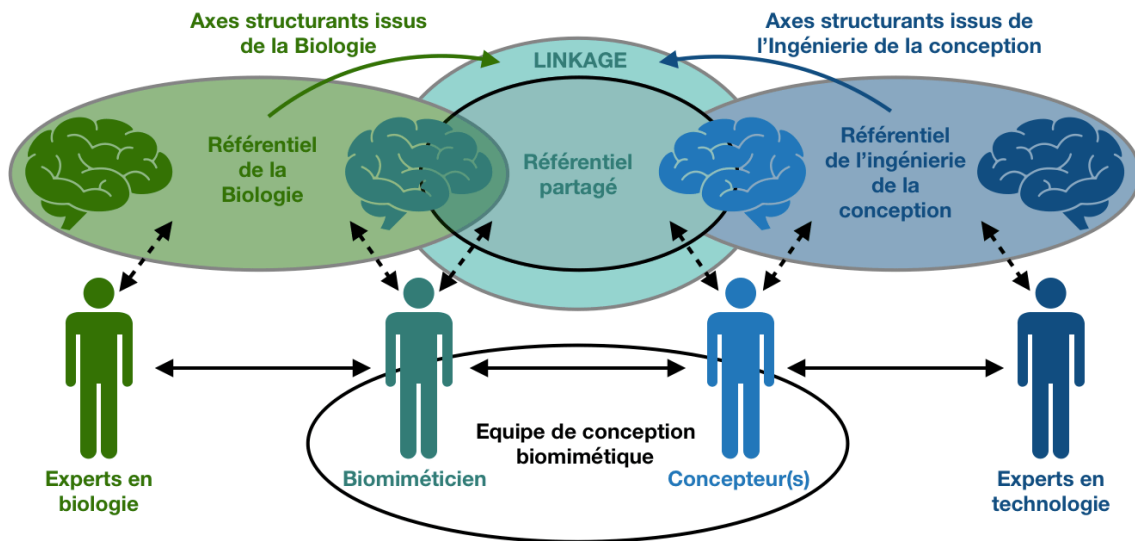


Figure 7.5 Résumé graphique de la contribution apportée par LINKAGE

Ce référentiel cognitif a pour but de faciliter la communication et l'activité synergique des équipes par le suivi d'un ensemble d'axes guidant le raisonnement et donc la structuration du champ conceptuel conduisant aux modèles mentaux des praticiens.

Celui-ci est cependant construit sur un petit nombre de points de comparaison et possède donc différentes limites :

- Si la représentation de l'information a été précédemment utilisée comme un témoin des référentiels cognitifs (Hashemi Farzaneh et al., 2015) il ne s'agit pas des seuls facteurs impactant (ex : facteurs culturels, heuristiques, etc.).
- L'étude n'a été faite que sur un nombre limité de type de représentations.
- La variabilité des profils des acteurs ne permet pas d'établir un référentiel absolu, chacun aura sa spécificité notamment due à son domaine de spécialisation.
- L'approche semble pertinente mais son impact réel reste à évaluer en profondeur.

La démarche proposée ici peut donc être réutilisée pour adapter plus en détail le référentiel cognitif proposé pour formaliser un cadre spécifique à des applications précises, voire même pour à des équipes données. Le référentiel proposé ici doit ainsi être considéré comme une base de réflexion à adapter pour appuyer l'évolution du cadre méthodologique.

7.2.4 Adaptation du processus à une approche pratique guidée

Associant apports industriels (adaptation du processus à la pratique et gestion des risques) et académiques (structuration du processus et intégration d'un nouveau profil), les travaux sur le processus de conception biomimétique apportent une contribution transversale visant le franchissement des barrières entre recherche et pratique.

La mise en place d'axes restructurés sur la représentation du processus, de nouvelles sémantiques, de résultats intermédiaires clés, et de « Go/No Go » associés à des boucles itératives permet d'apporter aux concepteurs un accompagnement pratique. Par ailleurs, la démarche décrit l'intégration du biomiméticien au cours des différentes étapes, permettant la mise en place d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique technology pull ou processus de conception TPIB (technology pull interdisciplinary biomimetic design process) (Chapitre 5, partie 5.4.4).

Celui-ci s'adapte ainsi aux besoins identifiés dans la phase descriptive en proposant une plus grande quantité d'informations, réduisant les risques et permettant une meilleure planification (Figure 7.6).

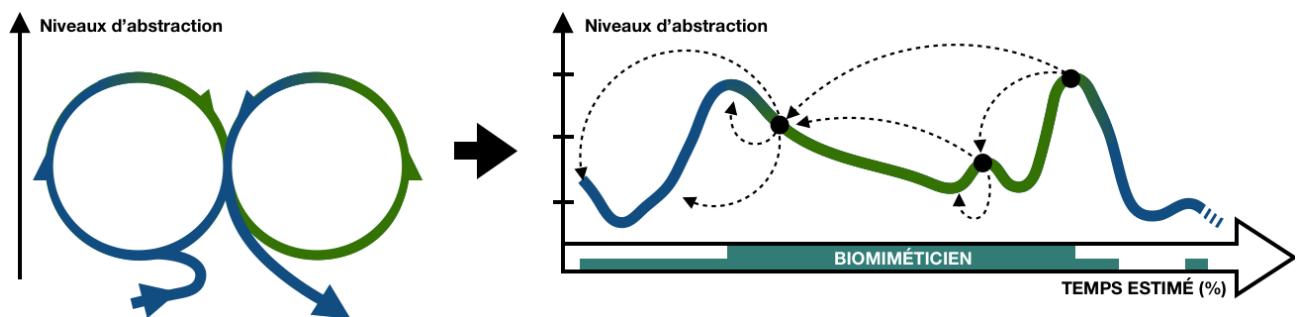


Figure 7.6 Résumé graphique des contributions apportées au processus biomimétique

Une des caractéristiques de ces contributions est de représenter un cadre adaptable aux spécificités de chaque équipe et projet. L'objectif est d'apporter aux concepteurs un ensemble d'instructions pratiques et d'appuis méthodologiques leur permettant de faciliter la mise en place de projets d'innovation biomimétique. Un ensemble de limites peuvent être soulignées :

- L'acceptabilité du processus devra être testée sur le long terme, avec différentes équipes interdisciplinaires et sur différents projets.
- L'estimation de la répartition du temps sur l'axe horizontal n'est établie qu'à partir de 15 projets et reste donc à confirmer avec plus de données expérimentales.
- Les « Go/No Go » et boucles de rétroaction n'ont pas encore pu être testés de manière significative, dans un cadre industriel et avec un échantillon suffisant.
- Les sémantiques proposées ont été évaluées négativement sur la première expérimentation. La version optimisée de ces sémantiques (préconisations présentées dans ce manuscrit) doit de ce fait être testée lors d'une nouvelle expérimentation.

- Les préconisations, qu’elles soient issues de la littérature ou de nos travaux, se concentrent sur les phases de conception générale (Pahl et al., 2007) (Chapitre 2, partie 2.2.2.1). Dans la mesure où notre étude se concentrait sur le biomiméticien, les phases de conception détaillée et d’industrialisation ont été très peu traitées malgré les freins certains qu’elles représentent, détectés dans l’AMDEC (freins de l’étape 8) et dans la littérature (Chirazi et al., 2019).

Les tests sur les préconisations faites sur le processus devront se poursuivre afin d’assurer une optimisation dans le temps du cadre méthodologique interdisciplinaire et de la pratique de la biomimétique.

7.3 Contributions pédagogiques

Au cours de ces 3 ans de doctorat, un certain nombre de cours magistraux et TD ont été délivrés pour sensibiliser les élèves de trois écoles d’ingénieurs l’ENSAM (généraliste), AgroParisTech et l’École de Biologie Industrielle (spécialisées sur les sciences du vivant).

De plus, comme présenté dans la partie 5.2.1 (Chapitre 5), 3 projets de conception biomimétique rassemblant 6 équipes étudiantes ont été supervisés dans le cadre des projets obligatoires du cursus d’ingénieurs de 2^{ème} et 3^{ème} année. Pour mettre en place des équipes interdisciplinaires, ces projets ont donné lieu à l’établissement d’une collaboration pédagogique entre l’ENSAM et AgroParisTech permettant aux étudiants de suivre des projets communs et ainsi de partager leurs expertises.

Par ailleurs, un stage de 6 mois en web design, appliqué aux axes de recherche sur la collaboration interdisciplinaire, a également été supervisé en qualité de maître de stage, menant à la conception de la plateforme LINKAGE décrite en partie 6.3.2.

Outre ces contributions en termes d’enseignements, les travaux menés sur la définition du profil du biomiméticien et de ses pratiques sont également conçus afin de fournir une base de réflexion à l’élaboration de cursus de formations, tel que présenté en partie 6.4.3 (chapitre 6).

7.4 Synthèse sur les contributions

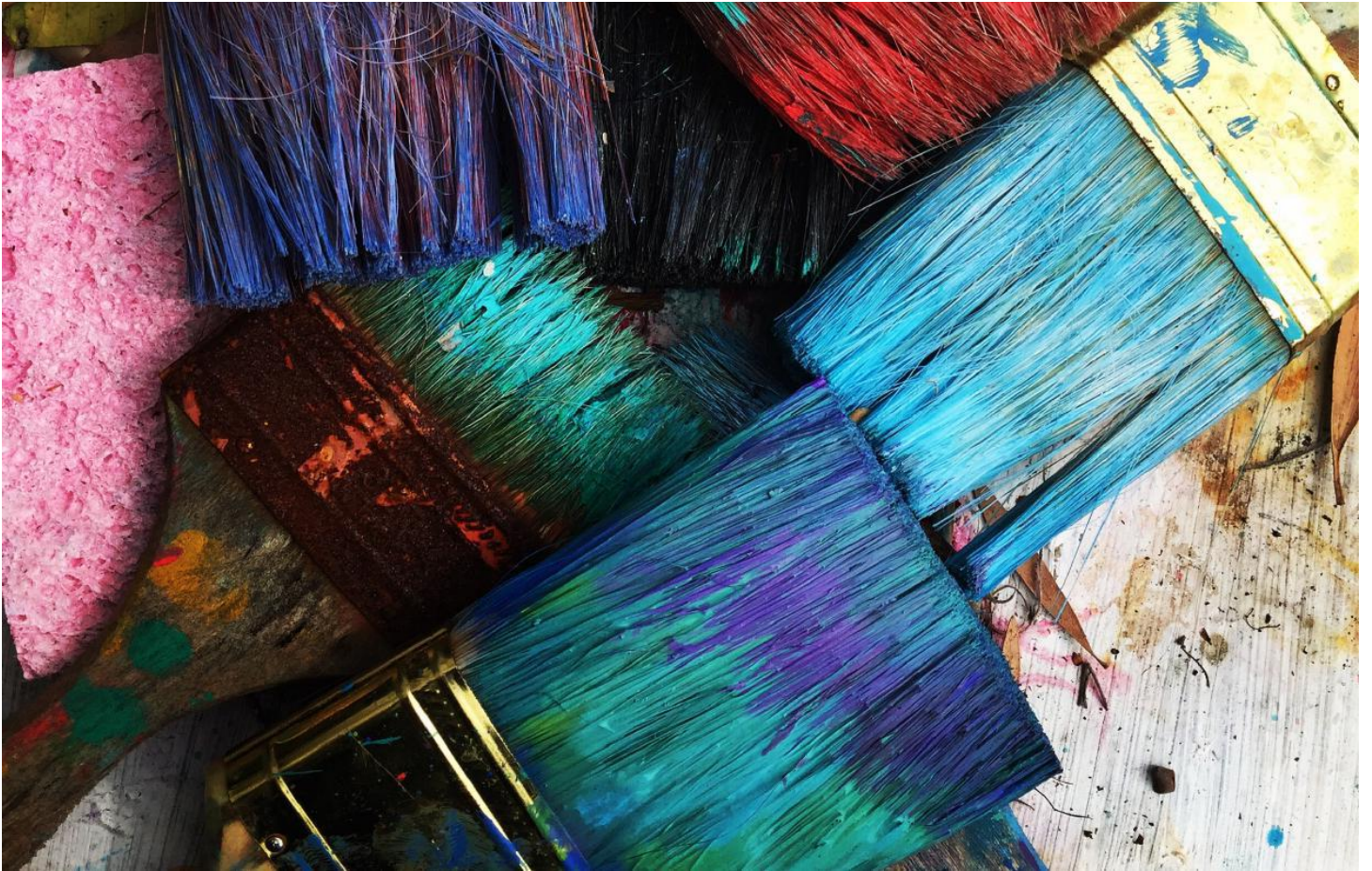
Afin d’offrir une synthèse sur nos contributions, les travaux de Nancarrow (Nancarrow et al., 2013) précédemment présentés dans l’état de l’art (Chapitre 2, partie 2.2.2.3), seront utilisés comme prisme d’analyse. Le tableau 7.1 met ainsi en évidence en quoi les différentes contributions permettent la mise en place de ce que Nancarrow appelle une « bonne équipe interdisciplinaire » (Tableau 7.1).

Ce tableau souligne la cohérence de nos contributions avec l’objectif poursuivi, à savoir la résolution d’un ensemble de freins identifiés dans la phase descriptive grâce à l’intégration du biomiméticien et la mise en place d’équipes interdisciplinaires de conception biomimétique. Les différents apports ont en effet pour but d’apporter de nouvelles solutions tout en prenant en compte, au cours de leur conception, les freins issus des pratiques interdisciplinaires.

Tableau 7.1 Synthèse sur les contributions à travers le prisme des critères d'interdisciplinarité de Nancarrow

Critères	Contribution
1. Leadership et gestion	Processus TPIB : aide à la gestion de projet par l'estimation des durées et l'identification des risques
	Arbre Go/No Go : temps aussi pour la gestion d'équipe
	LINKAGE : Outil de gestion de deux étapes du projet (pour le moment)
2. Communication	Biomiméticien : compétences en communication soulignées
	LINKAGE : pour promouvoir la communication dans un référentiel partagé
3. Récompenses personnelles, formations et développement	Arbre Go/No Go : évaluation de l'état d'esprit de l'équipe dans tous les Go/No Go
	LINKAGE : reconnaissance des apports en termes de savoir
4. Ressources et procédures appropriées	Processus TPIB : structuration des projets notamment sur les estimations de temps, l'organisation des réunions Go/No Go
	Arbre Go/No Go : évaluation des ressources à des moments clés
	LINKAGE : vision commune, échanges et exigences de temps.
5. Combinaison appropriée des compétences	Biomiméticien : description détaillée des compétences en adéquation avec les activités, elles-mêmes en adéquation avec les besoins et attentes.
	Processus TPIB : Répartition des tâches à travers la description des activités
	Arbre Go/No Go : évaluation des compétences disponibles à des moments clés
6. Ambiance au sein de l'équipe	Processus TPIB : légitimité des remises en question et des avis divergents encadrés par le processus
	Arbre Go/No Go : évaluation du climat, de l'état d'esprit de l'équipe
	LINKAGE : valorisation du savoir généré par le biais d'une base de données
7. Caractéristiques individuelles	Processus TPIB : accompagnement de l'alternance des rôles de spécialiste/non spécialiste et valorisation de la diversité des profils au cours du projet
	Biomiméticien : description des compétences préconisées & prise en compte des valeurs environnementales
8. Clarté de la vision	Processus TPIB : intégration des biomiméticiens dès les phases d'analyse du problème
	LINKAGE : compréhension commune des objectifs
9. Qualité et résultats des travaux	Processus TPIB : adaptabilité du processus pour prendre en compte des retours d'expériences
	Arbre Go/No Go : évaluation et itérations si nécessaire
	Biomiméticien : apport sur les phases d'évaluation de l'impact environnemental du produit
10. Respecter et comprendre les rôles	Biologiste : distinction du rôle d'expert externe et de biomiméticien
	Biomiméticien : différents rôles sont proposés pour ce nouveau profil

Après avoir présenté les contributions de nos travaux et leurs limites, le chapitre suivant (Chapitre 8) clôt cette thèse de doctorat à travers la présentation de la conclusion, des perspectives et des communications scientifiques associées à notre étude.



CHAPITRE 8

CONCLUSION ET PERSPECTIVES



8.1 Conclusion

La conclusion présentée dans ce chapitre 8 est composée de trois volets. La réponse à la problématique de thèse par la validation des hypothèses émises dans le Chapitre 3, la synthèse des travaux à travers le prisme de la DRM qui a structuré l'ensemble de notre démarche et enfin la mise en avant du caractère original des travaux présentés dans cette thèse de doctorat à travers une conclusion générale.

8.1.1 Retour sur la structuration scientifique des travaux

À travers l'état de l'art du chapitre 2, un ensemble de freins à la pratique de la biomimétique ont été identifiés dans la littérature. Notamment, la difficulté d'approcher le monde de la biologie pour des équipes de conception n'ayant pas de connaissances sur ce champ scientifique, et la difficulté intrinsèque de l'interdisciplinarité, sont apparues comme prépondérantes dans la littérature.

8.1.1.1 Retour sur la problématique

La problématique formalisée dans cette thèse de doctorat ciblait l'optimisation des pratiques de conception biomimétique *technology-pull* à travers l'angle des étapes centrées sur la biologie :

Comment optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull* ?

La formalisation des hypothèses de réponse à cette problématique repose sur deux constats :

- Les approches de résolution actuelles dessinent un cadre méthodologique centré sur l'axe processus, mais apportant relativement peu d'informations sur les spécificités des praticiens et des équipes de conception biomimétiques (l'axe métier).
- Il existe un décalage entre le champ à l'origine du problème, la biologie, et le champ utilisé pour apporter des solutions, l'ingénierie de la conception.

Ces axes clés nous ont conduit à proposer deux hypothèses de résolution traitant en parallèle des axes métiers et processus associés à la biomimétique. La validation de ces hypothèses au cours de nos travaux est décrite dans les parties suivantes.

8.1.1.2 Retour sur l'hypothèse 1

Face aux constats détaillés ci-dessus, **l'intégration au sein des équipes de conception biomimétique d'un nouvel acteur ayant des compétences en biologie** a été établie comme la première hypothèse permettant de répondre à la problématique. Celle-ci soulève trois éléments clés de validation, nommés sous-hypothèses, décrits dans la partie suivante.

Retour sur la sous-hypothèse 1.1

Tout d’abord, la question de l’intérêt des compétences en biologie au sein des équipes devait être discutée afin de légitimer un travail de formalisation visant à définir un nouveau profil à intégrer aux équipes.

À travers l’expérience 1, le Chapitre 4 a permis de valider la sous-hypothèse H.1.1 en montrant qu’une formation en biologie change la façon d’analyser un problème de conception, permet d’être plus efficace dans les phases de recherche de modèles biologiques et assure une plus grande pertinence des résultats obtenus.

L’ensemble de ces points ont conduit à valider la première sous-hypothèse : **« *il est possible de démontrer l’apport d’une formation en biologie et donc de justifier le fondement de l’hypothèse 1* »**.

Retour sur la sous-hypothèse 1.2

À la suite de ces premiers résultats, la formalisation des pratiques de ce nouvel acteur nommé biomiméticien constituait la deuxième sous-hypothèse de l’hypothèse 1. En d’autres termes, il était nécessaire de montrer que ce nouveau profil pouvait apporter des approches, des outils et des raisonnements biologiques jusque-là inaccessibles aux équipes de conception. Cette partie interrogeait également la question de la possibilité de formalisation de ces approches.

À travers l’étude de deux champs de la biologie, l’Écologie et la Systématique, au cours du chapitre 5 un ensemble d’approches nouvelles, basées sur des raisonnements et des outils biologiques, a pu être formalisé et en partie validé à travers une preuve de concept. Associés à celles-ci, différents apports complémentaires aux approches existantes, tels que l’explicitation du vocabulaire biologique, la proposition d’un point de vue nouveau ou l’évaluation des modèles biologiques sélectionnés ont été structurés en activités propres au biomiméticien.

L’ensemble de ces résultats ont conduit à la validation de la sous-hypothèse H.1.2 : **« *Il est possible d’identifier un ensemble de méthodes et d’outils propres aux savoirs et savoir-faire issus de la biologie et pouvant être utilisés par le nouvel acteur lors du processus biomimétique* »**.

Retour sur la sous-hypothèse 1.3

Enfin, la validation finale de la première hypothèse reposait sur la possibilité de formaliser un profil cohérent, synthétisant les différents apports identifiés au cours des phases précédentes et descriptible par des compétences.

À partir des activités identifiées lors des travaux sur la sous-hypothèse 1.2, 20 savoirs, 11 savoir-faire et 9 savoir-être ont été définis pour décrire le biomiméticien validant ainsi la troisième sous-hypothèse associée à l’hypothèse 1 : **« *Il est possible d’identifier un ensemble de savoirs et savoir-faire spécifiques caractérisant le nouveau profil à intégrer* »**.

Une fois validées, ces trois sous-hypothèses nous ont permis de conclure que l’intégration d’un nouvel acteur ayant une expertise en biologie au sein des équipes de conception est

effectivement une approche pertinente permettant d'optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull*.

La deuxième hypothèse développée dans nos travaux s'intéresse à la mise en place de cette approche. Comment structurer le cadre méthodologique pour que le biomiméticien soit effectivement intégré ?

8.1.1.3 Retour sur l'hypothèse 2

L'une des principales difficultés liées à l'application concrète de l'hypothèse 1 est la rigidité du cadre méthodologique. Les méthodologies biomimétiques actuelles sont censées être effectives telles quelles, dans ce contexte préexistant le biomiméticien n'existe pas et n'a donc pas « d'espace méthodologique » dédié. Ainsi, en parallèle de l'hypothèse 1, l'hypothèse 2 conjecture qu'il est possible de mettre **en place un cadre méthodologique permettant l'intégration opérationnelle du profil transdisciplinaire au sein des équipes de conception biomimétiques**. Cette hypothèse doit alors répondre aux questions suivantes : *pour faire quoi ? quand ? et où ?* intégrer ce profil pour qu'il soit effectivement accepté au sein des équipes.

De cette manière les modifications du cadre méthodologique doivent créer un déséquilibre moteur en conception biomimétique, conduisant les équipes à intégrer le biomiméticien en réponse aux nouveaux prérequis du cadre adapté par nos contributions. Le lien étroit entre les hypothèses 1 et 2 a conduit chaque étude à apporter des réponses aux deux axes, qui se sont mutuellement alimentés au cours de nos travaux.

Retour sur la sous-hypothèse 2.1

La première étape de la démarche était d'évaluer une potentielle résistance au changement du milieu de la biomimétique (praticiens actuels ou futurs et experts scientifiques) quant à la démarche proposée et de comprendre les besoins des praticiens afin de définir un ensemble de leviers critiques pour l'intégration du biomiméticien (Chapitre 4, partie 4.3).

À travers la récolte des informations de deux questionnaires et de l'expérience 1, des recommandations d'une part sur profil et d'autre part sur le cadre méthodologique ont été formalisées d'un point de vue théorique, sous la forme d'un ensemble d'éléments critiques (Chapitre 4, partie 4.3.4, Tableau 4.17 et 4.18 respectivement).

Il a ainsi été établi qu'il « ***est possible d'identifier un ensemble de besoins et d'attentes des équipes de conception légitimant l'évolution du cadre méthodologique biomimétique pour intégrer un nouveau profil formé en biologie*** ».

Retour sur la sous-hypothèse 2.2

L'identification de nouveaux besoins nous a conduit à apporter différentes adaptations au processus encadrant la pratique de la biomimétique. Il s'agissait d'une part de prendre en compte un ensemble de risques reconnus en adaptant le processus théorique pour qu'il accompagne plus étroitement les praticiens, et d'autre part d'intégrer le biomiméticien au cadre nouvellement formalisé (Chapitre 5, partie 5.4).

La répartition de l'activité du biomiméticien au cours du processus et son intégration dans les pratiques de l'équipe d'une part, et la première validation de ces contributions par l'expérimentation 2 d'autre part, ont permis de montrer qu'il **« est possible d'adapter le processus de conception biomimétique afin que l'ajout d'expertise en biologie conduise à mieux répondre aux besoins pratiques »**.

Retour sur la sous-hypothèse 2.3

Le dernier élément constitutif du cadre méthodologique et identifié comme un frein était la structuration des échanges interdisciplinaires et notamment les difficultés de communication.

La variabilité des expertises et donc des vocabulaires, raisonnements, pratiques, etc. nous a conduit à proposer un outil nommé LINKAGE (Chapitre 6, partie 6.3), visant à accompagner les équipes interdisciplinaires. Basé sur l'analyse des référentiels cognitifs des biologistes et des concepteurs à travers le prisme des théories de la communication, cet outil est conçu pour accompagner la mise en place d'un référentiel conceptuel partagé et pour structurer les pratiques préconisées dans la sous-hypothèse 2.2 au sein de l'équipe. Son évaluation lors de l'expérience 3 nous a conduit à une première validation de ses apports sur les freins d'accompagnement du travail collaboratif et de la communication.

Ces contributions et résultats expérimentaux ont ainsi permis de valider la sous-hypothèse 2.3, **« il est possible de structurer les échanges au sein de l'équipe de conception pour rendre synergique l'activité des acteurs et prévenir les freins d'interdisciplinarité »**.

La validation de ces trois sous-hypothèses a permis de confirmer l'hypothèse 2 et donc de démontrer que l'évolution du cadre méthodologique basée sur l'axe métier conduit à optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull*.

Après avoir repris la problématique et les différentes hypothèses validées dans cette thèse, la partie suivante propose une synthèse des différentes démarches expérimentales composant les phases de la Design Research Methodology (DRM) structurant nos travaux.

8.1.2 Retour sur la structuration méthodologique des travaux

La méthodologie scientifique choisie pour encadrer ces travaux est la Design Research Methodology (DRM), préconisant une phase descriptive I, une phase prescriptive, et une phase descriptive II évaluant les apports de la phase descriptive.

L'ensemble des démarches suivies dans ce doctorat se décomposent à travers ces trois phases et sont ainsi présentées en synthèse dans le tableau 8.1 (Tableau 8.1).

Tableau 8.1 Structuration des travaux présentés selon la DRM

	H.1.1	H.2.1	H.1.2	H.2.2	H.1.3	H.2.3
Phase descriptive 1	Littérature scientifique					
	Q. 1 / Q.2 / Exp. 1					
				Rex.		
				Interviews		
					AMDEC	
					Analyse comparée des référentiels	
Phase prescriptive	Approches biologiques					
				Processus TPIB & Arbres de validation des « Go/No Go »		
					LINKAGE	
					Biomiméticien	
Phase descriptive 2			POC	Exp. 2		Exp. 3

En bleu les travaux s'appuyant sur la littérature ; En vert les travaux s'appuyant sur une récolte d'informations expérimentales Exp. = Expérimentation, Q. = Questionnaires, Rex. = Retour d'expérience ; En orange les contributions prescriptives.

