



HAL
open science

**Contribution au développement du cadre
méthodologique de la conception biomimétique :
intégration de l'expertise des profils formés au Design
pour favoriser le déploiement de l'approche dans les
pratiques de conception et d'innovation**

Anneline Letard

► **To cite this version:**

Anneline Letard. Contribution au développement du cadre méthodologique de la conception biomimétique : intégration de l'expertise des profils formés au Design pour favoriser le déploiement de l'approche dans les pratiques de conception et d'innovation. Eco-conception. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE034 . tel-03678610

HAL Id: tel-03678610

<https://pastel.hal.science/tel-03678610v1>

Submitted on 25 May 2022

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 : **Anneline LETARD**

soutenue le : **13 juillet 2021**

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

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

Spécialité : **Conception**

**Contribution au développement du cadre
méthodologique de la conception biomimétique :
intégration de l'expertise des profils formés au Design
pour favoriser le déploiement de l'approche dans les
pratiques de conception et d'innovation**

THÈSE dirigée par : Pr. AOUSSAT Améziane
et co-dirigée par : Dr. MARANZANA Nicolas
Co-encadrement industriel : Dr. RASKIN Kalina

Jury

M. Jean-François BOUJUT , Prof. Dr., G-SCOP, Grenoble INP, UGA, Grenoble	Président du jury
M. Marc DESMULLIEZ , Prof. Dr., Heriot-Watt University, Édimbourg	Rapporteur
M. Bertrand ROSE , Prof. Dr., ICube, Université de Strasbourg	Rapporteur
Mme Lucie TOURNIER-COUTURIER , Dr., L'Oréal, Aulnay-ss-Bois	Examinatrice
M. Philippe GRANDCOLAS , Prof. Dr., ISYEB, MNHN, Paris	Examinateur
Mme Kalina RASKIN , Dr., CEEBIOS, Paris	Examinatrice
M. Nicolas MARANZANA , Dr., LCPI, Arts et Métiers, Paris	Examinateur
M. Améziane AOUSSAT , Prof. Dr., LCPI, Arts et Métiers, Paris	Examinateur

**T
H
È
S
E**

Je souhaite dédier cette thèse de doctorat à tous ceux qui ont directement ou indirectement soutenu ces travaux, à ceux qui ont guidé mes réflexions, corrigé mes erreurs et qui m'ont apporté l'écoute et le soutien nécessaire pour mener à bien les présents travaux de recherche.

Le jury

Tout d'abord, je tiens à remercier les membres du jury, Pr. Jean-François Boujut (Président du jury), Pr. Marc Desmulliez (Rapporteur), Pr. Bertrand Rose (rapporteur), Mme Lucie Tournier-Couturier (Examinatrice) et Pr. Philippe Grandcolas (examineur), pour leur bienveillance, leurs analyses pertinentes et leurs retours très constructifs qui ont permis d'ouvrir de nouvelles réflexions pour les travaux futurs.

Le laboratoire

Je remercie le Pr. Améziane Aoussat qui m'a permis de développer ces travaux de recherche au sein du LCPI. Je remercie également le Dr. Nicolas Maranzana pour sa confiance tout au long de ces trois années de recherche et pour son soutien malgré les moments de doutes.

Je remercie l'ensemble de l'équipe encadrante du LCPI pour leur écoute et nos échanges durant les GTT mensuels et en particulier Céline Rodrigo.

Merci à Séverine Fontaine, Valérie Saffar, Pierre Vedel, Bernard Aubagne et Hélène Zimmer pour leur bonne humeur et leur soutien.

Je remercie mes collègues doctorants du LCPI pour tous nos partages dans les moments de rires et dans les moments de doutes. Votre curiosité et nos discussions ont été un enrichissement pour moi.

Je souhaite remercier plus particulièrement Eliot Graeff, collègue de thèse qui est aujourd'hui devenu un ami, avec qui je partage la passion du vivant. Son écoute, Son aide et Son soutien sans faille m'ont permis de maintenir le cap ! De nouvelles aventures dans le monde du biomimétisme nous attendent !

Mes collègues

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à la merveilleuse équipe de Ceebios !

J'ai débuté ma grande aventure dans le domaine du biomimétisme au Ceebios il y a 6 ans, nous n'étions que 2 et aujourd'hui nous sommes 27. J'ai donc eu la chance de découvrir chacune des belles personnes qui composent cette équipe, je tiens à les remercier pour leurs soutiens et leurs aides.

Un merci particulier à ma collègue et amie Estelle Cruz avec qui j'ai partagé les montagnes russes émotionnelles inhérentes aux travaux de thèse. Cette expérience n'a fait que consolider notre belle amitié.

Merci à ma collègue et amie Laura Magro (alias Dr Magro) pour nos échanges passionnants en Normandie mais surtout pour sa gentillesse, son soutien et son aide. Sans oublier que ces années de thèse ont été aussi émerveillées par l'arrivée de trois magnifiques bébé Ceebios !

Merci Dounia pour toutes les belles vidéos de pandas ! Merci Luce-Marie, Chloé, Hugo, Adrien, Eduardo et Juliette pour votre aide si précieuse et pour votre soutien durant les moments de « panique zone ! ».

Merci Olivier, Hadhoum, Delphine, Yann, Bertrand, Thomas, Felix, Phil, Claire, Clara qui ont été d'un grand soutien pour l'épreuve de la soutenance de thèse et avec qui j'ai hâte de collaborer.

Et bien évidemment je remercie de tout cœur Kalina Raskin, directrice générale de Ceebios et amie, sans qui ces travaux n'auraient pas existé. Merci d'avoir cru en moi et en mes capacités de mener à bien ces recherches. Merci pour son écoute, sa bienveillance et son soutien sans faille dans mes grands moments de doute. Je réalise chaque jour la chance que j'ai de travailler à tes côtés !

Je suis fière de faire partie de cette belle équipe Ceebios.

Les expert(e)s et partenaires

Il me tient également à cœur de remercier Tarik Chekchak, Guillian Graves, Alain Renaudin, Pierre-Emmanuel Fayemi, Pathum Bila-Deroussy, Kristina Wanieck pour nos échanges, pour leur temps et pour leur expertise scientifique et pratique si précieuse qui ont enrichi cette thèse de doctorat.

Merci à Anne-Sophie Rössler et à l'équipe Biomim'Reflex de L'Oréal qui ont joué un rôle très important pour les expérimentations présentées dans ces travaux. Merci pour votre aide et votre soutien.

Un merci tout particulier à Juliette BRUN qui fût un pilier durant cette thèse. Merci pour ton temps, ton écoute et ton expertise qui ont été pour moi d'une aide précieuse !

Je tiens également à remercier la Fondation Inicativas et plus particulièrement François Le Jeune, qui a soutenu ces travaux en participant financière à son développement.

Mes proches

Je remercie mes amies Amélie, Océane, Anaïs, Alexandra, Suzon, Yasmine, Marina et Aline pour votre soutien au quotidien, merci pour tous les moments de réconfort et de célébration qui ont été tellement précieux pour moi ! Merci à tous mes ami(e)s qui ont cru en moi !

Mon plus grand remerciement va à ma famille !

Merci à mes parents qui ont toujours cru en moi et qui ont fait de moi celle que je suis aujourd'hui, je vous dois beaucoup ! Merci à ma sœur pour tous les partages de vidéos et de photos de bouledogues qui furent très inspirantes durant ces trois années de recherche. Merci à mes grands-parents pour votre soutien et votre amour !

Vous êtes mes piliers au quotidien. Merci pour tout le soutien et l'amour que vous m'apportez chaque jour.

Merci à mon mari, Florian, ton soutien et ton amour ont été et sont des cadeaux précieux pour moi. Ces années de thèse ont été riche en émotions avec notre mariage et l'arrivée de notre merveilleux fils Lohi. Merci à toi mon fils, qui a partagé avec moi les 7 derniers mois de thèse. Tu es ma plus grande fierté.

Les lecteurs

Pour conclure, j'ai une pensée particulière pour vous lecteur de ces travaux, j'espère que ces recherches sauront répondre à certaines de vos interrogations et vous donner l'envie d'aller plus loin dans la démarche du déploiement de la conception biomimétique. Au plaisir d'échanger avec vous, je vous souhaite une bonne lecture.

Introduction générale.....	9
----------------------------	---

CHAPITRE 1

Contexte des travaux

1.1 Contexte général	17
1.2 Contexte industriel	18
1.2.1 Le biomimétisme au service de la transition écologique et sociétale	18
1.2.2 Contexte industriel français.	19
1.3 Contexte scientifique et académique	26
1.3.1 Contexte scientifique international de la conception biomimétique	26
1.3.2 Contexte académique : Le Laboratoire de Conception de Produits & Innovation.	27
1.4 Enjeux des travaux.....	33
1.4.1 Enjeux de société.....	33
1.4.2 Enjeux industriels.....	33
1.4.3 Enjeux scientifiques.	34
1.5 Synthèse et conclusion du chapitre 1.....	35

CHAPITRE 2

Etat de l'art

2.1 Structure du chapitre 2	37
2.2 La conception biomimétique, une approche complexe.	38
2.2.1 De la bio-inspiration à l'émergence du biomimétisme	38
2.2.2 Formalisation théorique de la démarche : La conception biomimétique.....	39
2.2.3 Axes de recherche et freins pratiques de la conception biomimétique	47
2.2.4 Stratégies de résolution des défis au déploiement de la conception biomimétique	51
2.2.5 Synthèse de la première partie de l'état de l'art.	54
2.3 Processus, facteurs et outils facilitant la collaboration interdisciplinaire et le transfert des connaissances en conception innovante	55
2.3.1 De la modélisation des processus cognitifs au rôle des connaissances en conception.	55
2.3.2 Facteurs, méthodes et outils qui favorisent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire	64
2.3.3 Synthèse de la seconde partie de l'état de l'art.	75
2.4 Conclusion générale de l'état de l'art.....	76
2.4.1 Formalisation de la problématique et des hypothèses de recherche	77
2.4.2 Problématique initiale et hypothèses de recherche connexes.	79
2.4.3 Synthèse de la troisième partie de l'état de l'art.	80

CHAPITRE 3

Expérimentations

3.1 Structure du chapitre 3	82
3.2 Intégration des profils formés au Design en conception biomimétique	84
3.2.1 Expérimentation 1 : Apport des designers pour la génération d'idées en conception biomimétique	84
3.2.1.1 Objectif	84
3.2.1.2 Matériels et méthodes.	84
3.2.1.3 Résultats.	89
3.2.1.4 Discussion, limites et ouverture	90
3.2.2 Expérimentation 2 : Apport des designers pour les défis du travail interdisciplinaire et du transfert de connaissances en conception biomimétique.....	93
3.2.2.1 Objectif	94
3.2.2.2 Matériels et méthodes.	94
3.2.2.3 Résultats.....	98
3.2.2.4 Discussion, limites et ouverture	108
3.3 Adaptation du cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception et d'innovation.	113
3.3.1 Expérimentation 3 : Développement du Processus Technology Pull Interdisciplinary Biomimetic design process.	114
3.3.1.1 Objectif	115
3.3.1.2 Matériels et méthodes.	115
3.3.1.3 Résultats.....	119
3.3.1.4 Discussion, limites et ouverture	135
3.3.2 Expérimentation 4 : Développement d'un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique	137
3.3.2.1 Objectif	138
3.3.2.2 Matériels et méthodes.	138
3.3.2.3 Résultats.....	146
3.3.2.4 Discussion, limites et ouverture	152
3.4 Synthèse et conclusion du troisième chapitre	155
3.4.1 Synthèse du troisième chapitre.....	155
3.4.2 Synthèse des résultats.....	156

CHAPITRE 4

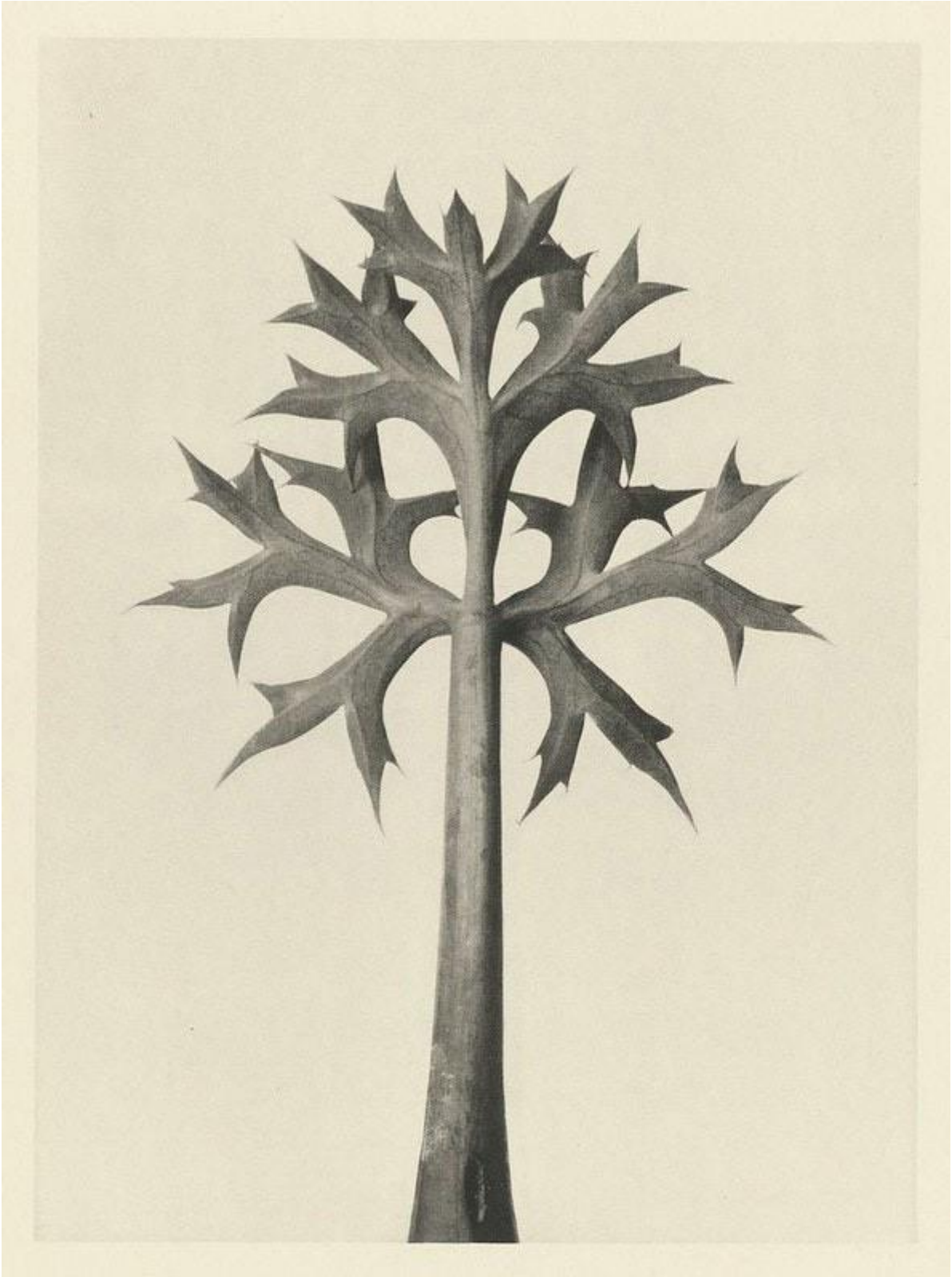
Originalité, contributions et limites des travaux

4.1 Structure du Chapitre 4	159
4.2 Contributions	160
4.2.1 Contribution 1 : Intégration des designers comme leviers pour le déploiement de la conception biomimétique.....	161
4.2.2 Contribution 2 : Augmentation des connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique.....	165
4.2.3 Contribution 3 : Evolution du cadre méthodologique pour favoriser son déploiement.....	166
4.2.4 Contribution 4 : Adaptation du cadre méthodologique de la conception biomimétique.....	170
4.3 Limites globales de nos travaux	171
4.3.1 Limites du contexte des travaux.....	171
4.3.2 Limites du contexte académique et de la cible d'étude de ces recherches.....	172

CHAPITRE 5

Conclusion générale et perspectives de recherches

5.1 Conclusion générale	174
5.2 Perspectives de recherche	176
5.3 Synthèse graphique des travaux de thèse	178
5.4 Publications et communications scientifiques	180
Références	181
Index des figures	201
Index des tableaux	202
Annexes	203
Annexe 1 : Fiches supports ateliers (Expérimentation 1).....	204
Annexe 2 : Questionnaire interviews des experts designers (Expérimentation 3).....	212
Annexe 3 : Questionnaire d'évaluation comparative des processus (Expérimentation 3).....	213
Annexe 4 : Tableau complet des poches de connaissances issues de la bouilloire « Nautile » (Expérimentation 4).....	216
Annexe 5 : Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautile ».....	218



Photographie de Karl Blossfeldt
Eryngium bourgatii. Bourgati's Eryngo
1928
Source : Rijksmuseum

INTRODUCTION GENERALE

Nos modèles de conception, de production et de consommation, hérités de la troisième révolution industrielle, montrent aujourd'hui leurs limites face aux crises environnementale (changements climatiques, perte massive de biodiversité, ...), sociales (augmentation des inégalités et de l'insécurité, ...) et économiques que nos sociétés traversent. La conjonction de ces différentes crises explique les problèmes de plus en plus complexes auxquels sont confrontées les industries. Dans cet environnement, le monde industriel est amené à être en recherche constante d'innovations et d'inspirations novatrices (Boer & Gertsen, 2003). C'est dans ce cadre qu'émerge la conception biomimétique et le biomimétisme.

Avec l'augmentation des moyens d'observation, d'exploration et de compréhension du monde vivant, la connaissance biologique ne cesse d'augmenter, permettant de dévoiler des richesses au potentiel innovant développées durant près de 4 milliards d'années. Un double constat peut être posé. Le premier concerne la prise de conscience mondiale de notre interdépendance avec notre environnement et avec la biodiversité (notamment sous la forme de services écosystémiques) (IPBES, 2019; Roche et al., 2016), d'autant plus avec la crise sanitaire de la COVID 19 que nous traversons. Le second porte sur l'opportunité de prendre comme sources d'inspiration innovantes le monde vivant à ces différentes échelles (des cellules aux écosystèmes). Ainsi, ces deux constats amènent un nouveau regard sur le vivant, qui peut et doit aujourd'hui être considéré comme une source d'inspiration pour les innovations humaines plutôt qu'une simple ressource à exploiter. S'inspirer du vivant pour créer n'est pas une approche nouvelle, comme nous le montrent les fresques de la célèbre grotte de Lascaux, ce qui est nouveau en revanche c'est l'objectif poursuivi derrière ces inspirations. Le vivant a été d'abord vu comme une source d'inspiration formelle et artistique par des artistes ou des architectes :

« Je déclare que l'heure est venue pour l'architecture de reconnaître sa propre nature, de comprendre qu'elle dérive de la vie. »

Frank Lloyd Wright

Le vivant a ensuite représenté une source d'inspiration pour des innovations techniques notamment dans les secteurs de l'ingénierie mécanique et électronique (la Bionique / la Biomimétique) (Ricard, 2015; Roth, 1983). Ainsi au milieu du XXe siècle, les chercheurs et les concepteurs se sont intéressés à la formalisation théorique du passage de l'inspiration de la nature vers la génération d'innovation humaine : La conception biomimétique (Fayemi, 2016). Enfin, depuis le début du XXIème siècle, face aux contraintes environnementales, sociétales et industrielles, on observe une bascule vers une recherche d'inspirations du vivant ayant pour but de repenser l'ensemble de nos paradigmes de conception, de production et d'innovation et ainsi générer des innovations durables, responsables et respectueuses de l'environnement : Le biomimétisme (Fayemi, 2016)

Bien que prometteuses, la mise en œuvre de la conception biomimétique et de l'approche du biomimétisme reste complexe et rencontre de nombreux freins méthodologiques et pratiques. Les présents travaux de thèse ont pour objectif d'alimenter les recherches en conception biomimétique (cadre méthodologique) afin de favoriser son déploiement dans les pratiques de conception et d'innovation pour la génération d'innovation durable et responsable (biomimétisme). Ainsi une problématique initiale s'est posée en amont de ces travaux de thèse :

« *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* »

Salariée depuis 2015 au sein de Ceebios, le centre d'études et d'expertises en biomimétisme, en tant que chargée de mission Design, c'est naturellement que mes projets professionnels m'ont amenée à faire le rapprochement entre le Biomimétisme et le Design. Ce rapprochement a permis de soulever quatre grands constats :

1. Du point de vue industriel, peu de designers sont intégrés dans le cadre de projets industriels traités par la conception biomimétique. Le plus souvent ces profils sont mobilisés en aval des projets afin de formaliser, matérialiser et communiquer sur les innovations générées.
2. Du point de vue scientifique, nous n'avons identifié que très peu de recherches rapprochant le Design et les approches s'inspirant du vivant. Le plus souvent ces recherches portent sur les inspirations formelles des designers (biomorphisme) (Lestari, 2020; Tavsan & Sonmez, 2015), sur les apports des connaissances biologiques pour le design et les designers (Appio et al., 2017; Volstad & Boks, 2008) ou encore sur l'intégration de la conception biomimétique dans les pratiques des designers (Rovalo et al., 2020; Rovalo & McCardle, 2019). Cependant, aucune recherche à notre connaissance, ne s'est intéressé aux apports et au rôle du Design pour la conception biomimétique et pour le biomimétisme.
3. En parallèle, le Design est reconnu par la communauté scientifique comme étant un acteur majeur et moteur de l'innovation humaine (Dell'era & Verganti, 2009; Verganti, 2009), que ce soit en gestion industrielle (Design Management (Mozota, 2018)) ou en capacité d'innovation créative et novatrice (Landoni et al., 2016). De plus, que ce soit du point de vue scientifique ou industriel, les profils formés au Design (designers) sont aujourd'hui connus pour leur capacité d'adaptation aux évolutions de la société. Cette capacité leur permet d'identifier et d'interpréter les connaissances sur les modèles et tendances socioculturels émergents et sur les besoins du marché (Dell'era, 2009) pour générer de nouveaux produits et services. Ainsi, les designers ont aujourd'hui une responsabilité dans la prise en compte des grands enjeux sociaux et environnementaux afin de créer de nouveaux environnements et communautés responsables et résilients (Findeli & Bousbaci, 2005). Ils peuvent être considérés comme des « interprètes » clés des modèles socioculturels en évolution (Dell'era et al., 2009) créant un pont entre l'industrie et la société.
4. Enfin, le dernier constat concerne une observation personnelle de ma pratique au sein de l'écosystème du biomimétisme français. J'ai pu relever, lors de l'observation et de l'accompagnement

de projets industriels, que la présence de designers dans les équipes de conception facilite la communication entre les parties prenantes présentes ainsi que le franchissement des étapes complexes du passage des connaissances biologiques vers la génération de concepts bio-inspirés.

Sur cette base, ces travaux de thèse se sont articulés autour de la problématique de recherche ciblée :

« Comment l'intégration de profils formés au design peut optimiser le processus de conception biomimétique problem-driven unifié et favoriser sa diffusion ? »

Deux hypothèses sont formalisées pour y répondre. La première aborde les capacités créatives des designers : *L'intégration de profils formés au design favorise la génération de concepts inspirés du vivant*. La seconde porte sur les capacités des designers à transférer les connaissances d'un champ à un autre et de créer un dialogue entre les parties prenantes : *l'intégration de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales*.

Ces deux hypothèses formalisées sur la base de notre état de l'art ont été étudiées au travers de récoltes de données pratiques et d'études expérimentales via le suivi de trois ateliers étudiants et d'une étude de cas industrielle. L'ensemble des résultats nous ont permis de formaliser des recommandations méthodologiques et pratiques favorisant le déploiement de la conception biomimétique et de mettre en lumière le rôle particulier des profils formés au Design dans le cadre de la conception biomimétique.

Sur la base d'observations inattendu lors de nos deux premières expérimentations, nous avons eu l'opportunité de réaliser deux expérimentations en collaboration avec deux chercheurs qui nous ont permis de formaliser de nouvelles pistes de recherches pour répondre à notre problématique initiale. Nous avons ainsi pu formaliser des contributions scientifiques et industrielles sur (1) l'adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié aux pratiques de conception et à la gestion des risques perçus et sur (2) le choix des parties prenantes tout au long d'un projet dans le cadre de la conception biomimétique.

Ce manuscrit de thèse de doctorat est composé de cinq chapitres formalisant notre logique de recherche :

Chapitre 1 - Contexte des travaux

Le premier chapitre a pour objectif de poser le contexte de ces recherches et de mettre en lumière les grands enjeux de cette thèse de doctorat. Dans un premier temps le contexte général (§1.1) de ces travaux sera présenté. Puis le contexte industriel (§1.2) sera abordé avec un focus particulier sur le contexte industriel français de la conception biomimétique et sur Ceebios, à l'initiative de ces recherches. Nous présentons ensuite le contexte scientifique (§1.3) international de la conception biomimétique ainsi que le contexte académique avec la présentation du Laboratoire de Conception Produit et Innovation (LCPI). Nous détaillons également dans ce chapitre notre méthodologie de recherche, la « recherche-action », ancrée et influencée par l'écosystème industriel de Ceebios et notre posture de designer-chercheur.

Enfin, nous concluons ce chapitre par la présentation des enjeux (§1.4) sociétaux, industriels et scientifiques de ces travaux de thèse.



Figure 1. Structure du premier chapitre – contexte des travaux

Chapitre 2 - Etat de l'art

Le second chapitre présente notre état de l'art et se découpe en trois parties (§2.1).

Nous débutons cet état de l'art par la présentation de la conception biomimétique (§2.2). Nous mettons en lumière le développement scientifique de cette approche en présentant sa formalisation théorique, les axes de recherches actuels et les freins identifiés pour sa diffusion. Nous concluons cette première partie par les stratégies de résolutions aujourd'hui poursuivies pour combler ces freins.

Puis, nous nous sommes intéressés aux leviers permettant de relever ces freins présents ou recommandés en conception innovante (§2.3). Nous présentons ainsi les processus, les facteurs, les méthodes et outils facilitant le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire. Cette seconde partie nous a permis de justifier scientifiquement de l'intérêt de rapprocher le Design et la conception biomimétique.

Enfin, nous concluons ce chapitre par la définition de notre problématique de recherche et par la formalisation de nos hypothèses, nous permettant ainsi de définir et cadrer nos expérimentations (§2.4).

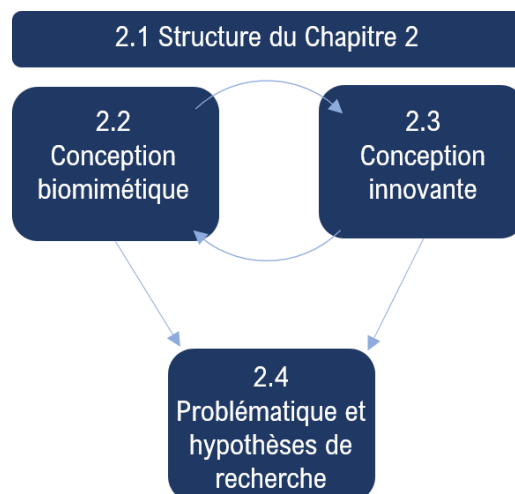


Figure 2. Structure du deuxième chapitre – Etat de l'art

Chapitre 3 - Expérimentations

Après la présentation de la structure de ce chapitre (§3.1), nos deux premières expérimentations sont détaillées (§3.2). Les résultats obtenus ont permis de formuler une réponse à notre problématique de recherche ciblée en justifiant l'intérêt d'intégrer des profils formés au Design pour favoriser (1) la génération de conception originaux et contextualisés inspirés du vivant, (2) la collaboration interdisciplinaire et (3) le transfert de connaissances entre les connaissances technologiques, biologiques mais également contextuelles. De plus, sur la base de nos résultats de la seconde expérimentation nous proposons une évolution du processus de conception biomimétique prenant en compte des observations pratiques et l'intégration d'actions clés facilitant les étapes complexes où le transfert de connaissances à lieu.

Puis nos expérimentations 3 et 4 (§3.3), qui apportent des résultats complémentaires à notre cible de recherche, sont présentées. Ces expérimentations ayant pour objectif de formaliser des premières pistes de réponse pour notre problématique initiale, se sont appuyées sur deux grands constats issus de notre état de l'art et de nos deux premières expérimentations : (1) il faut adapter le cadre méthodologique théorique au cadre pratique et (2) il est difficile de choisir les parties prenantes lors d'un projet en conception biomimétique.

Notre troisième expérimentation, en collaboration avec Eliot Graeff nous a permis de proposer une évolution du processus de conception biomimétique problem-driven unifié afin qu'il s'adapte aux besoins des praticiens.

Notre quatrième et dernière expérimentation à quant à elle permis de développer un modèle théorique de pilotage de projet en conception biomimétique facilitant la structuration des connaissances et le choix des parties prenantes tout au long du projet.

Chaque expérimentation est détaillée en termes d'objectif(s), de matériels et méthodes, de résultats, et sera conclue par une discussion des méthodes expérimentales choisies et des résultats, relevant ainsi les limites relatives à chacune de ces expérimentations.

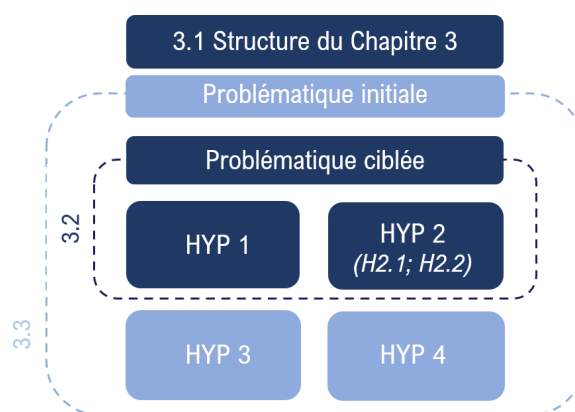


Figure 3. Structure du troisième chapitre - Expérimentations

Chapitre 4 - Originalité, contributions et limites des travaux

Dans ce quatrième, nous débutons par la mise en lumière de l'originalité des présents travaux de thèse (§4.1) : *la mise en regard du Design et de la conception biomimétique*.

Puis, l'ensemble de nos résultats de recherche sont repris afin de formaliser nos quatre grandes contributions (§4.2) découpées en apports scientifiques, industriels et pédagogiques. Ces contributions abordent (1) l'intégration des designers comme leviers pour le déploiement de la conception biomimétique, (2) l'augmentation des connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique, (3) l'évolution du cadre méthodologique pour favoriser son déploiement et (4) l'adaptation du cadre méthodologique de la conception biomimétique.

Ce chapitre se conclut par les limites globales de ces travaux (§4.3) en abordant à la fois les limites liées au contexte et celles liées à l'objet d'étude de ces recherches.