La cadre méthodologique de la DRM nous permet de mettre en évidence la construction progressive des travaux découlant des résultats accumulés au cours de ce doctorat jusqu'à la formalisation du biomiméticien.

8.1.3 Conclusion générale

À travers la présentation du contexte sociétal, industriel et scientifique, la biomimétique est apparue comme une stratégie d'innovation à fort potentiel mais dont l'utilisation est encore très limitée. Trois principaux enjeux associés sont traités dans nos travaux :

- **Les enjeux technologiques.** Le contexte du monde moderne impose une réflexion profonde quant à notre manière de concevoir et d'innover. Les concepteurs doivent donc trouver une manière de poursuivre leur activité tout en assurant une transition nécessaire pour réorienter les règles dictant l'évolution des sociétés humaines. La biomimétique, par son approche soutenant une forte innovation technique tout en préconisant une réorientation concrète et structurante du cadre de la conception vers des approches inspirées du monde vivant, apparaît comme un outil prometteur de cette transition.
- **Les enjeux scientifiques.** Les recherches scientifiques sur les méthodologies en ingénierie de la conception sont au cœur de la mise en place de nouvelle approche d'innovation. La biomimétique, étant donné son positionnement à l'intersection entre biologie et ingénierie de la conception, ouvre également la voie à un décloisonnement des silos scientifiques et à l'émergence de champs transdisciplinaires.
- **Les enjeux pédagogiques,** le développement de ces nouvelles méthodologies, pratiques et de cette transition industrielle par la biomimétique ne peuvent s'établir dans le temps qu'à travers une évolution des acteurs. L'enseignement, et donc la formation des praticiens de la conception biomimétique, apparaît comme un enjeu considérable pour nos travaux.

L'état de l'art de la littérature scientifique abordant le champ de la biomimétique nous a par la suite conduit à l'identification d'un ensemble de freins à son développement.

Cinq grands types d'obstacles sont ainsi définis : la difficulté de mise sur le marché des produits biomimétiques, le manque de programmes de formation, le manque de recul sur les produits biomimétiques effectivement commercialisés, l'inertie entre les avancées en recherche et les applications en pratique, et enfin les freins auxquels font face les équipes de conception durant la pratique de la biomimétique en elle-même.

C'est sur ce dernier point que nos travaux se concentrent. Plus particulièrement, il émerge de l'état de l'art que la principale difficulté est causée par la nécessité d'aborder la Biologie qui apparaît comme un champ scientifique non maîtrisé par les équipes de conception. Face à ce constat, un ensemble d'outils et de méthodes ont été générés par la communauté scientifique pour pallier le manque de compétences en Biologie des équipes. Pourtant, malgré ces contributions méthodologiques fondatrices le problème demeure. La biomimétique est toujours largement limitée dans son utilisation comme stratégie d'innovation. Une problématique émergeant de ces observations est formalisée :

Comment optimiser les étapes centrées sur la biologie du processus de conception biomimétique *technology pull* ?

Par l'analyse des travaux existants à travers le prisme de cette problématique, deux tendances émergent. Tout d'abord, alors que les solutions proposées sont centrées sur l'ingénierie de la conception, les problèmes sont intrinsèquement liés à la biologie. Par ailleurs, tandis que ce sont les compétences qui manquent aux équipes, la grande majorité des travaux vise l'axe processus sans remettre en question l'axe métier.

Face à ces paradoxes, deux hypothèses sont formulées afin de traiter en parallèle l'axe métier et l'axe processus par la modification de la composition des équipes de conception biomimétique.

On émet ainsi l'hypothèse que la problématique peut être résolue « **par l'intégration au sein des équipes de conception biomimétique d'un nouvel acteur ayant des compétences en biologie** » (H.1) accompagnée de « **la mise en place d'un cadre méthodologique permettant l'intégration opérationnelle d'un nouvel acteur formé en biologie au sein des équipes de conception biomimétique** » (H.2).

En pratique, l'intégration d'un nouvel acteur ne peut être une réponse que si l'investissement est montré légitime. L'hypothèse 1 suppose tout d'abord donc qu'*il est possible de démontrer l'apport d'une formation en biologie (H.1.1)*. À travers une première expérience comparant les résultats obtenus par des participants formés ou non en biologie, cette sous-hypothèse H.1.1 est validée.

Une fois que la démarche est démontrée légitime, l'identification des besoins des équipes et de leurs attentes quant à l'intégration d'un membre formé en biologie apparaît comme un prérequis fondamental. En cela, l'hypothèse 2 admet donc qu'il « *est possible d'identifier un ensemble de besoins et d'attentes des équipes de conception légitimant l'évolution du cadre*

méthodologique biomimétique pour intégrer un nouveau profil formé en biologie » (H.2.1). Ces éléments sont récoltés via deux questionnaires, validant la sous-hypothèse H.2.1.

Ces deux premières sous-hypothèses posent une première base à la phase descriptive de la Design Research Methodology (Blessing et al., 2009) structurant nos travaux.

À partir de ces résultats, il apparaît nécessaire de formaliser la pratique de ce nouvel acteur, nommé biomiméticien, afin qu'elle soit en adéquation avec les attentes précédemment identifiées. Par l'étude de deux champs biologiques, l'écologie et la systématique, un ensemble de contributions issues de la biologie est formalisé et accompagné d'activités spécifiques au biomiméticien, répondant de ce fait à une partie des besoins identifiés dans la phase descriptive. Par une preuve de concept sur ces approches, il est montré qu'*il est possible d'identifier un ensemble de méthodes et d'outils propres aux savoirs et savoir-faire issus de la biologie et pouvant être utilisés par le nouvel acteur lors du processus biomimétique* (H.1.2). Associé à ces pratiques issues de la biologie, un ensemble d'autres activités décrivant les pratiques du biomiméticien sont également établies.

Une fois ces éléments décrits, la question de l'adaptation du cadre méthodologique apparaît. Une nouvelle phase descriptive composée d'un ensemble d'interviews, de retours d'expériences de projets industriels et de projets étudiants ainsi que d'une AMDEC appliquée au processus biomimétique unifié (Fayemi et al., 2017) est effectuée. L'objectif poursuivi est la réduction des risques par l'accompagnement des praticiens et ce tout en intégrant le biomiméticien. Basé sur le processus unifié proposé par Fayemi (Fayemi et al., 2017), le processus interdisciplinaire de conception biomimétique technology pull (TPIB) est formalisé. Celui-ci reformule un ensemble de sémantiques, ajoutant des « Go/No Go » associés à des arbres décisionnels, des boucles d'itérations, et intègre le biomiméticien au cours des différentes étapes. L'expérience 2 visant l'évaluation comparative par 32 professionnels de trois processus de conception biomimétique, dont le processus TPIB, permet alors de valider un certain nombre d'adaptations proposées, tel le renforcement de la gestion des risques. À travers les formalisations proposées et les retours expérimentaux, il est montré qu'il « *est possible d'adapter le cadre méthodologique de la biomimétique pour favoriser l'intégration d'un nouvel acteur formé en biologie lors des différentes étapes du processus de conception biomimétique* » (H.2.2).

Outre le processus, la synergie des activités des différents membres de l'équipe dépend de leur capacité à travailler ensemble. Ainsi, le dernier point composant l'hypothèse 2 est la structuration des « *échanges au sein des équipes de conception pour rendre synergique l'activité des acteurs aux spécialisations variées et prévenir les freins émergeant de l'interdisciplinarité* » (H.2.3). À travers le prisme des théories de la communication, un ensemble d'obstacles à une bonne communication est identifié. Notamment, la divergence entre les référentiels cognitifs et conceptuels des profils formés en biologie ou en conception pose un problème. L'étude de ces référentiels cognitifs spécifiques nous conduit à concevoir un référentiel cognitif partagé, incarné à travers un outil, LINKAGE (<https://linkage-lcpi.com>). Celui-ci vise à accompagner les équipes interdisciplinaires dans la formalisation d'un référentiel conceptuel associé au projet et commun aux membres de l'équipe. L'expérience 3

conduit 19 professionnels rassemblés en 5 équipes interdisciplinaires à évaluer l’outil lors d’un projet de conception accéléré. Les résultats obtenus nous conduisent à valider l’hypothèse H.2.3 en montrant qu’il est possible d’accompagner les équipes interdisciplinaires pour favoriser une activité synergique et une communication efficace.

Le cadre méthodologique préconisé permet de modeler un profil au plus proche des contributions précédemment présentées, par « l’identification d’un ensemble de compétences spécifiques caractérisant le nouveau profil à intégrer » (H.1.3). En d’autres termes, il s’agit de formaliser concrètement le biomiméticien. Par la synthèse de toutes les études effectuées et un ensemble de nouvelles préconisations, les rôles potentiels, les missions et les compétences du biomiméticien sont formalisés. La sous-hypothèses H.1.3 est de ce fait validée, et l’hypothèse 1, représentant l’axe métier de notre étude, prend pleinement son sens.

Le besoin d’expertise en biologie, identifié dans la littérature et confirmé par les retours expérimentaux, est résolu par des contributions coordonnées à la fois sur l’axe métier, par la formalisation du biomiméticien, et sur l’axe processus, par l’adaptation du cadre méthodologique (Figure 8.1).

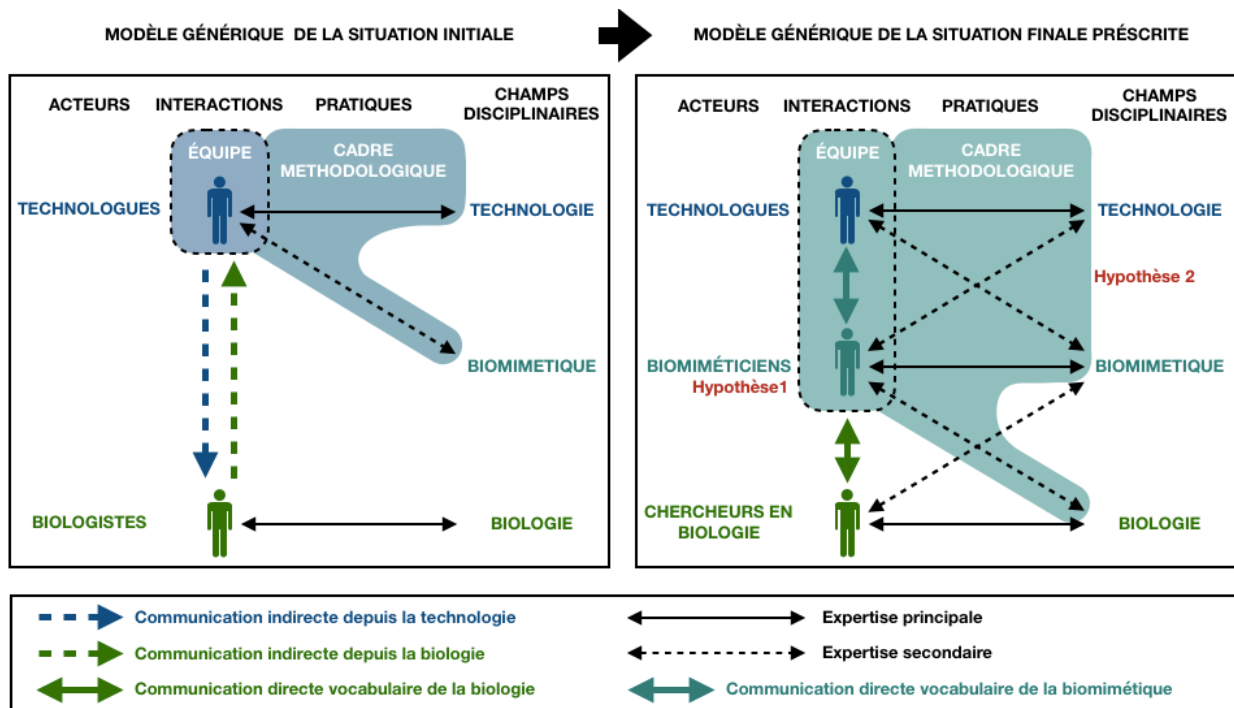


Figure 8.1 Figure de synthèse sur la conclusion

Ces travaux apportent un ensemble de contributions aux enjeux technologiques, par l’accompagnement des praticiens lors des phases de mise en pratique (limitations des risques, activités, etc.), aux enjeux scientifiques, par la nouvelle structuration méthodologique et la formalisation du biomiméticien, et enfin aux enjeux pédagogiques, par la réflexion apporter sur la formation du biomiméticien.

En conclusion, si la recherche scientifique sur les approches biomimétiques a pris un essor considérable au cours des 30 dernières années, celle-ci fait aujourd’hui face à la difficulté de

concrétiser sa mise en place dans les pratiques d'innovation. Afin de répondre aux freins associés au manque d'expertise en biologie, freins identifiés par les praticiens et les chercheurs, cette thèse de doctorat pose la question des métiers de la biomimétique. Plus spécifiquement elle souligne l'absence de professionnels formés d'une part à la conception biomimétique et d'autre part aux sciences du vivant, dans le cadre méthodologique. À travers un ensemble d'études descriptives et prescriptives, le profil du biomiméticien, professionnel spécialisé en biomimétique et formé en biologie, est formalisé. La préconisation de ses activités pratiques, impliquant notamment des concepts, des méthodes et outils issus de la biologie, mènent alors à la définition des compétences de ce nouveau membre des équipes de conception biomimétique. Pour assurer son intégration, un processus de conception biomimétique technology-pull interdisciplinaire et un outil accompagnant la pratique collaborative des équipes sont proposés.

8.2 Perspectives

Plus qu'une fin en soit, ces travaux sont menés avec l'objectif d'ouvrir de nouveaux champs de recherche en biomimétique, qu'il s'agisse d'études sur l'axe métier, sur les apports de la biologie ou encore sur l'adaptation des contributions scientifiques au contexte pratique. Cette partie « perspectives » sera alors constituée de deux points principaux, les perspectives associées aux contributions de nos travaux d'une part, et d'autre part une liste de questions de recherche émergeant de ce doctorat, permettant une prise de recul finale pour clore ce manuscrit.

8.2.1 Perspectives sur nos contributions

Nos différentes contributions apparaissent pour la plupart comme la première étape d'une démarche devant s'inscrire dans le temps. Ainsi une liste de perspectives sera présentée pour chacune d'entre elle.

Perspectives sur l'aide à l'analyse et à la gestion des risques :

- Compléter l'analyse des risques effectuée sur le processus unifié (Fayemi et al., 2017) avec des études sur d'autres prismes méthodologiques afin d'étudier la généralité des risques identifiés.
- Effectuer l'AMDEC du processus à une échelle internationale pour valider sa stabilité en fonction des approches culturelles de la conception biomimétique.
- Actualiser la liste des scénarios considérés dans l'analyse des risques au fur et à mesure des adaptations méthodologiques proposées.
- Tester les trois arbres de décision associés aux Go/No Go dans un cadre industriel, et adapter leur développement pour accompagner les praticiens sur des points critiques spécifiques à chaque champ d'application (ex. architecture, automobile, luxe, etc.).

La gestion des risques est centrale à la généralisation de la biomimétique. Elle devra donc évoluer en parallèle des avancées de la recherche scientifique pour favoriser le transfert des contributions méthodologiques tout en assurant une maîtrise des risques par les praticiens.

Perspectives sur l'outil LINKAGE :

- Assurer d'une part la maintenance et la stabilité de la plateforme web dans le temps et d'autre par son optimisation technique continue.
- Poursuivre les tests sur des sujets et des équipes variés.
- Poursuivre son développement sur l'ensemble des 8 étapes pour permettre aux équipes d'utiliser LINKAGE en continu sur tout le processus TPIB.

Chapitre 8 – Conclusion et perspectives

- Mettre en place des partenariats avec des industriels pour assurer une utilisation dans un cadre de confidentialité et ainsi faciliter la récolte des données pour alimenter la recherche.
- Mettre en place un projet de recherche scientifique encadrant l'analyse des données issues de l'utilisation de LINKAGE permettant l'identification de freins et de tendances pratique, l'évaluation de l'impact de la composition d'équipe et des contributions des différents membres ou encore la caractérisation des résultats obtenus (niveaux et prismes d'abstraction considérés, type de modèles biologiques, durabilité, etc.)

LINKAGE est donc un outil amené à évoluer, aussi bien par l'optimisation de sa forme actuelle, que par la proposition de nouvelles fonctionnalités étendant son impact à l'ensemble du processus ou par son utilisation comme un outil de recherche.

Perspectives sur le processus biomimétique TPIB :

- L'axe horizontal de répartition du temps devra être optimisé avec la récolte de nouvelles données afin d'ajuster les tendances observées sur les 15 premiers projets industriels.
- La variabilité des typologies des projets pouvant être très forte, les paramètres impactant la pratique et donc le processus devront être identifiés pour adapter la méthodologie (projet purement spéculatif étudiant si la biomimétique est d'intérêt sur un projet donné versus projet purement technique avec un problème très bien défini et un besoin de solution technique très détaillée).
- L'adéquation entre le processus préconisé et des équipes intégrant des biomiméticiens devra être évaluée dans un cadre industriel.
- Le processus devra continuer à être testé pour être optimisé selon les besoins émergents des nouveaux outils, des nouvelles compositions d'équipes, de nouveaux champs d'application, etc.

Le processus TPIB est un processus conçu pour être adaptatif, les modalités de son adaptation doivent cependant être formalisées pour faciliter son optimisation par les équipes au cours du temps.

Perspectives sur le biomiméticien :

- Approfondir les études sur la systématique et l'écologie pour identifier d'autres outils et raisonnements pouvant s'avérer pertinents pour une utilisation en biomimétique.
- Adapter des outils issus des champs scientifiques biologiques à la pratique de la biomimétique.
- Poursuivre l'identification et la formalisation d'apports potentiels d'autres champs biologiques tels que l'anatomie comparée, la microbiologie, la génétique, etc.

- Poursuivre la formalisation des compétences du biomiméticien afin d’apporter de nouveaux éléments de définition à ce nouveau profil.
- Mettre en place des formations pour permettre le passage du concept au métier.

Le biomiméticien représente à la fois une contribution et une perspective dans la mesure où sa formalisation est vouée à être complétée et où l’ajout d’un nouvel acteur aussi atypique ouvre un nombre important d’axes de recherche.

8.2.2 Perspectives sur la recherche en biomimétique

Cette dernière partie synthétise un ensemble de questions émergeant de ce doctorat et structurant ainsi les perspectives envisagées à l’échelle de la recherche globale en conception biomimétique.

Axe 1 : sur la limitation des risques lors des projets biomimétiques :

- Comment compléter les processus actuels, essentiellement axés sur la phase de conception générale, pour accompagner les praticiens sur les phases de conception détaillée et d’industrialisation des projets biomimétiques ?
- Comment déployer une stratégie d’innovation biomimétique de manière pertinente tout en maîtrisant les risques ?

Axe 2 : sur les interactions entre pratique biomimétique et recherche en biomimétique :

- Comment favoriser la mise en place de boucles de retours d’expériences afin d’aligner la recherche scientifique au plus près des besoins réels rencontrés par les équipes de conception ?
- Comment favoriser le test et le transfert de préconisations issues du monde académique pour réduire l’inertie entre les avancées scientifiques et les avancées pratiques ?

Axe 3 : sur le lien entre la recherche en biologie et la pratique de la conception biomimétique :

- Comment structurer la mobilisation des chercheurs en biologie intervenant en tant qu’experts (ex. motivations ? réseaux d’acteurs ? identification des experts adaptés ? etc.) ?
- Que peut apporter la biomimétique à la recherche en biologie ?
- Comment transférer des besoins spécifiques à la conception biomimétique (ex. valeur de certaines constantes physico-chimiques de biomatériaux) à la pratique de la recherche en biologie pour que ces données soient effectivement récoltées ?

- Comment rendre les acteurs de la recherche en biologie moteurs des développements méthodologiques ayant attiré à la biomimétique (ex. identification de nouvelles compétences et génération d'outils pour le biomiméticien) ?

Axe 4 : sur le développement de formations académiques et professionnelles :

- Comment résoudre le cercle vicieux selon lequel le faible nombre de personnes formées en biomimétique entraîne un manque de projets et donc de débouchés dans le domaine, limitant lui-même le développement de formations.
- Comment pallier le manque d'intervenants (notamment en France) formés à l'enseignement des approches biomimétiques ?

Axe 5 : sur l'approche biology-push :

- Quels rôles peuvent avoir les biomiméticiens dans les approches biomimétiques *biology push* (issues de découvertes de la recherche en biologie) ?
- Effectuer une évaluation des besoins et des risques de l'approche *biology push* afin de comparer les leviers d'optimisation communs et spécifiques aux deux approches.

Axe 6 : sur une conception innovante et un développement en cohérence avec l'écosystème terrestre :

- Comment l'intégration du biomiméticien peut-elle favoriser la mise en place de stratégies biomimétiques favorisant le développement durable et donc le biomimétisme ?
- Caractériser de manière robuste l'impact du développement de stratégies biomimétiques sur l'environnement à travers la récolte de données qualitatives et quantitatives. Effectuer une extrapolation sur le long terme de ces résultats afin de définir dans quelle mesure le biomimétisme est effectivement une méthode pertinente pour répondre au défi d'une harmonisation du développement humain avec l'écosystème terrestre ?
- Comme souligné dans l'axe 1 de cette partie, associer les phases de conception détaillée et d'industrialisation aux études méthodologiques. Celles-ci apparaissent en effet fortement liées à l'impact environnemental des produits. Sans tenir compte du produit considéré, que peut apporter le biomimétisme sur les standards actuels des méthodes de production industrielle ?
- Peut-on établir une certification ou un label assurant d'un développement par le biomimétisme en cohérence avec l'environnement ?

Cette partie sur les perspectives souligne ainsi que les travaux développés dans ce manuscrit représentent des apports à partir desquels différentes réflexions scientifiques pourront être poursuivies.

8.3 Publications associées à ce travail de thèse

Les résultats des différentes études présentées dans ce manuscrit ont conduit à la publication d'articles et de communications scientifiques listés ci-dessous :

Journaux internationaux

Graeff, E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (Soumis le 07/24/20) : *Biological fields, the missing pieces of the biomimetic puzzle Bioinspiration and biomimetics.*

Graeff, E. ; Letard, A. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (Soumis le 16/02/20) : *From practical to an interdisciplinary process Research in Engineering Design.*

Graeff, E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (2020) : A shared framework of reference, a first step towards engineers' and biologists' synergic reasoning in biomimetic design teams, *Journal of Mechanical Design.*

Graeff, E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (2019) : Biomimetics, where are the biologists? *Journal of Engineering Design.*, **30**, 289–310.

Conférences internationales

Graeff, E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (2019) : Engineers' and Biologists' Roles during Biomimetic Design Processes, Towards a Methodological Symbiosis. *International Conference on Engineering Design, ICED.* Delft, Vol. 1pp. 319–328.

Graeff, E. ; Gras, M. ; Piroux, R. ; Huet-Kouo, D. ; Jean, C. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (2019) : First step to combine bio-inspiration and frugal innovation : Application to a container's village. *7th International Conference on Research into Design (ICoRD'19), Bangalore, India.*

Graeff, E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (2018) : Role of biologists in biomimetic design processes : Preliminary results. *International Design Conference, DESIGN.* Dubrovnik, Vol. 3pp. 1149–1160.

Conférences nationales

Graeff, E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. (2018) : Conception biomimétique : quels acteurs pour quelles attentes ? *CONFERE conference. Budapest*

Caillieux, L. ; Graeff, E. ; Gazo, C. ; Maranzana, N. (2018) : Méthodologie innovante de résolution de problèmes incluant de la bio-inspiration. *CONFERE conference. Budapest*

Autres communications nationales

Graeff, E. (2020) : Integration of biological knowledge and know-how to structure an innovative methodological framework for problem-driven approaches. Ceebios Scientific Interest Group, Ceebios.

Graeff, E. (2019) : Quelle place pour le biologiste en conception biomimétique ? Séminaire du département Mécanisme Adaptatif et Évolution (MECADEV), Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.

Graeff, E. (2019) : Optimization of biomimetic design processes through the integration of biological expertise. Ceebios scientific board seminar, Ceebios.

REFERENCES

A

- ABET. (2013). "Criteria for accrediting engineering programs 2014-2015". *Cycle*: p.25.
- Adams, K.M. (2015). "Design methodologies". *Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality* 28: p.15–43.
- Ahmed-Kristensen, S. ; Christensen, B.T. and Lenau, T.A. (2014). "Naturally original: Stimulating creative design through biological analogies and Random images". In *International Design Conference, DESIGN*, 427–436. Dubrovnik
- Airbus. (2018). "Biomimicry: engineering in nature's style - Commercial Aircraft". Available at: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/01/biomimicry--engineering-in-nature-s-style.html> [Accessed March 12, 2020].
- Airbus. (2019). "An Airbus futuristic conceptual airliner "takes flight" to inspire next-generation engineers - Innovation". Available at: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2019/07/airbus-conceptual-airliner-to-inspire-new-generation-engineers.html> [Accessed March 12, 2020].
- Alexander, C. (1964). *Notes on the Synthesis of Form*. Harvard University Press.
- Alexander, C. (1971). "The State of the Art in Design Methods". *DMG Newsletter* 5(3): p.3–7.
- Altshuller, G.S. (1984). *Creativity as an exact science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. Gordon and Breach Science Publishers.
- American Institute of Industrial Engineers. (2018). "What is industrial and systems engineering? (IISE official definition)". Available at: <http://www.iise.org/details.aspx?id=282> [Accessed June 29, 2018].
- Angert, E.R. (2005). "Alternatives to binary fission in bacteria". *Nature Reviews Microbiology* 3(3): p.214–224.
- Aoussat, A. (1990). *La Pertinence en Innovation: Nécessité d'une Approche Plurielle*, Thèse de doctorat. ENSAM - Paris.
- Aoussat, A. ; Christofol, H. and Le Coq, M. (2000). "The new product design - A transverse approach". *Journal of Engineering Design* 11(4): p.399–417.
- Appio, F.P. ; Achiche, S. ; Martini, A. and Beaudry, C. (2017). "On designers' use of biomimicry tools during the new product development process: an empirical investigation". *Technology Analysis and Strategic Management* 29(7): p.775–789.
- Archer, B. (1964). "Systematic method for designers". *Council of Industrial Design*.
- Asimow, M. (1962). *Introduction to design*. Prentice-Hall.
- Avery, O.T. ; Macleod, C.M. and McCarty, M. (1944). "Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types : induction of transformation by a desoxyribonucleic acid fraction isolated from pneumococcus type iii.". *The Journal of experimental medicine* 79(2): p.137–58.
- Avibase. (2018). "Avibase - The world bird database". *Lepage*,. Available at: <https://avibase.bsc-eoc.org/search.jsp?lang=EN&isadv=yes> [Accessed February 29, 2020].

B

- Badarnah, L. and Kadri, U. (2015). "A methodology for the generation of biomimetic design concepts".

Annexes

- Architectural Science Review* 58(2): p.120–133.
- Baldussu, A. ; Cascini, G. ; Rosa, F. and Rovida, E. (2012). "Causal models for bio-inspired design: A comparison". In *Design Conference*, 717–726. Dubrovnik
- Bar-Cohen, Y. and Breazeal, C. (2003). "Biologically Inspired Intelligent Robots". In *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium*,
- Bar-Cohen, Y. (2006). "Biomimetics - Using nature to inspire human innovation". *Bioinspiration and Biomimetics* 1(1): p.P1–P12.
- Bar-Cohen, Y. (2012). "Biologically inspired technologies for aeronautics". In *Innovation in Aeronautics*, 15–36. Woodhead Publishing
- Barbosa, F.M. ; Alves, R.M.O. ; Souza, B. a and de Carvalho, C. a L. (2013). "Nest architecture of the stingless bee *Geotrigona subterranean* (Friese,1901) (Hymenoptera: Apidae: Meliponini)". *Biota Neotropica*.
- Barlow Darwin, N. (1958). *The autobiography of Charles Darwin, 1809-1882 : with original omissions restored ed. with appendix and notes by his grand-daughter Nora Barlow*. London: Collins.
- Baumeister, D. ; Tocke, R. ; Dwyer, J. ; Ritter, S. and Benyus, J. (2013). *Biomimicry Resource Handbook: A seed bank of knowledge and best practices* 2013th ed. Missoula: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Benyus, J.M. (1997). *Biomimicry: innovation inspired by Nature*. Quill.
- Berlo, D.K. (1960). *The process of communication: an introduction to theory and practice*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Bernard, C. (1875). *Définition de la vie, les théories anciennes et la science moderne* Revue des.
- Bernard, F. ; Bazzaro, F. ; Sagot, J.-C. and Paquin, R. (2017). "Consideration of human factor in aeronautical maintainability". In *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1–7. IEEE
- Bernard, C. and Wolf, S. (2018). *Experimental medicine*.
- Berns, T.A.R. (1984). "The integration of ergonomics into design—A review". *Behaviour & Information Technology* 3(4): p.277–283.
- Bertalanffy, L. (1968). *General system theory*.
- Berthet, E. (2014). *Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes : Fonds écologique et inconnu commun*, Thèse de doctorat. Presses des Mines-Transvalor.
- Bessant, J. ; Lamming, R. ; Noke, H. and Phillips, W. (2005). "Managing innovation beyond the steady state". *Technovation* 25(12): p.1366.
- Bhasin, D. and McAdams, D.A. (2018). "The Characterization of Biological Organization, Abstraction, and Novelty in Biomimetic Design". *Designs* 2(4): p.54.
- Bianciardi, A. ; Credi, C. ; Levi, M. ; Rosa, F. and Zecca, A. (2016). "Biomimicry thinking: Methodological improvements and practical implementation". *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*.
- Biberhofer, P. and Rammel, C. (2017). "Transdisciplinary learning and teaching as answers to urban sustainability challenges". *International Journal of Sustainability in Higher Education*.
- Bichat, M.F. (1800). *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*.
- Biokon. "BIOKON - Home". Available at: <https://www.biokon.de/en/> [Accessed March 5, 2020].

Annexes

- Biomim'expo. (2019). "The first biomimicry trade show and exhibition". Available at: <https://biomimexpo.com/> [Accessed March 12, 2020].
- Biomimicry Institute. (2002). "AskNature - Innovation Inspired by Nature". *AskNature*: p.27–29. Available at: <https://asknature.org/> [Accessed November 23, 2018].
- Blessing, L.T.M. (1994). "A process-based approach to computer supported engineering design".
- Blessing, L.T.M. (1995). *Comparison of design models proposed in prescriptive literature*.
- Blessing, L.T.M. and Chakrabarti, A. (2009). "DRM, a design research methodology". In *DRM, a Design Research Methodology*, 1–397. London: Springer London
- Blessing, L.T.M. and Seering, W. (2016). "Preparing for the Transfer of Research Results to Practice: Best Practice Heuristics". In *Impact of Design Research on Industrial Practice*, 3–21. Cham: Springer International Publishing
- Boeuf, G. (2007). "Océan et recherche biomédicale". *Journal de la Société de Biologie* 201(1): p.5–12.
- Bogatyrev, N.R. and Vincent, J.F.V. (2008). "Microfluidic Actuation in Living Organisms: a Biomimetic Catalogue". In *Proceedings of the First European Conference on Microfluidics*, 175–182.
- Bogatyrev, N. and Bogatyreva, O. (2014). "BioTRIZ: A Win-Win Methodology for Eco-innovation". In *Eco-Innovation and the Development of Business Models*,
- Bogatyrev, N. and Bogatyreva, O. (2015). "TRIZ-based algorithm for Biomimetic design". In *Procedia Engineering*, 377–387. Elsevier
- Bollazzi, M. and Roces, F. (2010a). "Control of nest water losses through building behavior in leaf-cutting ants (*Acromyrmex heyeri*)". *Insectes Sociaux*.
- Bollazzi, M. and Roces, F. (2010b). "Leaf-cutting ant workers (*Acromyrmex heyeri*) trade off nest thermoregulation for humidity control". *Journal of Ethology*.
- Bouchard, C. ; Camous, R. and Aoussat, A. (2005). "Nature and role of intermediate representations (IR) in the design process: Case studies in car design". *International Journal of Vehicle Design* 38(1): p.1–25.
- British Ecological Society. "Ecology is a science that matters". Available at: <https://www.britishecologicalsociety.org/about/what-is-ecology/> [Accessed June 24, 2019].
- Broberg, O. (2007). "Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists". *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 17(4): p.353–366.
- Brown, T. (2009). "Summary for Policymakers". In Intergovernmental Panel on Climate Change (ed) *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, 1–30. Cambridge: Cambridge University Press
- Bruneel, J. ; D'Este, P. and Salter, A. (2010). "Investigating the factors that diminish the barriers to university-industry collaboration". *Research Policy*.
- Butt, M. ; Sharunova, A. ; Storga, M. ; Khan, Y.I. and Qureshi, A.J. (2018). "Transdisciplinary Engineering Design Education: Ontology for a Generic Product Design Process". In *Procedia CIRP*,

C

- Cambien, A. (2007). *Une introduction à l'approche systémique*. CERTU Lyon.
- Campell, R.L. (2001). *Studies in Reflecting Abstraction* R. L. Campell (ed). New York: Psychology Press.

Annexes

- Cavallucci, D. and Weill, R.D. (2001). "Integrating Altshuller's development laws for technical systems into the design process". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50(1): p.115–120.
- Ceebios. (2017a). "Objectifs et context". Available at: <https://ceebios.com/objectifs-historique/> [Accessed June 29, 2018].
- Ceebios. (2017b). *Synthèse des formations en Europe*.
- Ceebios. (2018). *Biomimétisme en France*.
- Ceebios. (2019). "Partenaires & clients". Available at: <http://ceebios.com/partenaires-clients/> [Accessed March 12, 2020].
- CESE. (2015). *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*.
- Chakrabarti, A. ; Sarkar, P. ; Leelavathamma, B. and Nataraju, B.S. (2005). "A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 19(2): p.113–132.
- Chakrabarti, A. and Blessing, L.T.M. (2014). *An Anthology of Theories and Models of Design*. London: Springer London.
- Chapman, D.D. ; Shivji, M.S. ; Louis, E. ; Sommer, J. ; Fletcher, H. and Prodöhl, P.A. (2007). "Virgin birth in a hammerhead shark". *Biology letters* 3(4): p.425–7.
- Chayaamor-Heil, N. and Guéna, F. (2018). "Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils". *Journals.Openedition.Org* (1).
- Cheong, H. and Shu, L.H. (2009). "Effective Analogical Transfer Using Biological Descriptions". *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*.
- Cheong, H. and Shu, L.H. (2010). "Supporting Creative Concept Generation by Engineering Students with Biomimetic Design". *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*.
- Cheong, H. ; Chiu, I. ; Shu, L.H. ; Stone, R.B. and McAdams, D.A. (2011). "Biologically Meaningful Keywords for Functional Terms of the Functional Basis". *Journal of Mechanical Design* 133(2): p.021007.
- Cheong, H. and Shu, L.H. (2012). "Automatic extraction of causally related functions from natural-language text for biomimetic design".
- Chesbrough, H. (2006). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business School Press.
- Chirazi, J. ; Wanieck, K. ; Fayemi, P.-E. ; Zollfrank, C. and Jacobs, S.R. (2019). "What Do We Learn from Good Practices of Biologically Inspired Design in Innovation?". *Applied Sciences* 9(4): p.650.
- Chiu, I. and Shu, L.H. (2005). "Bridging Cross-Domain Terminology for Biomimetic Design". In *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 93–101. Long Beach
- Chiu, I. and Shu, L.H. (2007). "Biomimetic design through natural language analysis to facilitate cross-domain information retrieval". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 21(01): p.45–59.
- Chodasewicz, K. (2014). "Evolution, reproduction and definition of life.". *Theory in biosciences = Theorie in den Biowissenschaften* 133(1): p.39–45.
- Choi, B, Pak, A. (2006). "Multidisciplinarity, inter-disciplinarity and trans-disciplinarity in health research". *Clinical and Investigative Medicine*.

Annexes

- Chowdhury, H. ; Islam, R. ; Hussein, M. ; Zaid, M. ; Loganathan, B. and Alam, F. (2019). "Design of an energy efficient car by biomimicry of a boxfish". In *Energy Procedia*,
- Chown, B. (2017). "The design team as a "system of systems"". In *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 1–5. IEEE
- Clear Fashion. "L'app pour mieux choisir ses vêtements". Available at: <https://www.clear-fashion.com/> [Accessed March 4, 2020].
- Cleland, C.E. and Chyba, C.F. (2002). "Defining 'life'". *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 32(4): p.387–393.
- Climate Change & Infectious Diseases Group. (2019). "World Maps of Köppen-Geiger climate classification". Available at: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/> [Accessed October 24, 2019].
- CNRTL. (2012). "Définitions - Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales". Available at: <https://www.cnrtl.fr/definition/> [Accessed May 13, 2020].
- Cobb, M. (2014). "Oswald Avery, DNA, and the transformation of biology". *Current Biology* 24(2): p.R55–R60.
- Combemorel, P. (2016). "Combien de cellules composent un être humain?". *Planet-Vie-ENS*. Available at: <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/microbiologie/bacteriologie/combien-de-cellules-composent-un-etre-humain> [Accessed April 16, 2020].
- Cross, N. (1993). "A History of Design Methodology". In *Design Methodology and Relationships with Science*, 15–27. Dordrecht: Springer Netherlands
- Cross, N. (2001). "Designerly Ways of Knowing: Design Discipline Versus Design Science". *Design Issues*.
- Cross, N. (2008). *Engineering design methods*. Wiley.
- Cross, N. (2018). "Developing design as a discipline". *Journal of Engineering Design* 29(12): p.691–708.
- Cummings, J.N. and Kiesler, S. (2005). "Collaborative research across disciplinary and organizational boundaries". *Social Studies of Science*.

D

- Daniellou, F. (2005). "The French-speaking ergonomists' approach to work activity: Cross-influences of field intervention and conceptual models". *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 6(5): p.409–427.
- Darchen, R. (1973). "Thermorégulation et l'écologie de quelques espèces d'abeilles sociales d'Afrique (Apidae, Trigonini et Apis mellifi) - Thermoregulation and ecology of some african social species of bees (Apidae, Trigonini and Apis mellifi)". *Apidologie* 4(4): p.341–370.
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of the Species* 1st editio. London: John Murray.
- Deldin, J.-M. and Schuknecht, M. (2014). "The AskNature Database: Enabling Solutions in Biomimetic Design". In *Biologically Inspired Design*, 17–27. London: Springer London
- Denis, M. (2003). "Cognition humaine". *LIMSI*. Available at: <https://publi.limsi.fr/RS2002FF/CHM2002FF/CH2002FF/> [Accessed December 10, 2018].
- Design Research Society. "About the DRS". Available at: <https://www.designresearchsociety.org/cpages/about> [Accessed March 8, 2020].
- Design Society. (2016). "The Design Society - a worldwide community". Available at: <https://www.designsociety.org/> [Accessed April 15, 2020].

Annexes

Devito, J.A. (2013). *The Interpersonal Communication Book*.

Dewar, R.D. and Dutton, J.E. (1986). "The Adoption of Radical and Incremental Innovations: An Empirical Analysis". *Management Science* 32(11): p.1422–1433.

Dictionnaire Larousse. (2018). "Définition". *Dictionnaire Français Larousse*. Available at: <https://www.larousse.fr/> [Accessed March 4, 2020].

Dodd, M.S. ; Papineau, D. ; Grenne, T. ; Slack, J.F. ; Rittner, M. ; Pirajno, F. ; O'Neil, J. and Little, C.T.S. (2017). "Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates". *Nature* 543(7643): p.60–64.

Domke, M. and Hashemi Farzaneh, H. (2018). "Research in bio-inspired design - What is its current focus?". In *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED*,

Drack, M. ; Limpinsel, M. ; De Bruyn, G. ; Nebelsick, J.H. and Betz, O. (2018). "Towards a theoretical clarification of biomimetics using conceptual tools from engineering design". *Bioinspiration and Biomimetics* 13(1): p.016007.

E

Eder, W.E. (2013). "Engineering Design vs. Artistic Design: Some Educational Consequences". *US-China Education Review* 3(4): p.259–280.

Eggermont, M. (2011). "Biomimetics As Problem-Solving, Creativity and Innovation Tool". *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA)*.

Eggermont, H. (2015). "Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe". *Gaia* 24(4): p.243–248.

Ernest, S.K.M. (2008). "Homeostasis". In *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*,

F

Falkenhainer, B. ; Forbus, K.D. and Gentner, D. (1989). "The structure-mapping engine: Algorithm and examples". *Artificial Intelligence* 41(1): p.1–63.

Falzon, P. (2005). "Ergonomie, conception et développement". In *Conférence introductive, 40ème congrès de la SELF*, 21–23. Saint-Denis

Fayemi, P.-E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. and Bersano, G. (2014). "Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools". In *International Design Conference, DESIGN*, 173–182. Dubrovnik

Fayemi, P.-E. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. ; Chekchak, T. and Bersano, G. (2015). "Modeling biological systems to facilitate their selection during a bio-inspired design process". In *International Conference on Engineering Design, ICED*, 225–234. Milan

Fayemi, P.-E. (2016). *Innovation through bio-inspired design : suggestion of a structuring model for biomimetic process and methods*, Thèse de doctorat. ENSAM - Paris.

Fayemi, P.-E. ; Wanieck, K. ; Zollfrank, C. ; Maranzana, N. and Aoussat, A. (2017). "Biomimetics: Process, tools and practice". *Bioinspiration and Biomimetics* 12(1): p.11002.

Feher, J. (2017). "The Core Principles of Physiology". In *Quantitative Human Physiology*,

Fermanian Business & Economic Institute. (2013). *BIOINSPIRATION : An Economic Progress Report*.

Fish, F.E. and Beneski, J.T. (2014). "Evolution and Bio-Inspired Design: Natural Limitations". In *Biologically Inspired Design*,

Annexes

- Floreano, D. and Mattiussi, C. (2008). *Bio-inspired artificial intelligence: theories, methods, and technologies*. MIT Press.
- Ford, H. and Crowther, S. (1922). *My life and work*,. Garden City N.Y.: Doubleday Page & Co.
- Forterre, P. and Gribaldo, S. (2007). "The origin of modern terrestrial life". *HFSP Journal* 1(3): p.156–168.
- Fraunhofer. (2010). "BIOPS". Available at: <http://nature4innovation.com/> [Accessed July 18, 2018].
- Freitas Salgueiredo, C. and Hatchuel, A. (2014). "Modeling biologically inspired design with the C-K design theory". In *Proceedings of International Design Conference, DESIGN*, 23–32.
- French, M.J. (1985). *Conceptual Design for Engineers*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fu, K. ; Moreno, D. ; Yang, M. and Wood, K.L. (2014). "Bio-inspired design: An overview investigating open questions from the broader field of design-by-analogy". *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*.
- Full, R.J. (2001). "Using biological inspiration to build artificial life that locomotes". In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*,

G

- Garrigou, A. ; Thibault, J.-F. ; Jackson, M. and Mascia, F. (2001). "Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception". *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé* (3–2).
- Gasparski, W. and Strzalecki, A. (1990). "Contributions to Design Science: Praxeological Perspective". *Design methods and Theories* 24(2).
- Gayon, J. (2016). "From Mendel to epigenetics: History of genetics". *Comptes Rendus Biologies* 339(7–8): p.225–230.
- GBIF. (2019). "GBIF - Home Page". Available at: <https://www.gbif.org/> [Accessed July 1, 2019].
- Gebeshuber, I.C. and Drack, M. (2008). "An attempt to reveal synergies between biology and mechanical engineering". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 222(7): p.1281–1287.
- Geckskin. "GECKSKIN®". Available at: <https://www.buygeckskin.com/> [Accessed April 17, 2020].
- Gentner, D. (1989). "The Mechanisms of Analogical Learning". In Cambridge (ed) *Similarity and Analogical Reasoning*, 199–241.
- Gentner, D. (2002). "Psychology of Mental Models". In *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, 9683–9687.
- GENTNER, D. (1983). "Structure-mapping: A theoretical framework for analogy". *Cognitive Science* 7(2): p.155–170.
- Gericke, K. and Blessing, L. (2011). "Comparisons of design methodologies and process models across disciplines: A literature review". In *ICED 11 - 18th International Conference on Engineering Design - Impacting Society Through Engineering Design*,
- Gero, J.S. (1990). "Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design". *AI Magazine* 11(4): p.26.
- Gils, H.A.J.A. Van and Vanderwoude, C. (2012). " Leafcutter Ant (*Atta sexdens*) (Hymenoptera: Formicidae) Nest Distribution Responds to Canopy Removal and Changes in Micro-Climature in the Southern Colombian Amazon. ". *Florida Entomologist*.

Annexes

- Global Footprint Network. (2016). "Earth Overshoot Day". *Global Footprint Network*. Available at: https://worlddisk.com/wiki/Earth_Overshoot_Day/ [Accessed April 14, 2020].
- Glowee. "Glowee, c'est la mer qui nous éclaire". Available at: <https://www.glowee.com/> [Accessed April 17, 2020].
- Goel, A.K. ; Vattam, S. ; Wiltgen, B. and Helms, M. (2014). "Information-Processing Theories of Biologically Inspired Design". In *Biologically Inspired Design*, 127–152. Springer, London
- Goel, A.K. (2015). "Biologically inspired design: A new paradigm for AI research on computational sustainability?". In *AAAI Workshop - Technical Report*,
- Gordon, W.J.J. (1961). *Synectics - The development of creative capacity*. New York; Evanston: Harper & Row.
- Grabowski, H. ; Lossack, R.S. and El-Mejbri, E.F. (1999). "Towards a Universal Design Theory". In *Integration of Process Knowledge into Design Support Systems*, 49–56. Dordrecht: Springer, Dordrecht
- Grant, D. (1979). "Design Methodology and Design Method". *Design methods and Theories* 13(1).
- Gray, D. (2006). "Mercedes-Benz 'bionic' car inspired by tough reef-dwelling fish: [Final Edition]". *Edmonton Journal*: p.19.
- Griffiths, A.J.F. ; Gelbart, W.M. ; Miller, J.H. and Lewontin, R.C. (1999). "The Sources of Variation". *Modern Genetic Analysis*.
- Guerrero, J.E. ; Maestro, D. and Bottaro, A. (2012). "Biomimetic spiroid winglets for lift and drag control". *Comptes Rendus - Mecanique* 340(1–2): p.67–80.

H

- Haefner, J.W. (2005). *Modeling biological systems: Principles and applications*.
- Hall-Andersen, L.B. ; Neumann, W.P. and Broberg, O. (2016). "Integrating ergonomics knowledge into business-driven design projects: The shaping of resource constraints in engineering consultancy". *Work* 55(2): p.335–346.
- Hall, A.D. (1962). *A methodology for systems engineering*. Princeton, N.J. : Van Nostrand.
- Hallowell, J.H. (1945). " The Super-Powers: The United States, Britain, and the Soviet Union--Their Responsibility for Peace. William T. R. Fox ". *The Journal of Politics*.
- Hamon, B. (2017). "Développement du biomimétisme | BenoitHamon2017.fr". *Programme de campagne*. Available at: <https://www.benoithamon2017.fr/proposition/developpement-du-biomimetisme/> [Accessed June 29, 2018].
- Hanov, M.C. (1766). *Philosophiae naturalis sive physicae dogmaticae tomus I*. Halae Magdeburgicae: Prostat in Officina Libraria Rengeriana.
- Harman, J. (2014). *The shark's paintbrush : biomimicry and how nature is inspiring innovation* First edition. Ashland Oregon: White Cloud Press.
- Hashemi Farzaneh, H. ; Helms, K.M. and Lindemann, U. (2015). "Visual representations as a bridge for engineers and biologists in bio-inspired design collaborations". In *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED*, 215–224.
- Hashemi Farzaneh, H. and Lindemann, U. (2019). *A practical guide to Bio-Inspired Design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hashemi Farzaneh, H. (2020). "Bio-inspired design: the impact of collaboration between engineers and biologists

Annexes

- on analogical transfer and ideation". *Research in Engineering Design*: p.1–24.
- Hassan, S.A. ; Santulli, C. ; Yahya, M.Y.B. ; Gang, C.L. and Abu Bakar, M.N.F.B. (2018). "The potential of biomimetics design in the development of impact resistant material". *FME Transactions*.
- Hatchuel, A. and Weil, B. (2003). "A New Approach of Innovative Design: an Introduction To C-K theory". *International conference on engineering design, ICED* (January): p.1–15.
- Hatchuel, A. ; Le Masson, P. ; Reich, Y. and Subrahmanian, E. (2018). "Design theory: a foundation of a new paradigm for design science and engineering". *Research in Engineering Design*.
- Helfman Cohen, Y. and Reich, Y. (2016). *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*.
- Helms, M.E. ; Vattam, S.S. and Goel, A.K. (2009). "Biologically inspired design: process and products". *Design Studies* 30(5): p.606–622.
- Helms, M.E. ; Vattam, S.S. and Goel, A.K. (2010). "The effect of functional modeling on understanding complex biological systems". In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*,
- Helms, M. and Goel, A.K. (2014). "The Four-Box Method of Problem Specification and Analogy Evaluation in Biologically Inspired Design". In *Volume 7: 2nd Biennial International Conference on Dynamics for Design; 26th International Conference on Design Theory and Methodology*, V007T07A005. ASME
- Helms, K.M. ; Hashemi Farzaneh, H. and Lindemann, U. (2015). "Creating bio-inspired solution ideas using biological research articles". In *Multidisciplinary Contributions to the Science of Creative Thinking*, 215–232. Springer Singapore
- Helten, K. ; Schenkl, S. and Lindemann, U. (2011). "Biologizing Product Development - Results from a Student Project". *Research into Design — Supporting Sustainable Product Development*.
- Hemarina. "Hemarina, le 1er transporteur d'oxygène universel à visée thérapeutique". Available at: <https://www.hemarina.com/> [Accessed April 17, 2020].
- Hoegh-Guldberg, O.D. ; Jacob, M. ; Taylor, M. ; Bindi, S. ; Brown, I. ; Camilloni, A. ; Diedhiou, R. ; Djalante, K.L. ; Ebi, F. et al. (2018). "Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems". In *An IPCC Special Report*, 175–311.
- Hoeller, N. ; Farnsworth, M. ; Jacobs, S.R. ; Chirazi, J. ; Mead, T. ; Goel, A.K. and Salustri, F. (2016). "a Systems View of Bio-Inspiration: Bridging the Gaps". *Insight* 19(1): p.36–40.
- Holdridge, L.R. (1947). "Determination of world plant formations from simple climatic data". *Science* 105(2727): p.367–368.
- Hubka, V. and Eder, W.E. (1982). *Principles of engineering design*. Butterworth Scientific.
- Hubka, V. and Eder, W.E. (1987). "A scientific approach to engineering design". *Design Studies*.
- Hubka, V. and Eder, W.E. (1996). *Design Science*.
- Hublin, J.J. ; Ben-Ncer, A. ; Bailey, S.E. ; Freidline, S.E. ; Neubauer, S. ; Skinner, M.M. ; Bergmann, I. ; Le Cabec, A. ; Benazzi, S. et al. (2017). "New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of Homo sapiens". *Nature* 546(7657): p.289–292.
- Hwang, J. ; Jeong, Y. ; Hong, J.W. and Choi, J. (2015). "Biomimetics: Forecasting the future of science, engineering, and medicine". *International Journal of Nanomedicine* 10: p.5701–5713.

I

INSEE. (2016). "Définition - Industrie | Insee". Available at:

Annexes

<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1426> [Accessed July 3, 2018].

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.

ISO/TC266. (2015). "Biomimétique -Terminologie, concepts et méthodologie".

J

J. Forehand, C. (2009). *The Action Potential, Synaptic Transmission, and Maintenance of Nerve Function*.

Jacob, F. (1976). *The logic of life : a history of heredity*.

Jacobs, S.R. (2014). "Biomimetics: A simple foundation will lead to new insight about process". *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*.

Jacobs, S.R. ; Nichol, E.C. and Helms, M.E. (2014). "'Where Are We Now and Where Are We Going?' The BioM Innovation Database". *Journal of Mechanical Design* 136(11): p.111101.

Jinek, M. ; Chylinski, K. ; Fonfara, I. ; Hauer, M. ; Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2012). "A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity". *Science* 337(6096): p.816–821.

Jones, J. (1970). "Design Methods: Seeds of Human Futures". *Journal of the Operational Research Society* 32(12): p.1158–1159.

Jones, J. (1977). *How My Thoughts about Design Methods Have Changed During the Years* Spanner (ed).

K

Kaiser, M.K. ; Hashemi Farzaneh, H. and Lindemann, U. (2014). "Bioscrabble - The role of different types of search terms when searching for biological inspiration in biological research articles". In *Proceedings of International Design Conference, DESIGN*, 241–250. Dubrovnik

Karsenti, E. (2008). "Self-organization in cell biology: a brief history". *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 9(3): p.255–262.