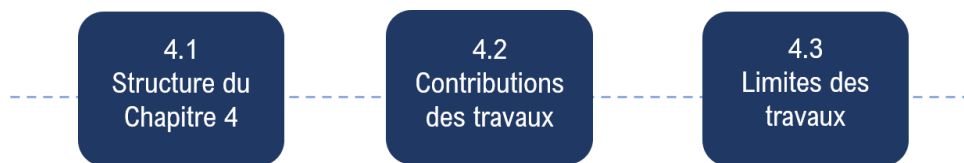


Figure 4. Structure du quatrième chapitre - Originalité, contributions et limites des travaux

Chapitre 5 - Conclusion générale et perspectives de recherche

Ce dernier chapitre synthétise les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse afin de mettre en lumière la logique de recherche mise en place et les apports qui en résultent (§5.1). Les perspectives de recherches émergentes sont présentées (§5.2). Elles concernent (1) le développement des recherches concernant le rôle et les impacts des designers et du Design pour la conception biomimétique (2) le développement méthodologique de la conception biomimétique et (3) la proposition d'axes de recherches complémentaires aux présents travaux, notamment relatifs aux apports de la conception biomimétique pour l'évolution du métier de designer et l'étude des profils présents ou devant être présent en conception biomimétique.

Enfin ce chapitre se conclut par une synthèse graphique (§5.3) des présents travaux et la liste de nos publications et communications scientifiques (§5.4) relatives aux résultats présentés dans le troisième chapitre.



Figure 5. Structure du cinquième chapitre – Conclusion générale et perspectives de recherche

L'objectif global de ces travaux est d'apporter des premiers résultats et des premières recommandations méthodologiques et pratiques qui favoriseront la diffusion de la conception biomimétique et du biomimétisme dans les pratiques de conception et d'innovation.



CHAPITRE 1

Contexte des travaux

1.1 Contexte général

1.2 Contexte industriel

- *Le biomimétisme au service de la transition écologique et sociétale*
- *Contexte industriel français*

1.3 Contexte scientifique et académique

- *Contexte scientifique international de la conception biomimétique*
- *Contexte académique : Le Laboratoire de Conception de Produits & Innovation*

1.4 Enjeux des travaux

- *Enjeux de société*
- *Enjeux industriels*
- *Enjeux scientifiques*

1.5 Synthèse et conclusion du chapitre 1

1.1 Contexte général

« Nous sommes en train d'éroder les fondements mêmes de nos économies, nos moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, la santé et la qualité de vie dans le monde entier. »

Sir Robert Watson, président de intergovernmental Science-Policy
Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)

Les changements climatiques, les grands déséquilibres écologiques (diminution massive de biodiversité, dégradation des écosystèmes, conversion des milieux, augmentations des surfaces d'échange ...)¹, les crises économiques et les crises sanitaires de plus en plus fréquentes (IPBES, 2019) sont les résultats des paradigmes de développement, de conception, de production et de consommation choisis par nos sociétés modernes depuis la révolution industrielle. Il en émerge une prise de conscience sur la nécessité de faire évoluer notre rapport d'interdépendance avec notre environnement.

Les pandémies telles que Ebola et la COVID-19 illustrent aujourd'hui ces propos en nous rappelant les liens intrinsèques entre la santé humaine, animale et celle des écosystèmes (Chien, 2013; Olivero et al., 2017). Ce contexte, incite plus que jamais à appréhender de façon systémique nos problématiques de complexité croissante pour penser résilience et soutenabilité globale, environnementale et économique. Pour ce faire, la conception innovante est conduite à rechercher de nouvelles approches d'adaptation et de développement, plus efficaces et respectueuses de nos écosystèmes. De nouveaux schémas de conception et de collaboration sont alors développés incitant à l'interdisciplinarité et à la recherche de nouvelles sources d'inspiration.

C'est dans ce contexte général que s'inscrit ce travail de thèse de doctorat visant à la fois à fournir des ressources pratiques pour le Centre d'études et d'expertises en biomimétisme (Ceebios) et à contribuer au développement scientifique de la conception biomimétique. Ainsi, ce chapitre présente le contexte industriel des travaux menés à Ceebios dont l'objectif est d'accélérer la transition écologique et sociale par le biomimétisme, et le contexte académique du Laboratoire de Conception Produit Innovation (LCPI) qui s'intéresse à l'optimisation du processus de conception et d'innovation et qui a encadré l'une des premières thèses explorant les liens entre conception biomimétique et innovation. Enfin, ce chapitre se conclue par la présentation des grands enjeux relatifs aux présentes recherches.

¹ Conférence dans le cadre des webinaires organisés par Ceebios – Intervention du Prof. Dr. Philippe Grandcolas

1.2 Contexte industriel

Cette thèse de doctorat est à l'initiative de Ceebios, le centre d'études et d'expertises en biomimétisme. Pour apporter un éclairage sur le contexte industriel de nos recherches nous présentons ici, une brève introduction sur le rôle du biomimétisme pour la transition écologique et sociétal et pour l'innovation. Puis nous nous concentrons sur l'écosystème industriel français autour du biomimétisme. Enfin, nous concluons par la présentation détaillée de Ceebios, ses missions, ses réalisations, son évolution ainsi que le positionnement et l'intégration de ce travail dans les activités Ceebios.

1.2.1 Le biomimétisme au service de la transition écologique et sociétale

1.2.1.1 Définitions

Nous souhaitons dès maintenant apporter une précision sémantique pour éviter toute confusion lors de la lecture de ce document. Nous allons employer fréquemment trois termes clés :

Bio-inspiration, Biomimétisme et Biomimétique. Nous utilisons ici les définitions de la norme ISO 18458 (ISO, 2015) :

Bio-inspiration : approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques.

Biomimétisme : philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (social, environnemental et économique).

Biomimétique : 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.

Nos travaux apportent des avancées pratiques et scientifiques pour la conception biomimétique puisque nous nous intéressons aux processus de conception biomimétique et à la coopération interdisciplinaire des praticiens. Cependant, en accord avec les missions de Ceebios et nos convictions personnelles, nous avons tout au long de nos travaux porter une attention particulière à la notion de développement durable.

Les résultats et les apports proposés dans ce manuscrit ont donc pour objectif global de faire avancer les connaissances et le déploiement de la conception biomimétique et du biomimétisme.

1.2.1.2 Le biomimétisme, une approche prometteuse

Aujourd'hui les entreprises et collectivités sont confrontées à un triple enjeu. Un enjeu de compétitivité, dans un monde globalisé où les consommateurs souhaitent avoir accès à une grande variété de produits et de services de plus en plus personnalisés, de haute qualité, à faibles coûts et disponibles dans des délais de plus en plus courts. Un enjeu de responsabilité sociétale, dans un monde où les inégalités ne cessent d'augmenter. Enfin, un enjeu de responsabilité environnementale, face

aux dérèglements climatiques et à l'effondrement de la biodiversité induits majoritairement par les activités humaines basées entre autres sur les énergies fossiles, comme le constatent de nombreux rapports d'experts (GIEC et IPBES/ONU, Planetary Boundaries/Stockholm Resilience Center, etc.).

Face à ces enjeux, les décideurs, entreprises et organisations sont poussés progressivement à remettre en cause le cœur même de leurs modèles économiques et organisationnels ainsi que leurs modèles de conception et d'innovation.

C'est dans ce contexte que le biomimétisme émerge comme une voie prometteuse et inédite pour innover de manière responsable avec un fort potentiel disruptif, pour l'ensemble des filières industrielles. Cette approche s'inscrit aujourd'hui, dans un certain nombre d'actions gouvernementales notables à l'échelle internationale, européenne et française (Ceebios & Myceco, 2020). Dès 2007, le biomimétisme est reconnu nationalement comme l'un des outils de la prochaine révolution industrielle (Laffitte & Saunier, 2007) permettant de s'appuyer sur l'étude des systèmes naturels, sélectionnés par près de 4 milliards d'années d'évolution, pour créer de nouveaux produits, services et modèles d'organisation durables.

Par exemple dans le secteur de l'énergie, les industries tendent à avoir recours aux énergies solaires, à séquestrer du dioxyde de carbone atmosphérique et à mettre en œuvre des sources diversifiées et décentralisées. Ces objectifs correspondent parfaitement aux stratégies adoptées par les systèmes vivants. De même, les principes de la chimie verte développée dans les années 90 convergent vers ceux des principes biologiques (utilisation d'éléments atomiques abondants, conditions de température et de pression ambiantes et modérées, biodégradabilité et biocompatibilité ...). Nous pouvons également prendre l'exemple des secteurs numériques (TIC, IA, ...) qui trouveront dans le monde vivant des stratégies favorisant une approche frugale et optimisée de gestion de l'information indispensable pour limiter les coûts énergétiques et la consommation de ressources tout en augmentant l'adaptabilité et la résilience.

En ce sens, le biomimétisme représente une méthode d'innovation novatrice qui intéresse de plus en plus les entreprises et organisations souhaitant innover de manière durable et responsable. Cette approche est intrinsèquement interdisciplinaire et plurisectorielle par la diversité des secteurs concernés et par la diversité des acteurs impliqués (biologistes, ingénieurs, architectes, chercheurs ...) impliquant un nécessaire dialogue entre le monde de la recherche académique et l'innovation industrielle.

1.2.2 Contexte industriel français

1.2.2.1 Opportunité française

Selon le dernier recensement² du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), le territoire français héberge près de 10 % des espèces connues au niveau mondial notamment via ses territoires d'Outre-Mer. Cela confère à la France un avantage mondial sur la ressource primaire du biomimétisme, la donnée biologique, sur laquelle se base près de 200 équipes de recherche reconnues

² D'après le référentiel taxonomique pour la France ou TAXREF v11, UMS Patrimoine Naturel et Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN), 6 décembre 2017

aujourd'hui comme une excellence scientifique de niveau international en biomimétisme. En quelques chiffres, la part de la biodiversité mondiale représentée en France correspond à (Figure 6) :



Figure 6. Richesse de la biodiversité française. « Quels leviers de développement & quelles perspectives pour la France ? » – Restitution de la journée de travail France Stratégie- Ceebios & Myceco

Les collections du MNHN sont les plus riches du monde, avec celles du Muséum de Londres et de la Smithsonian institution de Washington. On estime à environ 68 millions de spécimens l'ensemble des objets des collections du Muséum à la disposition des chercheurs, qui pourraient à l'avenir servir d'inspiration aux ingénieurs.

Aujourd'hui, des centaines d'acteurs économiques français dont des grands groupes et entreprises sont conscients de ce potentiel et s'approprient progressivement le concept, la démarche, jusqu'à, pour certains, développer des premières innovations bio-inspirées.

1.2.2.2 Ceebios, Centre d'études et d'expertises en biomimétisme

Dans ce contexte, Ceebios a vu le jour en 2014. Créé à l'origine sous la forme d'une association loi 1901 fondée par un collège d'acteurs publics à l'initiative de la Ville de Senlis, Ceebios a évolué en Société Coopérative d'Intérêt Collectif (SCIC) à but non lucratif le 1er janvier 2021. Son objectif principal est d'accélérer la transition écologique et sociétale par le biomimétisme, en fédérant un réseau d'acteurs experts et en mutualisant et développant les ressources, outils et méthodologies indispensables à l'appropriation de la démarche de biomimétique durable par les secteurs académiques, institutionnels et économiques, afin de faciliter l'émergence, la diffusion et l'appropriation d'innovations responsables bio-inspirées dans l'ensemble des domaines.

Missions et activités

Pour ce faire, six axes d'action sont aujourd'hui déployés : (1) Fédérer le réseau de compétences en biomimétisme, (2) Accompagner les projets innovants, (3) Développer et déployer des outils et des méthodologies communes, (4) Accompagner l'enseignement, (5) Communiquer et influencer, (6) Démontrer.

- (1) Fédérer les acteurs nationaux et européens : Ceebios mobilise depuis 6 ans un grand nombre d'acteurs allant des centres de recherche académique³ aux groupes industriels⁴ en passant par les institutions économique⁵, autour de Groupe d'Innovation Stratégique thématiques (habitat, matériaux, gestion de l'information, formation, coordination interrégionale ...). De plus, une cartographie des compétences publiques et privées du biomimétisme en France a été réalisée. Ainsi, depuis 2015, Ceebios a identifié 400 acteurs sur le territoire national et noué des collaborations à l'international (Europe, Japon, Etats-Unis). Ceebios représente alors un cadre d'intérêt pour nos travaux de doctorat présentés dans ce manuscrit puisqu'il nous a permis d'observer la pratique de la conception biomimétique dans une diversité de secteurs et de nous appuyer sur le réseau de Ceebios pour tester nos hypothèses de recherche.
- (2) Accompagner les projets innovants : Ceebios met en place des ateliers d'émergence et de créativité, des études industrielles (recherche de modèles biologiques d'intérêts, transposition techniques, prototypage rapide, aide à la maturation TRL) et des accompagnements méthodologiques et stratégique pour l'intégration du biomimétisme dans les pratiques de conception et d'innovation. Près d'une soixantaine de missions d'études en Recherche & Développement (de l'étude bibliographique au prototype préindustriel), de conseil en déploiement méthodologique et d'assistance à maîtrise d'ouvrage ont été menées par Ceebios depuis sa création. Ces accompagnements sont à destination des acteurs industriels français mais également à destination de collectivités, à l'instar de la région Nouvelle-Aquitaine, qui a été accompagnée pour l'élaboration de sa feuille de route du biomimétisme. De plus, Ceebios mobilise des experts autour de projets communs de Recherches & Développement (Cosmétique, Energie, ...). Enfin, depuis 3 ans Ceebios propose de concevoir et mettre en place des processus internes adaptés aux entreprises pour l'intégration du biomimétisme dans les stratégies d'innovation et de soutenabilité. C'est notamment sur ce dernier point que nos travaux de thèse de doctorat se positionnent avec une volonté d'apporter des leviers pour le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques d'innovation et de conception.
- (3) Développer et déployer des outils et des méthodologies communes : Depuis 2017, trois thèses de doctorat, dont celle présentée dans ce manuscrit, sont portées en partenariat avec les Arts et Métiers Sciences et Technologies de Paris ou le Muséum national d'Histoire naturelle de Paris. Un post doctorat a également été initié en 2020 relatif à la fouille de la donnée biologique par l'IA. Enfin, Ceebios a également contribué aux instances de normalisation internationale (ISO) et participe activement à des conférences et congrès internationaux, et comités d'orien-

³Près de 200 équipes de recherche étudient des modèles biologiques pour des applications dans de multiples domaines.

⁴Grands groupes, ETI, PME, startups.

⁵Collectivités, pôles, CCI et autres opérateurs, associations.

tation et d'évaluation européens, ainsi qu'à des projets de recherche (COST RESTORE, e-scaled, InNature...) et collabore avec les réseaux homologues du biomimétisme en Europe, Etats-Unis et Japon. Nos travaux se sont naturellement nourris des réflexions et avancées que nous venons de citer.

- (4) Accompagner l'enseignement : Ceebios contribue, depuis sa création, au développement d'ateliers, de programme et de cursus d'enseignement auprès d'une quarantaine d'écoles et universités de l'enseignement supérieur. Cette connaissance des initiatives de formation a permis de dresser une première cartographie des cursus et modules existants aux échelles européennes et françaises afin de pouvoir informer et guider les étudiants. Ceebios a également participé au développement de deux formations diplômantes (masters), l'une continue en entreprise développé avec le MNHN et L'École Nationale Supérieure de Création Industrielle (ENSCI Les Ateliers) qui a débuté à la rentrée 2019 et qui délivre un diplôme de spécialisation en biomimétisme et design. La seconde sur les matériaux bio-inspirés qui a été lancée en septembre 2020 par l'Université de Pau et des Pays de l'Adour. Outre ces formations d'enseignement supérieur, Ceebios en collaboration avec l'Institut des Futurs Souhaitables, réalise des formations sur mesure au sein des entreprises. Pour favoriser ce déploiement (i) un groupe de travail sur la formation a été mis en place et fédère près d'une vingtaine d'organismes de l'enseignement supérieur, (ii) des ressources pédagogiques sont développées et mises à disposition des enseignants et du grand public. Enfin, Ceebios participe au projet européen InNature⁶, dont l'objectif est de sensibiliser et d'améliorer les compétences en biomimétisme dans une démarche de reconnexion à la nature. Nos présents travaux ont également pour vocation d'apporter, modestement, de nouvelles briques de connaissances pour alimenter l'enseignement du biomimétisme et de la conception biomimétique.
- (5) Communiquer et influencer : Ceebios interpelle et alerte sur les opportunités et les avancées de la conception biomimétique et du biomimétisme par différente voie de communication. Ainsi, plus de 100 conférences par an sont effectuées en France et à l'étranger et Ceebios intervient de plus en plus dans les médias (journaux, revues scientifiques, télévision...). Ceebios a participé à la création d'une série documentaire sur le biomimétisme en France (Nature=Future !) et a animé une série de reportages dédiés aux grandes thématiques du biomimétisme sur la chaîne Planet (SuperNature). Ceebios contribue également à la rédaction de différents rapports tels que le rapport du CESE dédié à la thématique (Ricard, 2015), le projet de loi Biodiversité de 2015⁷, le rapport « La biodiversité, une opportunité pour le développement économique et la création d'emplois » (Delannoy, 2016), la norme expérimentale de L'AFNOR sur l'éco-conception et le biomimétisme, publiée en mars 2017 (Afnor, 2017) ou encore le rapport « Nature Based Solution » pour la commission européenne⁸.

⁶ <http://innature-project.eu/>

⁷ <https://ceebios.com/2015/03/18/le-biomimetisme-au-coeur-du-projet-de-loi-biodiversite/>

⁸ https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment_en

- **(6) Démontrer** : En 2021, Ceebios, le MNHN et le pôle de compétitivité EuraMaterials lancent le premier programme français d'envergure sur le biomimétisme : Bio-inspired Materials Open Innovation Generator (BiOMIg). Dans un format d'innovation ouverte, il s'agit d'accélérer l'éco-conception de matériaux bio-inspirés à travers des plateformes numériques et techniques articulées autour d'une matériauthèque du vivant. Par son rôle d'interface et ses missions qui fédèrent différents acteurs, Ceebios constitue un remarquable terrain d'expérimentation pour le déploiement de l'innovation bio-inspirée.

C'est dans ce cadre que Ceebios a proposé d'initier les travaux présentés dans ce manuscrit, avec des répercussions attendues sur l'ensemble de ses activités. Plus spécifiquement, ces réflexions contribuent aux actions d'accompagnement de projets innovants et de développement et déploiement des outils et des méthodologies communes (Figure 7). Notons également que ces recherches alimentent les questions de la formation et la mise en place du programme BiOMIg (mission « Démontrer »).

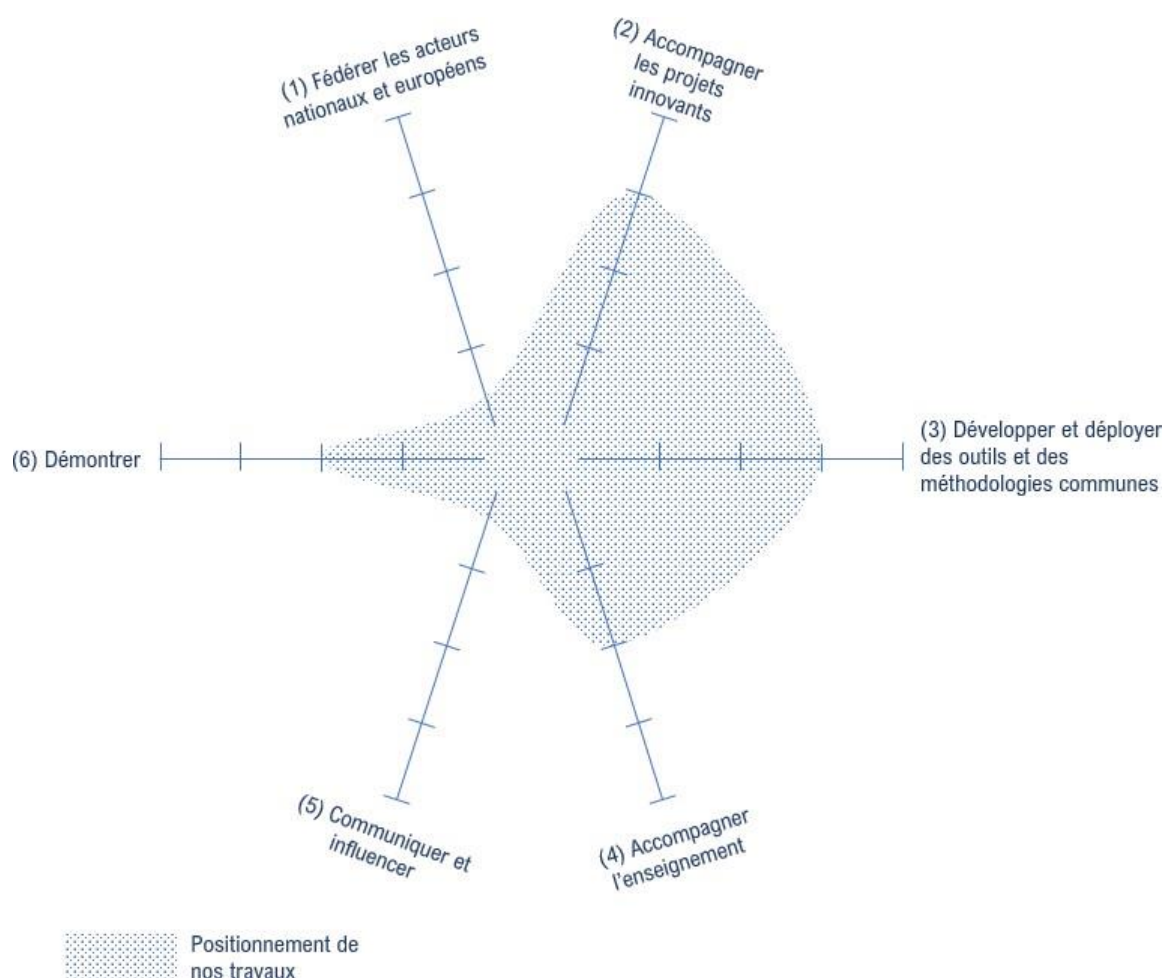


Figure 7. Positionnement de nos travaux de thèse par rapport aux missions de Ceebios

Une équipe et des expertises pluridisciplinaires

L'équipe opérationnelle de Ceebios est pluridisciplinaire et n'a cessé d'augmenter durant nos trois années de thèse de doctorat. De cinq salariés en 2017, Ceebios compte aujourd'hui une vingtaine de collaborateurs (architectes, biologistes, designers, ingénieurs, journaliste scientifique, physico-chimistes, urbaniste, ...) regroupés en 8 pôles interconnectés : le pôle direction, le pôle développement national & territorial, le pôle études industrielles, matériaux & fouille de la donnée biologique lié avec le pôle en charge du programme BiOMIG, le pôle architecture & urbanisme, le pôle formation, le pôle communication et le pôle design & méthodologies transverses. Durant ces travaux de recherche nous avons participé à la création de ce dernier pôle dans lequel j'évolue actuellement. L'objectif du pôle design & méthodologies transverses est double. D'une part, formaliser une méthodologie interne harmonisant les apports, outils et supports méthodologiques existants et provenant de diverse disciplines et expériences, afin de définir une base méthodologique évolutive interne en cohérence avec les missions de Ceebios. D'autre part, formaliser une méthodologie générique et adaptable à déployer lors des accompagnements industriels. Pour ce faire ce pôle est en interaction avec l'ensemble des équipes.

Ainsi ces travaux de thèse sont principalement au cœur du pôle design & méthodologies transverses et impacteront le pôle études industrielles, matériaux & fouille de la donnée biologique, le pôle formation et le pôle en charge du programme BiOMIG (Figure 8).



Figure 8. Positionnement de nos travaux de thèse par rapport aux pôles de Ceebios

1.2.2.3 Origine de nos travaux de thèse de doctorat : un intérêt particulier pour le rôle des designers

Comme nous l'avons décrit, Ceebios connaît une grande croissance depuis sa création, à l'instar de l'intérêt que porte le monde industriel pour la conception biomimétique et le biomimétisme. Cette croissance a permis à Ceebios de fédérer un grand nombre d'acteurs nationaux autour de grandes thématiques de recherche (habitat, matériaux, ...) et de structurer une première démarche d'accompagnement pour la génération d'innovations inspirées de la nature. Malgré ces avancées Ceebios fait encore face à différents défis et problématiques : *Quelles sont les leviers pour faciliter le déploiement de la conception biomimétique ? Comment faciliter les étapes complexes que demande la conception biomimétique ? Comment rendre l'approche bio-inspirée industriellement efficace ?*

En parallèle, ayant rejoint Ceebios en 2015, lors de son déploiement opérationnel, nous avons pu faire deux constats qui constituent la base de nos travaux. Le premier fût l'observation que lors de différents accompagnements de projets, la présence de designers permettait de faciliter les étapes complexes d'interface entre le monde biologique et le monde technologique. Pour donner suite à cette observation et à l'agrandissement de l'équipe opérationnelle, nous nous sommes alors interrogés sur le rôle de chacun des profils en interne avec un intérêt particulier pour les designers. Lors de nos premières recherches en tant que praticiens designers à Ceebios nous avons pu constater que très peu de recherches s'intéressent aux apports mutuels entre le domaine du Design et la conception biomimétique qui le plus souvent se cantonnent à un lien purement esthétique, hérité du mouvement Art Déco des années 1910. Ce lien réducteur ne prend pas en compte l'évolution du rôle des designers pour nos sociétés :

« La particularité du design est qu'il n'existe pas de définition unique et définitive, puisqu'il se réinvente à chaque époque, en suivant les évolutions, les cultures et les apports des designers du monde entier. »

Alliance Française des designers⁹

Le second constat fût que malgré la génération de nombreuses méthodologies et processus de conception biomimétique dans la littérature scientifique, les approches employées en pratique étaient majoritairement empiriques du fait de la diversité des domaines d'applications et de la diversité des équipes de conception.

Sur cette base, Ceebios a proposé d'initier les présents travaux de thèse qui ont pour ambition de fournir des leviers facilitant le déploiement et l'adaptabilité du biomimétisme et de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation, grâce notamment à l'étude du rôle des designers dans le cadre particulier de la conception biomimétique. Cette orientation de recherche engendre une posture singulière de notre part. Lors de ces trois années de thèse de doctorat nous avons adopté une posture de praticien designer et de chercheur. En effet, dans le cadre de notre activité de conseil, nous avons questionné notre propre pratique en tant que designer évoluant dans le domaine du biomimétisme. Dans le cadre de nos activités de recherche nous avons observé des designers intégrés dans le développement de projets biomimétiques.

⁹<http://www.alliance-francaise-des-designers.org/definition-du-design.html>

Afin de valider et justifier nos observations et nos intuitions, nous avons fait le choix de prendre pour point de départ de notre thèse de doctorat un cadre de recherche élargi, posant la question (problématique initiale) :

Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?

Afin d'être au plus près des contraintes et enjeu du monde industriel, nous avons fait le choix d'effectuer notre recherche au sein d'un laboratoire spécialisé en conception innovante, le Laboratoire de Conception de Produits & Innovation, présenté dans la prochaine section qui décrit le cadre académique et scientifique de nos travaux.

1.3 Contexte scientifique et académique

Pour compléter le contexte de nos travaux nous présentons dans cette partie, le contexte scientifique et académique de cette thèse de doctorat. Après une brève présentation du contexte scientifique international de la conception biomimétique nous détaillons notre contexte académique au travers de la présentation du LCPI et des recherches associées menées dans ce laboratoire. Enfin, nous concluons par la présentation de l'approche « Recherche-action », approche que nous avons suivi tout au long de ces travaux de thèse.

1.3.1 Contexte scientifique international de la conception biomimétique

La conception biomimétique fait état d'un fort développement scientifique au cours des deux dernières décennies, notamment illustré par la multiplication de publications scientifiques traitant du sujet (Lepora et al., 2013; Sharma & Sarkar, 2019).

Récemment des journaux de référence en sciences de la conception, comme Design Studies ou encore Journal of Mechanical Design ont mis en avant la biomimétique et le biomimétisme au travers de publications de numéros consacrés à cette thématique. Cette tendance est également observée dans les conférences scientifiques qui, de plus en plus, valorisent les recherches liées à ce domaine au travers des sessions spéciales à l'instar des conférences de la Design Society comme : Design International Conference, l'International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE)¹⁰ ou encore celle de l'International Conference on Engineering Design (ICED). Cet intérêt de la Design Society pour la conception biomimétique se renforce en 2019, sous l'impulsion du Pr. Julian Vincent, qui a influencé la mise en place d'un « Special Interest Group » (SIG) dédié aux questions de mise en œuvre de la biomimétique et du biomimétisme dans nos pratiques de conception.

Ainsi les sciences de la conception abordent de plus en plus les problématiques liés à la conception biomimétique afin de comprendre, formaliser et déployer les processus et outils qui lui sont associés. Plusieurs axes de recherches peuvent être identifiés et sont détaillé dans notre état de l'art

¹⁰ Dans laquelle nous avons publié l'article: Letard A., Graeff E., Maranzana N., Raskin K., Aoussat, A: « How do designers impact the biomimetic concepts typology? », 22e International Conference of Engineering and Product Design Education (E&PDE 2020).

(§2.2.3) allant de (1) la sensibilisation et enseignement des futurs praticiens (Chayaamor-Heil & Freitas Salgueiredo, 2016; Mackinnon et al., 2020; Mccardle et al., 2019; Nagel et al., 2019; Sharma & Sarkar, 2019; Stevens et al., 2019; Wanieck et al., 2017) à (2) l'évaluation des produits générés (Blok & Gremmen, 2016; Chirazi et al., 2019; Domke & Farzaneh, 2018; Keshwani et al., 2017; Rovalo et al., 2020; Svendsen & Lenau, 2019) en passant par (3) l'accompagnement de la pratique (Chirazi et al., 2019; Drack et al., 2017; Fayemi et al., 2017; Freitas Salgueiredo & Hatchuel, 2016; Graeff, 2020a; Graeff, Maranzana, Aoussat, et al., 2019; Hashemi Farzaneh, 2020; Hashemi Farzaneh & Lindemann, 2019; Helms et al., 2009; Iouguina & Dawson, 2016; Kennedy & Niewiarowski, 2018; Mccardle et al., 2019; Nagel et al., 2018; Rovalo et al., 2020; Wanieck et al., 2017). Ce dernier axe est majoritaire dans la littérature scientifique cependant des problématiques opérationnelles reste en suspens telles que la composition des équipes, le rôle de chacune des parties prenantes durant le projet, la garantie d'une interdisciplinarité efficiente ou encore la garantie d'un transfert efficace de connaissances entre le monde biologique et le monde technologique.

L'originalité de cette thèse de doctorat et la richesse scientifique des travaux résident alors dans le fait d'aborder ces questions opérationnelles avec le regard d'un praticien designer. Cette démarche nous a permis d'intégrer des compétences, des outils et des mécanismes cognitifs issues du design dans le cadre méthodologique de la conception biomimétique.