Kennedy, E. and Niewiarowski, P. (2018). "Biomimicry: Do Frames of Inquiry Support Search and Identification of Biological Models?". *Designs* 2(3): p.27.

Keshwani, S. and Chakrabarti, A. (2015). "Influence of analogical domains and abstraction levels on novelty of designs". In *ICDC 2015 - Proceedings of the 3rd International Conference on Design Creativity*,

Keshwani, S. ; Lenau, T.A. ; Ahmed-Kristensen, S. and Chakrabarti, A. (2017). "Comparing novelty of designs from biological-inspiration with those from brainstorming". *Journal of Engineering Design* 28(10–12): p.654–680.

Kim, S.J. and Lee, J.H. (2017). "A study on metadata structure and recommenders of biological systems to support bio-inspired design". *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 57: p.16–41.

Knight, K.E. (1967). "A Descriptive Model of the Intra-Firm Innovation Process". *The Journal of Business* 40(4): p.478.

Koen, P. ; Ajamian, G. ; Burkart, R. ; Clamen, A. ; Davidson, J. ; D'Amore, R. ; Elkins, C. ; Herald, K. ; Incorvia, M. et al. (2001). "Providing clarity and a common language to the 'fuzzy front end'". *Research Technology Management* 44(2): p.46–55.

Korb, J. (1999). "The architecture of termite mounds: a result of a trade-off between thermoregulation and gas

Annexes

- exchange?". *Behavioral Ecology*.
- Korb, J. (2003). "Thermoregulation and ventilation of termite mounds". *Naturwissenschaften*.
- Kord Forooshani, P. and Lee, B.P. (2017). "Recent approaches in designing bioadhesive materials inspired by mussel adhesive protein". *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*.
- Kruiper, R. ; Vincent, J.F.V. ; Abraham, E. ; Soar, R. ; Konstas, I. ; Chen-Burger, J. and Desmulliez, M. (2018). "Towards a Design Process for Computer-Aided Biomimetics". *Biomimetics* 3(3): p.14.
- Kruiper, R. ; Vincent, J.F. V. ; Chen-Burger, J. ; Desmulliez, M.P.Y. and Konstas, I. (2020). "A Scientific Information Extraction Dataset for Nature Inspired Engineering".
- Kucharavy, D. and De Guio, R. (2011). "Application of S-shaped curves". In *Procedia Engineering*, 559–572.
- Kumar, P. ; Gandhi, P.S. and Majumder, M. (2018). "Optimal morphometric factors responsible for enhanced gas exchange in fish gills.". *arXiv Biological Physics*.
- Kutschera, U. and Niklas, K.J. (2004). "The modern theory of biological evolution: An expanded synthesis". *Naturwissenschaften* 91(6): p.255–276.
- Kutschera, U. (2009). "Charles Darwin's Origin of Species, directional selection, and the evolutionary sciences today". *Naturwissenschaften* 96(11): p.1247–1263.
- Kvan, T. (2000). "Collaborative design: What is it?". *Automation in Construction* 9(4): p.409–415.

L

- Lahonde, N. (2010). *Design process improvement : proposal of a model for design methods selection to support the decision*, Thèse de doctorat. ENSAM - Paris.
- Lamarck, J.-B. (1809). "Philosophie zoologique; ou, Exposition des considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux". *Philosophie zoologique*.
- Lawson, B. (1980). *How designers think*. Architectural Press.
- LCPI. "Laboratoire de Conception de Produits et Innovation - Thématiques de recherche".
- Lecointre, G. and Le Guyader, H. (2006). *La classification phylogénétique du vivant*. Belin.
- Lecointre, G. and Camus, G. (2007). "La classification du vivant, mode d'emploi". *ENS Planet Vie*. Available at: <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/evolution/la-classification-du-vivant-mode-d-emploi> [Accessed April 3, 2020].
- Lecointre, G. ; Fortin, C. ; Guillot, G. and Le Louarn, M.-L. (2009). *Guide critique de l'évolution* 1st ed. Belin (ed).
- Legifrance. (2016). "Publication de la loi n ° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité , de la nature et des paysages".
- Lenau, T.A. (2009). "Biomimetics as a design methodology - Possibilities and challenges". In *International Conference on Engineering Design, ICED*, 121–132. Stanford
- Lenau, T.A. ; Dentel, A. ; Ingvarsdóttir, P. and Guolaugsson, T. (2010). "Engineering design of an adaptive leg prosthesis using biological principles". In *11th International Design Conference, DESIGN 2010*, 331–340.
- Lenau, T.A. ; Pigosso, D.C.A. ; McAloone, T. and Lakhtakia, A. (2020). "Biologically inspired design for environment". In A. Lakhtakia, R. J. Martín-Palma, & M. Knez (eds) *Bioinspiration, Biomimetics, and*

Annexes

Bioreplication X, 13. SPIE

- Letard, A. ; Maranzana, N. ; Raskin, K. and Auoussat, A. (2018). "Design et biomimétisme : quel rôle pour le designer ?". In *CONFERE conference*,
- Lighton, J.R.B. and Wehner, R. (1993). "Ventilation and respiratory metabolism in the thermophilic desert ant, *Cataglyphis bicolor* (Hymenoptera, Formicidae)". *Journal of Comparative Physiology B*.
- Lim, D. (2003). "Modélisation du processus de conception centrée utilisateur, basée sur l'intégration des méthodes et outils de l'ergonomie cognitive : application à la conception d'IHM pour la télévision interactive". <http://www.theses.fr>.
- Lindemann, U. and Gramann, J. (2004). "Engineering Design Using Biological Principles". In *International Design Conference, DESIGN*, 355–360. Dubrovnik
- Lipol, L.S. and Haq, J. (2011). "Risk analysis method : FMEA / FMECA in the organizations.". *International Journal of Basic & Applied Sciences* 11(5): p.1–9.
- Lissandre, M. (1990). *Maîtriser SADT*. Paris: Armand Colin.
- Lotrecchiano, G.R. (2010). "Complexity Leadership in transdisciplinary learning environments". *International Journal of Transdisciplinary Research* 5(1): p.29–63.

M

- Maclaurin, R.W. (1953). "The Sequence from Invention to Innovation and its Relation to Economic Growth". *Quarterly Journal of Economics*: p.97–111.
- Magyar, A. ; Arthanareeswaran, V.K.A. ; Soós, L. ; Nagy, K. ; Dobák, A. ; Szilágyi, I.M. ; Justh, N. ; Chandra, A.R. ; Köves, B. et al. (2017). "Does micropattern (sharklet) on urinary catheter surface reduce urinary tract infections? Results from phase I randomized open label interventional trial". *European Urology Supplements* 16(3): p.e146–e148.
- Mak, T.W. and Shu, L.H. (2004). "Abstraction of biological analogies for design". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53(1): p.117–120.
- Maranzana, N. ; Gartsier, N. and Caillaud, E. (2008). "From concurrent engineering to collaborative learning of design". *International Journal of Design and Innovation Research*: p.39–51.
- Maranzana, N. (2009). *Amélioration de la performance en conception par l'apprentissage en réseau de la conception innovante*, Thèse de doctorat. INSA de Strasbourg.
- Margara, J. (1984). "The basis of vegetative multiplication. Meristems and organogenesis.". *The basis of vegetative multiplication. Meristems and organogenesis*.
- Marsot, J. (2002). "Conception et Ergonomie". *Evolution*: p.1–69.
- Martin, S.J. (1990). "Nest thermoregulation in *Vespa simillima*, *V.tropica* and *V.analis*". *Ecological Entomology*.
- Massey, A.P. and Wallace, W.A. (1996). "Understanding and facilitating group problem structuring and formulation: Mental representations, interaction, and representation aids". *Decision Support Systems*.
- Masters, B.R. (2008). "History of the Optical Microscope in Cell Biology and Medicine". In *Encyclopedia of Life Sciences*,
- Mathieu, J.E. ; Goodwin, G.F. ; Heffner, T.S. ; Salas, E. and Cannon-Bowers, J.A. (2000). "The Influence of Shared Mental Models on Team Process and Performance". *Psychological Association, Inc* 85(2): p.273–283.

Annexes

- Maturana, H.R. and Varela, F.J. (1980). *Autopoiesis and cognition : the realization of the living*. D. Reidel Pub. Co.
- Mayr, E. (1942). *Systematics and the origin of species*. New York: Columbia University Press.
- McCardle, J. ; Angus, R. and Trott, J. (2019). "Transdisciplinary design practices in education: A complex search for innovation in nature". In *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering and Product Design Education: Towards a New Innovation Landscape, E and PDE 2019*,
- McInerney, S. ; Khakipoor, B. ; Garner, A. ; Houette, T. ; Unsworth, C. ; Rupp, A. ; Weiner, N. ; Vincent, J.F.V. ; Nagel, J.K.S. et al. (2018). "E2BMO: Facilitating User Interaction with a BioMimetic Ontology via Semantic Translation and Interface Design". *Designs* 2(4): p.53.
- Mead, T. and Jeanrenaud, S. (2017). "The elephant in the room: biomimetics and sustainability?". *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 6(2): p.113–121.
- Mélo, M. ; Raskin, K. ; Daigney, M. ; De Neubourg, S. and Chekchak, T. (2015). *Introduction to Nature Inspired Solutions*. Paris.
- Mendel, G. (1865). "Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn". : p.3–47.
- Merriam-Webster Dictionary. (2020). "Frame Of Reference". Available at: [https://www.merriam-webster.com/dictionary/frame of reference](https://www.merriam-webster.com/dictionary/frame%20of%20reference) [Accessed March 20, 2020].
- Metcalf, Z.P. (1918). *The Wings of Insects*.
- Miller, J.G. (1973). *Living systems*.
- Ministère de la transition Écologique et Solidaire. (2016). "Le biomimétisme". Available at: <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biomimetisme> [Accessed June 29, 2018].
- Minot, C.S. (2011). "The problem of age, growth, and death; a study of cytomorphosis.". *The problem of age, growth, and death; a study of cytomorphosis*. 71: p.211.
- Le Moigne, J.L. (1994). *La théorie du système général : théorie de la modélisation (General system theory : theory of modelling)*. Presses universitaires de France.

N

- Nagel, J.K.S. ; Stone, R.B. and McAdams, D.A. (2010a). "An engineering-to-biology thesaurus for engineering design". In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 117–128. ASME
- Nagel, J.K.S. ; Nagel, R.L. ; Stone, R.B. and McAdams, D.A. (2010b). "Function-based, biologically inspired concept generation". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 24(4): p.521–535.
- Nagel, J.K.S. ; Nagel, R.L. and Stone, R.B. (2011). "Abstracting biology for engineering design". *International Journal of Design Engineering* 4(1): p.23.
- Nagel, J.K.S. and Stone, R.B. (2012). "A computational approach to biologically inspired design". In *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 161–176.
- Nagel, J.K.S. (2014). "A Thesaurus for Bioinspired Engineering Design". In *Biologically Inspired Design*, 63–94.
- Nagel, J.K.S. ; Schmidt, L. and Born, W. (2015). "Fostering diverse analogical transfer in bio-inspired design". In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*,
- Nagel, J. ; Pittman, P. ; Pidaparti, R. ; Rose, C. and Beverly, C. (2016). "Teaching bioinspired design using C-K theory". *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 6(2): p.77–86.

Annexes

- Nagel, J.K.S. ; Schmidt, L. and Born, W. (2018). "Establishing Analogy Categories for Bio-Inspired Design". *Designs* 2(4): p.47.
- Nagel, J. ; Rose, C. ; Beverly, C. and Pidaparti, R. (2019a). "Bio-inspired Design Pedagogy in Engineering". In *Design Education Today*, 149–178.
- Nagel, J. ; Rose, C. ; Pidaparti, R. ; Tafoya, E. and Pittman, P. (2019b). "Preliminary findings from a comparative study of two bio-inspired design methods in a second-year engineering curriculum". In *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*,
- Nancarrow, S.A. ; Booth, A. ; Ariss, S. ; Smith, T. ; Enderby, P. and Roots, A. (2013). "Ten principles of good interdisciplinary team work". *Human Resources for Health*.
- NASA. (1994). "About | Life Detection | Research | Astrobiology". Available at: <https://astrobiology.nasa.gov/research/life-detection/about/> [Accessed July 9, 2018].
- National Center for Biotechnology Information. "NCBI Website". Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> [Accessed July 9, 2019].
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Academic Press.
- Nolan, V. (1989). *The innovator's handbook : team work, communication and problem solving*. Sphere.

O

- OCDE. (2018a). *Gross domestic spending on R&D*.
- OCDE. (2018b). *Manuel d'Oslo 2018 : Lignes directrices pour le recueil, la communication et l'utilisation des données sur l'innovation*. OCDE/Eurostat.
- Ohno, T. (1978). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production* 1 edition. Cambridge, Mass: Productivity Press.
- Olins, D.E. and Olins, A.L. (2003). "Chromatin history: our view from the bridge". *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 4(10): p.809–814.
- Olson, D.M. and Dinerstein, E. (1998). "The Global 200: A Representation Approach to Conserving the Earth's Most Biologically". *Conservation Biology* 12(3): p.502–515.
- Olson, D.M. ; Dinerstein, E. ; Wikramanayake, E.D. ; Burgess, N.D. ; Powell, G.V.N. ; Underwood, E.C. ; D'amico, J.A. ; Itoua, I. ; Strand, H.E. et al. (2001). "Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth". *BioScience* 51(11): p.933.
- Olson, D.M. and Dinerstein, E. (2002). "The Global 200: Priority Ecoregions for Global Conservation". *Annals of the Missouri Botanical Garden*.
- ONU. (2017). "La population mondiale devrait atteindre 9,8 milliards en 2050 et 11,2 milliards en 2100, selon l'ONU | ONU Info". Available at: <https://news.un.org/fr/story/2017/06/359662-la-population-mondiale-devrait-atteindre-98-milliards-en-2050-et-112-milliards> [Accessed July 24, 2018].
- Osborn, A.F. (1953). "Applied imagination".

P

- Pace, P.W. and Sutherland, J. (2001). "Detection, recognition, identification, and tracking of military vehicles using biomimetic intelligence". In F. A. Sadjadi (ed) 326. International Society for Optics and Photonics
- Pahl, G. ; Beitz, W. ; Wallace, K. ; Blessing, L.T.M. and Bauert, F. (1996). *Engineering Design: a systematic*

Annexes

approach. Springer.

- Pahl, G. ; Beitz, W. ; Feldhusen, J. and Grote, K.H. (2007). *Engineering Design : A Systematic Approach* L. T. M. Blessing (ed). Springer, London.
- Passow, H.J. and Passow, C.H. (2017). "What Competencies Should Undergraduate Engineering Programs Emphasize? A Systematic Review". *Journal of Engineering Education*.
- Paul, J.-J. (2011). "Graduates in the Knowledge and Innovation Society". In 111–137. Springer, Dordrecht
- Pearson, H. (2006). "What is a gene?". *Nature* 441(7092): p.398–401.
- Penny, R.K. (1970). "Principles of engineering design". *Postgraduate Medical Journal* 46(536): p.344–349.
- Perrin, J. (2017). "Recherche & industrie : la bioinspiration est-elle en train de faire bouger les lignes". *Biomim'expo Conference*. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=fOGcDWJzwCA> [Accessed March 12, 2020].
- Piaget, J. (1977). *Recherches sur l'abstraction réfléchissante*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Piaget, J. (2007). "Le rôle de l'imitation dans la formation de la représentation (1962)". *L'Évolution Psychiatrique* 72(4): p.625–631.
- Pierce, M. (2016). "Eastgate Building Harare". Available at: <https://www.mickpearce.com/Eastgate.html> [Accessed April 28, 2020].
- Piyush Tantia. (2017). "The New Science of Designing for Humans". *Stanford Social Innovation Review* 6: p.1–13.
- Prasad, B. (1996). *Concurrent engineering fundamentals*. Prentice Hall PTR.
- Pray, L. (2008). "Discovery of DNA Structure and Function: Watson and Crick". *Nature Education*.

R

- Reece, J. ; Simon, E. ; Dickey, J. and Hogan, K. (2015). *Campbell biology : Concepts & Connections*. Pearson Education.
- Renault, C. ; Chever, T. ; Romieu, V. ; Herry, L. ; Lepeule, C. and Kane, F. (2018). *Évaluation de la consommation alimentaire biologique*.
- Reynolds, L.K. ; McGlathery, K.J. and Waycott, M. (2012). "Genetic diversity enhances restoration success by augmenting ecosystem services". *PLoS ONE* 7(6): p.e38397.
- Ribatti, D. (2018). "An historical note on the cell theory". *Experimental Cell Research* 364(1): p.1–4.
- Richards, E.J. (2006). "Inherited epigenetic variation - Revisiting soft inheritance". *Nature Reviews Genetics* 7(5): p.395–401.
- Richter, I.A. ; Wells, T. and Kemp, M. (2008). *Notebooks New Editio*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Rittel, H.W.J. and Webber, M.M. (1973). "Dilemmas in a general theory of planning". *Policy Sciences* 4(2): p.155–169.
- Rosenau, M.D. (1998). "And suddenly the inventor appeared - triz, the theory of inventive solving, 2nd edition - altshuller,g". *Journal of Product Innovation Management* 15(1): p.100–102.

Annexes

De Rosnay, J. (1975). *Le Macroscopie. Vers une vision globale* Seuil (ed).

Rovalo, E. and McCardle, J. (2019). "Performance Based Abstraction of Biomimicry Design Principles using Prototyping". *Designs*.

Rovalo, E. ; McCardle, J. ; Smith, E. and Hooker, G. (2020). "Growing the practice of biomimicry: opportunities for mission-based organisations based on a global survey of practitioners". *Technology Analysis and Strategic Management*.

Rowe, P.G. (1987). *Design thinking*. MIT Press.

Rowland, R. (2016). "Biomimicry step-by-step". *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*.

Rowley, J. ; Baregheh, A. and Sambrook, S. (2011). "Towards an innovation-type mapping tool". *Management Decision* 49(1): p.73–86.

Rugaber, S. ; Bhati, S. ; Goswami, V. ; Spiliopoulou, E. ; Azad, S. ; Koushik, S. ; Kulkarni, R. ; Kumble, M. ; Sarathy, S. et al. (2016). "Knowledge extraction and annotation for cross-domain textual case-based reasoning in biologically inspired design". In *Lecture Notes in Computer Science*, 342–355.

S

Saaksvuori, A. and Immonen, A. (2008). *Product Lifecycle Management*.

Sangadji, S. and Schlangen, E. (2013). "Mimicking bone healing process to self repair concrete structure novel approach using porous network concrete". In *Procedia Engineering*,

Sartori, J. ; Pal, U. and Chakrabarti, A. (2010). "A methodology for supporting ‘transfer’ in biomimetic design". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 24(4): p.483–505.

SCAR. (2017). "Biodiversity Database". Available at: <https://www.scar.org/data-products/bio-database/> [Accessed February 29, 2020].

Schmitt, O.H. (1969). "Some interesting and useful biomimetic transform". In *Third International Biophysics Congress*, 297. Boston

Schöfer, M. (2015). *Processes and methods for interdisciplinary problem solving and technology integration in knowledge-intensive domain.*, Thèse de doctorat. ENSAM - Paris.

Schöfer, M. ; Maranzana, N. ; Aoussat, A. ; Bersano, G. and Buisine, S. (2018). "Distinct and combined effects of disciplinary composition and methodological support on problem solving in groups". *Creativity and Innovation Management* 27(1): p.102–115.

Schramm, W. (1954). "The Nature of Communication between Humans". *The Process and Effects of Mass-Communications*.

Schumpeter, J.A. (1939). *Business Cycles: A Theoretical, Historical, and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. McGraw-Hil.

Seim, R. ; Broberg, O. and Andersen, V. (2014). "Ergonomics in Design Processes: The Journey from Ergonomist toward workspace designer". *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 24(6): p.656–670.

Shai, O. and Reich, Y. (2004). "Infused design. I. Theory". *Research in Engineering Design* 15(2): p.93–107.

Shannon, C.E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication". *Bell System Technical Journal* 27(3): p.379–423.

Sharma, S. and Sarkar, P. (2019). "Biomimicry: Exploring Research, Challenges, Gaps, and Tools". In 87–97.

Annexes

Springer, Singapore

- Shu, L.H. (2010). "A natural-language approach to biomimetic design". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 24(4): p.507–519.
- Shu, L.H. (2011). "Generalizing the biomimetic design process". *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA)*.
- Shuman, L.J. ; Besterfield-Sacre, M. and McGourty, J. (2005). "The ABET 'professional skills' - Can they be taught? Can they be assessed?". In *Journal of Engineering Education*,
- Siddharth, L. and Chakrabarti, A. (2018a). "Evaluating the impact of Idea-Inspire 4.0 on analogical transfer of concepts". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 32(4): p.431–448.
- Siddharth, L. ; Chakrabarti, A. and Venkataraman, S. (2018b). "Representing Complex Analogues Using a Function Model to Support Conceptual Design".
- Siegel, D.S. ; Waldman, D.A. ; Atwater, L.E. and Link, A.N. (2004). "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 - JET-M* 21(1–2): p.115–142.
- Simon, H.A. (1969). *The sciences of the artificial* 1st editio. Cambridge, MA: MIT Press.
- Simon, H.A. (1973). "The structure of ill structured problems". *Artificial Intelligence* 4(3–4): p.181–201.
- Simon, E. ; Dickey, J. ; Hogan, K. and Reece, J. (2015). "Campbell Essential Biology". : p.544.
- Smithers, T. (1998). "Towards a Knowledge Level Theory of Design Process". *Artificial Intelligence in Design* 98: p.3–21.
- Snell-Rood, E. (2016). "Interdisciplinarity: Bring biologists into biomimetics". *Nature* 529(7586): p.277–278.
- Sohlenius, G. (1992). "Concurrent Engineering". *CIRP Annals* 41(2): p.645–655.
- Speck, T. and Harder, D. (2006). "BIOKON centers in brief–Freiburg". *BIOKON Bionik-Kompetenz-Netz- Creative transfer of biological principles into engineering*: p.4–6.
- Speck, T. and Speck, O. (2008). "Process sequences in biomimetic research". *WIT Transactions on Ecology and the Environment*.
- Speck, O. ; Speck, D. ; Horn, R. ; Gantner, J. and Sedlbauer, K.P. (2017). "Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments". *Bioinspiration and Biomimetics* 12(1).
- Stevens, L. ; De Vries, M.M.J. ; Bos, M.M.J.W. and Kopnina, H. (2019). "Biomimicry Design Education Essentials". *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*.
- Steward, D. V. (1981). "Design Structure System: a Method for Managing the Design of Complex Systems.". *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-28(3): p.71–74.
- Stroble, J.K. ; Stone, R.B. ; McAdams, D.A. and Watkins, S.E. (2009). "An Engineering-to-Biology Thesaurus to Promote Better Collaboration , Creativity and Discovery". In *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference – Competitive Design*,
- Suh, N.P. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press.
- Suh, N.P. (1998). "Axiomatic Design Theory for Systems". *Research in Engineering Design* 10(4): p.189–209.

Annexes

Svendsen, N. and Lenau, T.A. (2019). "How Does Biologically Inspired Design Cope with Multi-Functionality?". *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*.

T

Takai, S. and Esterman, M. (2017). "Towards a better design team formation - A review of team effectiveness models and possible measurements of design-team inputs, processes, and outputs". In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, ASME

Takeda, H. ; Tsumaya, A. and Tomiyama, T. (1999). "Synthesis thought Processes in Design". *Computer* 16(1): p.249–258.

Tansley, A.G. (1935). "The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms". *Ecology* 16(3): p.284–307.

Taylor, F. (1911). *The principles of scientific management*,. New York ;London: Harper & Brothers.

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (1998). "Biogeography". *Encyclopaedia Britannica*.

Thompson, M.K. ; Moroni, G. ; Vaneker, T. ; Fadel, G. ; Campbell, R.I. ; Gibson, I. ; Bernard, A. ; Schulz, J. ; Graf, P. et al. (2016). "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints". *CIRP Annals* 65(2): p.737–760.

Tomiyama, T. and Riitahuhta, A. (1997). "A Note on Research Directions of Design Studies". In *International Conference of Engineering Design (ICED 97)*,

Tomiyama, T. ; Gu, P. ; Jin, Y. ; Lutters, D. ; Kind, C. and Kimura, F. (2009). "Design methodologies: Industrial and educational applications". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.

Töre Yargın, G. ; Moroşanu Firth, R. and Crilly, N. (2018). "User requirements for analogical design support tools: Learning from practitioners of bio-inspired design". *Design Studies*.

Treviranus, G.R. (1802). *Biologie, oder Philosophie der lebenden Natur für Naturforscher und Ärzte* 1. Auflage. Göttingen: Röwer.

U

Université de Genève. (2015). "Arbre de la vie". Available at: https://www.bioutils.ch/ckeditor_assets/pictures/252/original_arbre_de_la_vie_fr.jpg [Accessed March 15, 2020].

Urban Canopee. "Website - Urban Canopee". Available at: <https://www.urbancanopee.com/> [Accessed May 13, 2020].

V

Vakili, V. and Shu, L.H. (2001). "Towards biomimetic concept generation". In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*,

Vandevenne, D. ; Verhaegen, P.A. and Duflou, J.R. (2014). "Mention and focus organism detection and their applications for scalable systematic bio-ideation tools". *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 136(11): p.111104.

Vandevenne, D. ; Verhaegen, P.-A. ; Dewulf, S. and Duflou, J.R. (2016). "SEABIRD: Scalable search for systematic biologically inspired design". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM* 30(1): p.78–95.

Varela, F. (1989). *Autonomie et connaissance. Essai sur le vivant*. Editions du Seuil.

Annexes

- Vattam, S.S. ; Helms, M.E. and Goel, A.K. (2007). *Biologically-Inspired Innovation in Engineering Design: A Cognitive Study*. Georgia Institute of Technology.
- Vattam, S.S. ; Helms, M.E. and Goel, A.K. (2008). "Compound Analogical Design: Interaction between Problem Decomposition and Analogical Transfer in Biologically Inspired Design". *Design Computing and Cognition '08*: p.377–396.
- Vattam, S.S. ; Helms, M.E. and Goel, A.K. (2010a). "A content account of creative analogies in biologically inspired design". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*.
- Vattam, S.S. ; Wiltgen, B. ; Helms, M.E. ; Goel, A.K. and Yen, J. (2010b). *Design Creativity 2010*. London: Springer London.
- Vattam, S.S. ; Wiltgen, B. ; Helms, M.E. ; Goel, A.K. and Yen, J. (2011). "DANE: Fostering Creativity in and through Biologically Inspired Design". In *Design Creativity 2010*, 115–122. London: Springer London
- Vattam, S.S. and Goel, A.K. (2013). "Seeking bioinspiration online: A descriptive account". In *International Conference on Engineering Design, ICED*, 347–356. Seoul
- Vidali, M. (2001). "Bioremediation. An overview". In *Pure and Applied Chemistry*,
- Vincent, J.F.V. and Mann, D.L. (2002). "Systematic technology transfer from biology to engineering". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 360(1791): p.159–173.
- Vincent, J.F.V. (2005). "Deconstructing the design of a biological material". *Journal of Theoretical Biology*.
- Vincent, J.F.V. ; Bogatyreva, O.A. ; Bogatyrev, N.R. ; Bowyer, A. and Pahl, A.K. (2006). "Biomimetics: Its practice and theory". *Journal of the Royal Society Interface* 3(9): p.471–482.
- Vincent, J.F.V. (2017). "The trade-off: a central concept for biomimetics". *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 6(2): p.67–76.
- Vincent, J.F.V. and Cavallucci, D. (2018). "Development of an ontology of biomimetics based on altshuller's matrix". In *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 14–25. Springer, Cham
- Da Vinci, L. (1945). *The Notebooks of Leonardo da Vinci*.

W

- Wade, C. (2019). "Bioinspired MOFs for Trace CO₂ Capture | NASA". Available at: <https://www.nasa.gov/ames/ocs/seminars/casey-wade> [Accessed March 12, 2020].
- Wainwright, S.A. (1988). "Form and function in organisms". *Integrative and Comparative Biology* 28(2): p.671–680.
- Waldeyer, W. (1888). "Ueber Karyokinese und ihre Beziehungen zu den Befruchtungsvorgängen". *Archiv für Mikroskopische Anatomie* 32(1): p.1–122.
- Wanieck, K. ; Fayemi, P.-E. ; Maranzana, N. ; Zollfrank, C. and Jacobs, S.R. (2017). "Biomimetics and its tools". *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 6(2): p.53–66.
- Wanieck, K. ; Ritzinger, D. ; Zollfrank, C. and Jacobs, S. (2020). "Biomimetics: Teaching the tools of the trade". *FEBS Open Bio*: p.2211-5463.12963.
- Waterman, T.H. (1968). "Systems Theory and Biology—View of a Biologist". In *Systems Theory and Biology*, 1–37. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Watson, J.D. and Crick, F.H. (1953). "Molecular structure of nucleic acids". *Nature* (171): p.737–738.

Annexes

- Weidner, B. V. ; Nagel, J.K.S. and Weber, H.J. (2018). "Facilitation method for the translation of biological systems to technical design solutions". *International Journal of Design Creativity and Innovation* 6(3-4): p.211-234.
- Whittlesey, R.W. ; Liska, S. and Dabiri, J.O. (2010). "Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design". *Bioinspiration and Biomimetics*.
- Wilson, J.R. (2000). "Fundamentals of ergonomics in theory and practice". *Applied Ergonomics* 31(6): p.557-567.
- Wong, M.C. and Dowd, M. (2015). "Patterns in Taxonomic and Functional Diversity of Macrobenthic Invertebrates Across Seagrass Habitats: a Case Study in Atlantic Canada". *Estuaries and Coasts* 38(6): p.2323-2336.
- Wynn, D. and Clarkson, J. (2005). "Chapter 1 Models of designing". In *Design Process Improvement - A Review of Current Practice.*, 34-59.

Y

- Yen, J. (Georgia I. of T. ; Weissburg, M.J. ; Helms, M. and Goel, A.K. (2011). "Biologically Inspired Design: A Tool for Interdisciplinary Education". In *Biomimetics: Nature-Based Innovation*,
- Yen, J. ; Helms, M.E. ; Goel, A.K. ; Tovey, C. and Weissburg, M. (2014). "Adaptive Evolution of Teaching Practices in Biologically Inspired Design". In *Biologically Inspired Design*, 153-199. London: Springer London
- Yoshikawa, H. (1981). "General Design Theory and a Cad System.". *Man-Machine communication in CAD/CAM*: p.35-58.
- Yuka. "Yuka - L'application mobile qui scanne votre alimentation". Available at: <https://yuka.io/> [Accessed March 4, 2020].

Z

- Zhang, G. (2012). "Biomimicry in biomedical research". *Organogenesis* 8(4): p.101-102.

Table des annexes

Annexe 1. Questionnaire 1 : perception du grand public.....	298
Annexe 2. Questionnaire 2 : perception des experts.....	302
Annexe 3. Comparaison de la proportion d'identification par fonction	306
Annexe 4. Comparaison du nombre moyen de problématiques techniques par fonction	307
Annexe 5. Comparaison du nombre moyen de requêtes par fonction	308
Annexe 6. AMDEC entière avec notation des experts	309
Annexe 7. Questionnaire d'évaluation comparative des processus (expérience 2).....	314
Annexe 8. Processus TPIB détaillé.....	317
Annexe 9. Exemple de fichier exporté depuis LINKAGE sur le modèle de la feuille de Lotus.....	319
Annexe 10. Fiche métier proposée pour le biomiméticien (type fiches ROME)	338

Annexes

Annexe 1. Questionnaire 1 : perception du grand public

Question 1. Age ?

- a) – de 25 ans
- b) 25 à 50 ans
- c) + de 50 ans

Question 2. Sexe ?

- a) Homme
- b) Femme

Question 3. Profil ?

- a) Étudiant
- b) Professionnel

Question 4. Diplôme ?

- a) Autodidacte
- b) Baccalauréat
- c) Licence
- d) Master
- e) PhD
- f) HDR

Question 5. Emploi actuel ?

- a) Chercheur
- b) Entrepreneur
- c) Enseignant chercheur
- d) Consultant
- e) Ingénieur d'étude
- f) Ingénieur R&D
- g) Ingénieur industriel
- h) Designer
- i) Autre

Question 6. Niveau d'étude ?

- a) Niveau Master 2 (= 3ème année d'école d'ingénieur)
- b) Niveau Master 1 (= 2ème année d'école d'ingénieur)
- c) Doctorant
- d) Niveau licence 3 (= 1ère année d'école d'ingénieur)
- e) Post-Doc
- f) Baccalauréat

Question 7. Domaine d'expertise ?

- a) Ingénierie (conception, mécanique, etc.)
- b) Ingénierie biologique (agronomie, biologie industrielle, etc.)
- c) Biologie (génétique, cellulaire, etc.)

En raison du cadre linguistique complexe entourant la bio-inspiration, nous précisons ici la définition de la biomimétique, sujet de cette enquête, telle qu'établie dans la norme l'ISO/TC266, 2015. « Biomimétique : coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines de l'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques à travers l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, leur abstraction en modèles et le transfert et l'application de ces modèles à la solution » (ISO/TC266, 2015)

Question 8. Connaissance en biomimétique ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 9. Quels intérêts ont les entreprises à faire de la biomimétique ?

- a) Pour stimuler l'innovation
- b) Pour résoudre des problèmes de conception complexes
- c) Pour construire une stratégie de marketing basée sur la biomimétique
- d) Pour des raisons environnementales
- e) Pour reconnecter les principes de la nature avec nos stratégies d'innovation
- f) Pour favoriser une innovation de rupture
- h) Autre

Question 10. Quels domaines d'application pour la biomimétique ?

- a) Résolution de problème complexe
- b) Créativité
- c) Eco-Innovation
- d) Organisation des systèmes
- e) Design (Art du Design)

Question 11. En conception biomimétique, le biologiste représente un inconvénient (0) ou un avantage (5) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

// Si le répondant est ingénieur :

Question 12. L'intégration d'un(e) biologiste me semble facile (0) ou difficile (5) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 13 Pourquoi intégrer un(e) biologiste ?

- a) Pour qu'il/elle explique le fonctionnement d'un système biologique précédemment identifié
- b) Pour qu'il/elle propose des systèmes biologiques répondant aux problèmes identifiés
- c) Pour qu'il/elle participe aux séances de créativité
- d) Pour qu'il/elle participe à l'abstraction des systèmes biologiques
- e) Pour qu'il/elle traduise le vocabulaire biologique

f) Autre

Question 14. Quel format d'intégration pour un(e) biologiste ?

- a) Poste au sein de l'équipe R&D
- b) Consultant spécialisé
- c) Expert scientifique externe

Question 15. A quelle(s) étape(s) du processus de conception biomimétique un(e) biologiste devrait-il/elle être intégré(e) ? (QCM)

- a) Transfert à la biologie (Comment le problème peut-il être transféré et étudié avec un point de vue biologique ?)
- b) Identification d'organismes biologiques potentiels (Quels organismes font face aux mêmes contraintes ?)
- c) Tri et sélection de stratégies biologiques appropriées (Quelles sont les stratégies pertinentes et réalistes à considérer ?)
- d) Abstraction des stratégies biologiques (Quel modèle peut être conçu pour représenter la stratégie biologique ?)
- e) Transposition en solutions techniques (Comment convertir les stratégies biologiques identifiées en solutions techniques ?)
- f) Abstraction des problèmes techniques (Quelles sont les contraintes techniques qui conduisent au problème ?)
- g) Analyse des problèmes (quel est le problème ?)
- h) Mise en œuvre et tests

Question 16. Le/la biologiste doit être généraliste (0) ou spécialisé (5) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 17. Le/la biologiste doit maîtriser les outils et concepts de conception (Bête à corne, Diagramme pieuvre, AMDEC, PLM, etc.) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 18. Le/la biologiste doit savoir vulgariser la biologie ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 19. Outre son savoir, le/la biologiste doit avoir un savoir-faire en biologie (techniques de laboratoire, de recherche, etc.) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 20. Le/la biologiste doit avoir connaissance des processus de conception de produit et innovation (analyse fonctionnelle, analyse de risque, créativité, etc.) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

// Si le répondant est biologiste :

Question 12 bis. Intégrer une équipe d'ingénieurs R&D me semble facile (0) ou difficile (5) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 13 bis. Selon vous, pourquoi les ingénieurs souhaiteraient-ils intégrer des biologistes dans les équipes R&D en biomimétique ?

- a) Pour qu'il/elle explique le fonctionnement d'un système biologique précédemment identifié
- b) Pour qu'il/elle propose des systèmes biologiques répondant aux problèmes identifiés
- c) Pour qu'il/elle participe aux séances de créativité
- d) Pour qu'il/elle participe à l'abstraction des systèmes biologiques
- e) Pour qu'il/elle traduise le vocabulaire biologique
- f) Autre

Question 14 bis. Quel serait pour vous le format d'intégration le plus adapté ?

- a) Poste au sein de l'équipe R&D
- b) Consultant spécialisé
- c) Expert scientifique externe

Question 15 bis. À quelle(s) étape(s) du processus de conception biomimétique vous sentiriez vous intégré(e) de manière pertinente ? (QCM)

- a) Transfert à la biologie (Comment le problème peut-il être transféré et étudié avec un point de vue biologique ?)
- b) Identification d'organismes biologiques potentiels (Quels organismes font face aux mêmes contraintes ?)
- c) Tri et sélection de stratégies biologiques appropriées (Quelles sont les stratégies pertinentes et réalistes à considérer ?)
- d) Abstraction des stratégies biologiques (Quel modèle peut être conçu pour représenter la stratégie biologique ?)
- e) Transposition en solutions techniques (Comment convertir les stratégies biologiques identifiées en solutions techniques ?)
- f) Abstraction des problèmes techniques (Quelles sont les contraintes techniques qui conduisent au problème ?)
- g) Analyse des problèmes (quel est le problème ?)
- h) Mise en œuvre et tests

Question 16 bis. Afin de mener à bien les missions précédemment identifiées, mes besoins d'accompagnement méthodologiques (que faire ? quand ?) sont nuls (0) ou très forts (5) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 17 bis. Afin de mener à bien les missions précédemment identifiées, les outils que je connais du fait de ma formation seront insuffisants (0) ou suffisants (5) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 18 bis. L'ingénieur doit savoir vulgariser l'ingénierie ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Question 19 bis. Afin de mener à bien les missions précédemment identifiées, mon interlocuteur doit connaître la biologie (vocabulaire, concepts, etc.) ? (Échelle de Likert à 6 niveaux)

Annexe 2. Questionnaire 2 : perception des experts

Question 1. Diplôme ?

- a) Autodidacte
- b) Baccalauréat
- c) Licence
- d) Master
- e) PhD
- f) HDR

Question 2. Profil ?

- a) Chercheur
- b) Entrepreneur
- c) Industriel
- d) Consultant
- e) Ingénieur
- f) Architecte
- g) Concepteur
- h) Autre

Question 3. Champ(s) d'expertise ?

- a) Ingénierie (conception de produits, mécanique, etc.)
- b) Conception technique (méthodes de conception, outils et théories)
- c) Ingénierie biologique (agronomie, biotechnologie, biologie industrielle, etc.)
- d) Biologie (génétique, biologie cellulaire, etc.)
- e) Conception (artistique et technique vers la conception de produits)

En raison du cadre linguistique complexe entourant la bio-inspiration, nous précisons ici la définition de la biomimétique, sujet de cette enquête, telle qu'établie dans la norme l'ISO/TC266, 2015. « Biomimétique : coopération interdisciplinaire de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines de l'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques à travers l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, leur abstraction en modèles et le transfert et l'application de ces modèles à la solution » (ISO/TC266, 2015)

Question 4. Les innovations biomimétiques (et non en biomimétisme) sont-elles respectueuses de l'environnement ?

- a) Presque jamais
- b) Parfois
- c) La plupart du temps
- d) Toujours
- e) Autre

Question 5. Elles sont respectueuses de l'environnement en raison de :

- a) La sensibilité des concepteurs travaillant en biomimétique

- b) L'adéquation intrinsèque avec l'environnement dans les solutions provenant de la nature
- c) La méthode de conception choisie et les outils associés
- d) Autre

//Si la réponse à la question 4 n'est pas « Toujours » sinon, la question n'est pas affichée//

Question 5.bis. Pourquoi sont-elles parfois non respectueuses de l'environnement ?
(Question ouverte)

Question 6. D'après votre expérience, quelles sont les principales raisons pour lesquelles les entreprises font de la biomimétique (3 réponses max) ?

- a) Pour stimuler l'innovation
- b) Pour résoudre des problèmes de conception complexes
- c) Construire une stratégie de marketing basée sur la biomimétique
- d) Pour des raisons environnementales
- e) Reconnecter les stratégies de notre innovation avec les règles de la nature
- f) Autre

Question 7. L'approche biomimétique convient :

- a) Pour la plupart des projets de conception
- b) Pour certains projets de conception
- c) Pour quelques projets de conception

Question 8. Pourquoi la biomimétique n'est-elle pas adaptée à tous les projets de conception :

- a) Parce que la méthode n'est pas encore assez mûre
- b) Parce que c'est une méthode complexe qui coûte trop de ressources
- c) Parce que le temps de R&D est parfois trop long
- d) Parce que certains domaines d'innovation n'ont pas d'analogies dans la nature
- e) Parce que certains domaines et/ou organismes ont d'abord besoin de plus de recherche en biologie
- f) Autre

Question 9. Les biologistes sont-elles/ils nécessaires pour rendre la biomimétique utilisable en pratique ?

- a) Oui
- b) Non
- c) Cela dépend du projet

// Si la réponse n'est pas oui, sinon, les questions 9 bis et 9 ter ne sont pas affichées//

Question 9 bis. Pourquoi pensez-vous que les biologistes ne sont pas nécessaires pour l'innovation biomimétique ? (Question ouverte)

Question 9 ter. Quels types de projets n'ont pas besoin de l'expertise des biologistes ?
(Question ouverte)

Question 10. Pourquoi intégrer un(e) biologiste dans les équipes de conception biomimétique (3 réponses max) ?

- a) Pour qu'elle/il traduise des concepts biologiques
- b) Pour qu'elle/il identifie les organismes biologiques appropriés pour résoudre les problèmes de conception étudiés
- c) Pour qu'elle/il explique le mécanisme biologique sous-jacent d'une solution biologique
- d) Pour qu'elle/il aide à l'exécution de l'abstraction des stratégies biologiques
- e) Pour qu'elle/il se joigne à des séances de créativité

Question 11. Quand les biologistes doivent-ils être intégrés pendant le processus biomimétique ?

- a) À des étapes spécifiques
- b) À chaque étape
- a) Autre

Question 12. À quelle étape(s) du processus de conception biomimétique les biologistes devraient-ils être intégrés ?

- a) Transfert à la biologie (Comment le problème peut-il être transféré et étudié avec un point de vue biologique ?)
- b) Identification d'organismes biologiques potentiels (Quels organismes font face aux mêmes contraintes ?)
- c) Tri et sélection de stratégies biologiques appropriées (Quelles sont les stratégies pertinentes et réalistes à considérer ?)
- d) Abstraction des stratégies biologiques (Quel modèle peut être conçu pour représenter la stratégie biologique ?)
- e) Transposition en solutions techniques (Comment convertir les stratégies biologiques identifiées en solutions techniques ?)
- f) Abstraction des problèmes techniques (Quelles sont les contraintes techniques qui conduisent au problème ?)
- g) Analyse des problèmes (quel est le problème ?)
- h) Mise en œuvre et tests

Question 13. Quel serait le moyen idéal d'intégrer un biologiste ?

- a) En tant que membre des équipes de recherche et développement
- b) En tant qu'expert scientifique externe
- c) En tant que consultant spécialisé
- d) Autre

Question 14. En plus de leurs connaissances théoriques, l'expertise pratique des biologistes en biologie (techniques de laboratoire, culture cellulaire, etc.) est (Échelle de Likert à 5 niveaux)

Question 15. Les biologistes sensibilisent les concepts théoriques des processus de conception des produits et méthodes (analyse fonctionnelle, analyse des risques, créativité, etc.) (Échelle de Likert à 5 niveaux)

Question 16. Les biologistes doivent être formés pour utiliser des outils et des concepts de conception de produits (Bête à cornes, Diagramme poulpe, FMECA, PLM, etc.) (Échelle de Likert à 5 niveaux)

Question 17. Les ingénieurs sensibilisent les concepts et les théories biologiques (cellule, noyau, mitose, sélection naturelle, etc.) (Échelle de Likert à 5 niveaux)

Question 18. De quel type de savoir les biologistes ont-ils besoin ?

- a. Un savoir très large mais pas très profond sur une grande quantité d'organismes (connaissances horizontales)
- b. Un savoir approfondi et précis sur quelques organismes (connaissances verticales)
- c. Les deux profils sont requis
- d. Autre

Question 19. Pourquoi les biologistes ne sont-ils pas plus intégrés (en comparaison avec les ingénieurs) dans les stratégies d'innovation en biomimétiques ?

- a. La plupart d'entre eux ne sont pas au courant de telles approches
- b. Manque de formation académique et professionnelle pour les biologistes en biomimétique
- c. Il n'y a presque pas de position pour les biologistes dans les équipes de conception biomimétique
- d. Besoin d'un nouveau type de biologistes
- e. Les biologistes ne sont pas intégrés dans le cadre des méthodes actuelles
- f. Ils ne semblent pas être intéressés
- g. Autre

Question 20. Selon vous, pourquoi la biomimétique est-elle encore une stratégie d'innovation très fragile et peu répandue dans les industries modernes ?

- a. Manque de communication entre les différents domaines scientifiques
- b. Manque d'investissements
- c. Manque d'intégration des profils ayant une formation en sciences naturelles
- d. Manque de formation académique
- e. Manque d'outils
- f. Manque de processus
- g. Autre

Annexe 3. Comparaison de la proportion d'identification par fonction

<i>Fonctions</i>	<i>Contraintes</i>	<i>% Biologistes (nb)</i>	<i>% Ingénieurs (nb)</i>	<i>P-value Chi²</i>
<i>F1</i>	<i>Isolation thermique</i>	100 % (21)	95 % (20)	1
<i>F2</i>	<i>Isolation de l'eau</i>	95 % (20)	86 % (18)	0,59
<i>F3</i>	<i>Isolation lumineuse</i>	19 % (4)	5 % (1)	0,34
<i>F4</i>	<i>Résistance matérielle</i>	52 % (12)	43 % (9)	0,75
<i>F5</i>	<i>Gestion de l'air</i>	33 % (7)	19 % (4)	0,48
<i>F6</i>	<i>Isolation biotique</i>	28 % (6)	14 % (3)	0,45
<i>F7</i>	<i>Isolation du bruit</i>	38 % (8)	9 % (2)	0,07
<i>F8</i>	<i>Isolation incendie</i>	14 % (3)	0 % (0)	0,23
<i>F9</i>	<i>Faible consommation d'énergie</i>	62 % (13)	62 % (13)	1
<i>F10</i>	<i>Travail non qualifié</i>	19 % (4)	19 % (4)	1
<i>F11</i>	<i>Isolation électrique</i>	5 % (1)	5 % (1)	1
<i>F12</i>	<i>L'esthétique de l'isolation</i>	9 % (2)	14 % (3)	1
<i>F13</i>	<i>Impact environnemental</i>	14 % (3)	9 % (2)	1
<i>F14</i>	<i>Structure du conteneur</i>	38 % (8)	38 % (8)	1
<i>F15</i>	<i>Matériaux de conteneur</i>	9 % (2)	0 % (0)	0,46
<i>F16</i>	<i>Disposition du village</i>	5 % (1)	0 % (0)	1
<i>F17</i>	<i>Coût</i>	33 % (7)	24 % (5)	0,73

Annexe 4. Comparaison du nombre moyen de problématiques techniques par fonction

<i>Fonctions</i>	<i>Contraintes</i>	<i>Biologistes (moyenne)</i>	<i>Ingénieurs (moyenne)</i>	<i>P-value Chi²</i>
<i>F1</i>	<i>Isolation thermique</i>	1,714	1,666	0,846
<i>F2</i>	<i>Isolation de l'eau</i>	1,809	1,380	0,105
<i>F3</i>	<i>Isolation lumineuse</i>	0,190	0	0,103
<i>F4</i>	<i>Résistance matérielle</i>	1,142	0,523	0,076
<i>F5</i>	<i>Gestion de l'air</i>	0,523	0,285	0,320
<i>F6</i>	<i>Isolation biotique</i>	0,285	0,095	0,123
<i>F7</i>	<i>Isolation du bruit</i>	0,714	0,095	0,008
<i>F8</i>	<i>Isolation incendie</i>	0,142	0	0,082
<i>F9</i>	<i>Faible consommation d'énergie</i>	0,619	0,523	0,579
<i>F10</i>	<i>Travail non qualifié</i>	0,285	0,380	0,619
<i>F11</i>	<i>Isolation électrique</i>	0,095	0,047	0,658
<i>F12</i>	<i>L'esthétique de l'isolation</i>	0,047	0,047	1
<i>F13</i>	<i>Impact environnemental</i>	0,095	0,190	0,467
<i>F14</i>	<i>Structure du conteneur</i>	0,285	0,095	0,123
<i>F15</i>	<i>Matériaux de conteneur</i>	0,095	0,095	1
<i>F16</i>	<i>Disposition du village</i>	0	0	0
<i>F17</i>	<i>Coût</i>	0,190	0,238	0,715

Annexe 5. Comparaison du nombre moyen de requêtes par fonction

<i>Fonctions</i>	<i>Contraintes</i>	<i>Biologistes (moyenne)</i>	<i>Ingénieurs (moyenne)</i>	<i>P-value Chi²</i>
<i>F1</i>	<i>Isolation thermique</i>	3,476	3,476	1
<i>F2</i>	<i>Isolation de l'eau</i>	3,380	2,238	0,153
<i>F3</i>	<i>Isolation lumineuse</i>	0,190	0	0,162
<i>F4</i>	<i>Résistance matérielle</i>	1,285	0,761	0,264
<i>F5</i>	<i>Gestion de l'air</i>	0,523	0,380	0,698
<i>F6</i>	<i>Isolation biotique</i>	0,428	0,095	0,089
<i>F7</i>	<i>Isolation du bruit</i>	0,428	0,095	0,182
<i>F8</i>	<i>Isolation incendie</i>	0,190	0	0,103
<i>F9</i>	<i>Faible consommation d'énergie</i>	0,809	0,857	0,920
<i>F10</i>	<i>Travail non qualifié</i>	0,095	0,047	0,560
<i>F11</i>	<i>Isolation électrique</i>	0,047	0	0,329
<i>F12</i>	<i>L'esthétique de l'isolation</i>	0	0	0
<i>F13</i>	<i>Impact environnemental</i>	0,047	0,047	1
<i>F14</i>	<i>Structure du conteneur</i>	0,285	0,285	1
<i>F15</i>	<i>Matériaux de conteneur</i>	0,047	0	0,329
<i>F16</i>	<i>Disposition du village</i>	0	0	0
<i>F17</i>	<i>Coût</i>	0,047	0	0,329

Annexe 6. AMDEC entière avec notation des experts

ID	Étape	Mode d'échec	Les causes potentielles (par rapport à l'entrée de l'étape, les étapes précédentes mal exécutées ne sont pas étudiées comme une nouvelle cause)	Sévérité (médiane)	Déteçtabilité (médiane)	Occurrence (médiane)	Criticité (Experts)	Sélection ID.2
1.1	1	Projet inapproprié	Le projet manque de ressources pour une approche biomimétique (humain, financier, temps, etc.).	3	2	3	18.00	
1.2			Le secteur/sujet n'est pas pertinent parce que trop limité par la technologie existante, les normes, etc.	3	2	1	6.00	
1.3			Le sujet n'est pas pertinent parce que les champs biologiques associés ne sont pas assez étudiés.	3	2	2	12.00	
1.4		Problème mal défini	L'absence d'interactions des parties prenantes empêche que le problème soit vraiment compris	3	2	2	12.00	
1.5			Le manque de formation/expertise des équipes de conception peut conduire à la fixation, à l'incertitude sur le processus, au contexte mal défini, etc.	2	2	2	8.00	
1.6			Les équipes de conception peuvent faire des erreurs menant à l'identification d'un problème de conception erroné.	3	2	2	12.00	
1.7			Dans le cas d'un projet de consultation, le client pourrait ne pas savoir ce qu'il recherche pour les équipes de premier plan à manquer d'informations pertinentes et spécifiques.	2	2	2	8.00	
1.8			Dans le cas d'un projet de conseil, les points de fixation menant à un projet mal défini peuvent également être imposés par le client	3	2	2	12.00	
1.9			L'équipe de conception ne trouve pas nécessaire de remettre en question et d'analyser le problème	3	3	3	27.00	R1
1.10			L'équipe de conception n'a pas de point de vue systémique et ne tient pas compte de l'ensemble du contexte	3	3	3	27.00	R2
2.1	2	Incapacité d'extraire le TP l'étape est considérée comme ignorée par l'équipe	Le concept sémantique est inconnu de l'équipe de conception	3	1	3	9.00	
2.2			L'équipe de conception connaît le concept sémantique mais ne sait pas comment réaliser l'abstraction du problème technique	3	1	3	9.00	
2.3			L'équipe de conception connaît le concept sémantique et comment effectuer l'étape, mais ne parviennent pas à le faire (sentiment d'être coincé)	3	1	3	9.00	
2.4		Abstraction non pertinente	L'équipe de conception fait des erreurs pendant la phase d'abstraction	3	3	3	27.00	R4
2.5			Incompréhension des données techniques, les mauvais éléments sont abstraits	3	2	2	12.00	
2.6			L'équipe de conception pense qu'elle a bien effectué l'étape, mais les membres ont une idée fautive de ce qu'est l'abstraction.	3	3	2	18.00	
2.7			L'équipe de conception n'a aucune idée de ce qu'est un niveau d'abstraction ou quel niveau rechercher ?	2	2	3	12.00	