1.3.2 Contexte académique : Le Laboratoire de Conception de Produits & Innovation

Ceebios a recensé en 2018¹¹, près de 175 équipes de recherche étudiant la thématique de la conception biomimétique et du biomimétisme. Parmi ces unités, le Laboratoire Conception de Produits et Innovation des Arts et Métiers Sciences et Technologies de Paris (LCPI, EA 3927) qui a hébergé de 2013 à 2016 la première thèse française reliant les sciences de la conception et la conception biomimétique (Fayemi, 2016). Nous basant sur ces derniers travaux fondateurs, que nous présentons dans la section suivante, c'est naturellement que nous avons choisi de mener nos travaux de thèse dans ce laboratoire de recherche.

Ce laboratoire a pour objectif commun et fédérateur : l'optimisation du Processus de Conception et d'Innovation (dans le cadre de la conception de produits en tant que passage d'un état immatériel (idée, concept, fonction) à un état matériel du produit (plan, maquette, prototype), disponible sur le marché). Le LCPI porte une attention particulière sur les phases amont du processus de conception (§1.3.2.2) et d'innovation ainsi que sur l'intégration et l'anticipation des phases aval très tôt avec les phases amont. L'ensemble est organisé selon deux axes majeurs :

L'axe métier : dont l'objectif est l'enrichissement du processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers (design, ergonomie, ingénierie, ...) au sein des processus d'innovation et de conception.

L'axe processus : dont l'objectif est la formalisation globale du processus de conception et innovation pour mieux le comprendre et l'optimiser.

¹¹ « Biomimétisme en France- Etat de lieux », Ceebios, 2018

Bénéficiant d'un ancrage académique et de partenariats industriels, le LCPI prône la pluridisciplinarité (§1.3.2.3) alliant notamment les sciences de la conception et les sciences humaines et sociales à l'image de l'évolution du processus de conception. En effet, les travaux du laboratoire associent des données, des méthodes, des outils, des théories et des concepts issus de disciplines différentes afin de développer un modèle générique et global du processus de conception et d'innovation pertinent et ambitieux. Les travaux de recherche menés au sein de cette unité se positionnent donc pour la plupart à l'intersection de l'axe métier et de l'axe processus, c'est pour cela que le LCPI représente l'ensemble de ses activités grâce à la classification présentée ci-dessous (Figure 9) :

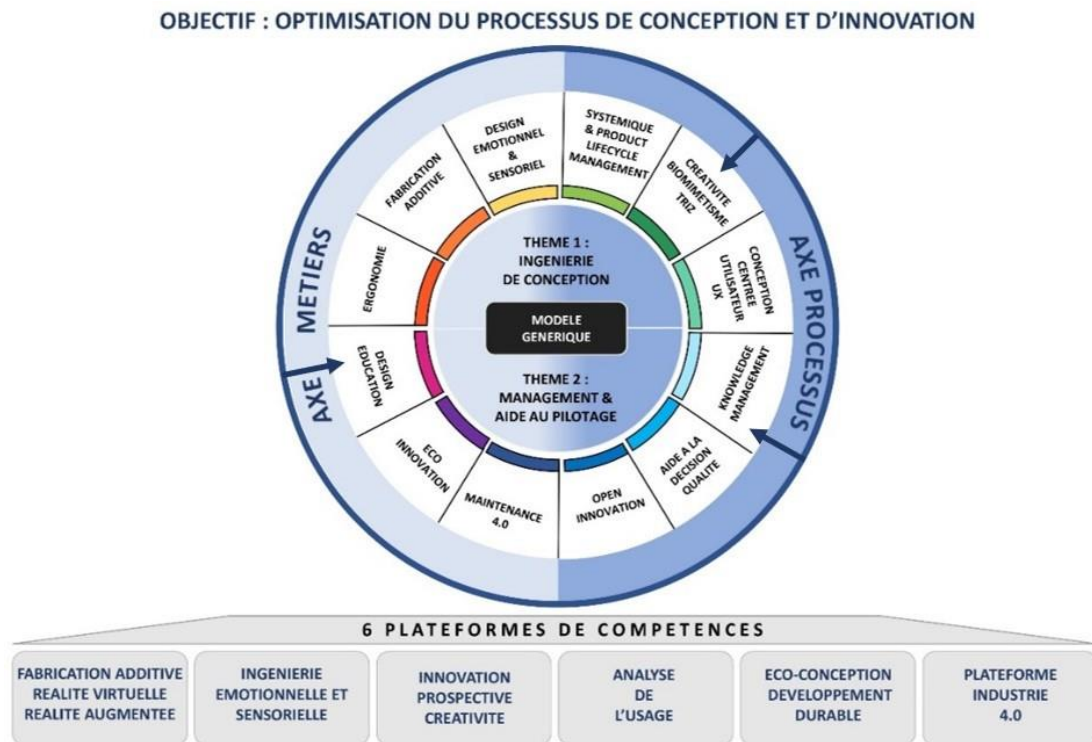


Figure 9. Rosace représentant les axes, les thèmes de recherche et les domaines d'activités poursuivis par le LCPI

Nos travaux se positionnent également sur ces deux axes. Concernant, l'axe processus, ces recherches sont au cœur du sous axe « Créativité/Biomimétisme/TRIZ » (vert foncé) car nous sommes particulièrement intéressés à l'optimisation et le développement du processus de conception biomimétique afin de favoriser son déploiement. Nous nous positionnons, à plus petite échelle, sur le sous axe traitant du management des connaissances (bleu clair), car nos travaux ont également porté sur le transfert des connaissances dans le cadre de la conception biomimétique. Concernant l'axe métier nous nous positionnons dans le sous axe « design éducation » (rose) car nos travaux ont permis d'approfondir nos connaissances quant aux rôles et apports des designers en conception biomimétique et nous a permis d'enrichir le processus de conception associé par l'intégration d'outils métier issus du Design.

Le rapprochement de ces 3 sous axes, encore non traité dans les travaux précédents, représente l'originalité première de nos travaux.

1.3.2.1 Recherches associées du laboratoire : conception biomimétique

Initié notamment par les travaux de Malte Schöfer en 2015 (Schöfer, 2015), le thème de la bio-inspiration et de la biomimétique a été développé au sein du LCPI via la première thèse française de doctorat sur les méthodologies de conception biomimétique, soutenue en 2016 par Pierre Emmanuel Fayemi intitulée : « 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). Se basant sur les travaux de Nathalie Lahonde (Lahonde, 2010) qui ont formalisé un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision, Fayemi a identifié les modèles de processus de conception biomimétique les plus cités dans la littérature. Puis après une analyse détaillée de ces processus, il les a synthétisés dans un processus de conception biomimétique unifié en 8 étapes (§2.2.2.2). Ce modèle représente le processus biomimétique de référence pour ces travaux de thèse. Enfin, parallèlement de la création de ce modèle et de ce référentiel, Pierre-Emmanuel Fayemi a participé à l'élaboration des normes internationales définissant ainsi la terminologie associée au domaine de la bio-inspiration que nous avons cité en début de ce chapitre (ISO, 2015).

En continuité de ces travaux de recherche, Eliot Graeff a mené une thèse de doctorat intitulée « Innovation bio-inspirée : Modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception biomimétique outillé et intégration d'un nouvel acteur, le Biomiméticien » soutenue en juillet 2020. Cette thèse de doctorat soulève la question des métiers associés à la pratique de la biomimétique et notamment l'absence de professionnels formés d'une part à la conception biomimétique et d'autre part aux sciences du vivant, ce qui 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, a été formalisé. La préconisation de ses activités pratiques, impliquant notamment des concepts, des méthodes et des outils issus de la biologie, ont mené 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 ont été proposés. Ces travaux étant menés dans le même laboratoire de recherche que ceux d'Eliot Graeff, nous avons pu collaborer et partager nos avancées et nos questionnements tout au long de nos trois années de thèse de doctorat. Cela a abouti notamment à une expérimentation (§3.3.1) présentée dans le chapitre 3 et la publication d'un article commun (Graeff et al., 2021).

1.3.2.2 Recherches associées du laboratoire : conception amont et conception innovante

Historiquement le laboratoire porte un intérêt particulier à la modélisation et l'amélioration du processus de conception et d'innovation. Les recherches développées au sein du laboratoire conduisent à la construction de modèles théoriques de compétences et de processus de conception aboutissant à la conception d'artefacts matériels ou immatériels (produits, systèmes, services etc...) (Aoussat, 1990; Aoussat et al., 2000). Nous nous positionnons dans la continuité de ces recherches portant notamment sur la conception amont et plus particulièrement dans le cadre spécifique de la conception biomimétique.

Depuis une vingtaine d'années, le laboratoire explore la conception amont et la modélisation des activités qui y sont associées (Bouchard & Aoussat, 2002; Bouchard, 2010). En effet, en 2002 Bouchard et Aoussat (Bouchard & Aoussat, 2002) ont démontré l'intérêt d'une approche de modélisation cognitive pour l'extraction de connaissances et de règles expertes dans le secteur de l'automobile, où l'information est subjective et peu formalisée (Bouchard, 1997; Bouchard et Aoussat, 2002). Ces travaux ont été, en 2010, alimentés par le mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de Carole Bouchard (Bouchard, 2010), intitulé « Modélisation et computation des processus cognitifs et informationnels en conception amont : une investigation chez les designers et les concepteurs ». Celui-ci considère alors « le processus de conception comme la matérialisation progressive d'un espace problème en un espace solution, selon un processus informationnel qui consiste à réduire l'abstraction par l'utilisation de cycles successifs de représentations mentales et physiques intégrant de plus en plus de contraintes ». Ce modèle théorique est alors représenté par une suite de cycles itératifs allant de la phase d'information à la phase de génération puis d'évaluation pour finir par une phase de matérialisation (Bouchard, 2010).

Notre recherche s'inscrit également dans la continuité de la thèse intitulée « Approche systémique de la créativité : outils et méthodes pour aborder la complexité en conception amont » soutenue en 2015 par Pathum Bila-Deroussy (Bila-Deroussy, 2015). Le modèle développé dans cette recherche a pour vocation de rendre le phénomène complexe de la créativité intelligible. L'auteur conclut cette recherche en identifiant le modèle systémique de la création comme « un modèle biomimétique qui a vocation à inspirer les concepteurs, les designers, et les acteurs du changement de tous horizons ». Elle constitue l'une des premières recherches effectuées au sein du laboratoire invitant au rapprochement de la bio-inspiration, du design et de la créativité.

1.3.2.3 Recherches associées du laboratoire : Interdisciplinarité et design

Le LCPI mène, depuis les années 90, un ensemble de travaux concernant la pluridisciplinarité au sein des processus et des pratiques de conception. Le Pr. Aoussat a démontré dans ses travaux, d'une part la nécessité de mettre en place une approche interdisciplinaire et collaborative dans le processus de conception (Aoussat et al., 2000) et d'autre part la nécessité de prendre en compte dès le début du processus de conception les spécifications professionnelles des parties prenantes. Cela implique alors la nécessité de formaliser en termes de métier, de méthodes et d'outils associés l'intégration de profils originaux au sein des équipes de conception tel que les designers considérés comme des profils de lien (Aoussat et al., 2000). D'autres recherches ont appuyé ces propos en mettant, par exemple, en lumière l'impact positif des designers lors de processus de conception grâce à leur apport d'informations plus ou moins conscients et explicites telles que les influences ou les inspirations (Bouchard, 2010).

Plus récemment, en 2018, Malte Schöfer (Schöfer et al., 2018) a étudié l'impact de la composition des groupes (mono ou pluridisciplinaire) lors de la conception amont. Il a démontré que la pluridisciplinarité, notamment entre concepteurs et profils relatifs aux sciences naturelles, avait un impact positif lors de la résolution de problèmes en termes de qualité et d'originalité des solutions générées, grâce au traitement efficient des informations.

Les différents travaux du laboratoire présentés précédemment ainsi que les modèles qui en découlent constituent une référence et un socle fondateur pour nos travaux de recherche.

Ainsi, la genèse de cette étude est issue de plusieurs travaux antérieurs, du Laboratoire Conception de Produits et Innovation, en conception amont, en conception biomimétique et portant sur l'interdisciplinarité en conception. Cela inscrit donc nos travaux dans la lignée des recherches générées par ce laboratoire.

1.3.2.4 Approche « Recherche-action »

Pour cette thèse de doctorat, nous avons mis en place une approche dites de « recherche-action », approche adaptée au contexte de nos travaux. En science de la conception, cette approche est considérée comme un outil indispensable permettant aux chercheurs d'élaborer et vérifier les modèles théoriques développés. Cette approche permet notamment d'impacter le contexte technique et organisationnel dans lequel il intervient (Bouchard, 2010).

Reason et Bradbury (Reason & Bradbury, 2001) ont décrit la recherche-action comme permettant de mieux comprendre les problèmes rencontrés dans la pratique et permettant d'initier des changements. Ainsi, comme évoqué dans le contexte industriel, en parallèle des développements théoriques au sein du LCPI, nous avons expérimenté les résultats de nos recherches auprès du tissu industriel et étudiant pluridisciplinaire fédéré par Ceebios. Cette approche nous a alors permis d'observer et d'interroger la pratique de manière à faire ressortir des éléments impossibles à percevoir d'un point de vue externe (Lawson, 2014).

Notre rôle peut donc être décrit sous les termes de « praticien-chercheur » (Schön, 1983). Dans le cadre de l'approche recherche-action, le chercheur adopte un rôle qui le conduit non pas à fournir des solutions uniquement théoriques mais à élaborer, en plus de celles-ci, des réponses pratiques concrètes en lien avec les enjeux et problématiques de terrain. Cette approche est notamment utilisée lors d'activités contractuelles de recherche entre industriels et chercheurs afin de traiter les problèmes complexes (Bouchard, 1997).

Historiquement issue des sciences sociales, la recherche-action (Lewin, 1946; Roy & Prévost, 2013) est décrite comme une spirale de cycles de recherche successifs (Figure 10) débutant pas une étape d'identification d'un problème par l'observation terrain. Puis un plan d'action est défini, mise en œuvre, analysé et évalué afin d'être validé ou réajusté.

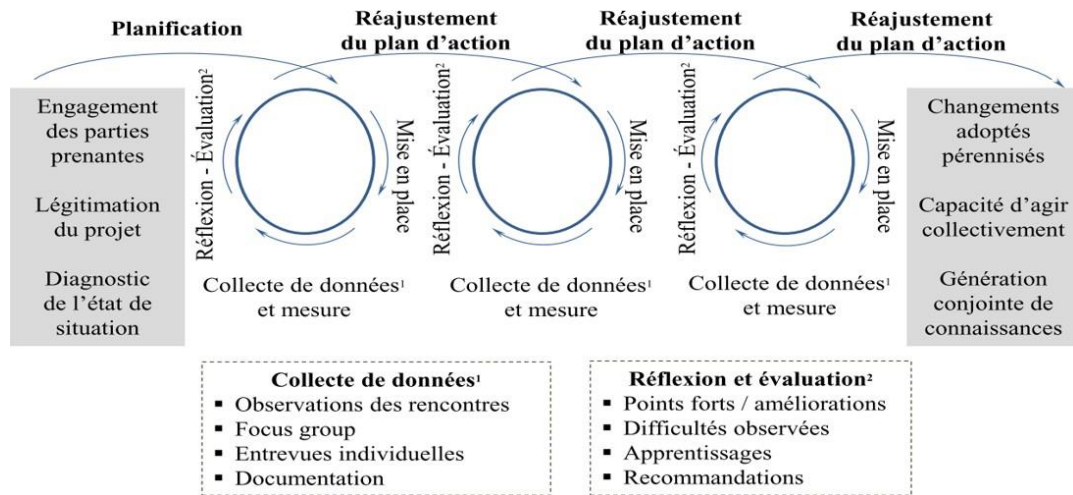


Figure 10. Cycle de l'approche recherche action (D'après Roy & Prévost, 2013)

La mise en place de cette approche de recherche nous a permis d'identifier un problème concernant le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation, ainsi que sur l'intégration des profils designers dans les pratiques de conception biomimétique, grâce à une exploration de notre contexte industriel (§1.2). Sur la base de cette exploration nous avons effectué une revue de littérature afin d'affiner notre problématique de recherche et de définir deux hypothèses (plan d'action) concernant les apports des profils designers pour la conception biomimétique (§2.4.1). Puis grâce à la mise en œuvre des changements proposés par nos hypothèses (mise en œuvre du plan d'action), nous avons effectué des tests au travers de deux premières expérimentations (analyse du plan d'action) (§3.2.1; 3.2.2). Le tout nous a permis de proposer une modification du processus biomimétique aujourd'hui proposé dans la littérature scientifique afin qu'il s'adapte aux enjeux et questionnement de la conception biomimétique. Cette modification, qui a un impact sur la pratique de la conception biomimétique, à également réajuster et développer notre plan d'action que nous avons tester lors de deux expérimentations « collaboratives » (§3.3.1; 3.3.2). L'ensemble des résultats obtenus durant cette recherche nous permet de proposer des recommandations méthodologiques et organisationnelles ayant un impact scientifique et pratique. Nous résumons ces actions dans la Figure 11 ci-dessous.

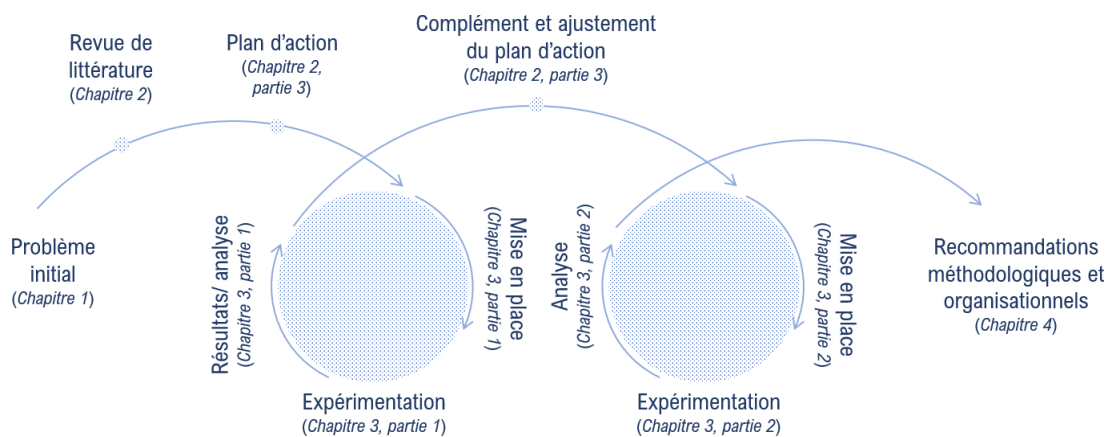


Figure 11. Approche de « Recherche-action » déployée pour nos travaux

Nous relevons néanmoins que lors de l'approche « Recherche-action » il est important de prendre en compte l'implication particulière du « praticien-chercheur » qui est lui-même acteur principal du changement et également prendre en compte la diversité des données soulevées qui sont pour la plupart des données qualitatives plutôt que quantitatives (Catroux, 2002). Ces dernières peuvent questionner la validité, la fiabilité des données et conclusion émises (Catroux, 2002). Ayant pris en compte cette limite (§4.3), nous proposons dans ces travaux de thèse des résultats qualitatifs qui constituent une base de recherche nécessaire qui sera à compléter par de résultats quantitatifs. D'une part, par les échanges permanant avec les partenaires scientifiques et industriels de Ceebios. Ils nous ont permis de discuter et de valider avec eux les résultats de nos recherches. D'autre part, en proposant des recommandations méthodologiques afin d'étudier de nouveaux projets.

1.4 Enjeux des travaux

Ces travaux de recherche ancrés dans un contexte industriel et académique font face à des enjeux qui concernent à la fois la génération de contenus adaptables aux pratiques de Ceebios et la production de connaissances scientifiques. Ainsi, un ensemble d'enjeux sociétaux, industriels et scientifiques ont été relevés.

1.4.1 Enjeux de société

Face aux défis environnementaux, la conception biomimétique et le biomimétisme sont aujourd'hui reconnus comme des approches prometteuses en tant que moteur de la transition écologique. De nombreux chercheurs et concepteurs développent, formalisent et structurent le cadre méthodologique qui leur est associé. Cependant, la complexité et la spécificité de ces approches (§2.2.3.3) rend leur déploiement rare dans les pratiques de conceptions et d'innovation.

L'un des enjeux de cette thèse est de favoriser le déploiement et l'appropriation de la démarche de conception biomimétique et du biomimétisme auprès des acteurs industriels pour prendre en compte les liens d'interdépendance entre l'Homme et son environnement et enfin changer les paradigmes de conception et de production.

Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte le contexte sociétal, le contexte économique, les contraintes industrielles et le contexte environnemental afin de favoriser l'acceptabilité de ces changements. Ainsi, les praticiens sont aujourd'hui invités à regarder le monde du vivant non plus comme une ressource consommable mais comme une source d'inspiration conduisant à des innovations durables, responsables et un développement sociétal respectueux des écosystèmes.

1.4.2 Enjeux industriels

Il est attendu de ces recherches, la génération de résultats porteurs de valeurs ajoutées alimentant les six axes d'action de Ceebios. En ce sens, notre approche de recherche (§1.3.2.4) intègre le suivi d'un projet industriel (§3.2.2). Au-delà des apports expérimentaux, les résultats obtenus doivent contribuer au développement interne du cadre méthodologique et des pratiques de Ceebios. Ces

recherches participeront, à court terme, à la structuration et aux activités du pôle design & méthodologies transverses et à l'alimentation du programme BiOMIg (§1.2.2.2).

De plus, il est reconnu que la conception biomimétique et le biomimétisme sont des voies prometteuses pour innover de manière responsable et durable et que l'intégration de designers en conception innovante représente aujourd'hui un levier d'innovation d'intérêt pour les entreprises. Chercher à lier durablement, dans le cadre de ces travaux et dans le cadre industriel de Ceebios, design et conception biomimétique pourrait alors devenir un facteur favorisant le déploiement du biomimétisme et de la conception biomimétique. Ainsi, intégrer des designers en amont des projets dans les unités de R&D et de recherche avancées d'une entreprise industrielles pourrait participer à la transformation des paradigmes de conception et d'innovation en favorisant la mobilisation d'une approche durable et respectueuse de l'environnement et des sociétés. Par conséquent les présents travaux visent à participer à la transformation et l'évolution de la formation et du métier de designer.

1.4.3 Enjeux scientifiques

Les enjeux scientifiques relatifs à notre cadre de recherche sont doubles et visent à combler le fossé présent entre la théorie et la pratique en conception biomimétique. Malgré un fort développement des recherches concernant la formalisation méthodologique de la conception biomimétique, aucune recherche, à notre connaissance, se sont concentrés sur les apports des designers pour la pratique de la conception biomimétique. Or, de nombreux travaux en conception et conception innovante, non liés à la conception biomimétique, ont montré que l'intégration de designer(s) dans des équipes de conception permet de favoriser la collaboration interdisciplinaire (Chouki et al., 2018; Driver et al., 2011) et la génération d'idées, grâce notamment à leurs compétences de formalisation graphiques et physiques des concepts (Driver et al., 2011; Kim et al., 2010; Visser, 2011) ou encore à leurs capacités cognitives leur permettant de créer des ponts cognitifs entre différentes connaissances de domaines divers (Le Masson & Subrahmanian, 2013). Ainsi, l'enjeu scientifique principale de cette thèse est de démontrer que l'intégration de designers permet d'optimiser le transfert d'informations et de connaissances dans le cadre des projets de conception biomimétique. Il s'agira alors de faire évoluer le cadre méthodologique existant pour pleinement exploiter le potentiel de ces acteurs originaux, favorisant alors le déploiement de la conception biomimétique.

Le second enjeu scientifique porte également sur le transfert d'informations et de connaissances, à une autre échelle, celle de la recherche et de la pratique. En effet, la formalisation méthodologique de la conception biomimétique étant récente, peu de recherches prennent en compte les données pratiques issus d'un cadre industriel. Ainsi, nous espérons contribuer à la formalisation d'une approche de recherche permettant de prendre en compte la réalité pratique (ici l'études des apports potentiels lié à l'intégration d'un nouveau profil) pour enrichir les recherches scientifiques en conception biomimétique.

1.5 Synthèse et conclusion du chapitre 1

Ce premier chapitre présente le contexte, le positionnement et les enjeux particuliers des présents travaux de thèse et ainsi son originalité. Ancrée à la fois dans l'écosystème industriel de Ceebios et au sein du LCPI des Arts et Métiers Sciences et Technologies de Paris nous avons pu mettre en place une approche « Recherche-action » nous permettant de mettre en avant notre position de praticien designer et chercheur et d'effectuer une recherche équilibrée entre théorie et pratique.

Positionné au croisement de plusieurs domaines, la conception biomimétique, la conception innovante et le design, ce travail de recherche a pour but de favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation, notamment au travers de l'étude des profils designers. Ainsi, nous espérons fournir, d'une part, des apports qui alimenteront les actions présentes et futures de Ceebios et qui permettront de formaliser le rôle des designers en conception biomimétique. D'autre part, nous souhaitons fournir des apports scientifiques en conception biomimétique ainsi qu'en conception innovante par notre positionnement particulier de designer-chercheur.

Sur la base de notre contexte de recherche, l'état de l'art, présenté dans le chapitre 2, vise à mettre en lumière les éléments de la littérature scientifique sur lesquels nous allons nous appuyer pour créer un lien entre design et conception biomimétique.



CHAPITRE 2

Etat de l'art

© Ameline LETARD

2.1 Structure du Chapitre 2

2.2 La conception biomimétique, une approche complexe

- *De la bio-inspiration à l'émergence du biomimétisme*
- *Formalisation théorique de la démarche*
- *Axes de recherche et freins pratiques de la conception biomimétique*
- *Stratégies de résolution des défis au déploiement de la conception biomimétique*
- *Synthèse de la première partie de l'état de l'art*

2.3 Processus, facteurs et outils facilitant la collaboration interdisciplinaire et le transfert des connaissances en conception innovante

- *De la modélisation des processus cognitif au rôle des connaissances en conception*
- *Facteurs, méthodes et outils qui favorisent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire*
- *Synthèse de la seconde partie de l'état de l'art*

2.4 Synthèse et conclusion du chapitre 2

- *Formalisation de la problématique de recherche et des hypothèses*

2.1 Structure du Chapitre 2

Ce second chapitre vise à présenter l'ensemble de nos recherches bibliographiques constituant la base du raisonnement scientifique de cette thèse de doctorat.

À travers la description des concepts, du cadre théorique et des outils développés en conception biomimétique, la première partie (§2.2) de cet état de l'art a pour objectif de fournir aux lecteurs, les axes de recherche actuels dominants dans la littérature scientifique, les principaux freins identifiés à la diffusion de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ainsi que les stratégies de résolutions pour surmonter ces freins. Ainsi les lecteurs pourront juger de la pertinence de ces travaux de thèse dans le cadre scientifique actuel de la conception biomimétique.

Afin d'identifier des leviers pour résoudre les freins au déploiement de la conception biomimétique et compléter les stratégies de résolution relevées en première partie de ce chapitre, la seconde partie (§2.3) de cet état de l'art, présente les processus, facteurs, outils et profils, facilitant la collaboration interdisciplinaire et le transfert des connaissances en conception innovante. La mise en lumière des méthodes logiques, issues du domaine du Design, et de l'agilité cognitives des designers nous a permis de valider scientifiquement l'opportunité, relevé dans le premier chapitre, de rapprocher le Design et la conception biomimétique. Cette revue bibliographique permet de positionner cette thèse de doctorat dans le contexte scientifique actuel.

Enfin, le rapprochement entre conception biomimétique et Design se formalise dans la dernière partie (§2.4) de cet état de l'art. Afin d'illustrer et d'exposer notre logique de recherche, une conclusion générale de ce chapitre est proposée nous permettant de formaliser notre problématique de recherche et nos hypothèses qui sont testées dans le chapitre 3.

2.2 La conception biomimétique, une approche complexe

2.2.1 De la bio-inspiration à l'émergence du biomimétisme

Les premières traces historiques du transfert de solutions observées dans le vivant vers la conception remontent à la Renaissance par l'intermédiaire des travaux célèbres de Léonard de Vinci qui analysa le vol des oiseaux pour la conception de « machines volantes » (Da Vinci, 2012).

A la fin du XIXe siècle, l'inspiration du vivant atteint les secteurs de l'ingénierie mécanique et électronique (Ricard, 2015) tels que l'aéronautique, l'ingénierie navale, l'industrie automobile, la cybernétique et la modélisation de systèmes complexes. C'est dans ce cadre que le terme de « Bionique »¹² est employé pour la première fois en 1958 par le Dr Jack E. Steele, médecin américain de l'US Air force (Roth, 1983).

Au milieu du XXe siècle un intérêt croissant pour la bio-inspiration, notamment de la part des acteurs de l'innovation, fait émerger la nécessité de formaliser de nouveaux processus et outils permettant de structurer le transfert de connaissances et d'idées de la biologie vers la technologie et plus précisément vers l'innovation. C'est dans ce contexte que le terme « biomimetics » (« biomimétique » en français) apparaît dans une publication du chercheur américain Otto H. Schmitt intitulée « Some interesting and useful biomimetic transform » (Schmitt, 1969). Malgré un sens différent de celui d'aujourd'hui, le terme « biomimetic » se concentrait déjà sur les innovations générées à partir d'observations du monde vivant.

C'est à la fin du XXème siècle, avec la prise de conscience internationale des enjeux environnementaux, que la première mention du terme « biomimicry » (« biomimétisme » en français) est apparue, attribuée à Merrill (Merrill, 1982) et sa formalisation des travaux de thèse dans le domaine de la chimie intitulée : « Biomimicry of the Dioxygen Active Site in the Copper Proteins Hemocyanin and Cytochrome Oxidase ».

C'est en 2006 sous l'influence de Janine Benyus, par l'intermédiaire de son ouvrage « Biomimicry Innovation Inspired by Nature » (Benyus, 1997), que le terme se vulgarise et se diffuse. Au-delà de l'aspect durable, le biomimétisme est présenté comme un nouveau prisme à travers lequel on peut observer le vivant (Dicks, 2018). La nature est alors vue comme une source d'inspiration et de connaissances plutôt qu'un objet de connaissance (Dicks, 2018) ou une simple ressource. Le biomimétisme représente alors un potentiel pour les domaines de l'innovation, de la durabilité et de la transformation (Mackinnon et al., 2020).

¹²La bionique (= bionics) est définie dans la norme ISO/TC266 comme étant une « discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques »

Ce bref historique nous montre que l'homme s'est, à des degrés différents, toujours inspiré de la nature pour créer et innover. Nous observons une évolution quant à l'application de ces inspirations, tout d'abord pour représenter et créer ce qui l'entoure (bio-inspiration), puis pour innover et trouver des solutions, le plus souvent monofonctionnelles, à une problématique technique (biomimétique) et enfin aujourd'hui pour innover et repenser de manière durable nos modes de vie et notre relation au vivant (biomimétisme) (Iouguina & Dawson, 2016; Mackinnon et al., 2020).