3.1	3	L'étape est inconsciemment ignorée	Mélanger la 3ème et 4ème étape, recherchez directement des organismes.	2	2	3	12.00	
3.2		Incapacité de transposer à la biologie, l'étape est sciemment ignorée par l'équipe	Le concept sémantique est inconnu de l'équipe de conception.	3	1	3	9.00	Max Indiv : R5
3.3			L'équipe de conception connaît le concept sémantique, mais ne sait pas comment effectuer la transposition à la biologie.	3	2	3	18.00	
3.4			L'équipe de conception connaît le concept sémantique et comment effectuer l'étape, mais ne parviennent pas à le faire (sentiment d'être coincé).	3	1	2	6.00	
3.5			L'équipe de conception pense qu'elle a bien effectué l'étape, mais les membres ont une idée fautive de ce qu'est la transposition.	3	2	2	12.00	
3.6		L'équipe de conception fait des erreurs pendant l'étape de la transposition : Mauvais choix de mots clés.	3	3	2	18.00		
3.7		L'équipe de conception n'a pas de connaissances biologiques préalables et les mots clés choisis ne sont pas pertinents pour les modèles biologiques.	3	3	3	27.00	R6	
3.8		L'équipe de conception ne choisit qu'une seule forme sémantique pour chaque mot clé et/ou choisissent une forme peu pertinente.	3	3	3	27.00	R7	
4.1	4	Incapacité de trouver des modèles biologiques jugés pertinents (l'étape n'est pas terminée)	L'équipe de conception ne sait pas comment ni où chercher des modèles d'intérêt.	4	1	3	12.00	
4.2			L'équipe de conception n'est pas en mesure de comprendre les données biologiques et donc de reconnaître le modèle biologique pertinent quand ils le trouvent.	4	2	3	24.00	
4.3			L'équipe de conception ne recherche que des correspondances directes et évidentes avec leurs problèmes techniques, les modèles qui ne sont pas directement liés sont perçus comme non pertinents.	3	3	3	27.00	R8
4.4			Les données biologiques sur le problème technique étudié existent mais ne sont pas trouvées par l'équipe.	4	3	2	24.00	
4.5			Il y a un manque de données biologiques existantes sur le problème technique étudié.	4	1	2	8.00	
4.6		Les modèles identifiés semblent très redondants avec des exemples biomimétiques déjà existants ou avec des projets antérieurs réalisés par l'équipe de conception.	Il n'existe que peu de données biologiques existantes sur le problème technique étudié.	3	2	3	18.00	
4.7			L'équipe de conception travaille toujours sur le même type de sujet.	2	2	2	8.00	
4.8			L'équipe de conception a toujours utilisé le même outil de recherche, limité dans la taille.	3	1	2	6.00	
4.9			L'équipe de conception crée des points de fixation.	3	3	3	27.00	R9
4.10			Les données facilement disponibles semblent redondantes, quel que soit l'outil de recherche.	2	2	2	8.00	

4.11	Identification de modèles biologiques inappropriés	L'équipe de conception identifie un modèle biologique sans disposer de suffisamment d'informations (manque de temps pour étudier, données, expertise).	3	2	3	18.00	<i>Max indiv : R10</i>	
4.12		L'équipe de conception identifie un modèle biologique basé sur leurs erreurs/malentendus/interprétation erronée ou analogies.	3	3	2	18.00		
4.13		L'équipe de conception identifie un modèle biologique basé sur de fausses informations fournies par des sources non vérifiées.	3	3	2	18.00		
4.14		L'équipe de conception ne sait pas quel modèle biologique est le plus pertinent et donc choisir en fonction de critères arbitraires.	3	2	3	18.00		
4.15		L'équipe de conception a une idée préalable des modèles biologiques et fixe sur eux, même si d'autres modèles biologiques sont plus appropriés.	3	3	2	18.00		
4.16		L'équipe de conception manque de compétences en biologie pour comprendre les données biologiques.	4	1	4	16.00		
5.1	5	Incapacité de sélectionner des modèles d'intérêt (l'étape n'est pas terminée)	L'équipe de conception ne sait pas sur quels critères concentrer leur évaluation des modèles biologiques à sélectionner.	3	2	4	24.00	
5.2			L'équipe de conception n'est pas en mesure de comprendre les données biologiques et donc effectuer l'évaluation des modèles biologiques.	3	2	3	18.00	
5.3			Les données biologiques sur le problème technique étudié existent mais ne sont pas trouvées par l'équipe, une partie ou la totalité de l'évaluation ne semble pas possible.	4	3	2	24.00	
5.4			Il y a un manque de données biologiques existantes sur le problème technique étudié, une partie ou la totalité de l'évaluation ne semble pas possible.	4	2	3	24.00	
5.5			Il y a un manque de clarté sur les exigences du produit et/ou la combinaison fonctionnelle attendue (un exemple pour chaque TP ou multifonctionnalité ?)	3	2	2	12.00	
5.6		Sélection de modèles inappropriés pour un problème technique donné	L'équipe de conception identifie un modèle biologique sans disposer de suffisamment d'informations (manque de temps pour étudier, données, expertise).	3	2	3	18.00	
5.7			L'équipe de conception n'a aucune idée de la pertinence du résultat de leur phase de sélection.	3	2	3	18.00	
5.8			L'équipe de conception sélectionne des modèles biologiques en fonction de leurs erreurs/malentendus/interprétation erronée ou des analogies.	3	3	2	18.00	
5.9			L'équipe de conception sélectionne des modèles biologiques basés sur de fausses informations fournies par des sources non vérifiées.	3	3	1	9.00	
5.10			L'équipe de conception n'a pas la capacité d'évaluer le modèle biologique et donc de sélectionner en fonction de critères arbitraires.	3	3	2	18.00	

5.11			L'équipe de conception aime particulièrement certains modèles biologiques et fixe sur eux, même si d'autres modèles biologiques sont plus appropriés.	3	3	2	18.00	
5.12		Sélection de modèles techniquement pertinents mais inapproprié pour un projet biomimétique donné	Selon les secteurs du projet, et outre toutes considérations scientifiques, certains organismes biologiques pourraient ne pas être acceptés du point de vue de la communication et de la commercialisation.	3	1	2	6.00	
5.13	L'équipe de conception oublie d'examiner certains éléments du contexte (clients, utilisateurs, parties prenantes, marché, exigences de compatibilité, etc.) conduisant à la sélection de modèle inapproprié pour le projet.		3	3	2	18.00	Max indiv : R11	
5.14	L'équipe de conception sélectionne un modèle biologique potentiellement pertinent, mais qui coûterait trop cher dans la recherche biologique avant que les données ne soient disponibles et donc l'application biomimétique rendue possible.		3	3	2	18.00	Max indiv : R12	
6.1	6	Incapacité d'abstraction du modèle biologique de l'étape est considérée comme ignorée par l'équipe	Le concept sémantique de l'abstraction est inconnu de l'équipe de conception, conduit à un passage à la bio-utilisation, le biomorphisme, etc.	3	2	2	12.00	
6.2			L'équipe de conception connaît le concept sémantique mais ne sait pas comment réaliser l'abstraction du problème technique	4	2	3	24.00	
6.3			L'équipe de conception connaît le concept sémantique et comment effectuer l'étape, mais ne parviennent pas à le faire (sentiment d'être coincé)	4	1	2	8.00	
6.4		Abstraction mal exécutée	L'équipe de conception fait des erreurs pendant la phase d'abstraction	3	3	2	18.00	
6.5			Incompréhension des données biologiques, les mauvais éléments sont abstraits	4	3	2	24.00	Max indiv : R14
6.6			L'équipe de conception pense qu'elle a bien effectué l'étape, mais les membres ont une idée fautive de ce qu'est l'abstraction.	3	3	2	18.00	Max indiv : R15
6.7			L'équipe de conception n'a aucune idée de ce qu'est un niveau d'abstraction ou quel niveau rechercher ?	3	3	3	27.00	R16
7.1	7	Incapacité de le transposer à la technologie (l'étape n'est pas terminée)	Le concept sémantique de transposition est inconnu de l'équipe de conception.	3	2	2	12.00	Max indiv : R17
7.2			L'équipe de conception connaît le concept sémantique, mais ne sait pas comment effectuer la transposition à la technologie.	4	2	3	24.00	Max indiv : R18
7.3			L'équipe de conception connaît le concept sémantique et comment effectuer l'étape, mais ne parviennent pas à le faire (sentiment d'être coincé).	4	2	2	16.00	
7.4		Transposition mal exécutée	L'équipe de conception fait des erreurs pendant l'étape de la transposition : ils se concentrent sur les mauvais éléments.	3	3	2	18.00	
7.5			L'équipe de conception a du mal à générer des concepts à partir de stratégies biologiques très abstraites	3	2	3	18.00	

7.6			L'équipe de conception se concentre sur la transposition directe ou la bio-utilisation.	3	2	3	18.00	
7.7			L'équipe de conception pense qu'elle a bien effectué l'étape, mais les membres ont une idée fautive de ce qu'est la transposition.	3	3	2	18.00	
8.1	8	Incapacité d'effectuer la mise en œuvre	Lorsque le concept semblait pertinent, le transfert vers un prototype fonctionnel n'est pas possible.	4	2	2	16.00	
8.2			Le concept généré est basé sur des technologies qui n'ont pas encore été développées.	4	2	2	16.00	
8.3			Le concept généré est basé sur des technologies inconnues de l'équipe.	3	2	2	12.00	
8.4			Le concept généré est basé sur des technologies qui ne sont pas comprises par l'équipe.	3	2	2	12.00	
8.5		Capacité à mettre en œuvre le concept, mais les tests montrent un manque d'efficacité	L'équipe de conception fait des erreurs pendant l'étape de la mise en œuvre.	3	3	2	18.00	
8.6			Le prototype généré est basé sur l'incompréhension / erreur abstraction du modèle biologique, les résultats attendus ne sont pas observés.	4	3	2	24.00	<i>Max indiv : R19</i>
8.7			Le prototype généré est basé sur un assemblage de blocs technologiques qui ne conduit pas à une organisation équilibrée comme dans les modèles biologiques.	3	3	2	18.00	
8.8			Le prototype généré est basé sur une stratégie biologique transférée à une échelle différente et l'efficacité est maintenue.	3	2	3	18.00	
8.9			L'équipe de conception n'a pas pris en compte le contexte du projet	3	3	2	18.00	
8.10		Perte du modèle biologique lors de la mise en œuvre	Le prototype généré n'est pas basé sur le modèle biologique, les propriétés d'intérêt ne sont pas logiquement appliquées.	3	3	2	18.00	
8.11			L'équipe de conception, avec ou sans le savoir, se fixe sur les stratégies technologiques existantes et essayer d'adapter le concept à celui-ci, perdant l'intérêt d'une approche biomimétique.	3	3	2	18.00	<i>Max indiv : R20</i>
8.12		Difficulté à produire un prototype	Les outils nécessaires à la production du prototype sont très coûteux et rares.	3	1	3	9.00	
8.13			Les outils nécessaires à la production du prototype n'existent pas encore et doivent donc aussi être conçus	4	2	3	24.00	<i>Max indiv : R21</i>

Annexe 7. Questionnaire d'évaluation comparative des processus (expérience 2)

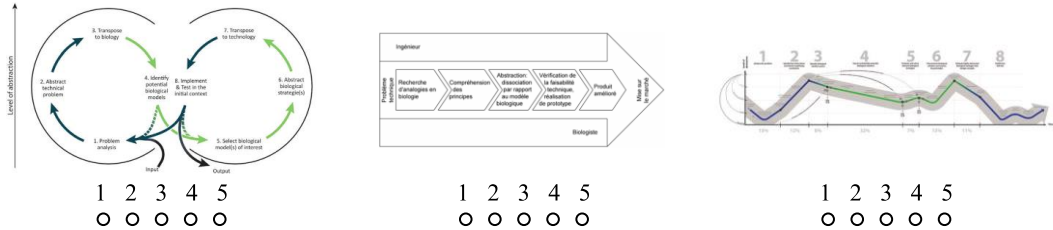
QUESTIONNAIRE

Ce questionnaire a pour but de récolter vos retours concernant la compréhension des différents processus biomimétiques proposés.

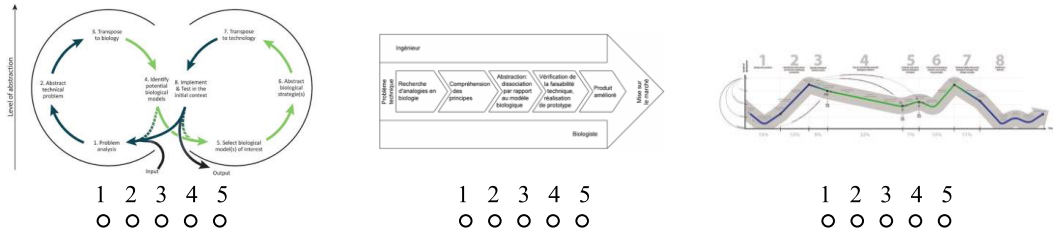
Avez-vous déjà effectué un projet biomimétique: Oui Non
 Avez-vous déjà suivi l'un des processus présentés: Oui Non
 Si oui lequel:

1 Perception générale, ergonomie et logique de construction

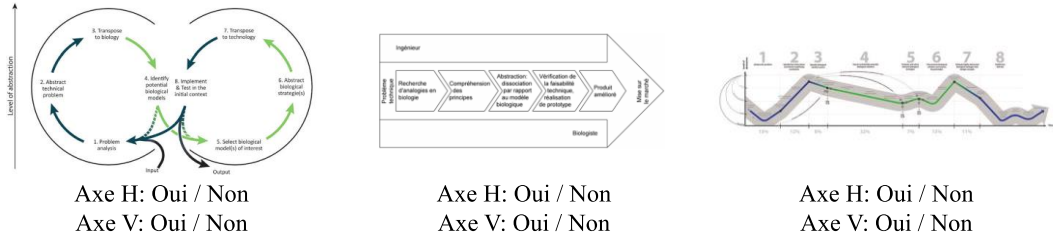
Je trouve le processus attractif (1(Peu attractif) -5 (très attractif))



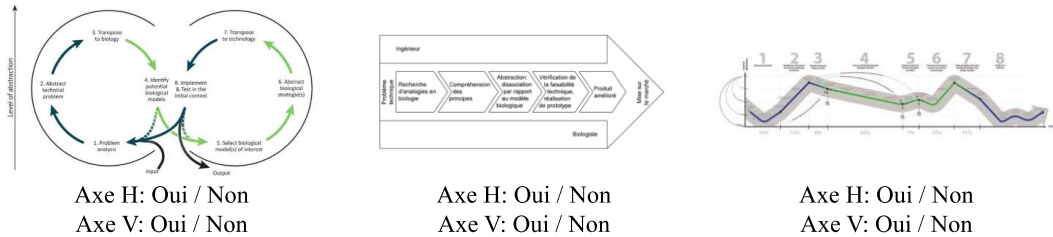
Je peux utiliser le processus tel quel dans un futur projet (1(Non, pas du tout) -5 (Oui, facilement))



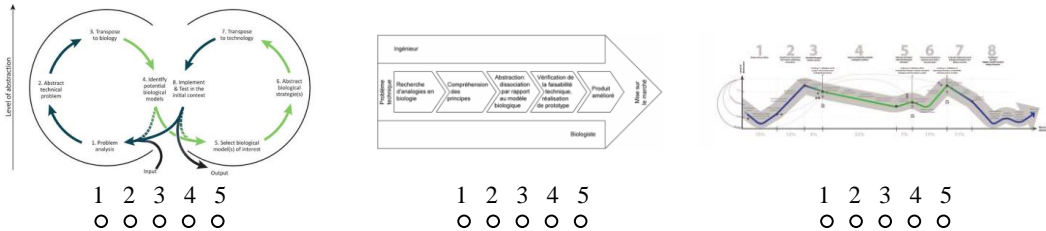
Je comprends la logique des axes structurants le processus (entourer la réponse de votre choix)



Je comprends la sémantique des axes structurants le processus (entourer la réponse de votre choix)



Je comprends la structure et le cheminement du processus (enchaînement des étapes, boucles itératives, etc.)
 (1(Non, pas du tout)-5(Oui, parfaitement))



2) Sémantique et extraction d'information

(V) si sémantique comprise - (X) si sémantique non comprise

The figure contains three diagrams for the second question, identical to the first question's diagrams. Below each diagram is a list of 8 items with checkboxes. The first diagram has checkboxes for E1 to E8. The second diagram has checkboxes for E1 to E7. The third diagram has checkboxes for E1 to E8.

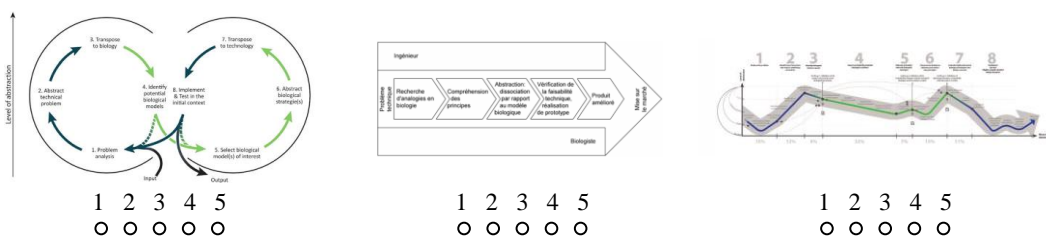
- E1:** Analyse du problème
- E2:** Abstraction du problème technique
- E3:** Transposition à la biologie
- E4:** Identification des modèles biologiques potentiels
- E5:** Sélection des modèles biologiques d'intérêts
- E6:** Abstraction des stratégies biologiques
- E7:** Transposition à la technologie
- E8:** Mise en contexte (espace problème)

- E1:** Problème technique
- E2:** Recherche d'analogies en biologie
- E3:** Compréhension des principes
- E4:** Abstraction: dissociation par rapport au modèle biologique
- E5:** Vérification de la faisabilité technique, réalisation de prototype
- E6:** Produit amélioré
- E7:** Mise sur le marché

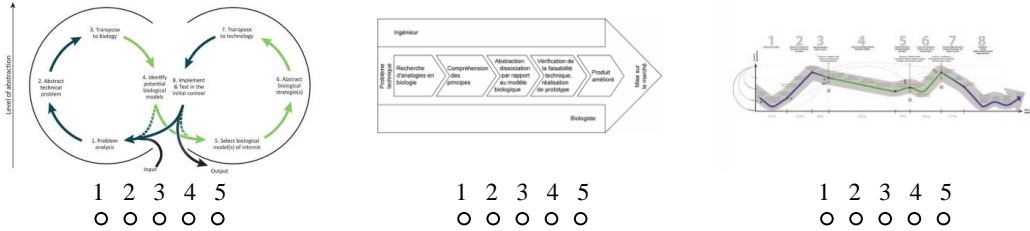
- E1:** Analyser le problème
- E2:** Identifier les interactions et extraire les contraintes sous-jacentes
- E3:** Identifier les espaces de solutions biologiques
- E4:** Rechercher et identifier des solutions biologiques potentielles
- E5:** Évaluer et sélectionner stratégies biologiques pertinentes
- E6:** Caractériser les solutions biologiques et extraire les principes clés
- E7:** Incarnez les stratégies biologiques très abstraites dans des concepts
- E8:** Mettre en œuvre et tester

3) Identification et gestion des risques

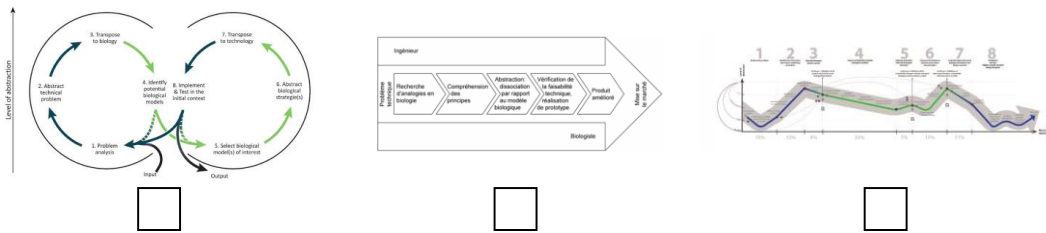
En analysant le processus global, diriez vous que le processus est pertinent dans sa gestion des risques?
 (1(Non, il n'est pas pertinent)-5(Oui, il est très pertinent))



A plus large échelle, diriez vous que ce processus peut vous aider à réduire les risques lors d'un projet biomimétique ? (1(Non, pas du tout)-5(Oui, tout à fait))

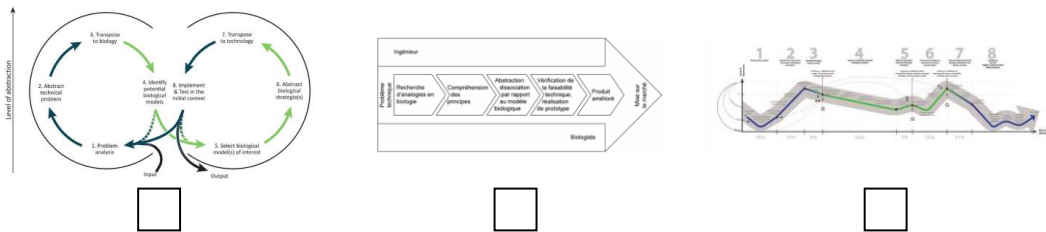


En vous basant sur votre ressenti, classer les process du plus au moins risqué. (1: Le plus risqué / 3: Le moins risqué)



4 Choix fin

Si demain vous deviez commencer un projet biomimétique, quel processus choisiriez-vous? (Mettez une X sous le processus choisi)



Expliquez en quelques mots pourquoi ce choix :

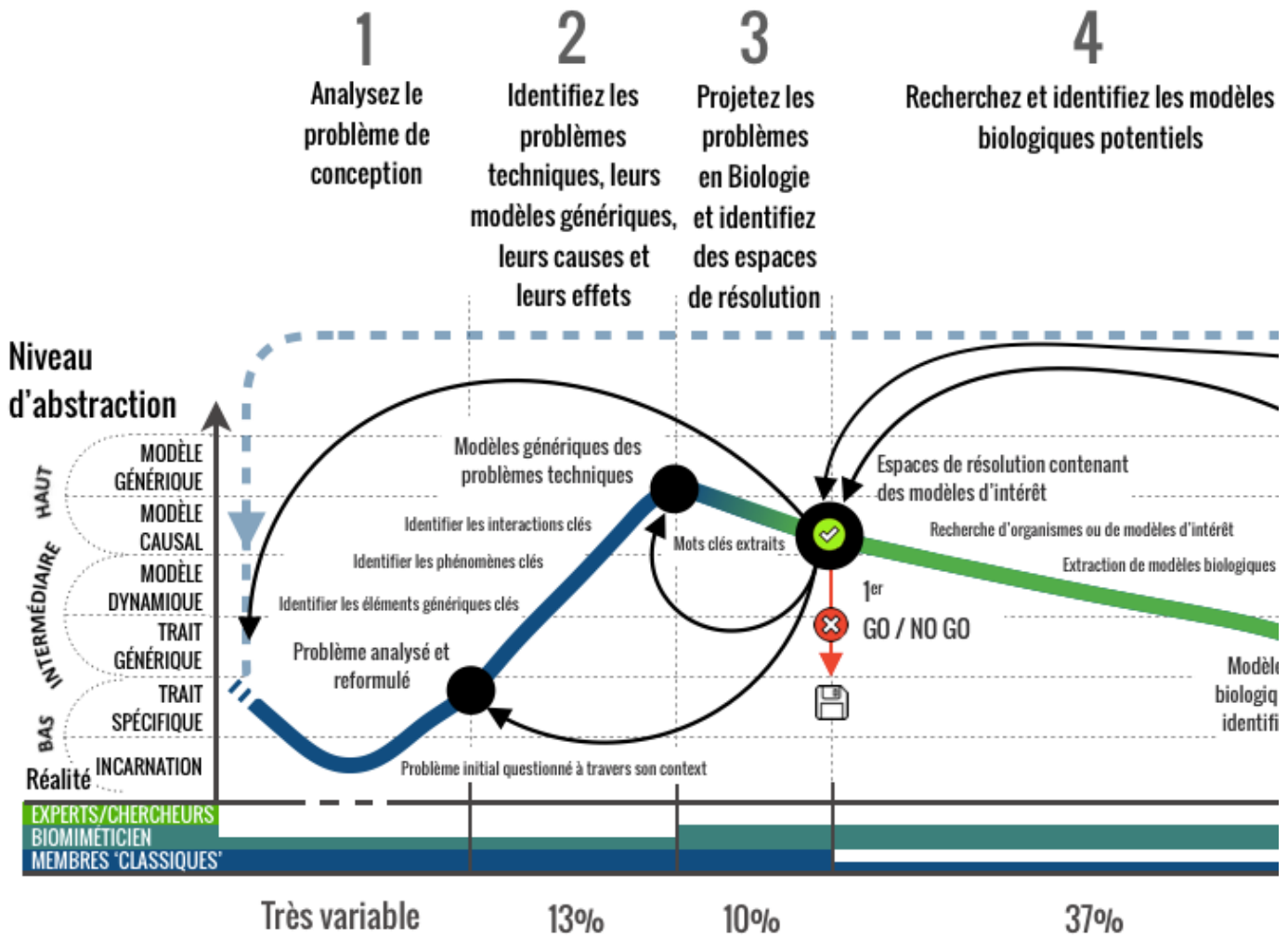
.....