Dans le présent document, le terme « biomimétique » est utilisé comme adjectif pour désigner les solutions associées au biomimétisme et la « conception biomimétique » comme le cadre méthodologique à des fins de biomimétisme.

2.2.2 Formalisation théorique de la démarche : la conception biomimétique

Cette volonté de s'inspirer du vivant pour innover a conduit la communauté scientifique à formaliser un cadre théorique et méthodologique pour structurer cette démarche d'innovation par l'inspiration du vivant : la conception biomimétique. Ils ont, dans un premier temps, défini au travers de la norme ISO/TC266, deux approches qui se différencient par leur point de départ ainsi que par leur processus (Goel, McAdams, et al., 2014) :

- L'approche biology push (ISO, 2015) fondée sur les solutions biologiques, aussi connus sous le nom de (i) bottom-up (Speck et al., 2006), (ii) solution-driven (Helms et al., 2009; Vattam et al., 2007), (iii) biomimetics by induction (Gebeshuber & Drack, 2008), (iv) biology to design (Baumeister et al., 2013), ou encore (v) solution-based (Badarnah & Kadri, 2014; Helms et al., 2008).
- L'approche technology pull (ISO, 2015) axée sur les problèmes, également nommée (i) top-down (Speck et al., 2006), (ii) problem-driven (Vattam et al., 2007 ; Helms et al., 2009), (iii) biomimetics by analogy (Gebeshuber et Crack, 2008), (iv) biology to design (Baumeister et al., 2013), ou encore (v) problem-based (Badarnah Kadri, 2015).

2.2.2.1 L'approche *biology-push*

L'approche « *biology push* »¹³ décrit une démarche qui a pour point de départ l'observation d'une ou plusieurs fonctions ou caractéristiques de systèmes biologiques qui offrent un avantage potentiel si elles sont transférées vers une innovation (Figure 12). L'ingénieur suisse George de Mestral a suivi, sans le savoir, cette approche quand, lors d'une balade dans les Alpes, il a observé les fleurs de bardane accrochées dans les poils de son chien. Les systèmes biologiques identifiés doivent alors être analysés en détail afin de comprendre finement les principes sous-jacents des fonctions ou caractéristiques d'intérêts. Cette analyse est nécessaire pour garantir l'efficacité du transfert de ces principes vers des problèmes de conception qui pourraient être résolus à l'aide de ces principes (Fayemi et al., 2017), comme l'a fait George de Mestral en inventant le premier système de fixation sèche à crochet et boucle. Les connaissances relatives à ces principes biologiques sont principalement acquises par la recherche fondamentale (Fayemi et al., 2017). La mise en place d'une collaboration efficiente entre chercheurs et concepteurs est donc nécessaire pour faciliter la circulation des connaissances.

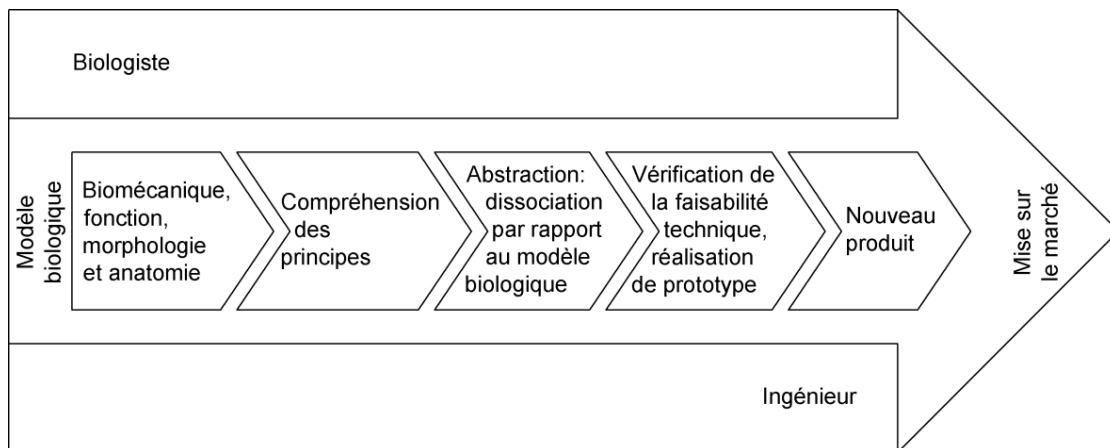


Figure 12. Approche *biology push* (ISO, 2015)

A ce jour, cette approche est majoritaire dans les projets biomimétiques étudiés dans la littérature scientifique. Jacobs et al. l'ont démontré, lors de l'étude de 380 cas de conception bio-inspirée, collectés dans la base de données BioM Innovation Database (Jacobs et al., 2014). Près de 62% de ces projets ont été issus d'une approche *biology-push*. Cette tendance était déjà observée dans le cadre de projets étudiants réalisés en conditions contrôlées (Helms et al., 2009).

¹³ Cette approche est souvent mise en lien avec la sérendipité (Jacobs et al., 2014; Von Gleich et al., 2010), c'est-à-dire l'art d'inventer « par hasard » et serait à l'origine entre autres de l'invention de la pénicilline par Fleming (Brun, 2017). La logique de la sérendipité veut que la création d'un nouvel artefact à fort potentiel de valeur, issue du croisement de différentes connaissances, provient d'un « coup de chance » et ne peut pas être provoqué intentionnellement (Brun, 2017). Cependant, il semble que l'identification, le croisement et l'association de différentes connaissances tiendraient plus de la perspicacité du concepteur plutôt qu'à la chance. Ceci souligne donc que l'approche *biology-push* repose principalement sur la capacité des individus à identifier des connaissances biologiques et à les associer à des connaissances du domaine de la conception.

2.2.2.2 L'approche technology-pull

L'approche technology-pull a pour point de départ une problématique identifiée, généralement technologique mais elle peut être également d'ordre sociale, économique ou environnementale (Figure 12). Cette problématique doit être analysée pour mettre en avant les fonctions et/ou performances à changer, améliorer ou encore remplacer. Ensuite l'identification de systèmes biologiques d'intérêts est effectuée. Puis par l'abstraction et le transfert de ces principes biologiques, une ou plusieurs solutions sont proposées pour résoudre la problématique initiale (ISO, 2015).

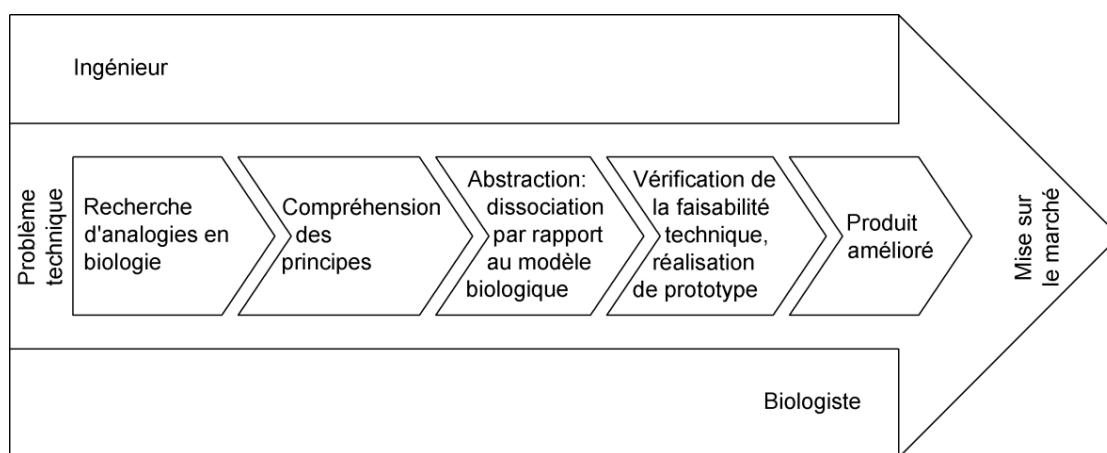


Figure 13. Approche technology-pull (ISO, 2015)

Cet intérêt grandissant pour la conception biomimétique a poussé les chercheurs, depuis les 20 dernières années, à transformer ce transfert de connaissances en une méthodologie robuste, reproductible et agile (Goel, Vattam, et al., 2014) afin de favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation.

Processus de l'approche technology-pull

Dans la littérature scientifiques les processus « technology-pull » peuvent être classés en deux catégories (Fayemi et al., 2017; Graeff, 2020) :

- Les processus biomimétiques descriptifs (Fayemi et al., 2017; Freitas Salgueiredo, 2013; Goel, Vattam, et al., 2014; Helms et al., 2009; ISO/TC266, 2015; Lenau, 2013; Lindemann & Gramann, 2004; Nagel, et al., 2010; Speck & Speck, 2008)
- Les processus biomimétiques prescriptifs (Badarnah & Kadri, 2014; Baumeister et al., 2013; Bogatyrev & Vincent, 2008; Chakrabarti et al., 2005; Cheong et al., 2011; Kruiper et al., 2018; Sartori et al., 2010; Weidner et al., 2018)

Le nombre de processus ne cesse d'augmenter encore aujourd'hui et crée une disparité conceptuelle dans l'écosystème de la conception biomimétique (Fayemi et al., 2017). Ces processus sont développés le plus souvent pour s'adapter à des cadres spécifiques, tels que l'ingénierie de la conception, ce qui implique que les équipes doivent être suffisamment expertes pour pouvoir sélectionner le processus le plus pertinent pour le projet à traiter. Cela représente un frein non négligeable quant au déploiement à grande échelle de la conception biomimétique dans nos pratiques de conception et d'innovation.

Afin de répondre à ce constat et de faciliter la diffusion de la conception biomimétique auprès des praticiens, un processus unifié a été développé : Le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017). Pour ce faire, les 14 processus de l'approche technology-pull, les plus représentés dans la littérature, ont été analysés et comparés au moyen du métamodèle de processus de résolution de problème développé par Massey et Wallace en 1996 (Massey & Wallace, 1996). Ce métamodèle tend à formaliser une approche holistique des processus de résolution de problème et se compose de 5 étapes : Identification du problème, Définition du problème, Génération des alternatives, Sélection de la solution, Implémentation de la solution et essais.

Ces analyses ont permis d'harmoniser le cadre (c'est-à-dire le périmètre d'action), la spécificité (afin de permettre une bonne lisibilité des étapes sans rattachement à une démarche particulière) et enfin la granularité (afin de déterminer le nombre d'étapes et leur niveau de détail). Selon la représentation unifiée issue de ces travaux, le processus biomimétique harmonisé peut être décrite en deux phases, découpées en huit étapes principales (Fayemi et al., 2017) (Figure 14) :

Phase 1 (étapes 1 à 4) : L'équipe définit le prisme par lequel le monde vivant sera interrogé. Pour ce faire, l'équipe de conception définit le problème (étape 1) et les fonctions techniques associées à réaliser en tenant compte des contraintes et du contexte (étape 2). Puis ces fonctions techniques sont transposées dans l'environnement biologique (étape 3). Enfin des ponts sémantiques sont développés pour identifier les modèles biologiques potentiels (étape 4).

Phase 2 (étapes 5 à 8) : L'équipe de conception effectue une abstraction et une transposition des mécanismes biologiques et des stratégies associées pour générer des concepts biomimétiques. Pour ce faire, les stratégies biologiques sélectionnées par l'équipe de conception (étape 5) doivent être précisément comprises pour être abstraites (étape 6). Ensuite, ils transposent les principes biologiques d'intérêt dans un environnement technique (étape 7) afin de pouvoir développer des concepts biomimétiques innovants (étape 8).

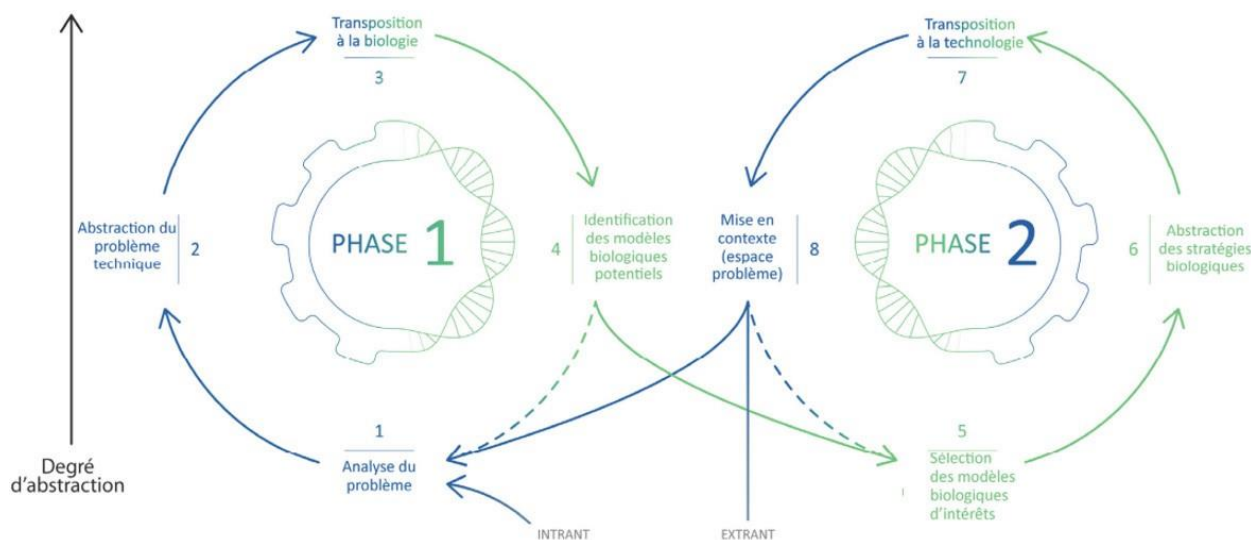


Figure 14. Le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017)

Ce modèle propose un cadre holistique faisant converger les processus biomimétiques existants, ce qui fait de lui une base méthodologique pour la conception biomimétique. Ce processus unifié est aujourd'hui reconnu et accepté par la communauté scientifique et représente une base pertinente pour les recherches actuelles, quelles soit d'ordre théorique, pratique ou pédagogique (Graeff, 2020a; Emily Barbara Kennedy & Marting, 2016; Kruiper et al., 2018; Mcinerney et al., 2018; Nagel et al., 2019). Ce processus met ainsi à disposition des chercheurs et praticiens un référentiel de la conception biomimétique technology-pull pouvant être modifié et adapté à différent cadre spécifique (Kruiper et al., 2018 ; Graeff, 2020). Nous le prendrons comme processus de référence pour les présentes recherches.

Outils de l'approche technology-pull

Ce développement croissant de processus biomimétiques s'est accompagné de la création d'un ensemble d'outils ayant pour vocation de s'adapter aux différentes spécificités des processus biomimétiques. Ils proviennent des sciences du vivant, des sciences de la conception ou sont spécifiquement développés pour faciliter le processus biomimétique (Fayemi et al., 2017).

En 2017, Wanieck et al., ont établi un état de l'art exhaustif des outils biomimétiques et en ont recensé 43. Seul 22 ont été analysés, les 21 restant étant considérés comme n'ayant pas la maturité nécessaire pour une mise en œuvre industrielle (Fayemi et al., 2017; Wanieck et al., 2017).

Ces outils ont ensuite été classés en 4 familles (ISO, 2015) : Les outils (1) d'analyse, (2) d'abstraction, (3) de transfert et (4) d'application. Puis afin d'assister les concepteurs au choix des outils biomimétiques pertinent pour un projet, Fayemi et al. ont développé le BiomimTree, un outil d'aide à la décision qui positionne ces outils par rapport aux étapes du processus problem-driven unifié :

- Les outils d'analyse (1) (Badarnah & Kadri, 2014; Benyus, 1997; Fayemi et al., 2017; Goel, Vattam, et al., 2014; Kucharavy et al., 2008; Nolan, 1989) ont par définition vocation de

faciliter les étapes d'analyse c'est-à-dire les étapes 1 et 5 du processus biomimétique problem-driven unifié. Ils offrent aux équipes un ensemble de clés pour interroger les problématiques de départ (étape 1) et questionner les sources de solutions biologiques (étape 5).

- Les outils d'abstraction (2) (Altshuller, 1984, 1997; Altshuller et al., 1997; Chakrabarti et al., 2005; Goel et al., 2012; Goel, Vattam, et al., 2014; Ohno, 1988; Rosa et al., 2014; Sartori et al., 2010) sont conçus pour faciliter les étapes d'abstraction, les étapes 2 et 6 du processus biomimétique problem-driven unifié. Les abstractions proposées par ce processus ont pour but de passer d'une entité réelle à un concept. Les outils alors proposés ont pour but de décrire et modéliser conceptuellement une problématique (étape 2) ou des modèles biologiques (étape 6).
- Les outils de transfert (3) (Altshuller et al., 1997; Baumeister et al., 2013; Nagel, Stone, et al., 2010; Savransky, 2000) ont un rôle d'interface entre les concepts issus de la biologie et ceux de la technologie (Fayemi et al., 2017). Nous les retrouvons donc aux étapes 3 et 7 du processus biomimétique problem-driven unifié.
- Les outils d'application (4) (Mcinerney et al., 2018; Osborn, 1953; Srinivasan et al., 2011) sont conçus pour permettre aux concepteurs d'identifier des modèles biologiques d'intérêt et de mettre en place des solutions techniques concrètes. Ils sont donc pertinents pour l'étape 4 du processus biomimétique problem-driven unifié.

En pratique cet arbre décisionnel (BiomimTree) propose de guider les praticiens afin d'adapter le processus biomimétique à leurs besoins en prenant en compte les contraintes et les paramètres des projets. Les chercheurs précisent néanmoins qu'aucune étape ou outil n'est obligatoire, ils promeuvent ici une volonté de rendre agile le processus biomimétique et précisent que cet outil devra s'enrichir des connaissances et des expertises des utilisateurs (Fayemi, 2017).

Ce développement croissant d'outils met en lumière le besoin des praticiens d'être accompagnés pour s'appropriier le processus complexe proposé par la conception biomimétique. Mais cette diversité d'outils disponibles représente également un frein en pratique car les utilisateurs n'ont pour la plupart pas les moyens (temps, financier...) de se former et de maîtriser l'ensemble de la boîte à outils de la conception biomimétique (Fayemi, 2017 ; Graeff, 2020).

Bien que des aides à la décision tel que BiomimTree aient été développées (Fayemi, 2016) peu de ces outils sont utilisés en pratique (Horn et al., 2018 ; Wanieck et al., 2017). D'une part, car ces outils sont pour la plupart basés sur une analyse par composant et non par système et intègrent rarement le contexte social, économique et environnemental (Bila-Deroussy, 2015 ; Wanieck et al, 2017). D'autre part, ils sont majoritairement développés par des ingénieurs (17 sur 27) pour des ingénieurs (19 sur 27) comme nous le montre le tableau ci-dessous qui synthétise l'ensemble des outils évoqués précédemment (Tableau 1).

Catégorie	Outil	Organisme de développement	Domaine	Profil des concepteurs	Profil des utilisateurs visés	
Outils d'analyse (1)	L'Analyse des Tâches (Nolan, 1989)	/	Ingénierie de la conception	Consultant management	Entreprises	
	Les principes du vivant (Benyus, 1997)	Biomimicry 3.8	Biomimétisme applicable à tous domaines	Biologiste	Tous	
	KARIM (Mêlo et al., 2015)	Paris Région Entreprises	Biomimétisme applicable à tous domaines	Ingénieurs / Biologistes	Entreprises	
	Les Courbes en S (Kucharavy & De Guio, 2011; Mann, 1999)	/	Ingénierie de la conception	/	Ingénieurs	
	T-Chart (A. K. Goel, Vattam, et al., 2014)	Georgia Institute of Technology (USA)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	
	BABELE (Fayemi, 2015)	Arts et Métiers, Sciences et Technologies - LCPI (Paris, France)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	
	Matrice de comparaison des pinnacles (Badarnah, 2017)	Delft University of Technology (Delft, Pays-Bas)	Architecture / Ingénierie de la conception / Biomimétique	Architectes / Ingénieurs	Architectes	
	5-Why (Ohno, 1988)	Toyota Motor Corporation	Ingénierie de la conception	Ingénieur	Ingénieurs	
	Les Contradictions techniques (Altshuller, 1984)	/	Ingénierie de la conception	Ingénieur	Ingénieurs	
	9-écrans (Altshuller, 1984)	/	Ingénierie de la conception	Ingénieur	Ingénieurs	
Outils d'abstraction (2)	Le Résultat Idéal Final (Altshuller et al., 1997)	/	Ingénierie de la conception	Ingénieur	Ingénieurs	
	Le Monde Clos (Altshuller, 1997)	/	Ingénierie de la conception	Ingénieur	Ingénieurs	
	Modèle SAPHIRE (Chakrabarti et al., 2005)	Indian Institute of Science - Centre for Product Design and Manufacturing	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	
	DANE (Goel et al., 2012)	Georgia Institute of Technology (USA)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	
	Uno-BID (Rosa et al., 2014)	Politecnico di Milano - Département de mécanique (Italie)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	
	Four-Box (Goel, Vattam, et al., 2014)	Georgia Institute of Technology (USA)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	
	Trade-off (Vincent, 2017)	University of Oxford, Department of Zoology (UK)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieurs	Ingénieurs	

Outils de transfert (3)	L'analyse des ressources (Savransky, 2000)	/	Ingénierie de la conception	/	Ingénieurs
	Les principes inventifs (Altshuller et al., 1997)	/	Ingénierie de la conception	Ingénieur	Ingénieurs
	Thesaurus ingénierie vers biologie (Nagel et al., 2010)	Oregon State University & Texas A&M University (USA)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieur	Ingénieurs
	BIOPS (Fraunhofer, 2010)	Institut Fraunhofer	Ingénierie de la conception / Biomimétique	/	Ingénieurs
	La taxonomie du biomimétisme (Baumeister et al., 2013)	Biomimicry 3.8	Biomimétisme applicable à tous domaines	/	Tous
Outils d'application (4)	Brainstorming (Osborn, 1953)	/	Ingénierie de la conception	Journaliste	Tous
	AskNature (Biomimicry 3.8, 2008)	Biomimicry 3.8	Biomimétisme applicable à tous domaines	/	Tous
	Bioniquity (Dell, 2006)	/	Biomimétique	/	Tous
	IDEA-INSPIRE (Srinivasan et al., 2011)	Indian Institute of Science - Centre for Product Design and Manufacturing	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Ingénieur	Ingénieurs
	E2BMO <i>Engineering-to-BioMimetic Ontology</i> (Mcinerney et al., 2018)	The University of Akron - Department of Biology, Program in Integrated Bioscience (Akron; USA) School of Engineering and Physical Science, Heriot-Watt University (Edinburgh; UK) James Madison University, Department of Engineering, (Harrisonburg; USA)	Ingénierie de la conception / Biomimétique	Biologistes, ingénieurs, architecte	Ingénieurs

Tableau 1. Outils de conception biomimétique

2.2.2.3 Synthèse sur l'état actuel du cadre méthodologique en conception biomimétique

Ces vingt dernières années, une grande diversité de processus et d'outils de la conception biomimétique ont été développés mettant en lumière l'intérêt croissant des chercheurs et praticiens pour cette approche de conception et son potentiel innovant (Cheong et al., 2011 ; Keshwani et al., 2017). Ce développement significatif contribue à une compréhension de plus en plus fine des actions à mener pour innover en s'inspirant des propriétés remarquables du vivant. Toutefois, des études révèlent que la diffusion de l'approche dans les pratiques de conception et d'innovation reste marginale et rencontre un certain nombre de freins (Chirazi et al., 2019). Par exemple, les processus et outils de la conception biomimétique sont majoritairement issus du secteur de l'ingénierie et sont à destination des profils ingénieurs alors que par définition (§1.2.1.1) la conception biomimétique est une approche interdisciplinaire (ISO, 2015). Peu de ces processus et outils sont aujourd'hui adaptés aux autres profils identifiés comme pertinents en conception biomimétique (ISO, 2015) : les biologistes et les autres acteurs de l'innovation. Cela constitue l'un des freins à sa diffusion.

Dans la prochaine section nous détaillons les axes de recherche actuelles et les freins liés à la diffusion de la conception biomimétique au sein des pratiques de conception et d'innovation.

2.2.3 Axes de recherche et freins pratiques de la conception biomimétique

Les avancées majeures en ce qui concerne la formalisation théorique de la conception biomimétique (§2.2.2), amènent les chercheurs à s'intéresser aujourd'hui à son déploiement dans les pratiques de conception et d'innovation au travers différents axes de recherche que ce soit dans l'enseignement ou dans le monde industriel. Ces recherches portent sur l'ensemble de la chaîne de conception allant de la sensibilisation et formation des futurs praticiens (Chayaamor-Heil & Freitas Salgueiredo, 2016; Mccardle et al., 2019; Nagel et al., 2019; Stevens et al., 2019) jusqu'à l'évaluation des produits générés (Chirazi et al., 2019; Domke & Farzaneh, 2018; Keshwani et al., 2017; Rovalo et al., 2020; Speck et al., 2017; Svendsen & Lenau, 2019) en passant par l'accompagnement de la pratique et par les questions de la mise sur le marché.

Chacun de ces travaux a permis d'identifier des freins à la diffusion de la conception biomimétique. En effet, la mise en œuvre du processus biomimétique est aujourd'hui reconnue comme complexe appelant notamment à l'emploi de l'interdisciplinarité qui se heurte aux habitudes d'emploi des méthodologies de conception bien établies et robustes dans l'industrie (Chirazi et al., 2019; Hashemi Farzaneh & Lindemann, 2019; Rovalo et al., 2020; O. Speck et al., 2017; Svendsen & Lenau, 2019). Ce processus, en plus de faire face aux mêmes défis que les processus généraux d'innovation, comme le passage d'une idée à un produit viable (Chirazi et al., 2019), est également confronté à des défis supplémentaires que nous synthétisons dans le Tableau 2.

Axes de recherche		Freins identifiés	Référence
Sensibilisation et enseignement des futurs praticiens	La sensibilisation	Compréhension et communication sur le biomimétisme et la conception biomimétique	(Mackinnon et al., 2020; Sharma & Sarkar, 2019)
	L'enseignement	Adaptation des enseignements selon les champs	(Mccardle et al., 2019; Stevens et al., 2019)
		Manque de programmes et cursus dédiés	(Chayaamor-Heil & Freitas Salgueiredo, 2016; Nagel et al., 2019; Wanieck et al., 2017)
Accompagnement de la pratique	La collaboration interdisciplinaire	Collaboration interdisciplinaire	(Chirazi et al., 2019; Hashemi Farzaneh, 2020; Mccardle et al., 2019)
		Implication de la recherche biologique et des biologistes	(Graeff et al., 2018; Graeff, Maranzana, & Aoussat, 2019a; Rovalo et al., 2020)
		Transfert entre la biologie et l'ingénierie	(Nagel et al., 2018)
		Transfert de connaissances entre biologistes, ingénieurs et architectes	(Hashemi Farzaneh & Lindemann, 2019)
		Choix des processus et outils	(Fayemi et al., 2017; Wanieck et al., 2017)
		Manque d'information quant aux profils à impliquer	(Graeff, 2020b)
	Le transfert des connaissances	Rôles des connaissances et leur transfert	(Chirazi et al., 2019; Freitas Salgueiredo & Hatchuel, 2016; Rovalo et al., 2020)
	Les exigences du processus	Compréhension de la sémantique et des concepts	(Iouguina & Dawson, 2016)
		Décalage d'efficacité entre le monde académique et la pratique industriel	(Rovalo et al., 2020)
		Utilisation des contributions méthodologiques en pratique	(Rovalo et al., 2020)
		Application de résultats théoriques à la pratique vulgarisation de la donnée de recherche	(Drack et al., 2017)
		Recherche et identification de la donnée biologique	(Chirazi et al., 2019; Helms et al., 2009; Kennedy & Niewiarowski, 2018; Rovalo et al., 2020)
		Sélection de la donnée biologique	(Vincent, 2017)
		Compréhension de la donnée biologique	(Mcinemey et al., 2018)
Mise sur le marché	La « Vallée de la mort »	(Chirazi et al., 2019)	
	Identification des ressources nécessaires (temps, investissements)	(Chirazi et al., 2019)	
	Identification d'un business model	(Chirazi et al., 2019)	
	Temps de développement, de la solution technique au produit	(Chirazi et al., 2019)	
Evaluation des produits générés	Validation de l'aspect durable des produits	(Blok, 2016; Speck et al., 2017)	
	Validation de l'aspect innovant des produits	(Keshwani et al., 2017)	
	Validation de l'aspect multifonctionnel des produits	(Svendsen & Lenau, 2019)	
	Informations concernant les connaissances et les choix mobilisés	(Domke & Farzaneh, 2018)	
	Identification des domaines d'application préférentiels	(Rovalo et al., 2020)	
Acceptabilité des produits générés	(Chirazi et al., 2019)		

Tableau 2. Synthèse sur les axes de recherche sur la biomimétique (Adapté et complété d'après les travaux de Graeff, 2020)

Les présents travaux de thèse se positionnent sur l'axe de recherche concernant « l'accompagnement de la pratique ». Nous en détaillons ces différents freins.

2.2.3.1 *La collaboration interdisciplinaire*

L'évolution des pratiques d'innovation au cours des deux dernières décennies, implique une évolution des schémas de collaboration vers plus de complexité et de flexibilité (Boer & Gertsen, 2003) afin de s'adapter aux besoins de la société. L'émergence de ces processus d'innovation tend à réorganiser les schémas collaboratifs en repositionnant et en redéfinissant le rôle et les missions des acteurs impliqués. La conception biomimétique s'inscrit dans cette évolution et sa définition nécessite la mise en place d'une collaboration interdisciplinaire efficace entre les praticiens de la biologie, de la technologie et d'autre domaine de la conception et de l'innovation (ISO, 2015; Mackinnon et al., 2020). En effet, les acteurs sont amenés à échanger des connaissances et des concepts, tout en ayant des perceptions, des typologies de connaissances et des processus cognitifs différents et variables (Fayemi et al., 2017), ce qui complique sa mise en œuvre (Chirazi et al., 2019). Une mauvaise communication et le manque d'un langage interdisciplinaire entre les parties prenantes risque d'engendrer des erreurs d'interprétations quant aux informations partagées voir une incompréhension créant ainsi un obstacle pour le bon déroulé du processus.

L'efficacité de la collaboration interdisciplinaire est étroitement liée à la qualité et au partage des connaissances entre les parties prenantes, ce qui fait du transfert de connaissances le deuxième grand défi du déploiement de la biomimétique.

2.2.3.2 *Le transfert des connaissances*

Le transfert de connaissances, qu'il soit cognitif (individuel) (Brun et al., 2016) ou externe (entre parties prenantes) (Carvajal Pérez et al., 2018 ; Le Masson et al., 2016) est reconnu dans la littérature comme étant difficile et long (Carvajal Pérez et al., 2018). Néanmoins, ce transfert est crucial, en particulier dans le contexte de la biomimétique, qui mobilise au moins deux types de connaissances peu susceptibles d'être associées : les connaissances issues des sciences naturelles, qui se concentrent sur l'étude et la description de ce qui a existé et de ce qui existe, et les connaissances issues de la science de la conception, qui étudient comment les choses pourraient ou devraient être (Simon, 1996). A cela s'ajoute les connaissances des experts mobilisés tout au long du processus (Rovalo et al., 2020), le plus souvent des experts en biologie pour garantir une bonne compréhension des modèles biologiques (Chirazi et al., 2019; Graeff et al., 2018; Graeff, Maranzana, & Aoussat, 2019a). Enfin, tout comme les processus d'innovation généraux, la conception biomimétique doit également prendre en compte les attentes et besoins des consommateurs. Il est donc nécessaire de créer un cadre favorable à l'interdisciplinarité pour faciliter le transfert des connaissances au cours du processus.

2.2.3.3 *Les exigences du processus biomimétique*

Nous présentons les exigences du processus biomimétique en prenant comme prisme les étapes de notre processus de référence, le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017) (§2.2.2.2).

Etape 1 : Analyse du problème

L'étape 1 n'est pas spécifique au processus biomimétique, néanmoins elle représente l'une des étapes essentielles de ce processus. C'est à ce moment que la problématique de départ est analysée afin d'identifier et d'étudier les différents paramètres influents comme les marchés potentiels (Chirazy et al., 2019) ou encore les moyens disponibles (temps, Homme, financiers). Cela permettra d'identifier si la résolution par l'approche du biomimétisme est pertinente et de déterminer les ressources à fournir (Chirazi et al., 2019).

Etape 2,3,6,7 : Etapes d'abstraction et de transfert des connaissances

Nous venons de voir que l'un des défis majeurs du processus biomimétique est le transfert de connaissances (Freitas Salgueiredo et al., 2016, Chirazi et al., 2019). L'ensemble des parties prenantes, qu'elles fassent partie du domaine de la biologie ou de la conception, vont devoir formaliser les connaissances, les idées ou encore les concepts issus de leurs champs d'expertises pour que l'ensemble de l'équipe puisse comprendre et intégrer ces informations. Si cette action n'est pas effectuée il risque d'y avoir une mauvaise compréhension des attentes et des propositions de chacun mais également une mauvaise interprétation des informations fournies ce qui peut engendrer l'arrêt du projet. Le bon transfert des connaissances et donc primordial pour garantir en partie la réussite d'un projet biomimétique.

Aujourd'hui la littérature scientifique relie le transfert de connaissances aux principes d'abstraction (Vincent & Mann, 2002) et d'analogie (Stevens et al., 2019). En effet, lors de ces transferts, les connaissances d'un domaine (A) ne pourront pas être transférées en intégralité à un champ de connaissances (B) car chaque espace conceptuel a ses propres spécificités qui diffèrent. Ce qui est d'autant plus vrai entre les connaissances biologiques et les connaissances technologiques (Graeff et al., 2020). Le transfert de connaissances n'est donc pas une action figée et peut varier selon le projet et les connaissances impliquées (Graeff et al. 2020). Notamment concernant le niveau d'abstraction qui sera choisi et qui déterminera les ressources à investir.

Etape 4 et 5 : Identification (4) et sélection (5) des modèles biologiques d'intérêts

La littérature scientifique pointe largement l'identification des modèles biologiques comme étant une difficulté majeure dans le processus biomimétique (Chirazi et al., 2019; M. Helms et al., 2009; Emily Barbara Kennedy et al., 2015; Rovalo & McCardle, 2019). En effet, l'équipe projet doit déterminer ce qu'il faut rechercher, où trouver les informations et comment y accéder (Graeff, 2020).

Lors de l'étape 5, l'équipe projet doit, le plus souvent, faire face à un grand nombre de modèles biologiques identifiés, choisir le ou les modèles les plus efficient est alors complexe : Quel(s) est/sont les plus pertinents ? Sur quel(s) critère(s) les sélectionner ?

Etape 8 : Mise en contexte du concept dans le cadre initial

Tout comme l'étape 1, l'étape 8 n'est pas spécifique au processus biomimétique et fait face aux mêmes freins et exigences que les processus d'innovation généraux, comme la difficulté à passer d'une idée à un produit viable disponible sur le marché (Chirazi et al., 2019).

Enfin, dans la présente recherche nous étudions la conception biomimétique à des fins de biomimétisme, il est donc essentiel de prendre en compte le critère de durabilité tout au long du processus ce qui complexifie d'autant plus sa mise en œuvre.

Face à ces exigences, le processus biomimétique apparaît comme plus risqué que les processus d'innovation généraux pour beaucoup d'entreprises et d'investisseurs que ce soit en termes de temps ou en termes de ressources humaines et financières (Chirazy et al., 2019 ; Rovalo et al., 2019). Il est alors nécessaire de rassurer les praticiens sur la pertinence de cette approche et les accompagner par la formalisation de recommandations et le développement d'outils.

Pour répondre à ces freins, la communauté scientifique a développé des stratégies de résolutions que nous présentons dans la partie suivante.

2.2.4 Stratégies de résolution des défis au déploiement de la conception biomimétique

Deux stratégies d'aide à l'accompagnement de la pratique en conception biomimétique sont aujourd'hui suivies par la communauté scientifique : (i) la création et le développement d'outils, (ii) l'étude des profils présent ou devant être présent au sein de la conception biomimétique.

2.2.4.1 La création et le développement d'outils

Cette stratégie de résolution semble aujourd'hui majoritaire, les chercheurs se focalisent plus particulièrement sur la création d'outils pour accompagner les praticiens lors des étapes complexes du processus biomimétique problem-driven unifié :

Lors des étapes de fouilles (étape 4) et de sélection (étape 5) des modèles biologiques d'intérêts en proposant (i) des outils numériques permettant l'identification de mots-clés biologiques (Cheong et al., 2011; Hyunmin Cheong et al., 2014; Vakili & Shu, 2001), (ii) des outils de modélisation permettant de représenter, sélectionner et comprendre les données biologiques (Chakrabarti et al., 2005; Töre Yargın et al., 2018), (iii) des outils permettant de formaliser automatiquement des modèles biologiques (Kim & Lee, 2017; Rugaber et al., 2016), (iv) des outils comparatifs permettant de choisir le(s) modèle(s) biologique(s) pertinent(s) (Badarnah & Kadri, 2014; Jacobs et al., 2014; Weidner et al., 2018) ou encore (v) des bases de données de modèles biologiques (Chakrabarti et al., 2005; Goel et al., 2012).

Lors des étapes de transfert des connaissances (étapes 2,3,6,7) en proposant (i) des outils de génération de mots-clés permettant de créer un pont sémantique entre un champ conceptuel et un autre (Baumeister et al., 2013; Nagel & Mcadams, 2014; Stroble et al., 2014), (ii) des outils d'aide à l'analogie permettant de clarifier et raffiner la recherche à transférer et facilitant le raisonnement cognitif grâce à différents prismes d'abstraction de l'information (Vattam et al., 2008), (iii) des outils d'associations sémantiques facilitant le pont entre des champs d'explorations (Kaiser et al., 2014; Nagel & Stone, 2012; Vandevenne et al., 2016), (iv) l'utilisation de modélisations de principes

génériques (Vincent, 2017; Vincent et al., 2006) ou encore des outils d'aide à la collaboration interdisciplinaire (Graeff, 2020b)

Ces outils bien que multiples montrent leurs limites et leurs utilisations dans le contexte industriel reste marginale (Graeff et al., 2020). En effet, ces outils, développés pour combler le manque de collaboration entre biologistes et ingénieurs, conviennent aux ingénieurs qui souhaitent s'approprier des données biologiques pour développer des produits biomimétiques mais ne favorisent que très peu la collaboration interdisciplinaire.

2.2.4.2 L'étude des profils et leurs impacts en conception biomimétique

La plupart des articles traitant des processus ou des outils biomimétiques ne précisent pas les profils, les compétences ou encore les savoirs requis des praticiens en conception biomimétique. Ce n'est que très récemment que la communauté scientifique s'est tournée vers l'étude des profils comme stratégie de résolution. Des profils tels que les experts en biologie ont été identifiés et reconnus théoriquement comme un atout majeur (Graeff et al., 2018) notamment lors des étapes centrées sur la biologie (étapes 3,4 et 5 du processus biomimétique problem-driven unifié). Cependant en pratique, leur intervention fait face d'une part aux défis de la collaboration interdisciplinaire présentés plus tôt, d'autre part à la volonté, la disponibilité et la motivation de ces experts à intervenir lors des projets de conception biomimétique (McCardle et al., 2019 ; Graeff, 2020). De plus l'identification de ou des experts pertinents parmi l'ensemble des chercheurs en biologie reste encore difficile.

Dans ses travaux de thèse, Graeff (Graeff, 2020b) appuie l'intérêt d'intégrer une expertise en biologie et différencie deux types d'acteurs à intégrer, les experts en biologie, le plus souvent des chercheurs, qui seront intégrés ponctuellement lors des étapes centrées sur la biologie et un nouveau profil généraliste ayant acquis une expertise en biologie qui intégrera l'équipe tout au long du processus. Ce nouveau profil est appelé le « Biomiméticien » (Figure 15) et est défini comme (Graeff, 2020b) :

« 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 »

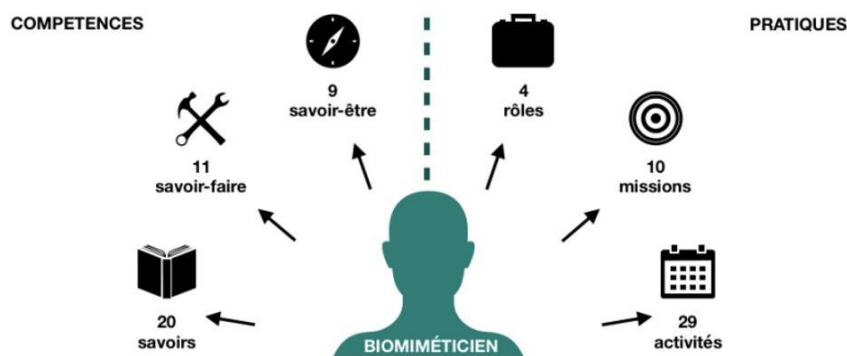


Figure 15. Le Biomiméticien (Graeff, 2020)

Cette description représente une première étape quant à la formalisation complète du Biomiméticien. L'auteur préconise de compléter cette définition en étudiant d'autres compétences, savoirs, savoir-faire, missions, rôles et activités d'intérêts de domaines différents. Hashemi Farzaneh recommande également la formalisation et l'ajout d'un nouveau profil, facilitant la collaboration interdisciplinaire et la génération de concepts biomimétiques innovants (Hashemi Farzaneh, 2015, 2020). Il est donc nécessaire de poursuivre aujourd'hui l'étude des profils pour d'une part compléter le profil du Biomiméticien et d'autre part identifier et étudier l'ensemble des profils pertinents en conception biomimétique. La littérature scientifique nous invite notamment à étudier les compétences des profils issus de disciplines qui privilégient l'utilisation de la communication visuelle pour faciliter le travail interdisciplinaire (Töre Yargın et al., 2018).

2.2.5 Synthèse de la première partie de l'état de l'art

La volonté de formaliser la conception biomimétique afin de la rendre accessible, reproductible et efficace a conduit à formalisation de deux approches possibles du biomimétisme, *biology-push* et *technology-pull*, ainsi que les outils associés.

Le cadre méthodologique de la conception biomimétique ne cesse d'évoluer et de s'enrichir du point de vue théorique, cependant son déploiement dans les pratiques de conception et d'innovation reste marginal et se confrontent aux défis du travail interdisciplinaire, à la complexité du transfert de connaissances et aux exigences du processus.

La littérature scientifique propose alors divers outils biomimétiques pour accompagner les praticiens. Cependant, à l'instar des processus ils sont aujourd'hui que faiblement utilisés en pratique. En complément un axe complémentaire de recherche émerge : l'étude des profils en conception biomimétique. Cette voie de recherche est prometteuse mais doit encore être complétée pour répondre aux questions qui émergent aujourd'hui : *Quel profils doit ont mettre autour de la table lors d'un projet biomimétique ? Sont-ils variables selon les projets ? selon les étapes du processus ? Quels sont les compétences, les savoirs, les savoir-faire, les rôles, les missions et les activités des différentes parties prenantes d'un projet biomimétique ?*

Le développement du cadre méthodologique de la conception biomimétique a permis de répondre à la question « quoi faire ? » par la formalisation des étapes à suivre. Néanmoins les questions concernant le « comment faire ? » et « avec qui ? » reste encore en suspens. Pour y répondre, la littérature scientifique nous invite notamment à observer le cadre pratique de la conception biomimétique afin de comprendre les freins sous-jacents et les besoins des praticiens (Chirazi et al., 2019; Rovalo et al., 2020).

Afin de formaliser un cadre d'étude de la pratique en conception biomimétique nous avons fait le choix d'explorer les processus, facteurs et outils facilitant la collaboration interdisciplinaire et le transfert des connaissances en conception innovante, freins majeurs au déploiement de la conception biomimétique.

2.3 Processus, facteurs et outils facilitant la collaboration interdisciplinaire et le transfert des connaissances en conception innovante

En préambule de cette partie nous nous intéressons à l'évolution des processus de la conception allant des modèles linéaires aux modèles co-évolutifs. Puis nous nous intéresserons au rôle de la structuration et du transfert de connaissances en conception innovante et enfin aux facteurs, méthodes et outils qui favorisent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire.

2.3.1 De la modélisation des processus cognitifs au rôle des connaissances en conception

2.3.1.1 *Des processus de conception linéaires à la prise en compte du raisonnement cognitif en conception*

La conception est majoritairement étudiée à travers deux champs : le champ des sciences de l'ingénierie et le champ des sciences cognitives.

Les sciences de la conception couvrent l'ensemble des théories, méthodologies et outils permettant la mise en pratique de la conception avec pour objectif de guider les praticiens dans leurs activités de conception grâce à la formalisation d'approches facilitant l'appréhension et la résolution de problèmes (Lahonde, 2010). Les chercheurs ont pour objectif de modéliser et formaliser le processus de conception afin de l'optimiser et de manière à pouvoir planifier et organiser l'activité de conception dans le temps (Bouchard, 2010).

Les sciences cognitives étudient et modélisent les processus mentaux, les stratégies et les types de connaissances utilisées lors de situations de conception ou de créativité (Bouchard, 2010). En d'autres termes, elle étudie les processus et les structures cognitives relatives à la façon dont les personnes pensent, raisonnent, agissent en fonction de leurs expériences, leurs connaissances ou encore leurs représentations (Visser, 2011). Ce point de vue cognitif permet, par exemple, d'étudier les questions d'apprentissage ou d'évolution permettant de passer de « novice » à « expert » (Visser, 2011).

Au travers d'un court historique de l'évolution des processus de conception nous illustrons ici l'émergence et les apports quant aux modélisations du raisonnement de conception. Ceci dans la perspective de comprendre l'adaptation de ces processus face aux problématiques complexes et multicritères que l'industrie rencontre aujourd'hui.

Modèles linéaires et séquentiels

Le formalisme classique envisageait le processus de conception comme un enchaînement linéaire et séquentiel des activités qui sont réalisées l'une après l'autre (Andreasen, 1987; Aoussat, 1990; Baxter, 1995; Cross, 2000; Dorst & Cross, 2001; Duchamp, 1988; Howard et al., 2008; Hubka et al., 1996; John, 1992; Le Coq, 1992; Pahl & Beitz, 1996; Quarante, 1994; Ulrich, 2000), comme l'illustre le modèle synthétique, développé en 2000, par Cross qui découpe le processus de conception en quatre étapes génériques : Exploration, Génération, Evaluation et Communication (Cross, 2000) présenté dans la Figure 16. La modélisation linéaire est reconnue dans la littérature comme étant la plus dominante (Howard et al., 2008).



Figure 16. Modèle macro du processus de conception proposé par Cross (Cross, 2000)

Modèles itératifs : mise en évidence du rôle cruciale de la conception amont

Avec l'arrivée progressive de la conception intégrée (Quarante, 1994) les processus de conception se sont vus modélisés de manière itérative comme l'illustre par exemple les travaux fondateurs menés au LCPI (Aoussat, 1990; Vadcard, 1996). Certains prennent la forme d'une succession de cycles élémentaire de conception (Gero & Kannengiesser, 2004; Lebahar, 1993) et d'autres se formalisant en spirale (Blessing, 1994; Boehm, 1988; Roozenburg, 1995). Des chercheurs, comme Suh (1999) se sont focalisés sur le passage d'un espace abstrait à un espace fonctionnel (Suh, 1999).

D'autres se sont intéressés aux notions de convergence et divergence à l'instar de Van der Lugt (Van der Lugt, 2000) ou de l'organisation Design Council. La pensée divergente (ou divergence) est définie comme étant la capacité à générer des idées originales en faisant varier les points de vue (Guilford, 1967) contrairement à la pensée convergente (ou convergence) qui est la capacité à évaluer et à trouver la solution idéale (Kryssanov et al., 2001). Le modèle proposé par le Design Council en 2006 connu sous le nom de « Double Diamond design model » propose une formalisation en double diamant qui permet de mettre en évidence ce phénomène de divergence et de convergence, comme illustré dans la Figure 17 (Design Council, 2006).

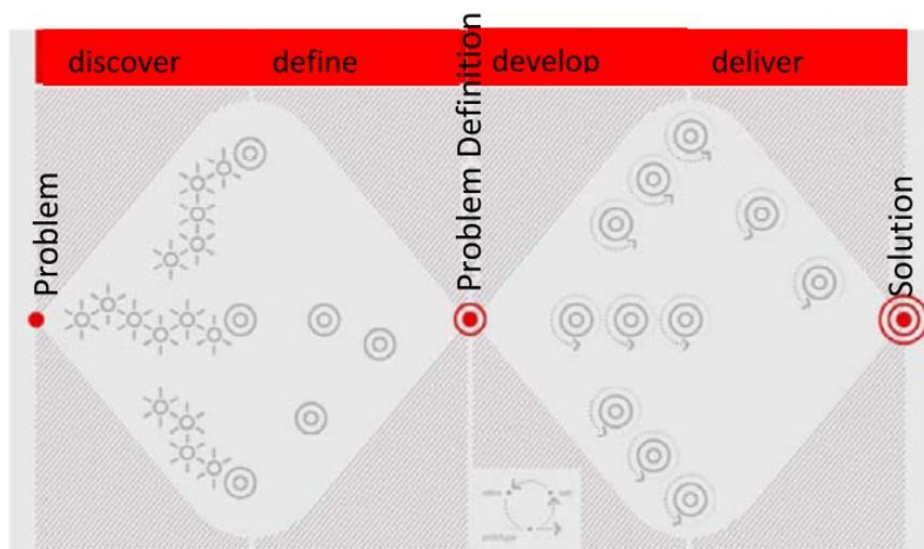


Figure 17. Le modèle Double-Diamant (Design Council, 2006)

Ce modèle met en évidence le rôle crucial de la phase amont, ici nommé « Discover », lors d'un projet de conception (Mougenot, 2009). Ce dernier point est également soulevé dans la littérature, qui identifie la conception amont comme étant stratégique pour le développement du produit et pour l'optimisation du processus de conception (Cross, 2000; Zeiler et al., 2007).

Selon Cross (2000) les praticiens doivent avoir la capacité de mobiliser une grande « attention », c'est-à-dire une grande agilité cognitive lors des premières phases du processus de conception. Plus le processus évoluera vers une solution acceptable, plus cette agilité sera réduite (Cross, 2000).

En 1997, Bouchard, a proposé une modélisation théorique du processus de conception amont (Bouchard, 2010). Ce modèle théorique considère (Bouchard, 2010) :

« Le processus de conception comme la matérialisation progressive d'un espace problème en un espace solution, selon un processus informationnel qui consiste à réduire l'abstraction par l'utilisation de cycles successifs de représentations mentales et physiques intégrant de plus en plus de contraintes ».

Celui-ci s'articule autour de 4 grandes phases cycliques : Information, Génération, Evaluation et Matérialisation (Figure 18). L'information, consiste à intégrer et assimiler les diverses données du cahier des charges et données d'inspiration. Les idées issues de cette première étape sont développées dans la phase de génération. L'évaluation, appréhende les processus expérimentiels (perceptif, cognitif, etc.). Enfin, la phase de matérialisation permet, à chaque cycle, la mise en forme et la représentation physique des idées et des concepts.

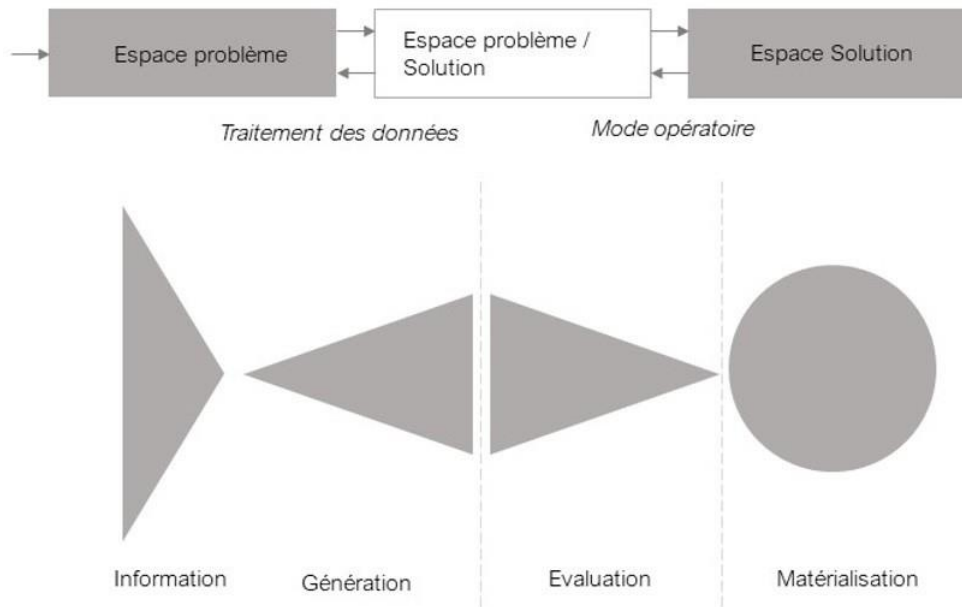


Figure 18. Modélisation du processus de conception amont (design), alternance des phases de divergence, convergence, matérialisation (Bouchard, 2010)

L'importance de la phase amont et plus précisément l'importance des mécanismes cognitifs sous-jacents est ici soulevée. Si la phase amont n'est pas correctement effectuée, cela aura un impact tout au long du processus car le problème de départ sera mal défini ce qui impliquera une augmentation du temps et des coûts de conception si celui-ci ne s'arrête pas avant ce qui correspondra à un échec de conception pour l'entreprise (Rias, 2017; Ullman, 2009).

Modèles co-évolutifs : étude des processus cognitifs en conception

Le contexte industriel actuel (§1.2) pousse les entreprises à proposer des solutions toujours plus innovantes dans des délais de plus en plus courts. Les modèles de conception ont donc évolué pour permettre une compréhension fine des mécanismes qui pilotent la conception afin que cette dernière soit performante (Bouchard, 2010; Brun, 2017). La prise en compte des activités cognitives des praticiens et de leurs rôles en conception innovante (Benami & Jin, 2002; Finke et al., 1992; Jin & Chusilp, 2006; Maher & Poon, 1996; McCoy & Evans, 2002) ont donc conduit à l'émergence de modèles de conception novateurs et plus proches des activités cognitives des praticiens. Ces modèles sont appelés des Knowledge space models (modèles d'espaces de connaissances) ou plus couramment modèles co-évolutifs (Howard et al., 2008). Il est supposé que pour ces modèles (Howard et al., 2008):

« (...) une certaine quantité de connaissances doit être acquise pour chaque phase du processus afin de réaliser une conception ».

Cette nouvelle modélisation co-évolutive propose une formalisation agile basée sur les mécanismes cognitifs qui sous-tendent la conception.

Dorst et al. (Dorst & Cross, 2001) propose une modélisation co-évolutive du processus de conception en distinguant deux espaces, l'espace problème et l'espace solution représentés en Figure 19 ci-dessous.

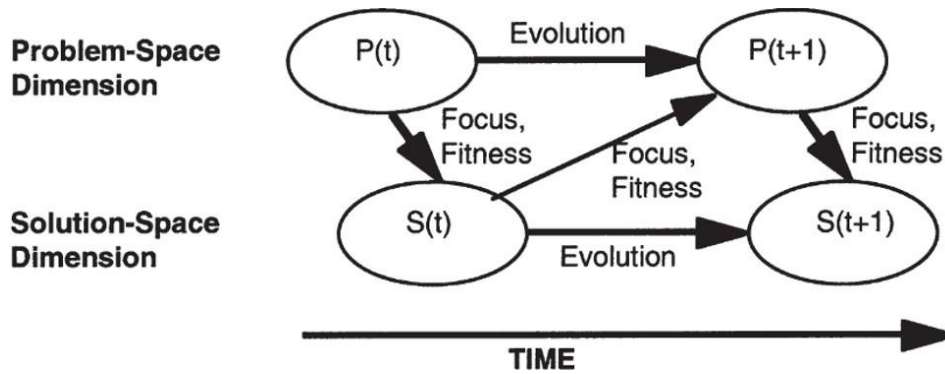


Figure 19. Modèle co-évolutif du processus de conception d'après Dorst (Dorst & Cross, 2001)

Ces modèles proposent une coévolution itérative du problème et de la solution tout au long du processus. En effet, en début de processus, le praticien fera face à un problème mal ou peu défini ($P(t)$), ces derniers définiront en générant un ensemble de solutions ($S(t)$) qui auront pour but de restructurer le problème ($P(t+1)$), d'en fournir une nouvelle représentation et générer de nouvelles solution ($S(t+1)$). Cette dynamique d'évolution implique que lors d'un mouvement dans un espace, tous les autres seront impactés et ainsi de suite. La conception de nouvelles solutions se base alors sur des connaissances ou des solutions préexistantes.

Le modèle « Radical Innovation Design » (RID) développé par Yannou et al. (2013) illustre également ces modèles novateurs et agiles (Yannou et al., 2013)(Figure 20). Ce modèle d'exploration systémique nécessite la prise en compte et l'intégration de facteur contextuels tels que : la présence, la réputation et le portefeuille des produits, la présence ou non de concurrents et fournisseurs, les actifs financiers de l'entreprise etc. Ces facteurs sont pris en compte dès la première étape d'explo ration et influencent l'ensemble du processus et des pistes d'innovation.

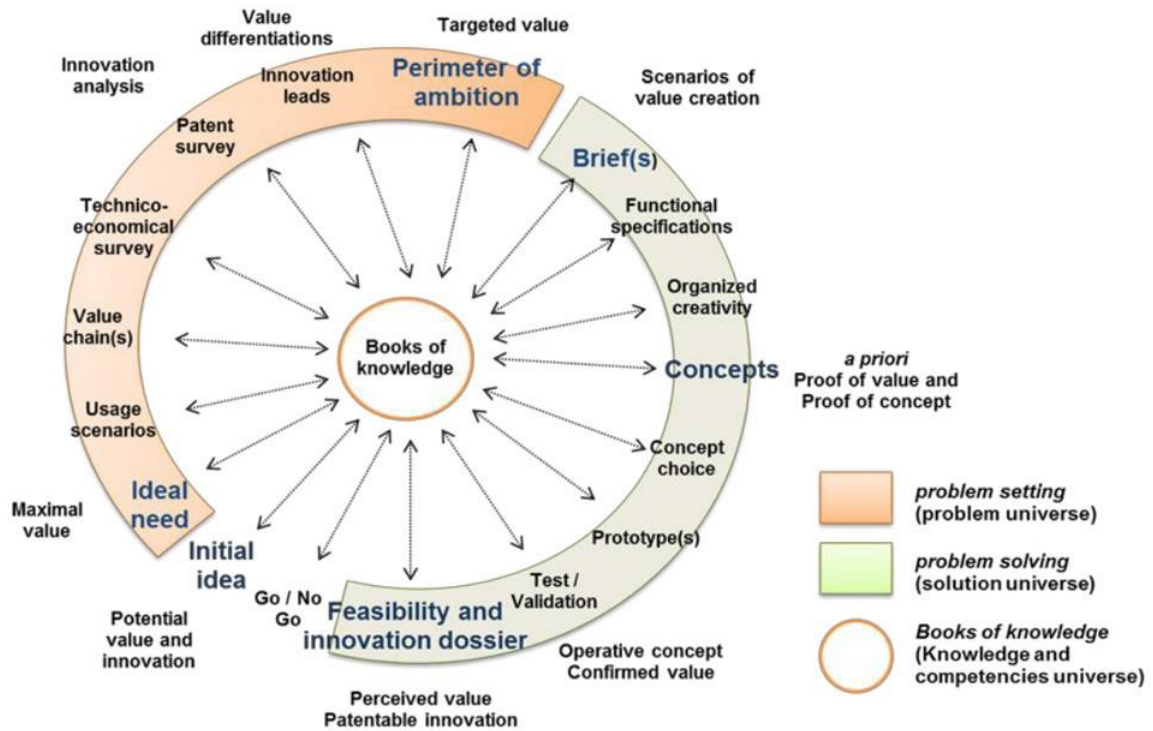


Figure 20. Modèle du processus de conception proposé par Yannou (Yannou et al., 2013)

En France, le modèle de la théorie C-K développé par Hatchuel et al. (Hatchuel, 2001; Hatchuel & Weil, 2002, 2003, 2009) représente un modèle fondateur en conception innovante. Ce modèle décrit la conception comme étant un processus d'interaction entre un espace conceptuel (C) et un espace des connaissances (K) comme l'illustre la Figure 21 ci-dessous. Ce modèle sera détaillé dans la partie 2.3.2.2.

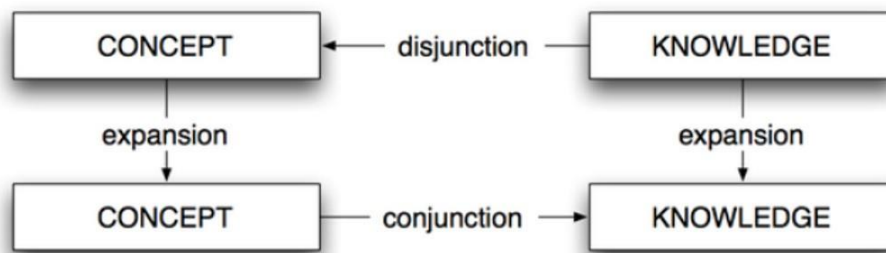


Figure 21. Circulation entre les espaces C et K d'après (Hatchuel & Weil, 2003)

D'après les modèles co-évolutifs, la résolution de problème résulte alors d'une co-évolution, d'un co-mouvement entre problème et solution tout au long de la durée du processus de conception.