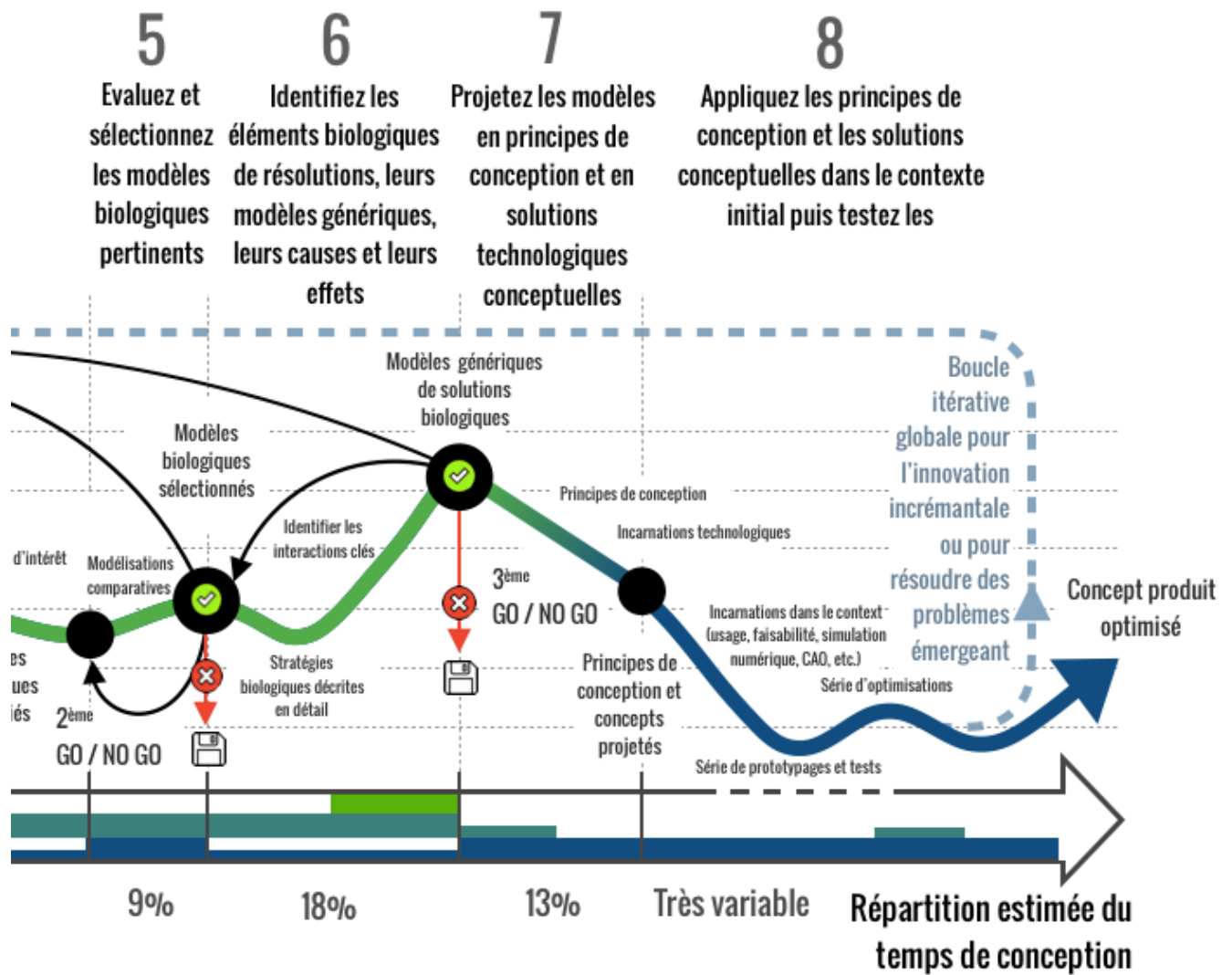
.....

Seriez-vous disponible pour remplir un rapide questionnaire complémentaire ? Oui Non
Si oui merci de joindre votre adresse email :

Nous vous remercions du temps que vous avez dédié à remplir ce questionnaire.

Annexe 8. Processus TPIB détaillé





Annexe 9. Exemple de fichier exporté depuis LINKAGE sur le modèle de la feuille de Lotus

FILE EXPORTED FROM LINKAGE

<p>Studied system</p> <p>FEUILLE DE LOTUS Biological organisms: Lotus (Nelumbo nucifera) Function of interest: Surface auto-nettoyante Technical problem to solve: Comment empêcher des déchets biologiques d'adhérer à une surface</p> <hr/> <p>Contributors</p> <p> Eliot GRAEFF eliot.graeff@ensam.eu</p>	
---	--

Abstraction of the biological model

External constraints abstractions

System: sub-system	Abstracted elements composing the biological model
air: l'air à proximité	Présence de gaz libre ambiant pouvant être utilisé comme une ressource
feuille de lotus: microstructure	La surface du système est structurée à une échelle micrométrique
feuille de lotus: nanostructure	La surface du système est structurée à une échelle nanométrique
microstructure: les papilles microscopiques	Les microstructures forment des papilles
nanostructure: nanocristaux	Les nanocristaux sont issus d'un matériau sécrété et cristallisé
la surface: la zone mouillée	Prévoir des zones de mouillage préférentiel
air: air piégé	Le système piège une partie du fluide issu de l'environnement
gouttes d'eau: gouttes d'eau en surface	Présence de liquide en surface pouvant être utilisé comme une ressource

Sub-system (attribute): what makes it relevant?	Principles abstracted from causal relationships
l'air à proximité (densité): Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	Récolter de l'énergie mécanique issue de la masse de fluide (comme l'air) de l'environnement (énergie potentielle de pesanteur).
l'air à proximité (vitesse): Impact l'énergie transmise à la feuille	Récolter de l'énergie mécanique issue de la vitesse de fluide (comme l'air) de l'environnement (énergie cinétique).
la surface (composition): En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou à s'assécher par exemple	Le système peut impacter la composition de fluides environnants.
la surface (aire): Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	Plus la surface de contact entre le système et l'environnement est important et plus le système modifie les flux de fluides environnementaux.
microstructure (orientation): D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	La mise en place de microstructures inclinées permet de mieux protéger la couche de fluide piégé des flux de fluide ambiant
microstructure (organisation): Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	Microstructurer la surface avec une densité suffisante pour limiter l'impact du flux de fluide ambiant

Annexes

microstructure (taille): Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	La hauteur des microstructures impact la hauteur de la couche de fluide piégée
toute la surface (matériau): Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.	Utiliser différents matériaux pour conduire à plusieurs fonctions du système
toute la surface (forme): La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer	Prendre en compte le lien entre la forme et les zones d'équilibres stables de potentiel de pesanteur. Les zones en cuvettes ou proche de la perpendiculaire par rapport à la gravité seront des zones fortement encombrées (ce qui peut être problématique ou au contraire d'intérêt)
toute la surface (aire de contact): Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saleté fixée peut être importante	Limitier au maximum la surface de contact pour limiter le nombre de liaisons potentiellement formées.
les papilles microscopiques (composition): Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	Structuré les éléments depuis l'intérieur vers l'extérieur. Les sous-systèmes du système peuvent assurer un rôle unitaire simple (libérer un revêtement) mais qui s'avère complexe à grande échelle (recouvrir toutes les microstructures de cire sans les boucher), facilitant alors grandement la tâche. Les composants sont ici actifs dans le renouvellement du système.
les papilles microscopiques (organisation): La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entraîner de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures	La distance entre les microstructures doit être suffisamment faible pour maintenir l'intégrité des particules à évacuer (répartition des forces par rapport à la tension de surface) et suffisamment forte pour réduire au maximum les liaisons potentielles
les papilles microscopiques (forme): La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	La concentration de la force sur une zone trop petite risque de déstabiliser l'intégrité physique de la particule et la fragmenter, trouver l'équilibre entre la limitation de l'interaction et la répartition des forces.
nanocristaux (taille): 100 nm de diamètre et 500 nm de long limitant énormément la surface de contact (100 nm en bout de cristaux)	Structurer les microstructures à une échelle nanométrique pour amplifier le phénomène de limitation de zone de contact par les mêmes principes qu'à l'échelle microscopique.
nanocristaux (forme): Cristaux épineux formés de tubes creux, les saletés ne sont donc en réalité en contact qu'avec les "pics" des cristaux.	La structure épineuse des nanostructures permet d'avoir des zones de contact de type 'point' permettant de limiter fortement l'adhésion d'éléments extérieurs.
nanocristaux (composition): Cire (65 % de diols variés et 22 % de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)) ayant un caractère hydrophobe (peu affine avec l'eau)	La nanostructures peuvent être faites à partir d'un matériau renouvelé dans le temps et à faible affinité avec l'eau (peu de liaison hydrogènes formées).
nanocristaux (organisation): Les nanocristaux recouvrent la surface (séparés d'environ 500 nm) et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme sous-jacent	Assurer le renouvellement des matériaux des nanostructures par les composants des microstructures pour permettre une répartition homogène des nanostructures sur toute la surface.
nanocristaux (organisation): Les nanocristaux recouvrent la surface séparée de 500 nm environ stabilisant les gouttes en répartissant les forces et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	Les nanostructures de la surface du système peuvent permettre de stabiliser une forme préférentielle de fluide ambiant, ici la formation en goutte est stabilisée par la faible affinité et la faible quantité de liaisons formées.
air piégé (composition): Les gaz composant l'air sont assez peu affines de l'eau et donc les molécules d'eau ont tendance à rester fixées entre elles étant donné leur tension superficielle, l'eau est maintenue en sphère.	Utiliser des fluides ambiants (comme l'air) comme levier de stabilisation ou pour transférer de l'énergie (vitesse de l'air) à d'autre fluide ambiant.
air piégé (surface de contact): L'air piégé par les micros et nanostructures permet de maintenir physiquement les (comme un coussin) les gouttes en surface	Piéger des fluides ambiants pour en faire des ressources permettant un soutien physique
gouttes d'eau en surface (volume): Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	Récolter de l'énergie mécanique issue de la masse de fluide (comme l'eau) de l'environnement (énergie potentielle de pesanteur).

Annexes

gouttes d'eau en surface (vitesse): L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	Récolter de l'énergie mécanique issue de la vitesse du fluide (comme l'eau) de l'environnement (énergie potentielle de pesanteur).
gouttes d'eau en surface (fluide): La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	Utiliser les propriétés des fluides comme la poussée d'Archimède comme moteur d'évacuation, et donc les fluides en situation propice à ces phénomènes
gouttes d'eau en surface (organisation): Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	Le milieu d'évacuation doit être le plus affine possible des éléments à évacuer.

Sub-system : Impact of the sub-system	Principles abstracted from how phenomenon occurred
l'air à proximité: Entraîne le mouvement de la feuille	Utiliser les fluides extérieurs comme des sources d'énergie mécanique.
microstructure: Piège une couche d'air	Piéger une couche de fluide issue de l'environnement
nanostructure: Stabilise la couche d'air	Stabiliser la couche de fluide
toute la surface: Offre un support de fixation	Limiter la surface de contact pour limiter la fixation
les papilles microscopiques: Représente la zone d'interaction de la surface et donc de fixation des saletés	Limiter la surface de contact pour limiter la fixation (échelle micro)
nanocristaux: Limite la surface de contact et d'adhésion des saletés	Limiter la surface de contact pour limiter la fixation (échelle nano)
la zone mouillée: Interrompt la chute de la pluie par la surface de la feuille	Utiliser les fluides extérieurs comme des sources d'énergie potentielle de pesanteur.
air piégé: l'air a moins d'affinité avec les gouttes que les gouttes entre elles et favorise donc une forme sphérique	Utiliser les différences d'affinité entre les fluides de l'environnement pour stimuler des comportements d'intérêt.
gouttes d'eau en surface: Les gouttes d'eau entraînent les saletés	Utiliser un fluide de l'environnement comme un milieu d'entraînement des particules de saleté.

Overall principles to abstract
Assurer un apport fréquent en fluides pour permettre l'évacuation des saletés
Le fluide en lui même peut apporter une énergie par gravité ou par sa vitesse

Internal organizations abstractions

Sub-system (attribute): what makes it relevant?	Principles abstracted from causal relationships
les papilles (organisation): Par leur organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	Augmentation de la surface globale par micro structuration mais diminution de la surface partielle de contact (somme des surfaces apicale des microstructures)
les papilles microscopiques (organisation): La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force stabilisant la forme sphérique. Par sa tension superficielle et la quantité de liaisons potentielles avec la surface (une gamme en fonction de la densité de papilles) la goutte est stabilisée mais en surface des microstructures	Répartition de la force à la surface des éléments en contact afin de stabiliser les éléments dans une forme aux propriétés d'intérêt et à la faible quantité de liaisons avec la surface.
les papilles microscopiques (composition): Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire à faible affinité avec l'eau vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	Structuration de l'intérieur vers l'extérieur chaque couche effectue une fonction impactant la suivante.

Annexes

gouttes d'eau en surface (vitesse): L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	Récolter de l'énergie mécanique issue de la vitesse du fluide (comme l'eau) de l'environnement (énergie potentielle de pesanteur).
gouttes d'eau en surface (fluide): La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	Utiliser les propriétés des fluides comme la poussée d'Archimède comme moteur d'évacuation, et donc les fluides en situation propice à ces phénomènes
gouttes d'eau en surface (organisation): Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	Le milieu d'évacuation doit être le plus affine possible des éléments à évacuer.

Sub-system : Impact of the sub-system	Principles abstracted from how phenomenon occurred
l'air à proximité: Entraîne le mouvement de la feuille	Utiliser les fluides extérieurs comme des sources d'énergie mécanique.
microstructure: Piège une couche d'air	Piéger une couche de fluide issue de l'environnement
nanostructure: Stabilise la couche d'air	Stabiliser la couche de fluide
toute la surface: Offre un support de fixation	Limiter la surface de contact pour limiter la fixation
les papilles microscopiques: Représente la zone d'interaction de la surface et donc de fixation des saletés	Limiter la surface de contact pour limiter la fixation (échelle micro)
nanocristaux: Limite la surface de contact et d'adhésion des saletés	Limiter la surface de contact pour limiter la fixation (échelle nano)
la zone mouillée: Interrompt la chute de la pluie par la surface de la feuille	Utiliser les fluides extérieurs comme des sources d'énergie potentielle de pesanteur.
air piégé: l'air a moins d'affinité avec les gouttes que les gouttes entre elles et favorise donc une forme sphérique	Utiliser les différences d'affinité entre les fluides de l'environnement pour stimuler des comportements d'intérêt.
gouttes d'eau en surface: Les gouttes d'eau entraînent les saletés	Utiliser un fluide de l'environnement comme un milieu d'entraînement des particules de saleté.

Overall principles to abstract
Assurer un apport fréquent en fluides pour permettre l'évacuation des saletés
Le fluide en lui même peut apporter une énergie par gravité ou par sa vitesse

Internal organizations abstractions

Sub-system (attribute): what makes it relevant?	Principles abstracted from causal relationships
les papilles (organisation): Par leur organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	Augmentation de la surface globale par micro structuration mais diminution de la surface partielle de contact (somme des surfaces apicale des microstructures)
les papilles microscopiques (organisation): La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force stabilisant la forme sphérique. Par sa tension superficielle et la quantité de liaisons potentielles avec la surface (une gamme en fonction de la densité de papilles) la goutte est stabilisée mais en surface des microstructures	Répartition de la force à la surface des éléments en contact afin de stabiliser les éléments dans une forme aux propriétés d'intérêt et à la faible quantité de liaisons avec la surface.
les papilles microscopiques (composition): Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire à faible affinité avec l'eau vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	Structuration de l'intérieur vers l'extérieur chaque couche effectue une fonction impactant la suivante.

Annexes

Sub-system : Impact of the sub-system	Principles abstracted from how phenomenon occurred
nanocristaux: Recouvrir les cellules des microstructures qui ne sont donc pas en contact direct avec l'environnement	Mettre en place une couche de protection renouvelable qui empêche la mise en contact direct avec l'environnement

Overall principles to abstract

Biological solutions

1 Propre et sèche

Element 1	Element 2	Phenomenon	Biological Embodiment
l'air à proximité	feuille de lotus	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	l'air à proximité: densité
l'air à proximité	feuille de lotus	Impact l'énergie transmise à la feuille	l'air à proximité: vitesse
la surface	air	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou à s'assécher par exemple	la surface: composition
la surface	air	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	la surface: aire
microstructure	air	Pilier faiblement conique	microstructure: forme
microstructure	air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	microstructure: orientation
microstructure	air	Piliers formé par des cellules épidermiques	microstructure: composition
microstructure	air	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	microstructure: organisation
microstructure	air	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	microstructure: taille
nanosstructure	air	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	nanosstructure: organisation
nanosstructure	air	100 nm de diamètre et 500 nm de long	nanosstructure: taille
nanosstructure	air	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	nanosstructure: composition
nanosstructure	air	Nanocristaux épineux.	nanosstructure: forme

2 Sale et sèche

Element 1	Element 2	Phenomenon	Biological Embodiment
les éléments en contact avec la surface	feuille de lotus	L'aire de contact et de couverture varie avec la taille des particules qui est elle même très variable.	les éléments en contact avec la surface: taille

Annexes

les éléments en contact avec la surface	feuille de lotus	Plus il y a de saleté et plus la surface est recouverte	les éléments en contact avec la surface: quantité
les éléments en contact avec la surface	feuille de lotus	Les molécules composant les particules vont avoir plus ou moins d'affinités avec la surface et donc plus ou moins tendance à entraîner la formation d'une couche stable de saleté.	les éléments en contact avec la surface: composition
l'air à proximité	feuille de lotus	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	l'air à proximité: densité
l'air à proximité	feuille de lotus	Impact l'énergie transmise à la feuille	l'air à proximité: vitesse
la surface	air	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou à s'assécher par exemple	la surface: composition
la surface	air	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	la surface: aire
microstructure	air	Pilier faiblement conique	microstructure: forme
microstructure	air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	microstructure: orientation
microstructure	air	Piliers formé par des cellules épidermiques	microstructure: composition
microstructure	air	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	microstructure: organisation
microstructure	air	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	microstructure: taille
nanosstructure	air	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	nanosstructure: organisation
nanosstructure	air	100 nm de diamètre et 500 nm de long	nanosstructure: taille
nanosstructure	air	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	nanosstructure: composition
nanosstructure	air	Nanocristaux épineux.	nanosstructure: forme
nanocristaux	feuille de lotus	Les nanocristaux recouvrent la surface et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	nanocristaux: organisation
les papilles	feuille de lotus	Par leur organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduire, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	les papilles: organisation
toute la surface	saleté	Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.	toute la surface: matériau
toute la surface	saleté	La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer.	toute la surface: forme
toute la surface	saleté	Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saletés fixées peut être importante.	toute la surface: aire de contact
les papilles microscopiques	saleté	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une	les papilles microscopiques:

Annexes

		certaine élasticité.	composition
les papilles microscopiques	saleté	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entraîner de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures.	les papilles microscopiques: organisation
les papilles microscopiques	saleté	La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	les papilles microscopiques: forme
les papilles microscopiques	saleté	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas traverser les saletés (poids de la saleté et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface en cas de déformation.	les papilles microscopiques: taille
nanocristaux	saleté	100 nm de diamètre et 500 nm de long limitant énormément la surface de contact (100 nm en bout de cristaux).	nanocristaux: taille
nanocristaux	saleté	Cristaux épineux formés de tubes creux, les saletés ne sont donc en réalité en contact qu'avec les "pics" des cristaux.	nanocristaux: forme
nanocristaux	saleté	Cire (65 % de diols variés et 22 % de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)) ayant un caractère hydrophobe (peu affine avec l'eau).	nanocristaux: composition
nanocristaux	saleté	Les nanocristaux recouvrent la surface (séparés d'environ 500 nm) et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme sous-jacent.	nanocristaux: organisation

3 Sale et mouillée

Element 1	Element 2	Phenomenon	Biological Embodiment
les éléments en contact avec la surface	feuille de lotus	L'aire de contact et de couverture varie avec la taille des particules qui est elle même très variable.	les éléments en contact avec la surface: taille
les éléments en contact avec la surface	feuille de lotus	Plus il y a de saleté et plus la surface est recouverte	les éléments en contact avec la surface: quantité
les éléments en contact avec la surface	feuille de lotus	Les molécules composant les particules vont avoir plus ou moins d'affinités avec la surface et donc plus ou moins tendance à entraîner la formation d'une couche stable de saleté.	les éléments en contact avec la surface: composition
les molécules d'eau	saleté	Les particules seront décollées et entraînées par la force apportée par l'eau sous forme d'énergie cinétique	les molécules d'eau: vitesse
les molécules d'eau	saleté	Les molécules d'eau vont former des ponts hydrogène et solubiliser un ensemble de particules de saleté	les molécules d'eau: composition
les molécules d'eau	saleté	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	les molécules d'eau: fluide
l'air à proximité	feuille de lotus	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	l'air à proximité: densité
l'air à proximité	feuille de lotus	Impact l'énergie transmise à la feuille	l'air à proximité: vitesse
la surface	air	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou à s'assécher par exemple	la surface: composition
la surface	air	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	la surface: aire

Annexes

microstructure	air	Pilier faiblement conique	microstructure: forme
microstructure	air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	microstructure: orientation
microstructure	air	Pilier formé par des cellules épidermiques	microstructure: composition
microstructure	air	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	microstructure: organisation
microstructure	air	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	microstructure: taille
nanostucture	air	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	nanostucture: organisation
nanostucture	air	100 nm de diamètre et 500 nm de long	nanostucture: taille
nanostucture	air	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	nanostucture: composition
nanostucture	air	Nanocristaux épineux.	nanostucture: forme
nanocristaux	feuille de lotus	Les nanocristaux recouvrent la surface et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	nanocristaux: organisation
les papilles	feuille de lotus	Par leur organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	les papilles: organisation
toute la surface	saleté	Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.	toute la surface: matériau
toute la surface	saleté	La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer.	toute la surface: forme
toute la surface	saleté	Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saletés fixées peut être importante.	toute la surface: aire de contact
les papilles microscopiques	saleté	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	les papilles microscopiques: composition
les papilles microscopiques	saleté	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entraîner de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures.	les papilles microscopiques: organisation
les papilles microscopiques	saleté	La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	les papilles microscopiques: forme
les papilles microscopiques	saleté	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas traverser les saletés (poids de la saleté et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface en cas de déformation.	les papilles microscopiques: taille
nanocristaux	saleté	100 nm de diamètre et 500 nm de long limitant énormément la surface de contact (100 nm en bout de cristaux).	nanocristaux: taille
nanocristaux	saleté	Cristaux épineux formés de tubes creux, les saletés ne sont donc en réalité en contact qu'avec les "pics" des cristaux.	nanocristaux: forme

Annexes

nanocristaux	saleté	Cire (65 % de diols variés et 22 % de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)) ayant un caractère hydrophobe (peu affine avec l'eau).	nanocristaux: composition
nanocristaux	saleté	Les nanocristaux recouvrent la surface (séparés d'environ 500 nm) et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme sous-jacent.	nanocristaux: organisation
les papilles microscopiques	gouttes d'eau	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas déstabiliser les gouttes d'eau (poids de la goutte, tension superficielle et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface malgré la déformation	les papilles microscopiques: taille
les papilles microscopiques	gouttes d'eau	La forme arrondie évite que la goutte soit trop déstabilisée et ainsi se sépare en deux gouttes, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	les papilles microscopiques: forme
les papilles microscopiques	gouttes d'eau	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force stabilisant la forme sphérique. Par sa tension superficielle et la quantité de liaisons potentielles avec la surface (une gamme en fonction de la densité de papilles) la goutte est stabilisée mais en surface des microstructures	les papilles microscopiques: organisation
les papilles microscopiques	gouttes d'eau	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire à faible affinité avec l'eau vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	les papilles microscopiques: composition
nanocristaux	gouttes d'eau	Les nanocristaux recouvrent la surface (séparés d'environ 500 nm) et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme sous-jacent	nanocristaux: organisation
nanocristaux	gouttes d'eau	Cire (65 % de diols variés et 22 % de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)) ayant un caractère hydrophobe (peu affine avec l'eau peu de liaisons sont formées)	nanocristaux: composition
nanocristaux	gouttes d'eau	Cristaux épineux formés de tubes creux, les saletés ne sont donc en réalité en contact qu'avec les pics des cristaux réduisant encore la surface de contact	nanocristaux: forme
nanocristaux	gouttes d'eau	100 nm de diamètre et 500 nm de long limitant énormément la surface de contact (100 nm en bout de cristaux)	nanocristaux: taille
nanocristaux	gouttes d'eau	Les nanocristaux recouvrent la surface séparée de 500 nm environ stabilisant les gouttes en répartissant les forces et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	nanocristaux: organisation
air piégé	gouttes d'eau	Les gaz composant l'air sont assez peu affines de l'eau et donc les molécules d'eau ont tendance à rester fixées entre elles étant donné leur tension superficielle, l'eau est maintenue en sphère.	air piégé: composition
air piégé	gouttes d'eau	L'air piégé par les micros et nanostructures permet de maintenir physiquement les (comme un coussin) les gouttes en surface	air piégé: surface de contact
molécules d'eau	saleté	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	molécules d'eau: volume
molécules d'eau	saleté	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	molécules d'eau: vitesse
molécules d'eau	saleté	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	molécules d'eau: fluide
molécules d'eau	saleté	Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	molécules d'eau: organisation
gouttes d'eau en surface	saleté	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	gouttes d'eau en surface: volume
gouttes d'eau en surface	saleté	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	gouttes d'eau en surface: vitesse

Annexes

gouttes d'eau en surface	saleté	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	gouttes d'eau en surface: fluide
gouttes d'eau en surface	saleté	Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	gouttes d'eau en surface: organisation

4 Propre et mouillée

Element 1	Element 2	Phenomenon	Biological Embodiment
l'air à proximité	feuille de lotus	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	l'air à proximité: densité
l'air à proximité	feuille de lotus	Impact l'énergie transmise à la feuille	l'air à proximité: vitesse
la surface	air	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou à s'assécher par exemple	la surface: composition
la surface	air	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	la surface: aire
microstructure	air	Pilier faiblement conique	microstructure: forme
microstructure	air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	microstructure: orientation
microstructure	air	Piliers formé par des cellules épidermiques	microstructure: composition
microstructure	air	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	microstructure: organisation
microstructure	air	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	microstructure: taille
nanostucture	air	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	nanostucture: organisation
nanostucture	air	100 nm de diamètre et 500 nm de long	nanostucture: taille
nanostucture	air	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	nanostucture: composition
nanostucture	air	Nanocristaux épineux.	nanostucture: forme
nanocristaux	feuille de lotus	Les nanocristaux recouvrent la surface et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	nanocristaux: organisation
les papilles	feuille de lotus	Par leur organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	les papilles: organisation
les molécules d'eau	saleté	Les particules seront décollées et entraînées par la force apportée par l'eau sous forme d'énergie cinétique	les molécules d'eau: vitesse
les molécules d'eau	saleté	Les molécules d'eau vont former des ponts hydrogène et solubiliser un ensemble de particules de saleté	les molécules d'eau: composition
les molécules	saleté	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules	les molécules