Néanmoins, n'ayant plus d'axe chronologique ces modèles prennent fin dès lors que la représentation du design final de l'artefact produit est générée (Visser, 2011). Cela implique que le but n'est pas de générer la solution « optimale » mais de générer la solution la plus « acceptable/satisfaisante » (Dorst & Cross, 2001). Ces modèles se basent sur les connaissances, il est donc aisé de comprendre que le praticien ne pourra pas explorer l'ensemble des solutions possibles mais devra faire un choix et juger si la ou les solution(s) émises sont suffisamment satisfaisantes (Bila-Deroussy, 2015). Une évaluation des représentations devra alors être effectuée par le concepteur (Visser, 2011). Une fois la/les solutions choisie(s), le mécanisme cognitif lié à la conception amont s'arrête pour laisser place à la phase aval qui aura pour objectif la mise sur le marché des solutions innovantes.

L'émergence de ces processus prenant en compte les activités cognitives des praticiens permet de mettre en évidence le rôle déterminant des connaissances en conception innovante que nous explorons dans la partie suivante.

2.3.1.2 L'importance de la structuration et du transfert de connaissances en conception innovante

La communauté scientifique s'accorde quant au rôle essentiel des connaissances, de leurs structururations et de leur transfert pour la conception (Hatchuel & Weil, 2009; Nonaka & Kono, 1998; Von Krogh et al., 2000).

En conception innovante (Le Masson & Weil, 2010), l'identification de connaissances inconnues et originales, leurs structururations et leurs transferts jouent un rôle stratégique. En effet cela permet de questionner, renouveler et rediscuter l'identité des objets existants permettant de passer d'un objet qui n'existe pas à sa conception puis sa réalisation.

Cependant, la structuration et le transfert de connaissances qu'il soit cognitif (individuel) (Brun et al., 2016) ou externe (entre individus, dans une notion de transmission) (Carvajal Pérez et al., 2018; Le Masson et al., 2016) est reconnu dans la littérature comme étant difficile et chronophage (Carvajal Pérez et al., 2018). Des études se sont alors concentrées sur (i) l'enseignement du design qui permet d'acquérir une agilité cognitive pour la structuration des connaissances et (ii) sur la capacité de génération de la structuration et du transfert de connaissances.

La structuration des connaissances, bases de l'enseignement du Design

En 2016, pour comprendre le rôle du transfert de connaissances dans l'enseignement du Design, Le Masson et al. (2016) ont étudié comment les cours proposés par l'école du Bauhaus donnaient des clés aux étudiants pour comprendre les différents courants artistiques (anciens et nouveaux), mais aussi pour leur permettent d'en créer de nouveaux. Grâce à ce nouvel enseignement du design (qui est toujours d'actualité) les étudiants créent une structure de connaissances caractérisée par la non-modularité et la non-indépendance, contrairement à l'enseignement en ingénierie de la conception, caractérisée par des structures de connaissances qui empêchent la condition de division (« splitting » knowledge) et qui sont caractérisées par l'indépendance et le déterminisme (Le Masson et al., 2016). En prenant l'exemple de l'enseignement donné par le Bauhaus, il est intéressant de noter que les designers ont pu apprendre un processus de conception qui les a aidés et qui les aidera à

être génériquement créatifs. Ce processus se base sur une accumulation progressive et robuste de langages généraux sur l'objet (langages fonctionnels, conceptuels, d'incarnation et de détail) (Le Masson & Weil, 2013).

Les travaux de Visser et al., (Falzon & Visser, 1989; Visser, 2011) décrivent également cette typologie d'enseignement des profils créatifs tels que les designers et leur structure de connaissances. Ils ajoutent que la connaissance en design est acquise non pas à travers une éducation formelle, mais à travers l'expérience. C'est en travaillant sur différentes typologies de projet et à travers différentes interactions avec d'autres spécialités qu'ils acquièrent une agilité à structurer les connaissances de manière à favoriser la générativité (Falzon et Visser, 1989).

Cette agilité cognitive et leurs compétences font, aujourd'hui, des designers, des atouts pour l'innovation et la créativité. Nous listons ci-dessous, de manière non exhaustive, les compétences que nous considérons comme étant particulièrement intéressantes pour la collaboration interdisciplinaire :

- Créer des ponts cognitifs entre différentes connaissances (Le Masson & Subrahmanian, 2013)
- Donner une vision holistique (Letard et al., 2018)
- Vaincre les fixations cognitives (Agogué et al., 2015)
- Produire des idées originales (Agogué et al., 2015)
- Matérialiser et contextualiser les idées et les connaissances par le biais d'un artefact, d'une représentation ou d'un cas d'utilisation (Driver et al., 2011; Kim et al., 2010; Letard et al., 2018; Visser, 2011)
- Remettre en question la perception d'autres profils sur leurs données en étant exposé aux représentations des concepteurs (Driver et al., 2011)
- Aider les autres profils à comprendre et à générer des idées (Driver et al., 2011)
- Faciliter la communication et le rayonnement du projet (Driver et al., 2011)
- Identifier les parties prenantes appropriées pour le bon déroulement du projet (Chouki et al., 2018)

Le transfert de connaissances : de la restructuration des connaissances à la générativité

En s'appuyant sur le cadre de la théorie C-K, Brun et al., (2016), ont formalisé de façon précise, le phénomène de restructuration des connaissances par les croquis qui induit une générativité de concepts (Brun et al., 2016). Plus précisément, la chercheuse a analysé les effets générateurs des croquis en étudiant la façon dont elles soutiennent la stratégie de conception des profils créatifs, à savoir celle d'un architecte dans l'étude. Il a ainsi été relevé que les croquis se réfèrent aux concepts mais également et surtout aux connaissances, permettant, ici à l'architecte, de mobiliser des connaissances éloignées du sujet initial. La stratégie mise en place est donc axée sur la connaissance et axée sur le concept. Au travers de cette analyse une notion clé a été soulevée : l'architecte effectue un travail important de structuration des connaissances appelé « knowledge preordering » qui permet de constituer une base de connaissance fractionnée augmentant la capacité de génération (Brun et al., 2016; Le Masson et al., 2016). Cette recherche valide et propose une continuité à celle menée par Le Masson et Weil (2016). En effet, il est mis en avant que les profils créatifs, grâce au « knowledge preordering », abandonnent tous les éléments impliquant une modularité ou un déterminisme de façon à construire une structure de connaissance divisée (« splitting » knowledge) qui offre de nouvelles règles génératrices de concepts et d'idées originales (Brun et al., 2016). A la suite de cette étude, Brun (2016) a soulevé que :

« Les outils non verbaux pourraient précisément s'avérer être un moyen privilégié de renforcer cette structuration générative des connaissances lors des sessions de créativité. »

Nous détaillons cette hypothèse en partie 2.3.

Plus récemment, Carvajal Pérez et al. (2018) ont étudié le transfert de connaissances, ici appelée le transfert du « patrimoine créatif » entre un concepteur source et un concepteur destinataire. Ce transfert du « patrimoine créatif » a des effets positifs sur l'originalité et l'efficacité opérationnelle lors de projets d'innovation (Carvajal Pérez et al., 2018). Les auteurs définissent dans ces recherches une variété d'héritages générateurs, qui peuvent être classés en 4 types de générativité (Carvajal Pérez et al., 2018) :

Type 0. Générativité de sélection : représente la capacité du concepteur source à fournir au concepteur récepteur un ensemble de connaissances permettant de reproduire des objets.

Type I. Générativité combinatoire : représente la capacité du concepteur source à créer un modèle général composé de modules à combiner pour permettre aux concepteurs destinataires de créer de nouveaux objets.

Type II. Générativité expansive : représente la capacité du concepteur source à identifier des modules de connaissance connus mais aussi des modules de connaissance inconnus qu'il transmet au concepteur destinataire.

Type III. Générativité de type III : représente la capacité du concepteur source à créer un nouveau langage pour décrire l'objet ou le processus de conception, qui fournit au concepteur du destinataire un nouveau cadre de référence.

Conclusion quant au rôle du transfert de connaissance en conception innovante

Pour résoudre les problèmes complexes que rencontrent nos sociétés, les chercheurs ont développé des processus co-évolutifs prenant en compte les activités cognitives des praticiens. Pour alimenter ces processus la communauté scientifique a étudié le rôle de la structuration et du transfert de connaissances nous permettant de relever quatre constats : (i) l'enseignement proposé en formation dans les écoles de Design permet de développer une agilité cognitive pour structurer les connaissances et des compétences d'intérêt pour faciliter la collaboration interdisciplinaire, (ii) la structuration des connaissances favorise la créativité comme le montre la typologie d'enseignement dispensé aux designers (Le Masson et al., 2016) (iii) la structuration des connaissances peut être favorisée par l'utilisation de langage non verbal comme les croquis, ce qui augmentera la capacité de génération des concepteurs (Brun et al., 2016), (iv) le patrimoine créatif peut être transféré d'un concepteur source à un concepteur destinataire selon quatre types de générativité et engendre des effets positifs sur l'originalité et l'efficacité opérationnelle lors de projets d'innovation (Carvajal Pérez et al., 2018).

Pour compléter cet état de l'art, les facteurs, méthodes et outils organisationnels qui facilitent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire sont présentés dans la partie suivante.

2.3.2 Facteurs, méthodes et outils qui favorisent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire

Bien qu'essentielle, l'étude des impacts des caractéristiques des équipes de conception sur l'innovation est récente alors que les recherches concernant les processus cognitifs individuels sont plus anciennes (Reiter et al, 2011). Cet intérêt grandissant est intimement lié au contexte industriel concurrentiel. Les problèmes auxquels sont confrontées les organisations (entreprises, industries ...) sont de plus en plus complexes de sorte que les connaissances d'un individu seul ne suffisent pas à les résoudre (Reiter et al, 2011). C'est en ce sens que l'étude des équipes et leurs caractéristiques (compositions, profils d'intérêt, communication, cognition, ...) est considérée comme étant source de solutions notamment en termes d'innovation mais également de créativité (Ford, 1996; Rias, 2017). Engeström (2001) affirme que la créativité n'est pas le produit d'un seul individu mais qu'elle est générée par l'interaction entre les pensées d'une personne et un contexte social. En d'autres termes, l'activité créatrice n'émerge que si des interactions (positives) se mettent en place entre un individu (sa personnalité, ses motivations, ses connaissances ...) et un environnement qu'il soit social ou technique (Fischer et al., 2005).

Dans ce contexte, les organisations ont de plus en plus recours à des équipes plutôt que des individus seuls pour les activités d'innovation et de créativité (Edmondson & Roloff, 2008) car elles offrent des avantages comme un accès à une diversité d'informations et de connaissances, la multiplication des perspectives ou encore la capitalisation de compétences variées liées aux individus qui composent ces équipes (Tesluk et al., 1997).

Afin d'assurer les avantages cités ci-dessus, la prise en compte des freins rencontrés par l'équipe interdisciplinaire est nécessaire. Deux freins majeurs sont identifiés (Schöfer, 2015): (i) les résultats comparant les performances des équipes et celles des individus restent mitigés et non significatifs, (ii) à court terme, la diversité disciplinaire réduit l'efficacité et l'efficience des équipes à cause de différents facteurs tels que la pensée de groupe, l'influence de la majorité, le partage d'informations communes, les schémas interprétatifs incohérents ou encore les conflits non gérés. De plus, les entreprises et les unités de recherche sont de plus en plus poussées à résoudre des problèmes d'interdisciplinarité afin d'appliquer leurs connaissances à de nouveaux marchés et à de nouvelles applications (Schöfer, 2015; Schöfer et al., 2018).

Dans la partie suivante nous nous concentrons sur les facteurs liés à la composition des équipes ainsi que les facteurs environnementaux. En complément, les différentes méthodes et outils associés développés afin d'accompagner les équipes à surmonter ces freins sont exposés.

2.3.2.1 Facteurs qui favorisent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire

Dans la littérature scientifique nous avons identifié deux facteurs clés qui favorisent l'innovation et la collaboration interdisciplinaire : (1) la composition des équipes (ex : diversité démographique, diversité fonctionnelle, styles cognitifs et des personnalités, perte ou gain d'acteurs) et (2) les facteurs environnementaux (La communication au sein de l'équipe, La gestion des conflits, L'alternance du travail individuel et collectif, ...). Nous détaillons ces deux facteurs dans cette sous-partie.

Composition des équipes

L'un des facteurs les plus influents sur la performance en innovation et en créativité est la composition des équipes (Ilgen et al., 2005; Woodman et al., 1993). Selon Reiter-Palmon et al. (2011), il est possible de découper l'étude de la composition des équipes en 4 éléments distincts : (i) la diversité démographique, (ii) la diversité fonctionnelle, (iii) les styles cognitifs et les personnalités et (iv) L'ajout ou la perte d'un membre de l'équipe (Reiter-Palmon & De Vreede, 2011).

D'après leurs études, la diversité démographique concernant parfois le sexe, les origines, l'âge ou encore l'ensemble de ces critères est aujourd'hui encore trop méconnu et complexe pour identifier précisément leurs impacts sur les processus d'innovation et de créativité et nécessite des recherches supplémentaires.

La diversité fonctionnelle reliée aux notions de performances professionnelles (métier, éducation, fonction dans l'organisation, connaissances, compétences et capacités) quant à elle est reconnue comme étant positivement liée à l'innovation et la créativité (Hülshager et al., 2009; Milliken et al., 2003). En effet, les équipes composées d'individus de milieux fonctionnels variés sont reconnues plus créatives et innovantes que les équipes homogènes (Fay et al., 2006).

La littérature, bien que limitée sur l'étude des styles cognitifs et des personnalités, identifie que la diversité de styles cognitifs impacte positivement les capacités créatives d'une équipe (Basadur & Head, 2001). Par exemple, Kutzberg (2005) a démontré que la diversité du style cognitif favorise la fluidité, c'est-à-dire le nombre d'idées générées par les équipes. Il est également reconnu que les équipes étant composées d'un grand nombre de profils créatifs avaient une tendance positive à favoriser la créativité (Mathisen et al., 2008).

De plus, des études ont analysé les impacts de profils dit « extravertis » ou « créatifs » et d'autres dit « consciencieux » ou « attachés aux traditions et aux modèles anciens » (Alberti, 2009; Barry & Stewart, 1997; Robert & Cheung, 2010). Leurs résultats indiquent que les équipes les plus créatives étaient celles accueillant des individus « extravertis » dans l'équipe mais à moins de 50% du nombre total d'individu composant l'équipe. Ils ont également relevé que les profils « attachés aux traditions et aux modèles anciens » étaient plus favorables à la conception routinière (Alberti, 2009). A ces résultats Baer et al. (Baer et al., 2008) ont ajouté le paramètre de « confiance créative » (i.e. le sentiment que l'équipe est capable de générer des idées créatives) qui impacte positivement la génération d'idées collectives indépendamment des personnalités.

Enfin, en pratique les équipes sont assez souvent amenées à perdre ou gagner des individus (Levine et al., 2003), ces changements peuvent être vus comme négatifs pour les projets ou l'entreprise notamment lorsqu'un nouveau membre intègre l'équipe car ce dernier n'aura généralement pas les compétences ou les connaissances nécessaires ou sera encore novice sur le sujet traité (Levine & Choi, 2004). Néanmoins l'ajout ou le changement de membres de l'équipe peut également être positif pour la créativité, notamment sur le nombre d'idées générées, car cela implique l'ajout de nouvelles informations, connaissances, visions, idées et perspectives (Choi & Thompson, 2005; Levine et al., 2003; Reiter-Palmon & De Vreede, 2011), préconisent d'approfondir les recherches concernant l'impact des changements d'équipes sur la créativité et les processus d'innovation.

Plus récemment, Schöfer (Schöfer, 2015; Schöfer et al., 2018) a étudié l'impact de la composition des groupes dans le cadre de l'utilisation de différentes méthodes de résolution de problèmes en s'intéressant particulièrement aux transferts de connaissances. Ces travaux ont démontré que la pluridisciplinarité affectait positivement le processus de résolution de problème (à la fois du point de vue de la gestion de l'information durant la résolution et du point de vue de la qualité, quantité et originalité des solutions générées). Ces recherches ont également démontré l'intérêt qualitatif et quantitatif d'associer des profils scientifiques tels que les biologistes avec des ingénieurs durant le processus de créativité et de résolution de problèmes. De plus, il démontre, au travers l'utilisation d'outils issus de la TRIZ (Altshuller, 1984) l'intérêt de modéliser les concepts associés aux sciences naturelles pour favoriser la communication interdisciplinaire (Schöfer, 2015; Schöfer et al., 2018).

Facteurs environnementaux

Les organisations doivent développer un environnement propice afin de supporter efficacement l'innovation et la créativité (Bila-Deroussy, 2015; Martensen & Dahlgard, 1999). Les processus sociaux permettant une continuité d'effort, diversifié et large d'esprit (Fischer et al., 2005) contribuent de manière importante à l'innovation et à la créativité des équipes.

Différents facteurs environnementaux favorisant la créativité ont été identifiés dans la littérature (Bila-Deroussy, 2015; Chang, 2011; Hülshager et al., 2009; Reiter-Palmon & De Vreede, 2011):

La communication au sein de l'équipe / la possibilité d'expression : celle-ci est intimement liée à l'innovation et à la créativité. Elle a un impact positif lorsque celle-ci est collaborative et ouverte permettant alors aux membres de l'équipe de se sentir en sécurité (Edmondson, 2004) et libre d'exprimer ses idées sans contraintes et de manière égale (Chang, 2011). De plus, il est fortement suggéré que les équipes soient formées aux techniques de communication (Marks et al., 2001). En effet, les effets négatifs issues des conflits ou de la diversité peuvent être atténués par une communication interne efficace la mise en place d'un sentiment de confiance commun (Reiter-Palmon & De Vreede, 2011).

La gestion des conflits : il est important que les conflits soient gérés de manière agile et constructive de sorte que la cohésion de l'équipe et donc les résultats créatifs et innovants ne soient négativement impactés (Salas et al., 2005).

La gestion tout au long d'un processus : il a été constaté que selon l'avancée d'un projet dans le temps et de la phase du cycle du projet, la coordination, la communication ou encore l'effet des conflits étaient changeants (Hoegl et al., 2004; Kratzer et al., 2006). De plus, Chang (Chang, 2011) indique que le « timing opportun », la reconnaissance et le suivi clair d'une procédure structurée au cours du temps auront un impact positif sur la créativité et permettront de parvenir à un niveau d'innovation élevé.

L'importance du rôle du « manager » : le manager doit surveiller, évaluer, encourager et guider les équipes tout au long du processus tout en accompagnant individuellement les membres de l'équipe (Chang, 2011). Un manager favorisant des relations positives et solidaires améliorera la communication et aura un impact positif sur l'innovation et la créativité (Hunter et al., 2007).

L'alternance du travail individuel et collectif : Osborn (Osborn, 1953; Osborn, 1988) soulève que l'effort individuel et les réflexions de groupe sont complémentaires. Néanmoins, l'alternance de ces deux phases est nécessaire pour permettre d'une part aux individus de générer de nouvelles idées et pistes de solution (phase de divergence) et d'autre part dédier un temps pour le partage, la discussion ou encore l'évaluation collective (phase de convergence) (Hoegl & Parboteeah, 2007; Park et al., 2008).

Le soutien à l'innovation (Hülshager et al., 2009) : Dans un environnement où l'innovation et la créativité sont soutenues et où les tentatives d'innovation non menées à bien sont susceptibles d'être tolérées, les membres des équipes sont plus enclins à prendre des risques pour mettre en œuvre de nouvelles idées (King et al., 1991; Sethi et al., 2001). Dans ce cadre, l'innovation et la créativité sont favorisées, et les idées nouvelles sont encouragées et valorisées (Amabile et al., 1996; Madjar et al., 2002; Scott & Bruce, 1994; Shin & Zhou, 2003).

Des méthodes et outils ont alors été développés afin d'accompagner la mise en place de certains de ces facteurs et ainsi favoriser la performance la collaboration interdisciplinaire.

2.3.2.2 Méthodes favorisant la collaboration interdisciplinaire

Les processus cognitifs au sein des équipes sont notamment étudiés afin de développer des méthodes et des outils qui ont pour but d'aider et d'accompagner les équipes à générer de nombreux concepts, à favoriser la qualité créative des idées et concepts générés ou encore à augmenter les capacités de création de chacun des membres (Rias, 2017). Ces méthodes et les outils et techniques associées peuvent être classés en deux catégories (Shah et al., 2003) :

Les méthodes intuitives : utilisent des mécanismes pour briser les blocages mentaux et maximisent le nombre d'idées générées.

Les méthodes logiques : impliquent une décomposition et une analyse fine du problème, en s'appuyant fortement sur des bases de données techniques et sur des bases de connaissances.

Méthodes intuitives

L'une des méthodes intuitives les plus connues et certainement la plus répandue en entreprises est le brainstorming (Osborn, 1953; Osborn, 1988; Paulus & Paulus, 1997). Développée au début des années 50 par Osborn (1953,1988), cette méthode a permis de sensibiliser un grand nombre d'entreprises en les incitant à générer une grande quantité d'idées sans jugement et contraintes et en encourageant les idées farfelues (Bila-Deroussy, 2015). Par sa vocation à générer de façon quantitative des idées le brainstorming est souvent critiqué comme l'illustre les propos de De Bono cité par Aznar et par Bila-Deroussy (2005) :

« Le processus du brainstorming donne parfois l'impression que la créativité intentionnelle se résume à émettre des rafales d'idées folles dans l'espoir que l'une d'elles pourra atteindre sa cible (...) d'après mon expérience, cependant, je dirai qu'il est dépassé peu efficace. »

A l'instar de la définition de la conception proposée par Visser (Visser, 2011), certains chercheurs se sont appuyés sur le fait que la création de représentations était un élément moteur pour les processus créatifs dans le but de développer des variantes du brainstorming et ainsi augmenter la génération d'idées par : la production de représentations textuelles (« Brainwriting » (VanGundy, 1984) ; « Brainstorming with post-it ®notes » (Vehar, 1997)), des représentations visuelles (« Visual brainstorming », « Brainsketching » (Van Der Lugt, 2000)) ou encore des représentations tangibles (objets, maquettes, prototypes ...) (« Objectual Brainstorming » (Van der Lugt, 2000)).

Il est intéressant de noter également que lorsque le brainstorming est guidé et dirigé, il aboutit à un plus grand nombre de solutions générées ainsi que des notes de créativité plus élevées (Santanen et al., 2004). Paulus et al. (Paulus et al., 2006) ont également constaté que les équipes auxquelles on avait fourni des règles pour le brainstorming ont généré plus d'idées que les groupes auxquels on n'avait pas donné de règles. Cela suggère que les règles et les instructions peuvent jouer un rôle important dans la génération d'idées en équipe.

Bila-Deroussy (Bila-Deroussy, 2015), en s'appuyant sur la classification de Shah (Shah et al., 2003), a proposé dans ses travaux une synthèse des méthodes intuitives et des outils associés que nous présentons ci-dessous :

Nom de la méthode	Descriptif de la méthode	Outils et techniques associés
Brainstorming (Osborn, 1953, 1988)	Démarche en deux temps (divergence/convergence), qui consiste à générer une grande quantité d'idées, en suspendant le jugement, en associant sur les idées des autres, et en encourageant les idées farfelues.	<i>Brainwriting</i> (VanGundy, 1983) : les participants écrivent eux-mêmes leurs idées
		<i>Brainstorming with post-it® notes</i> (Vehar et al., 1999) : les participants écrivent eux-mêmes leurs idées sur des post-it® notes
		<i>Visual Brainstorming</i> (Van der Lugt, 2000) : utilisation de stimuli visuel (photos, vidéos, etc.)
		<i>Objectual Brainstorming</i> (Van der Lugt, 2000) : utilisation de stimuli tangibles (objets, maquettes, prototypes,...)
		<i>Brainsketching</i> (Van der Lugt, 2000) : générer des idées en respectant une contrainte de temps et de quantité, et de format (dessin).
		<i>6-3-5</i> (Vehar et al. 1999) : générer des idées en respectant une contrainte de temps et de quantité : 3 idées toutes les 5 minutes par 6 personnes.
Synectique (Gordon, 1965)	Démarche en trois temps. La première phase (divergence) est enregistrée, puis une deuxième phase de réécoute constitue l'idéation à proprement parlé. Le processus se conclut par une phase de sélection des pistes à approfondir (convergence et évaluation).	<i>L'analogie directe</i> : mettre en parallèle des faits, des connaissances ou des disciplines différentes
		<i>L'analogie personnelle</i> : s'identifier aux termes de son problème
		<i>L'analogie symbolique</i> : une vision immédiate du problème, condensée dans une image objective et impersonnelle, esthétiquement satisfaisante ou techniquement pertinente
		<i>L'analogie fantastique</i> : l'expression du désir, la solution magique d'un problème, ce qui se passerait dans le meilleur des mondes.
Détournement (Aznar, 2005)	Il s'agit d'abord d'identifier les éléments et fonctions d'un problème puis de casser les relations entre ces éléments, et de décomposer le problème.	<i>Techniques de déformation</i> : SCAMPER, La Liste de Brabandère, etc.
		<i>Techniques de rencontres forcées</i> : les matrices de découverte, de combinaison, morphologique, etc.
		<i>Techniques projectives</i> : identification, identique à l'analogie personnelle
		<i>Techniques oniriques</i> : identique à l'analogie fantastique
		<i>Techniques graphiques</i> : identique à l'analogie symbolique

Tableau 3. Méthodes intuitives et outils associés (Bila Deroussy, 2015)

Méthodes logiques

Sur le même modèle (Shah et al., 2003), Bila-Deroussy (Bila-Deroussy, 2015) a proposé dans ses travaux une synthèse des méthodes logiques et des outils associés que nous présentons ci-dessous :

Nom de la méthode	Descriptif de la méthode	Outils et techniques associés
Pensée Latérale (Edward de Bono, 1967)	Elle se déroule en quatre étapes : Définir et partager le sujet, générer des idées, développer les idées et présenter les résultats. La pensée « latérale » considère qu'une solution impossible ou irréaliste peut servir d'étape à la découverte d'une solution possible éventuellement innovante.	<i>Inverser ou exagérer le problème,</i>
		<i>Détournement ou distorsion des faits</i>
		<i>Utopie</i>
		<i>Analogies éloignées</i>
		<i>Mots aléatoires</i>
		<i>Méthode « Po »</i>
Théorie TRIZ (Altshuller, 1956 ; Horowitz, 1999)	Partant du postulat que des solutions antérieures peuvent s'appliquer à un problème de conception nouveau, TRIZ propose des outils de déblocage de l'inertie mentale, permettant de profiter de l'expérience acquise dans différents domaines d'activité. TRIZ propose l'adaptation de « principes d'inventions » en solutions applicables	<i>ASIT Suppression</i> : supprimer un composant
		<i>ASIT Division</i> : diviser un composant et l'utiliser ailleurs
		<i>ASIT Multiplication</i> : dupliquer un composant en lui donnant un autre usage
		<i>ASIT Unification</i> : faire réaliser à un composant plusieurs usages
		<i>ASIT Rupture de symétrie</i> : changer les valeurs des caractéristiques d'un composant
Théorie C-K (Hatchuel, 1996 ; Hatchuel et Weil, 2003, 2004)	La méthode commence par reformuler le problème. Celui-ci est ensuite divisé et une partition est sélectionnée. A partir de cette partition du concept, des connaissances sont mobilisées dans l'espace K, puis le concepteur retourne dans l'espace C afin de créer de nouvelles partitions du concept, et ainsi de suite.	<i>La méthode DKCP</i> (Hatchuel, 2009) : une transposition de la théorie C-K en un processus divisé en 4 étapes : <ul style="list-style-type: none"> - Définition du thème d'innovation - Mutualisation intensive des connaissances - Détermination de concepts déclencheurs puis d'atelier de conception - Transformation des concepts et connaissances en propositions
Design Thinking (IDEO, 2002)	Une démarche qui favorise l'analyse des freins et motivations des utilisateurs, afin de mieux cerner leurs besoins. Elle est divisée en cinq phases. On note que le processus n'est pas linéaire, et que de nombreux retours en arrière sont possibles, notamment à l'issue des phases de tests. A chaque situation correspond un ensemble d'outils, et il n'est pas rare que chaque concepteur adapte les outils existants à son propre cas d'usage.	Les techniques de <i>collecte d'information</i> : Activity analysis, Affinity diagrams, Competitive product survey, Cross-cultural comparisons, Flow analysis, Long-range forecasts
		Les techniques de <i>observation</i> : A day in the life, Behavioral mapping, Rapid ethnography, Shadowing, Social network mapping, Stillphoto survey
		Les techniques de <i>conception</i> : Swimlanes, Design pattern, Process flow, Design the box, Concept model, Tangible futures, Experience map, Scenario planning, Concept video
		Les techniques de <i>questionnement</i> : Camera journal, Card sorting, Collage, Draw the experience, Extreme user interviews, Five whys, Foreign correspondents, Narration, Surveys
		Les techniques de <i>évaluation</i> : Bodystorming, Empathy tools, Paper prototyping, Quick-and-dirty prototyping, Roleplaying, Scale modeling, User scenario, Scenario testing

Tableau 4. Méthodes logiques et outils associés (Bila Deroussy, 2015)

Les deux tableaux présentés ci-dessus ont constitué une base de connaissances nous permettant d'explorer plus en détail deux méthodes d'intérêts pour ces travaux. D'une part la théorie C-K (Hatchuel et al., 2013; Hatchuel & Weil, 2002, 2003, 2009) car ce modèle propose un cadre théorique qui est aujourd'hui utilisé pour étudier la structuration et le transfert de connaissances en conception innovante. D'autre part, le Design thinking (Brown, 2008, 2009), car ce modèle s'appuie sur certains processus cognitifs développer dans le domaine du Design (Carlgren et al., 2016), permet de développer une agilité cognitive pour la structuration des connaissances.

La théorie C-K (Hatchuel & Weil, 2009) : est un modèle co-évolutif (§2.3.1.1) développé à partir d'expérimentations menées au sein de grands groupes industriels et ayant pour but de favoriser le pilotage des premières étapes du processus de conception (qui correspondent souvent à une exploration dans l'inconnu) (Brun, 2017). Elle fournit un cadre théorique générique pour la modélisation et l'interprétation du raisonnement et des opérations cognitives à l'origine des activités créatives et innovantes, ce qui permet d'étudier les processus générateurs. La modélisation est divisée en deux espaces, l'espace de la connaissance (K) et l'espace des concepts (C). L'espace K rassemble ce qui est connu et décidable, c'est-à-dire ce qui a un statut logique, tandis que l'espace C rassemble ce qui est inconnu et indécidable (Brun et al., 2018; Hatchuel & Weil, 2009). L'espace C est un espace organisé et structuré ne permettant que l'addition ou la soustraction de propriétés qui lui donne une structure arborescente (cloisonnement). L'espace K est composé de bases isolées (Hatchuel & Weil, 2009), qui représentent des poches de connaissances, ajoutées sans ordre ni connexion directe. Selon la théorie C-K, le processus de conception consiste à élargir à la fois l'espace des concepts et celui des connaissances : c'est précisément l'interaction entre les connaissances et les concepts qui permet aux idées innovantes d'émerger. Divers outils et techniques associées ont découlé de la théorie C-K, telles que C-K invent pour la conception de brevets (Felk et al., 2011) ou encore les ateliers KCP pour l'organisation de la conception en entreprise (Hatchuel & Weil, 2009).

Le Design thinking (Rowe, 1991) : a été conceptualisé par Peter Rowe puis largement diffusé et promu par Tim Brown co-fondateur de l'agence de design IDEO, est apparu comme une approche de l'innovation centrée sur l'homme et basée sur les modes de pensée et de travail des designers (Brown, 2008, 2009; Martin, 2009). L'agence de design IDEO et la Rotman School of Management (Martin, 2009) mise sur le Design Thinking en soulignant que toutes disciplines et donc toutes entreprises peuvent, dans leurs pratiques, s'inspirer et apprendre de la façon dont les designers pensent et travaillent afin d'innover du point de vue du développement de produits mais également du point de vue stratégique et organisationnel (Brown, 2009; Brown & Katz, 2011; Carlgren et al., 2016; Frisendal, 2012; Holloway, 2009). Cette méthode favorise l'analyse des freins ainsi que les motivations des individus afin de cerner finement les besoins. Elle se subdivise classiquement en 5 étapes : (1) Empathize qui représente la phase d'exploration, (2) Define qui se concentre sur l'analyse, (3) Ideate qui consiste en la phase d'idéation, (4) Prototype, cette étape permet de modéliser les idées et enfin (5) Test correspondant à l'étape de test des modélisations.

A l'instar du brainstorming, le Design Thinking est également critiqué. Certains stipulent que ce modèle, largement diffusé par les managers et non par des profils designers professionnels, perd toute sa puissance créatrice au profit d'une systématisation et d'une rationalité qui par conséquent rassurent les entreprises (Johansson-sköldberg & Woodilla, 2013). Garel et al (Garel & Rosier, 2008) appuient également le fait que les individus utilisant cette méthode n'étaient pas nécessairement les

mieux placés pour repenser les applications ou usages d'un objet car ils risquent de faire face à un certain nombre de fixations cognitives (Agogué, 2012).

Pour conclure cette seconde partie de l'état de l'art, nous nous intéressons aux représentations comme outils de communication.

2.3.2.3 La construction de représentations pour favoriser la collaboration interdisciplinaire

La construction de représentations est un élément clé pour la créativité tout au long du processus de conception (Visser, 2011). Les représentations peuvent être internes (mentales) ou externes, nous les détaillons dans cette partie. Nous nous intéresserons plus particulièrement au rôle des représentations non-verbales en conception collective (Brun, 2017).

Représentations internes :

Dans ses travaux de thèse, Bila-Deroussy décrit la genèse du système cognitif, en l'illustrant par le développement de l'enfant à l'instar de Arnheim (Arnheim, 1971). Il la décrit alors en trois niveaux. Le premier, le percept, correspond à la découverte d'un environnement et à l'apparition d'un premier matériel cognitif. Le second niveau appelé la représentation mentale, définit une construction (avec l'ajout de connaissances) plus stable de l'objet perçu et augmente d'un niveau l'élaboration des connaissances. Chez l'enfant ce second niveau lui permettra de construire son imagination grâce à des images mentales, il passera ensuite au troisième niveau, l'idée concept, définie par des représentations abstraites de ce qu'il découvre dans son environnement. Ainsi, l'individu trouvera en ces trois niveaux des moyens d'expressions, qui à leur tour, seront sources de connaissance pour l'individu comme illustré dans la Figure 22 :

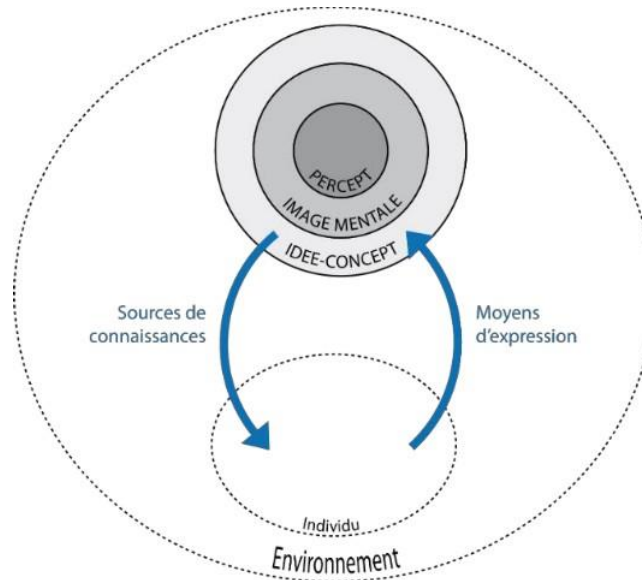


Figure 22. Genèse du système cognitif (Bila-Deroussy, 2015)

La construction de représentations mentales (internes) est donc un réflexe, commun à tous les individus, qui apparaît dès l'enfance et qui se matérialise à partir de sensations et de ressentis dans un environnement donné (Plante et Bernèche, 2009). L'ensemble de ces représentations mentales forment l'imaginaire de chacun, c'est-à-dire la perception (objective et subjective) de l'environnement qui nous entourent (Rias, 2017).

En plus de ces représentations mentales, les équipes de conception ont besoins de matérialiser des représentations externes lors des processus créatifs (Schön, 1983). Pour ce faire, un certain nombre de moyens d'exprimer et de communiquer sont alors disponibles, tels que les mots, les symboles, les croquis, les comportements etc... (Plante et Bernèche, 2009). Plante et al. (2009) ajoute que les profils créatifs sont caractérisés par leur capacité à « donner forme au sensible » via des représentations externes non-verbales.

Représentations externes :

Les représentations externes permettent à l'individu mais également à l'équipe de communiquer, de partager des connaissances et des informations mais également à évaluer et capitaliser les idées et les concepts générés (Vinck, 2003). Elles favorisent également le suivi d'un projet en modélisant les différentes étapes permettant alors de le stocker dans le temps.

Oxman (Oxman, 1997) a modélisé l'émergence des idées et des concepts au travers d'une répétition d'un cycle de re-représentations illustré en Figure 23 :

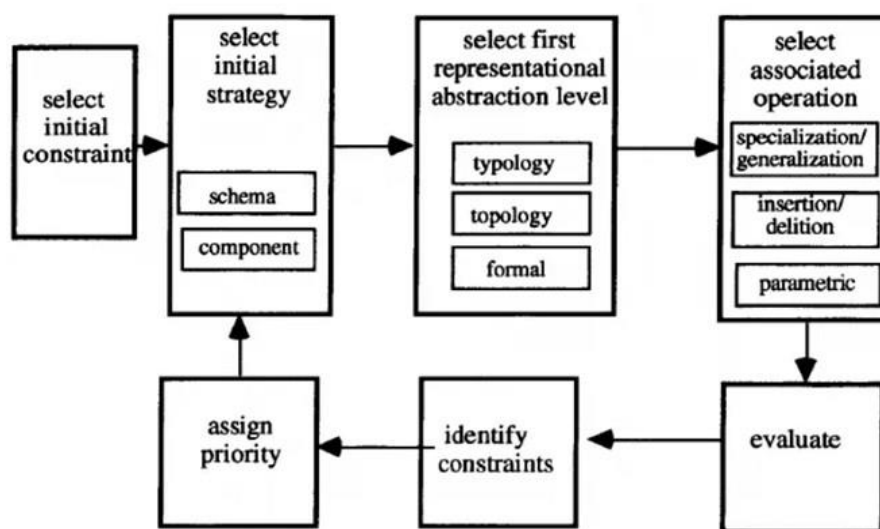


Figure 23. Modèle général d'un cycle de re-représentations (Oxman, 1997)

Pour ce faire, une première phase d'externalisation des connaissances est issue de l'imaginaire au travers de multiple représentations visuelles. Puis un repérage et une extraction des caractéristiques d'intérêts, parmi les connaissances externalisées, sont effectués de manière à pouvoir manipuler les informations et les représenter à nouveau. La créativité représente donc la capacité d'un individu

à extraire et manipuler des informations de manière nouvelle et inattendue puis la capacité de représenter l'ensemble du processus sous-jacents au travers de représentations visuelles (Owman, 1997). Dans le cadre d'un projet, les individus devront également prendre en compte les contraintes imposées et changeantes du problème traité.

Nous retenons ici à l'instar de Rias (2017) que les représentations externes matérialisent les informations et les connaissances mobilisées lors du processus créatif et de conception. Les représentations permettent aux individus de matérialiser et manipuler les connaissances, capacités essentielles au raisonnement créatif (Rias, 2017).

Tout comme le définissent Visser (Visser, 2011) et Goel (Goel, 1995), la conception consiste en la génération et la transformation d'une représentation en une autre et ainsi de suite, jusqu'à ce que la représentation finale soit satisfaisante. Ces représentations considérées également comme des « artefacts » en conception, sont appelées « Objets Intermédiaires » (OI) ou « Représentations intermédiaires » (RI) (Vinck, 2003).

Comme introduit par Oxman (1997) et en accord avec les compétences identifiées en partie 2.3.1.2, les designers sont traditionnellement formés à la construction de représentations ce qui n'est pas le cas dans tous les métiers (Hyysalo, 2006). Par exemple dans le cadre des métiers de l'ingénierie elle est souvent compensée par des outils numériques (Rias, 2017).

En complément, dans ses travaux de thèse, Brun (2017) a identifié les conditions nécessaires pour que l'utilisation des représentations non verbales soient bénéfiques en conception collective. Pour ce faire, la chercheuse a étudié et comparé quatre usages du non-verbal, au travers de quatre sessions de générations d'idées, afin de déterminer quelles étaient les conditions d'usages les plus propices à la générativité (§2.3.1.2). Elle a également proposé un profil de « Leader créatif » comme étant garant des bonnes conditions favorables à la restructuration générative des connaissances reposant sur le non verbal. Trois conditions nécessaires à la performance générative du non-verbal en session collective ont été mise en lumière : (i) En premier, l'effet produit par le non-verbal doit être cohérent avec les attentes du leader créatif. (ii) En second, les participants doivent avoir la capacité d'interpréter facilement le média non-verbal utilisé pendant la session et en extraire des informations nouvelles (concepts et connaissances). (iii) En troisième, les médias non-verbaux produits en session devront posséder un fort pouvoir génératif.

Ces travaux proposent ainsi un cadre pour l'utilisation efficiente des représentations dans le cadre de conception interdisciplinaire et plus précisément dans le cadre de la conception biomimétique.

2.3.3 Synthèse de la seconde partie de l'état de l'art

Les processus en conception innovante se sont développés pour s'adapter à l'évolution du contexte industriel et sociétale. Pour ce faire les processus prennent aujourd'hui en compte les activités cognitives des praticiens (Benami & Jin, 2002; Finke et al., 1992; Jin & Chusilp, 2006; Maher & Poon, 1996; McCoy & Evans, 2002). Dans cette seconde partie de notre état de l'art, nous nous sommes intéressés particulièrement aux rôles des connaissances, à leurs structurations et leurs transferts ainsi qu'aux leviers favorisant la collaboration interdisciplinaire.

Ainsi, il a pu être démontré que les profils formés au Design (les designers) acquièrent, grâce à leurs formations, des compétences et une agilité cognitive leur permettant de structurer les connaissances (Falzon & Visser, 1989; Le Masson et al., 2016; Visser, 2011) notamment par l'utilisation de représentations non-verbales telles que les croquis (Brun et al., 2016). De plus, nous avons relevé que le transfert de connaissances, au travers du transfert de patrimoines créatifs d'un concepteurs source à un concepteur destinataire, engendre à des degrés de générativité différents des effets positifs sur l'originalité et l'efficacité opérationnelle lors de projets d'innovation (Carvajal Pérez et al., 2018).

Concernant la collaboration interdisciplinaire, il a été démontré qu'elle pouvait être favorisée par la mise en place d'un environnement propice à la communication, à la bonne gestion des conflits, au suivi détaillé du processus de conception et à la bonne organisation entre le travail individuel et collectif (Bila-Deroussy, 2015; Chang, 2011; Hulsheger et al., 2009; Reiter-Palmon & De Vreede, 2011).

De plus, il a été relevé que la collaboration interdisciplinaire, la créativité et la génération d'idées sont favorisées d'une part, par l'optimisation de la composition des équipes que ce soit en nombre, en profils ou encore en compétences. D'autre part, grâce à des méthodes logiques, basées sur les processus cognitifs issues du design. Enfin, il a été soulevé que la génération de représentations internes et externes permet de structurer et accompagner la performance générative collective lors d'une résolution de problèmes (Brun et al., 2016; Rias, 2017).

Ainsi, cette seconde partie nous a permis de relever des pistes potentielles de résolution des freins principaux au déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation que sont la collaboration interdisciplinaire, le transfert de connaissances et les exigences du processus de conception biomimétique.

Les deux premières parties sont mises en regard dans la troisième et dernière partie de ce chapitre qui présente notre problématique et de nos deux hypothèses de recherche.

2.4 Conclusion générale de l'état de l'art

Le biomimétisme et son pendant méthodologique, la conception biomimétique, proposent une voie prometteuse pour repenser, de manière durable et innovante nos paradigmes de conception et d'innovation. Afin de systématiser cette démarche et de la diffuser, la communauté scientifique a dans un premier temps, structuré et formalisé la démarche biomimétique en définissant deux stratégies de résolution : Biology-push et technology-pull (§2.2.2). Puis, dans un second temps les chercheurs, le plus souvent issus de l'ingénierie de la conception, ont formalisé un ensemble de processus et d'outils biomimétiques (§ 2.2.2.2). Cependant, la littérature fait état d'une diffusion marginale de ces avancées académiques dans les pratiques de conception et d'innovation. Cela s'explique par (§2.2.3) (i) la difficulté à transférer les connaissances du domaine technologique au domaine biologique et vice versa, (ii) la difficulté de mise en place de la collaboration interdisciplinaire nécessaire en conception biomimétique et (iii) la complexité de mise en œuvre pratique des processus de conception biomimétique. Malgré les nouveaux apports méthodologiques et organisationnelles de la communauté scientifique (§2.2.4), ces obstacles peinent à être surmontés.

Nous avons alors exploré les facteurs de succès qui facilitent le transfert de connaissances et la collaboration interdisciplinaire en conception innovante (§2.3). Ainsi nous avons pu relever que les activités cognitives des praticiens ont aujourd'hui un rôle clé en conception innovante. L'étude de ces activités a permis aux chercheurs de mieux comprendre le rôle des connaissances, notamment pour la génération d'idées innovantes. Sur la base de ces recherches, des méthodes dites logiques ont été développées afin de cadrer et favoriser le travail interdisciplinaire (§2.3.2.2). Enfin, il a été reconnu que la matérialisation des informations et des connaissances au travers de représentations permet de faciliter la collaboration de praticiens venant de différents domaines (§2.3.2.3).

Ces recherches ont également permis de mettre en avant un profil d'intérêt pour la collaboration interdisciplinaire et le transfert des connaissances (§2.3.1.2) : le designer. En effet, les profils formés au Design acquièrent une agilité cognitive qui leur permet, d'identifier, de mobiliser, de structurer les connaissances et de les matérialiser notamment grâce à la génération de représentations le plus souvent non verbales (Agogué et al., 2015; Le Masson et al., 2016; Le Masson & Subrahmanian, 2013). Ces capacités permettent aux designers d'être créatif et de s'adapter à différents contextes de conception (Falzon & Visser, 1989; Le Masson et al., 2016; Visser, 2011). Ces éléments de recherches nous permettent de comprendre l'évolution du métier de designer et justifie que ces profils soient aujourd'hui vus comme des atouts en conception innovante.

Bien que pertinents, ces profils ne sont que très peu étudiés dans le cadre de la conception biomimétique. Le plus souvent les recherches sur ce sujet portent sur (i) l'analyse de projets inspirés du vivant réalisés par les designers, qui majoritairement s'inspirent de la forme (biomorphisme) (Lestari, 2020; Tavsan & Sonmez, 2015), (ii) sur les apports des connaissances et des inspirations biologiques pour le design et les designers (Appio et al., 2017; Volstad & Boks, 2008) ou sur (iii) l'intégration de la conception biomimétique dans les pratiques des designers (Rovalo et al., 2020; Rovalo & McCardle, 2019).

2.4.1 Formalisation de la problématique et des hypothèses de recherche

Sur la base de notre état de l'art, nous nous proposons d'étudier, dans ces travaux de thèse, les apports potentiels du design et des designers pour l'optimisation et la diffusion de la conception biomimétique. Ainsi dans le cadre de ces présentes recherches traitent de la problématique de recherche suivante (problématique ciblée) :

Comment l'intégration de profils formés au Design, au sein des équipes de conception, peut optimiser le processus de conception biomimétique problem-driven unifié et favoriser sa diffusion ?

Face à cette problématique, nos travaux proposent de s'intéresser à la facilitation du transfert de connaissances et de la collaboration interdisciplinaire par le prisme des compétences développées par les profils formés au Design (§2.3.1.2). La première hypothèse porte sur les apports globaux de l'intégration de designers dans les équipes en conception biomimétique :

Hypothèse 1 : *L'intégration de profils formés au design, au sein des équipes de conception, favorise la génération de concepts inspirés du vivant.*

L'évaluation des apports engendrés par l'intégration de profils formés au Design et la validation de cette hypothèse permettra, d'une part, de légitimer l'investissement qu'une telle intégration représente, et d'autre part, de caractériser d'un point de vue quantitatif et qualitatif ces apports.

Par ailleurs, la littérature scientifique fait état de la difficulté à générer des idées à partir de connaissances originales tels que celles issues de la biologie (Brun, 2017) car elles sont le plus souvent décorées du sujet (Smith, 1998). En effet, le lien entre le problème de conception et la connaissance mobilisée devient non évident pour le(s) concepteur(s) lors d'un tel changement de référentiel. Face à ces deux constats, démontrer l'apport des compétences des designers dans le cadre particulier de la conception biomimétique, pour faciliter la génération de concepts à partir de connaissances biologiques apportées par les experts métiers, apparaît d'autant plus pertinent.

Enfin, si nous remontons à la problématique initiale de nos travaux portant sur le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation, valider cette première hypothèse soulèverait deux éléments clés : (1) l'identification de leviers méthodologiques issus du design, permettant d'améliorer les pratiques de génération de concepts inspirés du vivant et donc réduire les risques d'échec, (2) accompagner la composition d'équipe projet, en conception biomimétique, en augmentant les chances de succès par l'intégration de profils formés au Design.

La seconde hypothèse porte spécifiquement sur les étapes de transfert des connaissances (étapes 2, 3, 6, 7) du processus de conception biomimétique problem-driven unifié, dont la complexité est soulignée dans la littérature (Freitas Salgueiredo et al., 2016, Chirazi et al., 2019) :

Hypothèse 2 : *l'intégration, au sein des équipes de conception biomimétique, de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales.*

Cette seconde hypothèse vise à caractériser les apports dus aux compétences, des profils formés au Design. Il s'agit de tester si celles-ci permettent, d'une part, d'assister la collaboration interdisciplinaire par la « facilitation de la communication » (Driver et al., 2011) ou encore « l'identification des parties prenantes appropriées pour le bon déroulement du projet » (Chouki et al., 2018). D'autre part, on testera l'apport de la capacité à « matérialiser et à contextualiser des connaissances par le biais d'artefact, d'une représentation ou d'un cas d'utilisation » (Driver et al., 2011 ; Kim et al., 2010; Letard et al., 2018; Visser, 2011) sur la structuration et le transfert des connaissances.

Ainsi, cette seconde hypothèse peut être décomposée en deux sous-hypothèses :

La première sous-hypothèse se concentre sur les résultats liés à l'intégration de profils formés au Design (H2.1) : *L'intégration de profils formés au design, au sein des équipes de conception, favorise le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire.*

La seconde porte sur les moyens d'obtenir ces résultats (H2.2) : *Les profils formés au Design favorisent le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire par la formalisation de représentations non verbales.*

Valider cette seconde hypothèse permettrait de formaliser le rôle propre aux profils formés au Design dans le cadre de la conception biomimétique. Outre leur apport sur l'axe de l'esthétisme formelle, il s'agit donc de caractériser leurs rôles d'une part en tant que générateurs de concepts innovants inspirés du vivant mais également en tant qu'acteur facilitant le déploiement pratique de la conception biomimétique.

2.4.2 Problématique initiale et hypothèses de recherche connexes

Lors de notre état de l'art nous avons également pu soulever trois constats d'intérêts relatifs à notre problématique initiale :

« *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* ».

Le premier constat est issu de la première partie de cet état de l'art. Nous avons relevé que malgré un fort développement théorique de la conception biomimétique, cette approche est faiblement mobilisée en pratique lors des projets de conception. Au-delà des freins identifiés dans la littérature (§2.2.3), nous supposons que cette faible mobilisation est également dû à l'aspect disruptif et novateur de l'approche qui implique un changement dans les paradigmes de conception. Ainsi nous posons l'hypothèse suivante :

Hypothèse 3 : *Adapter le cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception permet de favoriser son déploiement dans un cadre industriel.*

Les deux autres constats ont été relevés lors de notre seconde partie d'état de l'art. D'une part, nous avons identifié que la théorie C-K proposent un cadre théorique permettant de modéliser, structurer et étudier les connaissances mobilisées et les concepts générés lors des projets de conception. D'autre part, nous avons pu relever que le Design Thinking représente un modèle d'intérêt à mobiliser pour développer une agilité cognitive qui permet la structuration des connaissances. Nous posons alors une quatrième hypothèse :

Hypothèse 4 : *Mobiliser la théorie C-K et le Design Thinking comme cadre de pilotage des projets en conception biomimétique facilite la mobilisation, la modélisation et la structuration des connaissances et permet de sélectionner les parties prenantes d'intérêts tout au long du projet.*

Ces deux hypothèses représentent des pistes connexes à explorer. Dans le cadre de nos travaux de thèse, en parallèle de notre cible de recherche qui porte sur le rapprochement entre conception biomimétique et Design, nous avons eu l'opportunité de collaborer avec deux chercheurs. Ces collaborations ont donné lieu à deux expérimentations (§3.3.1 ; 3.3.2) basé sur ces deux hypothèses, nous permettant de formuler des premiers résultats à approfondir. Ces hypothèses ont donc pour objectifs d'être exploré plus en détail lors de futures recherches.

2.4.3 Synthèse de la troisième partie de l'état de l'art

Nous proposons de synthétiser cette troisième et dernière partie au travers de la figure 24 :

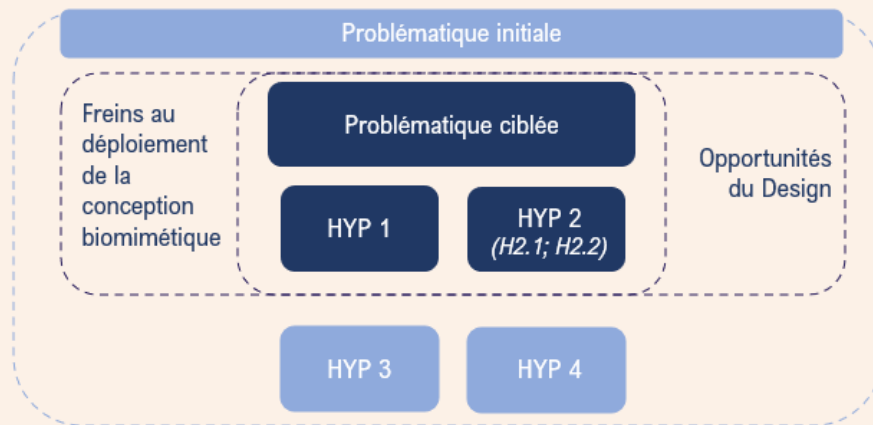


Figure 24. Liens entre les problématiques (initiale et ciblée) et les hypothèses

Ainsi les deux premières expérimentations présentées dans la chapitre suivant (i) interrogent et démontrent l'intérêt d'intégrer des profils formés au Design en conception biomimétique, (ii) formalisent les apports de ces profils notamment lors des étapes critiques du processus biomimétique problem-driven unifié et enfin (iii) identifient les outils mobilisés et/ou facteurs influant la pratique des designers en conception biomimétique. Puis les deux dernières expérimentations correspondent à nos collaborations de recherche et interrogent (i) l'adaptabilité du processus de conception biomimétique et (ii) la mobilisation de la théorie C-K et du Design Thinking comme cadre de pilotage de projets biomimétique.



CHAPITRE 3

Expérimentations

3.1 Structure du Chapitre 3

3.2 Intégration des profils formés au Design en conception biomimétique

- *Expérimentations 1 : Apport des designers pour la génération d'idées en conception biomimétique*
- *Expérimentations 2 : Apport des designers pour les défis du travail interdisciplinaire et du transfert de connaissances en conception biomimétique*

3.3 Adaptation du cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception et d'innovation

- *Expérimentations 3 : Développement du Processus Technology Pull Interdisciplinary Biomimetic design process*
- *Expérimentations 4 : Développement d'un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique*

3.4 Synthèse et conclusion du troisième chapitre

3.1 Structure du Chapitre 3

Le Ceebios, Centre d'études et d'expertises du biomimétisme à l'initiative de ces travaux de recherche, nous a permis d'avoir accès à un réseau national d'acteurs industriels, académiques et institutionnels (§1.2). Ce contexte offre un terrain d'expérimentation pour tester nos hypothèses. Depuis 2017, Ceebios a accompagné près de 52 projets industriels allant de la revue d'opportunités biologiques à la génération de prototypes en passant par la veille techniques, l'exploration biologique ou encore la formalisation de concepts. Ce nombre croissant de projets accompagnés par Ceebios nous a permis d'observer et de questionner la pratique de la biomimétique tout au long du processus de conception.

Comme détaillé dans le chapitre précédent, ce chapitre est composé de deux parties. Dans un premier temps (§3.2), nous présentons deux expérimentations (expérimentations 1 & 2), relatives à notre problématique de recherche ciblée, qui explorent l'intérêt d'intégrer des profils formés au Design en conception biomimétique :

- L'expérimentation 1 interroge le **rôle des profils formés en Design dans la génération de concepts inspirés du vivant** (*Hypothèse 1*).
- L'expérimentation 2 étudie si l'intégration de profils formés au Design favorise, d'une part, le **transfert de connaissances** et d'autre part, si cela favorise le **travail interdisciplinaire** entre les parties prenantes du projet (*Hypothèse 2.1*). Un focus particulier sera porté sur les **représentations non-verbales** générés par les profils formés au Design (*Hypothèse 2.2*).

Dans un second temps (§3.3), nous présentons deux nouvelles expérimentations (expérimentation 3 & 4) qui proposent, en tant que résultats, de futures pistes de recherches relatives à notre problématique de recherche initiale et s'intéressent à l'adaptation du cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception et d'innovation :

- L'expérimentation 3 étudie **les risques et les freins perçus par les praticiens, liés au processus de conception biomimétique problem-driven unifié** afin d'identifier des leviers d'adaptation de ce processus aux pratiques de conception et d'innovation (*Hypothèse 3*).
- L'expérimentation 4 propose un **modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique** qui s'appuie sur la mobilisation de la théorie C-K et du Design Thinking (*Hypothèse 4*).

Nous résumons la structure de ce chapitre dans la figure 25 :

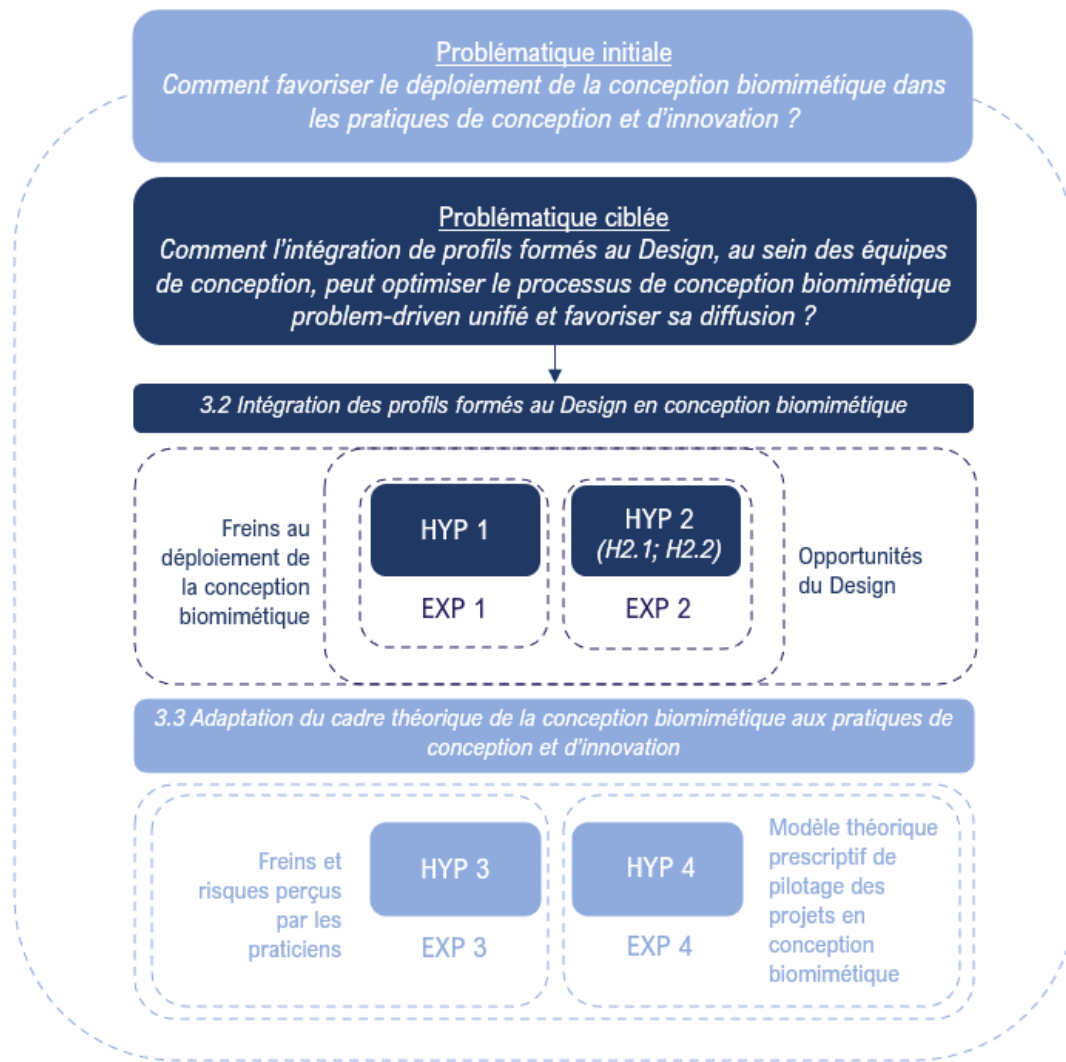


Figure 25. Liens entre les problématiques (initiale et ciblée), les hypothèses et nos quatre expérimentations

Chacune de ces quatre expérimentations sont présentées au travers de leurs objectifs, les matériels et les méthodes utilisés, les résultats obtenus et se conclue par une discussion autour des limites et des perspectives de recherches. Nous concluons se chapitre par une synthèse de nos résultats.