Annexes

d'eau		entrant en contact avec le fluide.	d'eau: fluide
molécules d'eau	saleté	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	molécules d'eau: volume
molécules d'eau	saleté	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	molécules d'eau: vitesse
molécules d'eau	saleté	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	molécules d'eau: fluide
molécules d'eau	saleté	Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	molécules d'eau: organisation
gouttes d'eau en surface	saleté	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	gouttes d'eau en surface: volume
gouttes d'eau en surface	saleté	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	gouttes d'eau en surface: vitesse
gouttes d'eau en surface	saleté	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	gouttes d'eau en surface: fluide
gouttes d'eau en surface	saleté	Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	gouttes d'eau en surface: organisation
les papilles microscopiques	saleté	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	les papilles microscopiques: composition
les papilles microscopiques	saleté	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entrainer de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures.	les papilles microscopiques: organisation
les papilles microscopiques	saleté	La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	les papilles microscopiques: forme
les papilles microscopiques	saleté	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas traverser les saletés (poids de la saleté et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface en cas de déformation.	les papilles microscopiques: taille
nanocristaux	saleté	100 nm de diamètre et 500 nm de long limitant énormément la surface de contact (100 nm en bout de cristaux).	nanocristaux: taille
nanocristaux	saleté	Cristaux épineux formés de tubes creux, les saletés ne sont donc en réalité en contact qu'avec les "pics" des cristaux.	nanocristaux: forme
nanocristaux	saleté	Cire (65 % de diols variés et 22 % de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)) ayant un caractère hydrophobe (peu affine avec l'eau).	nanocristaux: composition
nanocristaux	saleté	Les nanocristaux recouvrent la surface (séparés d'environ 500 nm) et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme sous-jacent.	nanocristaux: organisation
toute la surface	saleté	Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.	toute la surface: matériau
toute la surface	saleté	La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer.	toute la surface: forme
toute la surface	saleté	Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saletés	toute la surface:

	fixées peut être importante.	aire de contact
--	------------------------------	-----------------

Model elements

Super system's level	Sub-system's level	Attribute	PROPRE ET SÈCHE	SALE ET SÈCHE	SALE ET MOUILLÉE	PROPRE ET MOUILLÉE
AIR		Composition	O2, N2, CO2, Arg et vapeur d'eau	O2, N2, CO2, Arg et vapeur d'eau	O2, N2, CO2, Arg et vapeur d'eau	O2, N2, CO2, Arg et vapeur d'eau
		Vitesse	Variable	Variable	Variable	Variable
	AIR PIÉGÉ	Composition	UNDEFINED	UNDEFINED	Les gaz composant l'air sont assez peu affines de l'eau et donc les molécules d'eau ont tendance à rester fixées entre elles étant donné leur tension superficielle, l'eau est maintenue en sphère.	UNDEFINED
	AIR PIÉGÉ	Surface de contact	UNDEFINED	UNDEFINED	L'air piégé par les micros et nanostructures permet de maintenir physiquement les (comme un coussin) les gouttes en surface	UNDEFINED
	L'AIR À PROXIMITÉ	Densité	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.	Plus l'air va être dense et plus la masse est forte et donc plus l'énergie transmise est importante.
	L'AIR À PROXIMITÉ	Vitesse	Impact l'énergie transmise à la feuille	Impact l'énergie transmise à la feuille	Impact l'énergie transmise à la feuille	Impact l'énergie transmise à la feuille
FEUILLE DE LOTUS	LA SURFACE	Aire	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.	Plus l'aire est importante plus elle impacte le flux d'air.
	LA SURFACE	Composition	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou a s'assécher par exemple	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou a s'assécher par exemple	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou a s'assécher par exemple	En fonction de la composition de la surface, l'air peut avoir tendance à s'humidifier ou a s'assécher par exemple
	MICROSTRUCTURE	Composition	Piliers formé par des cellules épidermiques	Piliers formé par des cellules épidermiques	Piliers formé par des cellules épidermiques	Piliers formé par des cellules épidermiques

Annexes

	MICROSTRUCTURE	Forme	Pilier faiblement conique	Pilier faiblement conique	Pilier faiblement conique	Pilier faiblement conique
	MICROSTRUCTURE	Organisation	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée	Répartition relativement homogène séparation d'environ 10 micromètres permet d'offrir une densité suffisante pour couper le flux d'air extérieur de la couche piégée
	MICROSTRUCTURE	Orientation	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air	D'après les observations au MEB, entre 40 et 90° par rapport à la surface, permet de mieux capturer l'air
	MICROSTRUCTURE	Taille	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.	Microstructure entre 10 et 20 micromètres de haut pour 10 micromètres de diamètre entraîne la stabilisation d'une couche d'air de 15 micromètres en moyenne.
	NANOSTRUCTURE	Composition	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)	Cire : 65% de diols variés et seulement 22% de nonacosan-10-ol (C29-10-ol)
	NANOSTRUCTURE	Forme	Nanocristaux épineux.	Nanocristaux épineux.	Nanocristaux épineux.	Nanocristaux épineux.
	NANOSTRUCTURE	Organisation	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux	Couvre les papilles microscopiques, environ 500nm entre les différents nanocristaux
	NANOSTRUCTURE	Taille	100 nm de diamètre et 500 nm de long	100 nm de diamètre et 500 nm de long	100 nm de diamètre et 500 nm de long	100 nm de diamètre et 500 nm de long
GOUTTES D'EAU	GOUTTES D'EAU EN SURFACE	Fluide	UNDEFINED	UNDEFINED	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.

Annexes

	GOUTTES D'EAU EN SURFACE	Organisation	UNDEFINED	UNDEFINED	Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	Organisation affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau
	GOUTTES D'EAU EN SURFACE	Vitesse	UNDEFINED	UNDEFINED	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.
	GOUTTES D'EAU EN SURFACE	Volume	UNDEFINED	UNDEFINED	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.
	LES MOLÉCULES D'EAU	Composition	UNDEFINED	UNDEFINED	Les molécules d'eau vont former des ponts hydrogène et solubiliser un ensemble de particules de saleté	Les molécules d'eau vont former des ponts hydrogène et solubiliser un ensemble de particules de saleté
	LES MOLÉCULES D'EAU	Fluide	UNDEFINED	UNDEFINED	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.
	LES MOLÉCULES D'EAU	Vitesse	UNDEFINED	UNDEFINED	Les particules seront décollées et entraînées par la force apportée par l'eau sous forme d'énergie cinétique	Les particules seront décollées et entraînées par la force apportée par l'eau sous forme d'énergie cinétique
	MOLÉCULES D'EAU	Fluide	UNDEFINED	UNDEFINED	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.	La poussée d'Archimède peut avoir un impact sur le décollement et l'entraînement des particules entrant en contact avec le fluide.
					Organisation	Organisation

Annexes

	MOLÉCULES D'EAU	Organisation	UNDEFINED	UNDEFINED	affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau	affine des molécules d'eau entre elles par formation de liaison hydrogène. Ces liaisons se forment aussi avec d'autres molécules qui sont alors entraînées dans l'eau
	MOLÉCULES D'EAU	Vitesse	UNDEFINED	UNDEFINED	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.	L'énergie cinétique apporté par les molécules d'eau peut rompre l'adhésion de particules à la surface du système.
	MOLÉCULES D'EAU	Volume	UNDEFINED	UNDEFINED	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.	Le volume d'eau impact la masse et donc l'énergie potentielle de pesanteur apportée par l'eau et transformé en énergie mécanique par mise en contact.
LA SURFACE	TOUTE LA SURFACE	Aire de contact	UNDEFINED	Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saletés fixées peut être importante.	Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saletés fixées peut être importante.	Plus l'aire de contact est grande et plus la fixation sera importante et plus la quantité de saletés fixées peut être importante.
	TOUTE LA SURFACE	Forme	UNDEFINED	La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer.	La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer.	La forme de la surface et notamment par rapport à l'horizontal (et donc le travail maximum de la force de gravité) impact la capacité des saletés à adhérer.
	TOUTE LA SURFACE	Matériau	UNDEFINED	Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.	Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.	Les matériaux composant la surface vont avoir un impact selon leur élasticité et leur affinité chimique, ici la surface est recouverte de lipides à faible affinité avec l'eau et le cœur de la feuille est composée de cellulose qui est élastique.
				Par leur	Par leur	Par leur

Annexes

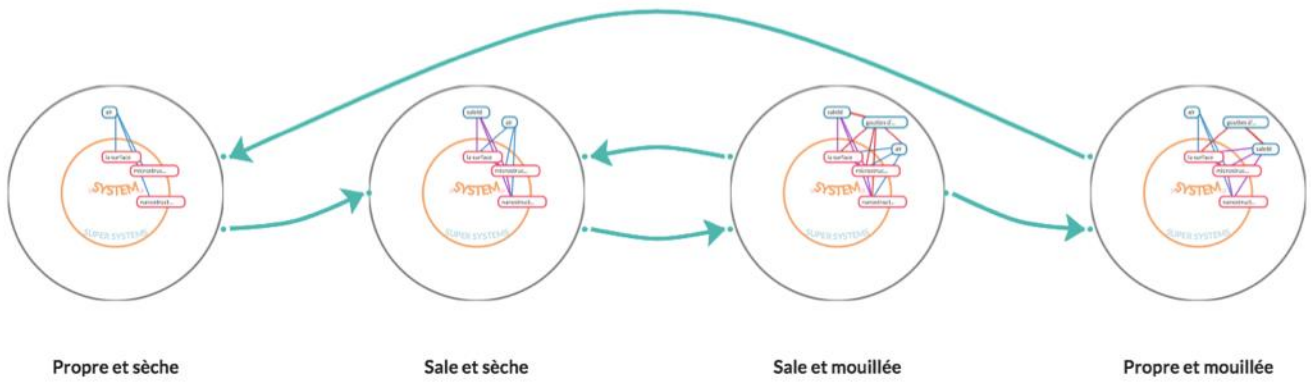
MICROSTRUCTURE	LES PAPILLES	Organisation	UNDEFINED	organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles	organisation en papilles, la surface globale de la feuille augmente. En revanche, par leur densité et taille réduite, les papilles limite la surface de contact pour les éléments plus gros que l'écart entre deux papilles
	LES PAPILLES MICROSCOPIQUES	Composition	UNDEFINED	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.	Composé de cellules épidermiques qui permettent elles de sécréter de la cire vers l'extérieur et donc la cire va recouvrir toutes les microstructures, par ailleurs les cellules assurent une certaine élasticité.
	LES PAPILLES MICROSCOPIQUES	Forme	UNDEFINED	La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.	La forme arrondie évite que la particule soit transpercée et ainsi fixée, par ailleurs, la forme en papille limite au maximum la surface de contact.
	LES PAPILLES MICROSCOPIQUES	Organisation	UNDEFINED	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entrainer de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures.	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entrainer de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures.	La répartition des papilles de manière homogène permet de répartir la force sans entrainer de trop forte déformation de la particule ni un contact avec la surface, la particule est ainsi stabilisée mais en surface des microstructures.
	LES PAPILLES MICROSCOPIQUES	Taille	UNDEFINED	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas traverser les saletés (poids de la saleté et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface en cas de déformation.	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas traverser les saletés (poids de la saleté et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface en cas de déformation.	La taille des papilles est suffisamment large pour ne pas traverser les saletés (poids de la saleté et concentration de la force) et suffisamment haute pour éviter un contact avec la surface en cas de déformation.

Annexes

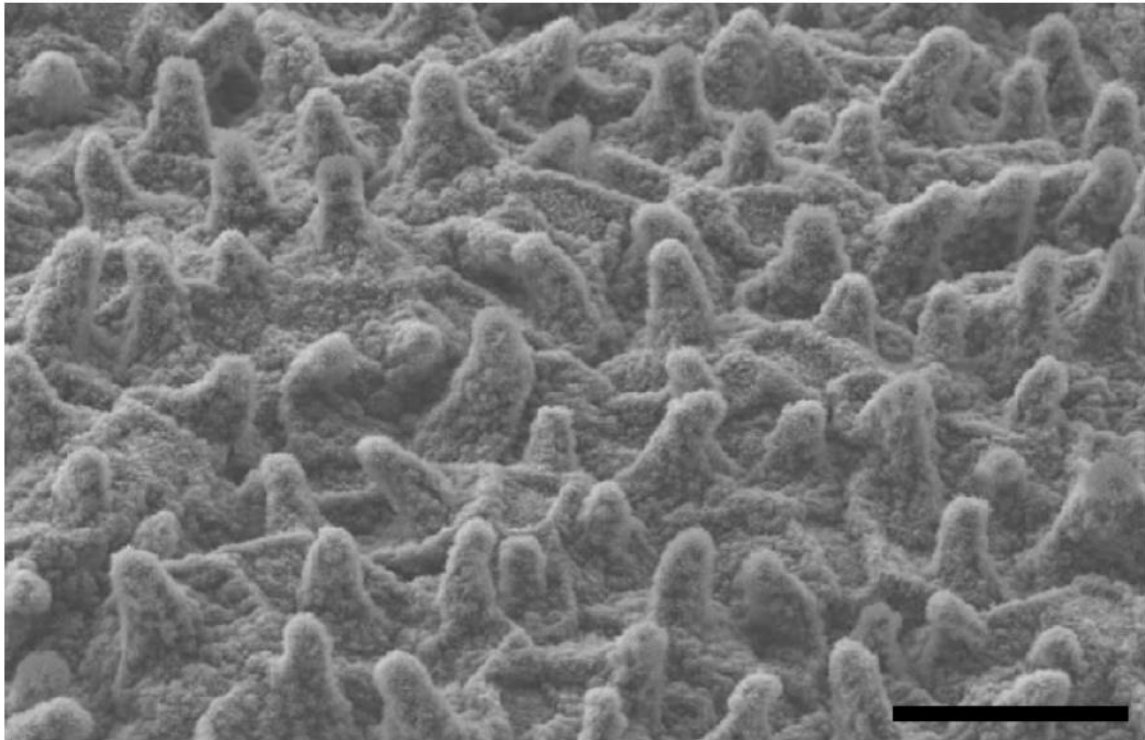
NANOSTRUCTURE	NANOCRISTAUX	Composition	UNDEFINED	UNDEFINED	UNDEFINED	UNDEFINED
	NANOCRISTAUX	Forme	UNDEFINED	UNDEFINED	UNDEFINED	UNDEFINED
	NANOCRISTAUX	Organisation	UNDEFINED	Les nanocristaux recouvrent la surface et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	Les nanocristaux recouvrent la surface et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme	Les nanocristaux recouvrent la surface et les éléments extérieurs ne touchent donc pas la surface, les lipides sont sécrétés par les cellules de l'épiderme
	NANOCRISTAUX	Taille	UNDEFINED	UNDEFINED	UNDEFINED	UNDEFINED
SALETÉ	LES ÉLÉMENTS EN CONTACT AVEC LA SURFACE	Composition	UNDEFINED	Les molécules composant les particules vont avoir plus ou moins d'affinités avec la surface et donc plus ou moins tendance à entrainer la formation d'une couche stable de saleté.	Les molécules composant les particules vont avoir plus ou moins d'affinités avec la surface et donc plus ou moins tendance à entrainer la formation d'une couche stable de saleté.	UNDEFINED
	LES ÉLÉMENTS EN CONTACT AVEC LA SURFACE	Quantité	UNDEFINED	Plus il y a de saleté et plus la surface est recouverte	Plus il y a de saleté et plus la surface est recouverte	UNDEFINED
	LES ÉLÉMENTS EN CONTACT AVEC LA SURFACE	Taille	UNDEFINED	L'aire de contact et de couverture varie avec la taille des particules qui est elle même très variable.	L'aire de contact et de couverture varie avec la taille des particules qui est elle même très variable.	UNDEFINED

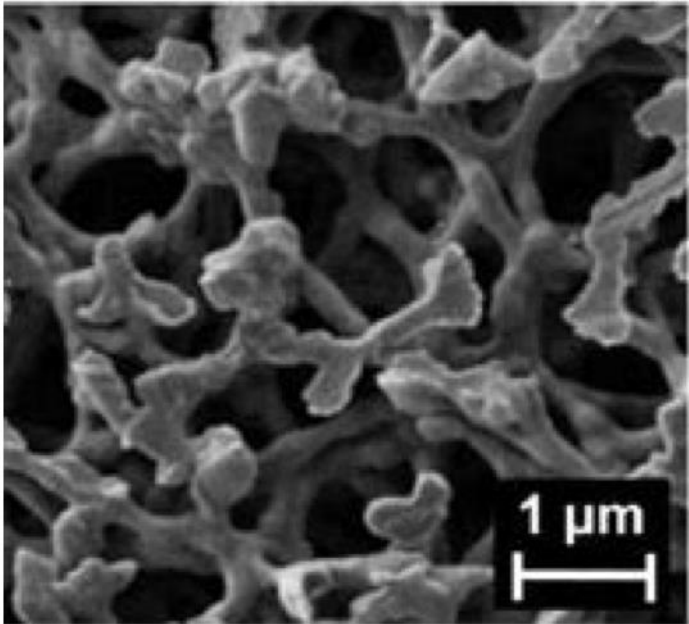
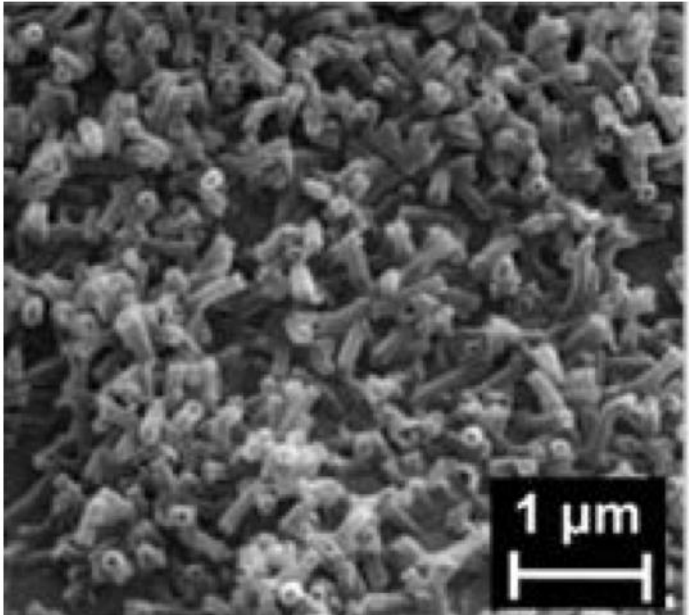
Graphical part

Global graphic representation



Attachments





Annexe 10. Fiche métier proposée pour le biomiméticien (type fiches ROME)

Fiche métier proposée pour le biomiméticien

❖ Appellations

- Biomiméticien / Biomiméticienne
- Chargé / chargée de projet biomimétique
- Ingénieur / Ingénieure biomiméticien
- Ingénieur / Ingénieure en conception biomimétique
- Chef de projet biomimétique
- Responsable recherche et développement biomimétique

❖ Définition

Membre d'une équipe de conception biomimétique pouvant d'une part manipuler des outils et des concepts biologiques complexes pour créer de nouvelles connaissances, et maîtrisant d'autre part les connaissances biomimétiques pour participer aux pratiques de conception, facilitant notamment le transfert de connaissance d'un champ scientifique à l'autre. Peut superviser et coordonner un projet, une équipe ou un département et assurer le développement d'une stratégie de conception biomimétique à ces différentes échelles.

❖ Accès à l'emploi métier

Cet emploi/métier est accessible avec un BAC +5 (Master, Diplôme d'ingénieur, etc.), la maîtrise de l'Anglais est un prérequis.

Formation approfondie en biologie, formation à la recherche (parmi les auteurs d'un article publié dans un journal scientifique à comité de relecture en biologie fondamentale).

Formation approfondie en conception biomimétique à travers une formation en école d'ingénieur, école de design industriel, ou équivalent BAC + 5.

Formation de base en ingénierie de la conception.

❖ Conditions d'exercice de l'activité

L'activité de cet emploi/métier s'exerce au sein d'entreprises industrielles, de bureaux d'études et d'ingénierie, d'entreprise de conseil, de laboratoire de recherche, d'organismes de Recherche & Développement en relation avec différents services et intervenants (production, méthodes, qualité, marketing, commercial, clients, ...). Elle varie selon le secteur d'activité (aéronautique, chimie, électronique, ...), le mode d'organisation et le type produits développés.

Le port d'Equipements de Protection Individuelle -EPI- et de protection stériles (charlotte, chaussons, ...) peut être exigé selon la nature du secteur d'activité.

❖ Compétences de bases

Savoir-faire	Savoirs
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Réaliser/Remettre en question une analyse de problème/ solution à travers un prisme propre, systémique, multifactoriel. <input type="checkbox"/> Apporter une assistance scientifique en biologie. <input type="checkbox"/> Présentation de données biologiques à différent type de publics. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Outils et démarches d'analyse systémique <input type="checkbox"/> Connaissances transversales en Biologie (théories, concepts, classification, etc.) <input type="checkbox"/> Connaissances générales en conception (concepts, vocabulaire, etc.) <input type="checkbox"/> Organisation de la recherche biologique.

<input type="checkbox"/> Évaluer les impacts environnementaux.	<input type="checkbox"/> Évaluation environnementale (indicateurs, mesures, normes, etc.) <input type="checkbox"/> Écoconception (théorie, approches, processus, concepts, outils)
--	---

❖ **Compétences spécifiques**

Savoir-faire	Savoirs
<input type="checkbox"/> Collecter, classer, et analyser des informations issues de la biologie. <input type="checkbox"/> Modéliser des systèmes biologiques à haut niveau d'abstraction	<input type="checkbox"/> Outils biomimétiques de recherche de modèles (base de données, mots clés, etc.) <input type="checkbox"/> Approches et outils d'étude bibliographique <input type="checkbox"/> Connaissances spécifiques en Écologie et Systématique (raisonnement, outils, etc.) <input type="checkbox"/> Spécificités des systèmes biologiques. <input type="checkbox"/> Outils biomimétiques de modélisation (LINKAGE, SAPPhIRE, FBS, etc.). <input type="checkbox"/> Concept d'abstraction, démarche, prismes et niveaux.
<input type="checkbox"/> Évaluer l'adéquation entre un modèle biologique et un modèle technique. <input type="checkbox"/> Transférer des connaissances entre les champs scientifiques.	<input type="checkbox"/> Outils de sélection, critères d'intérêt, etc.
<input type="checkbox"/> Élaborer des propositions d'applications techniques.	<input type="checkbox"/> Outils de créativité, idéation, représentation graphique, etc.
<input type="checkbox"/> Mettre en place, adapter et/ou concevoir un processus de conception biomimétique.	<input type="checkbox"/> Connaissances des différents processus biomimétiques <input type="checkbox"/> Prérequis à la mise en place d'une équipe biomimétique (expertises, rôles, etc.). <input type="checkbox"/> Connaissances des risques principaux associés à la démarche biomimétique.

<input type="checkbox"/> Coordonner des partenariats avec des chercheurs en biologie.	<input type="checkbox"/> Organisation de la recherche biologique. <input type="checkbox"/> Apports d'une vision biomimétique sur une recherche biologique. <input type="checkbox"/> Réseau d'experts à même de participer à des projets biomimétique.
---	---

❖ **Environnements de travail**

Structures	Secteurs
<input type="checkbox"/> Bureau d'études et d'ingénierie <input type="checkbox"/> Cabinet de conseil <input type="checkbox"/> Entreprise industrielle <input type="checkbox"/> Entrprise publique/établissement public <input type="checkbox"/> Établissement / organisme de recherche	<input type="checkbox"/> Aéronautique, spatial <input type="checkbox"/> Alimentaire <input type="checkbox"/> Automobile <input type="checkbox"/> Architecture <input type="checkbox"/> Chimie, chimie verte, chimie fine <input type="checkbox"/> Construction navale <input type="checkbox"/> Éco-industrie <input type="checkbox"/> Énergie <input type="checkbox"/> Ferroviaire <input type="checkbox"/> Génie civil <input type="checkbox"/> Gestion des déchets <input type="checkbox"/> Gestion de l'eau <input type="checkbox"/> Industrie textile <input type="checkbox"/> Industrie plastique <input type="checkbox"/> Isolation <input type="checkbox"/> Matériaux <input type="checkbox"/> Organisation des systèmes complexes

Innovation bio-inspirée : Modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomiméticien

Résumé

La recherche scientifique sur les méthodologies de conception biomimétique fait aujourd'hui face à la difficulté majeure de concrétiser sa mise en place dans les pratiques d'innovation. Dans ce contexte, et face aux nombreux freins qui en découlent, cette thèse de doctorat soulève la question des métiers associés à la pratique de la biomimétique. Plus spécifiquement, l'absence de professionnels formés d'une part à la conception biomimétique et d'autre part aux sciences du vivant rend particulièrement complexe l'accès et l'analyse des données issues de la biologie. À travers un ensemble d'études descriptives et prescriptives, le profil du biomiméticien, professionnel spécialisé en biomimétique et en biologie, est formalisé. La préconisation de ses activités pratiques, impliquant notamment des concepts, des méthodes et des outils issus de la biologie, mènent alors à la définition des compétences de ce nouveau membre des équipes de conception biomimétique. Pour assurer son intégration, un processus de conception biomimétique technology-pull interdisciplinaire et un outil accompagnant la pratique collaborative des équipes sont proposés.

Mots-clés : biomimétique, conception bio-inspirée, processus de conception, interdisciplinarité

Abstract

Scientific research on biomimetic design methodologies now faces the major challenge of implementing it in innovation practices. In this context, and in the face of the many obstacles that result, this doctoral thesis raises the question of the occupations associated with the practice of biomimetics. More specifically, the absence of professionals trained in biomimetic design and life sciences makes access and analysis of biological data particularly complex. Through a series of descriptive and prescriptive studies, the profile of the biomimetician, a professional specializing in biomimetics and biology, is formalized. The recommendation of its practical activities, including concepts, methods and tools derived from biology, then leads to the definition of the skills of this new member of the biomimetic design teams. To ensure its integration, an interdisciplinary technology-pull biomimetic design process and a tool accompanying the collaborative practice of the teams are proposed.

Keywords : biomimetics, bio-inspired design, design process, interdisciplinarity