3.2 Intégration des profils formés au Design en conception biomimétique

3.2.1 Expérimentation 1 : Apport des designers pour la génération d'idées en conception biomimétique

3.2.1.1 Objectifs

Cette expérimentation, menée sous forme de trois ateliers d'une demi-journée chacun, avait pour objectif d'une part, de sensibiliser des étudiants à la démarche et à la méthodologie de la conception biomimétique et d'autre part, d'identifier si la présence de profils formés au design au sein des équipes de conception a un impact sur la typologie des concepts biomimétiques générés à partir d'informations biologiques.

3.2.1.2 Matériels & méthodes

Nous détaillons les « Matériels et méthodes » en quatre sous-parties : (1) les profils étudiés, (2) le protocole suivi, (3) la typologie d'accompagnement des ateliers et (4) la méthode d'analyse choisie.

Profils

L'expérimentation 1 a été menée auprès de 46 étudiants de niveau Master répartis en 14 groupes, au cours de trois ateliers d'une demi-journée. L'ensemble des étudiants a été réparti de manière à constituer 7 groupes mixtes designers et ingénieurs et 7 groupes composés uniquement d'ingénieurs (Figure 26).

- Le premier atelier a été suivi par 10 étudiants, tous issus du Master Innovation, Conception, Ingénierie (ICI), parcours Innovation Conception, de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers Sciences et Technologies de Paris. Sur ces 10 étudiants, 9 étaient des profils ingénieurs et 1 étudiant était designer de formation. Nous avons donc constitué 3 groupes composés d'ingénieurs et 1 groupe mixte designers, ingénieurs.
- Le second atelier a regroupé 19 étudiants issus de différentes écoles d'enseignement supérieur : 4 étudiants designers de l'École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs de Paris (ENSAD) et 15 ingénieurs issus de quatre écoles, l'École des Mines ParisTech, l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris (ESPCI), l'École de Chimie ParisTech de Paris et PSL Université de Paris. Ces étudiants ont été répartis en 3 groupes composés d'ingénieurs et 2 groupes mixtes designers, ingénieurs.
- Enfin, le troisième atelier a rassemblé 17 étudiants dont 8 profils designers et 9 étudiants ingénieurs, tous issus du Master Innovation, Conception, Ingénierie (ICI), parcours Design d'Interaction de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers Sciences et Technologies de Paris. Lors de cet atelier, 1 groupe était composé uniquement d'ingénieurs et 4 groupes étaient mixtes designers, ingénieurs.

Nous avons dirigé ces ateliers en collaboration avec une ingénieure chargée de mission matériaux du Ceebios.

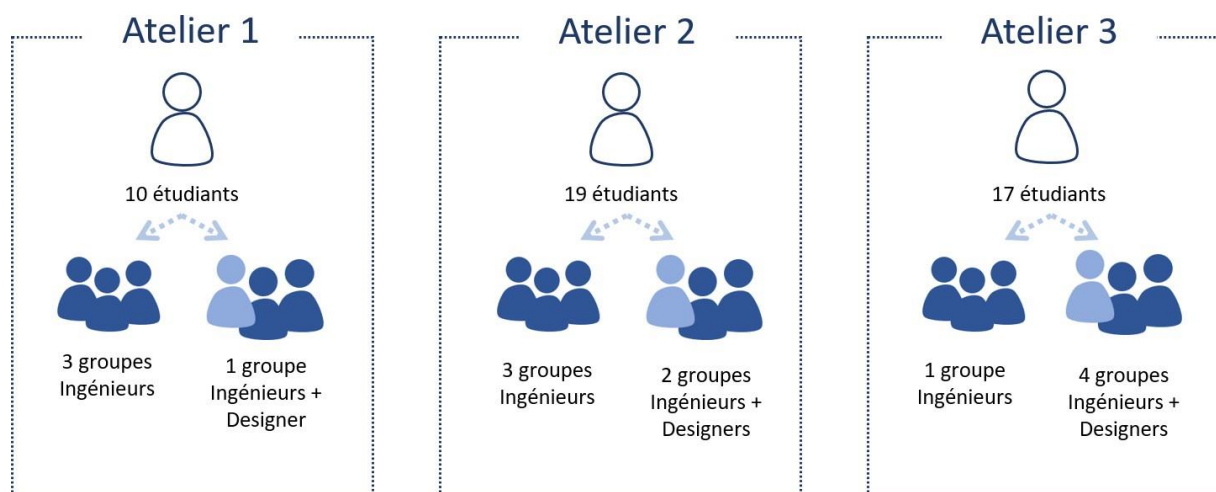


Figure 26. Composition des équipes de l'expérimentation 1

Protocole suivi

Les trois ateliers se sont déroulés selon le même protocole (Figure 27). Un ensemble de références bibliographiques sur la conception biomimétique (Ceebios, 2018; Fayemi et al., 2017; Wanieck et al., 2017) et des ressources vidéo¹⁴ ont été envoyés à l'ensemble des étudiants une semaine avant les ateliers.

Lors de cette expérimentation, le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017) a été pris comme modèle de référence sur lequel nous nous sommes basés pour structurer le protocole des ateliers. Ils se sont effectués en quatre phases :

- Phase 1 - Analyse : Cette phase comprend la réalisation des étapes 1 à 3 du processus (40min)
- Phase 2 - Exploration : Cette phase débute à l'étape 4 pour terminer à l'étape 7 (60min)
- Phase 3 - Mise en contexte : Cette phase correspond à l'étape 8, au cours de laquelle les participants devaient produire des fiches d'idées basées sur les données biologiques recueillies durant la phase d'exploration (15min).
- Phase 4 - Restitutions : A la fin de chaque atelier, les étudiants étaient invités à restituer leurs résultats en 3 min dans le format de leur choix (présentations graphiques, présentations orales, présentations numériques, etc..).

¹⁴ Conférence d'introduction au biomimétisme :

https://www.youtube.com/watch?v=0A9XXxci5EU&index=1&list=PLuqHFMv_h_Xxa71lsuCQI31tXWYLow3jo

Page YouTube Chrysalide France, groupe de veille français sur le biomimétisme :

https://www.youtube.com/channel/UC3wZNAHThRHh9EeWdQuFG_g

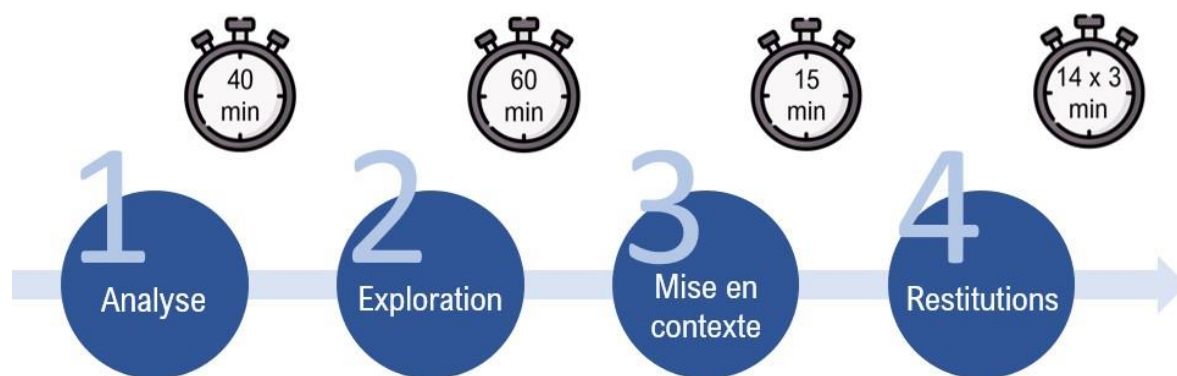


Figure 27. Protocole de l'expérimentation 1

Accompagnement

Les étudiants avaient pour sujet de recherche : *L'emballage de demain*. Les enjeux et les défis relatifs au sujet ont été présentés par les encadrants au début de chaque atelier. Aucun étudiant n'a été formé au processus de conception biomimétique, ainsi chaque phase a été détaillée par les encadrants tout au long des trois ateliers. Pour compléter cet accompagnement des fiches détaillées¹⁵ pour chaque phase étaient distribuées à chacun des groupes ainsi que des feuilles blanches (Figure 28).

Lors de la première phase, cinq actions étaient demandées aux groupes : (1) L'analyse de la problématique, (2) la formalisation d'un cahier des charges, (3) parmi ce cahier des charges, le choix d'un ou plusieurs défis techniques à approfondir, (4) la formalisation d'une liste de mots clés liés au(x) défi(s) choisi(s) et enfin la transposition des mots clés en termes biologiques pour préparer l'exploration du vivant de la phase 2.

Durant la seconde phase, les étudiants étaient amenés à (1) explorer le vivant et identifier des modèles biologiques grâce à la base de données AskNature¹⁶, (2) sélectionner les modèles biologiques d'intérêts, et enfin (3) abstraire et transposer les modèles biologiques pour préparer la génération de concepts inspirés du vivant.

Lors de la troisième et dernière phase de ces ateliers, les groupes devaient générer des concepts inspirés des modèles biologiques sélectionnés lors de la phase précédente. Il leur été demandé de détailler chacun de leurs concepts selon différents critères : l'organisme d'intérêt, le principe sélectionné, la description générale du concept et la formalisation d'une vue d'ensemble du concept. Puis ils ont dû lister les avantages et les inconvénients de leurs propositions et enfin qualifier si leur concept proposé une innovation de rupture ou incrémentale et si ce dernier était réalisable en low-tech ou en high-tech.

¹⁵ Les fiches supports sont présentées en Annexe 1

¹⁶ <https://asknature.org/>

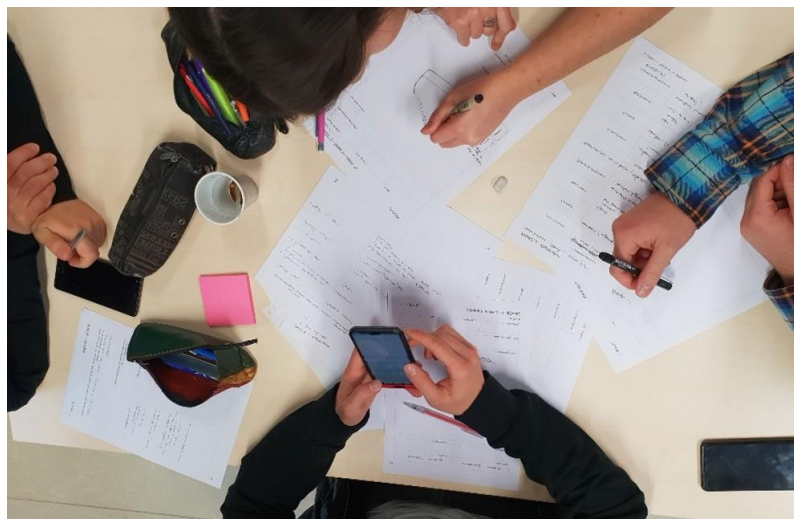


Figure 28. Formalisation des concepts (expérimentation 1, photo de l'atelier 3)

Méthode d'analyse

Pour cette première expérimentation et en cohérence l'hypothèse 1 « *L'intégration de profils formés au design favorise la génération de concepts inspirés du vivant* », nous avons décidé d'analyser les concepts générés à la fin de ces trois ateliers.

Dans un premier temps, nous avons dénombré les concepts générés par chacun des groupes afin d'identifier si l'intégration de designers dans les équipes influait cette génération. Puis dans un second temps, nous avons demandé à 8 experts de la conception biomimétique d'évaluer chaque concept selon 3 critères :

- L'originalité, c'est-à-dire la qualité des idées produites (Agogué et al., 2015; Fink et al., 2010),
- La faisabilité de chaque fiche concept,
- Leur contextualisation, c'est-à-dire considérer les concepts dans leur contexte.

Il est à noter qu'aucun des étudiants n'a été informé de ces critères d'analyse. De plus, pour ne pas influencer les évaluations des 8 experts de la conception biomimétique, nous ne les avons pas informés de notre cible de recherche, qui est de savoir si la présence ou non de designer(s) dans les groupes étudiants impact la génération de concepts inspirés du vivant.

Il a été demandé aux 8 évaluateurs de noter chaque critère sur une échelle de Likert à 6 points, de 0 (« pas du tout original » / « pas du tout faisable ») à 5 (« très original » / « très faisable »). Il leur a également été demandé d'indiquer si OUI ou NON les concepts étaient contextualisés. Nous présentons ci-dessous des exemples de fiches concepts ayant été évaluées (Figure 29).

PHASE 3 - Mise en contexte Groupe : 1

IDEE N°: 1

Organisme(s): Rat Principe(s): digestion/prédation Piste: Love ton Rat

Description générale:
Le packaging est constitué d'une substance qui donne envie au rat et sensoriel de le manger. Le produit comestible est transformé par la digestion du rat.

Vue d'ensemble:

Avantage(s): traitement rapide de transport en

Inconvénient(s): transport, stockage

Innovation: Rupture Incrémentale

Innovation: Low-tech High-tech

8/8

PHASE 3 - Mise en contexte Groupe : 5

IDEE N°: 1

Organisme(s): Palme, Palmier, Papillon Principe(s): Assembler divers couches et structures différentes Piste:

Description générale:
Emballage d'un produit alimentaire

Vue d'ensemble:
Assemblage de couches qui apportent à la fois résistance mécanique et thermique, en s'inspirant de matériaux biologiques qui remplissent ces fonctions grâce à des micro ou nano-structures.

Avantage(s): Utilise la structure et l'interaction entre les différents éléments. Réutilisable. Ne nécessite pas de matériaux avec des propriétés spéciales.

Inconvénient(s): Difficile et dur à produire

Innovation: Rupture Incrémentale

Innovation: Low-tech High-tech

8/8

PHASE 3 - Mise en contexte Groupe : 3

IDEE N°: 3

Organisme(s): MIMOSA PUDICA Principe(s): Rétraction Piste: ENVELOPPE

Description générale:
Grande surface plane qui vient se rétracter autour des objets

Vue d'ensemble:

Avantage(s): Adaptable à tous les objets. Facile à emballer.

Inconvénient(s): Forme visible

Innovation: Rupture Incrémentale

Innovation: Low-tech High-tech

8/8

PHASE 3 - Mise en contexte Groupe : 2

IDEE N°: 1

Organisme(s): Corticule (Cire) Principe(s): Hydratation sélective, filtration, régulation des apports Piste:

Description générale:
Les micropores inspirés de la corticule permettent de filtrer sélectivement l'entrée de l'eau & nutriment (soluble dans l'eau). Le qui est trop gras ne passe pas.

Vue d'ensemble:

Avantage(s): (*)

Inconvénient(s):

Innovation: Rupture Incrémentale

Innovation: Low-tech High-tech

8/8

Figure 29. Exemples de fiches concepts de l'expérimentation étudiante

3.2.1.3 Résultats

Les résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation étudiante ont été comparés par un test Chi-2 ou un T-test selon que les variables soient quantitatives ou qualitatives.

Nombre d'idées et contextualisation

Numéro de groupe	1	2	3	4	5	6	7	TT	Moyennes	Concepts contextualisés	Concepts non contextualisés
Groupe avec designer(s)	4	3	1	3	2	3	4	20	2,86	97	63
Groupe sans designer(s)	3	2	2	2	1	2	3	15	2,14	38	82
p-value (Unpaired; t-test) = 1,67.10-01										p-value (Chi-Square Test of Independence) = 2,89,10-06	

Tableau 5. Nombre d'idées générés par les groupes avec ou sans designers (partie gauche) et évaluation de la contextualisation des concepts par les experts de la conception biomimétique (partie droite)

En ce qui concerne le nombre de solutions (tableau 5, partie gauche) fournies par chaque groupe, le T-test non apparié n'a pas révélé de différence significative entre les groupes avec designer et les groupes sans designer. En ce qui concerne la contextualisation des concepts (c'est-à-dire la prise en compte des concepts dans leur contexte) (tableau 5, partie droite), le test d'indépendance du Chi-2 indique une différence significative entre les groupes avec et sans designers, nous indiquant que les groupes ayant intégrés des designers ont une capacité significativement plus élevée à contextualiser leurs concepts.

Originalité & faisabilité

	Originalité					Faisabilité				
Echelle de Likert	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Groupe avec designer(s)	8	34	36	55	27	23	46	37	44	10
Groupe sans designer(s)	23	29	44	16	8	18	32	28	29	13
p-value (Chi-Square Test of Independence)	4,24.10-07					7,04.10-01				

Tableau 6. Evaluation de l'originalité (partie gauche) et de la faisabilité (partie droite) par les experts en conception biomimétique

En ce qui concerne l'originalité (tableau 6, partie gauche), le test du Chi-2 indique une différence significative entre les groupes avec designers et les groupes sans designers, les groupes avec designers obtenant une meilleure évaluation. Cela semble montrer que l'intégration d'un designer a un impact significatif sur l'originalité des idées générés en conception biomimétique. En ce qui concerne les résultats sur la faisabilité (tableau 6, partie droite), le test du Chi-2 ne suggère aucune différence entre les groupes avec ou sans designers.

Synthèse des résultats

Lors de cette première expérimentation nous avons pu relever que les groupes avec et sans profils designers présentent des différences quant à la qualité des concepts générées à partir des données biologiques identifiées. Premièrement, les groupes intégrant des étudiants designers ont majoritairement présenté des concepts contextualisés contrairement aux groupes uniquement composés de profils ingénieurs. La contextualisation des concepts permet d'apporter une vision systémique de la solution grâce notamment à la présence d'un lien avec l'environnement, l'utilisateur, l'usage ou encore la pratique. Deuxièmement, les groupes intégrant des étudiants designers ont proposé des concepts jugés statistiquement plus originaux que les groupes sans profils designer. Enfin nous concluons que pour les autres critères, le nombre de concepts et la faisabilité, aucune différence significative entre les deux typologies de groupes n'a été observée.

3.2.1.4 Discussion, limites et ouverture

Cette expérimentation étudiante proposait de tester si l'intégration de profils formés au design favorise la génération de concepts inspirés du vivant (Hypothèse 1).

Il a pu être démontré que l'intégration de designers dans une équipe de conception étudiante avait un **impact positif significatif sur la contextualisation et l'originalité** des concepts biomimétiques générés. De plus, malgré l'absence de résultats significatifs en termes de nombre de concepts développés, on note que les groupes avec des designers ont proposé 5 idées de plus que les groupes composés uniquement de profils ingénieurs. Le temps de l'expérimentation étant limité, on peut supposer que ce critère aurait pu être significativement positif si les étudiants avaient eu plus de temps pour générer des concepts biomimétiques ou si le panel étudié était plus important. Cette supposition met en lumière l'une des principales limites de cette expérimentation : le temps. En effet, les projets en conception biomimétique ont des temps variables et se déroulent le plus souvent sur des temps longs comme nous avons pu le noter lors de l'analyse des projets en conception biomimétiques accompagnés par Ceebios. De plus, les contraintes organisationnelles liées à la disponibilité des étudiants nous ont amené à limiter chaque atelier à une demi-journée.

La seconde limite est le nombre de groupes étudiés limitant les résultats de cette expérimentation. En effet, bien que nos résultats soient considérés comme quantitatifs nous pouvons questionner les grandes tendances identifiées lors de l'étude d'un plus grand panel d'ateliers.

Nous souhaitons également soulever la difficulté que nous avons rencontrée à associer des étudiants de parcours et d'écoles différentes qui n'ont pas les mêmes calendriers, les mêmes attentes ou encore les mêmes directives d'encadrement. Cette troisième limite met en lumière la structure en silo des formations des futurs praticiens et chercheurs. Ainsi les collaborations interdisciplinaires, essentielles pour la conception biomimétique, deviennent compliquées à mettre en œuvre.

Du point de vue méthodologique nous observons également une limite, celle du choix du processus suivi. Bien que le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017) soit reconnu par la communauté scientifique comme un processus de référence (§2.2.2.2) nous pouvons nous demander si les résultats seront identiques avec l'utilisation d'un autre processus biomimétique.

Enfin, nous avons également identifié comme limite, la composition des équipes. En effet, comme indiqué dans le chapitre 2, les équipes en conception biomimétique ont pour vocation d'être interdisciplinaires, intégrant notamment des profils issus des sciences du vivants, cependant notre protocole d'expérimentation n'intègre que deux typologies de profils les designers et les ingénieurs. Bien que ce choix ait été fait pour des raisons de simplification de nos recherches, il nous semble pertinent, pour de futurs travaux, de reproduire cette expérimentation lors de projets accueillant une plus grande diversité de profils.

Compléments et ouverture de l'expérimentation 1 – Expérimentation 1 bis

À la suite des résultats présentés ci-dessus, nous avons voulu mener une seconde expérimentation complémentaire afin de valider et compléter nos recherches. Cette expérimentation avait pour objectif de tester si l'accompagnement par un professionnel designer spécialiste de la conception biomimétique impactait la génération de concepts inspirés du vivant par des équipes intégrant ou non des designers.

Pour ce faire, nous avons mis en place un atelier réparti sur une semaine découpée, comme la première expérimentation, en quatre phases de recherche : Analyse (3h), Exploration (5h), Mise en contexte (2h30) et Restitution (3h). De nouveaux étudiants ont participé à cet atelier : 7 étudiants designers de l'École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs de Paris (ENSAD) et 18 ingénieurs issus de quatre écoles, l'École des Mines ParisTech, l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), l'École de Chimie ParisTech de Paris et PSL Université de Paris. Le processus de conception biomimétique suivi fût le même que celui de la 1ère expérimentation, cependant nous avons décidé de ne plus utiliser les fiches supports qui ont guidé les étudiants. Elles ont été remplacées par un accompagnement et des indications complémentaires au processus de conception biomimétique amenés par l'encadrant designer.

Malheureusement, nous n'avons pas pu réaliser d'études statistiques car la composition des équipes n'est pas restée fixe tout au long de l'expérimentation faute de disponibilité des étudiants. Cette expérimentation étant effectuée dans le cadre d'un projet « fil rouge » lors d'une semaine de formation dédiée à la conception biomimétique, les étudiants n'ont pas tous fait acte de présence lors des jours dédiés au projet. Néanmoins, nous avons relevé, grâce à l'observation et l'interrogation informelles des groupes, quelques pistes qualitatives intéressantes, c'est pourquoi nous les présentons en complément et ouverture de notre première expérimentation étudiante.

Premièrement, nous avons pu évaluer avec l'équipe encadrante Ceebios que les concepts générés par des groupes avec et sans designers semblaient cette fois ci être majoritairement homogène quant à l'originalité et la contextualisation. Deuxièmement, lors de la première expérimentation, sur la base de la sollicitation des étudiants et sur l'étude de leurs concepts nous avons relevé que lors des étapes

de transposition et d'abstraction, c'est-à-dire lors des étapes de transfert des connaissances entre la conception et la biologie, les étudiants ingénieurs avaient connu plus de difficultés que les étudiants designers à créer des ponts cognitifs entre les connaissances des différents domaines. Lors de cette seconde expérimentation les profils ingénieurs ont réussi à dépasser leurs fixations cognitives ce qui leur a permis de faire des liens cognitifs entre les connaissances biologiques et les connaissances technologiques. Ainsi ils ont pu générer des concepts originaux et contextualisés.

Nous supposons donc que l'accompagnement de projets en conception biomimétique par des méthodes issues du design, ici au travers d'un professionnel du design, permet de favoriser la génération de concepts inspirés du vivant et facilite les ponts cognitifs lors des étapes d'abstraction et de transposition, étapes où le transfert de connaissances a lieu.

Bien que ces ateliers se concluent par des observations qualitatives, les tendances soulevées vont dans le sens de notre seconde hypothèse qui suppose que « *l'intégration, au sein des équipes de conception biomimétique, de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales* ».

3.2.2 Expérimentation 2 : Apport des designers pour les défis du travail inter- disciplinaire et du transfert de connaissances en conception biomimétique

Notre première expérimentation (§3.2.1) nous a permis de valider notre première hypothèse de recherche et de valider la pertinence de notre seconde hypothèse qui suppose que « *l'intégration, au sein des équipes de conception biomimétique, de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales* ». Ainsi, nous avons pu tester cette dernière dans le cadre d'une expérimentation industrielle menée chez L'Oréal, acteur majeur de l'industrie cosmétique dans le monde.

Depuis 2013, L'Oréal, s'intéresse particulièrement à la durabilité afin de s'assurer que l'ensemble de ses activités respectent les « limites planétaires ». Pour concilier les besoins utilisateurs avec la préservation d'une planète aux ressources limitées, L'Oréal met en œuvre un programme de transformation interne spécifique axé sur l'impact direct et indirect de ses activités pour relever les défis auxquels le monde est confronté.

C'est dans ce cadre qu'une équipe dédiée à la conception biomimétique a été créée au sein du département de Recherche Avancée de L'Oréal en 2017, avec pour but de fournir de nouveaux paradigmes d'innovation pour innover durablement : L'équipe Biomim'reflx. L'Oréal s'est appuyé sur le Ceebios pour l'accompagner sur le déploiement de la conception biomimétique au sein de l'entreprise notamment à travers la génération de projets démonstrateurs et d'une méthodologie de conception biomimétique adaptée aux pratiques de l'entreprise. C'est dans ce cadre que nous avons pu suivre le développement de l'un de ces projets démonstrateurs allant de l'exploration de la thématique principale « *L'hygiène de demain* » à la génération de 41 concepts parmi lesquels un prototype d'objet lavant inspirée par la langue et le mécanisme de nettoyage des animaux comme les chats : « *CatBrush* ». Ce concept est aujourd'hui breveté par L'Oréal.

Notre expérimentation industrielle porte sur l'analyse de la méthodologie empirique mise en place tout au long de ce projet et sur l'étude des profils et de leurs apports durant le processus de conception.

Ce projet a débuté en 2017 et est aujourd'hui en phase de prototypage fonctionnel. Notre expérimentation porte sur les trois premières phases du projet (Figure 30) :

- Phase 1 « Opportunités biologiques » (2017) qui a consisté à définir les opportunités biologiques attrait à la thématique de « *L'hygiène de demain* ». Ces grandes opportunités ont été nécessaire pour convaincre les donneurs d'ordres de la pertinence de la conception biomimétique comme levier d'innovation durable.
- Phase 2 « Des opportunités biologiques à la génération d'idées » (2018) a consisté à sélectionner, sur la base des opportunités biologiques et des concepts présentés à la fin de la phase 1, un projet de démonstration : « *l'objet lavant* ». L'objectif était de développer un concept fonctionnel pour effectuer des tests.
- Phase 3 « Mise en œuvre et tests dans le contexte initial » (2019 à 2020) a consisté à mettre en œuvre et à tester les concepts fonctionnels sélectionnés. Un premier prototype de test est en cours de développement.



Figure 30. Phases de l'expérimentation 2 menée chez L'Oréal

3.2.2.1 Objectifs

Les objectifs industriels de ce projet étaient doubles :

- Concevoir de nouvelles routines d'hygiène et de beauté inspirées du vivant, répondant aux grands enjeux sociétaux et environnementaux au travers de projets démonstrateurs.
- Convaincre les décideurs de l'intérêt de la conception biomimétique en tant que stratégie de conception durable pour déployer la conception biomimétique au sein de l'entreprise.

D'un point de vue scientifique nos objectifs principaux étaient d'une part, de tester notre seconde hypothèse de recherche, d'autre part, d'observer et d'analyser la pratique de la conception biomimétique, encore trop peu étudiée dans la littérature scientifique, sur un cas réel allant de l'analyse de la demande client à la génération d'un produit breveté. Ainsi nous avons pu compléter et développer le processus théorique biomimétique problem-driven unifié et révéler le rôle clé des profils formés au Design en conception biomimétique.

3.2.2.2 Matériels & méthodes

Nous détaillons les « Matériels et méthodes » en trois sous-parties : (1) les profils présents durant cette expérimentation, (2) les livrables générés lors du projet étudié et (3) les méthodes d'analyse choisies et le protocole suivi.

Profils

Pour ce projet L'Oréal a fait appel aux équipes de Ceebios afin de les accompagner tout au long du processus de conception et s'est entouré lors des phase 2 et 3 de deux partenaires, le cabinet de conseil en stratégies bio-inspirées NewCorp Conseil et l'agence de design Big Bang Project. L'équipe de ce projet fût donc interdisciplinaire, et sa composition a évolué entre la première phase et la seconde phase (Figure 32).

Au cours de la première phase, l'équipe projet était composée de deux chercheurs de l'équipe Biomim'Reflx de l'Oréal, que nous appelons dans cette expérimentation « *chercheurs* », de deux ingénieurs de Ceebios, formés en biologie, physique et chimie, que nous appelons « *ingénieurs* », et d'un designer de Ceebios appelé « *designer* ».

Puis dès la seconde phase, 15 nouveaux « *chercheurs* » de l'équipe Biomim'Reflx ont rejoint l'équipe de conception. Deux partenaires externes ont également rejoint l'équipe, le fondateur de NewCorp Conseil, en charge de la veille technologique et de la stratégie d'entreprise que nous appelons « *consultant en stratégie* » et des designers de l'agence Big Bang project, appelés « *designers* ».

La présence de designers tout au long de l'expérimentation nous a permis de tester notre seconde hypothèse de recherche. De plus, ces designers n'étant pas les mêmes au cours des différentes phases du projet, nous avons pu relever si des similitudes quant à leurs rôles existaient.

Il nous semble également important de souligner que les chercheurs de L'Oréal présents sont des biophysiciens et des biochimistes.

Livrables

Tout au long du projet, divers outils et livrables ont été développés (Figure 31) pour soutenir et illustrer les différentes étapes du projet. Ces livrables ont fourni des références pour le partage et la discussion entre les membres de l'équipe de conception.

Durant la première phase, les ingénieurs et le designer ont proposé trois notes de synthèse et un poster de synthèse :

(1) La note préliminaire présentait les principales questions soulevées à propos de l'« *hygiène de demain* » lors d'entretiens individuels avec les experts internes. Ces questions ont été complétées par des exemples biologiques d'intérêts, pour présenter les grandes opportunités du vivant, au travers d'un panel d'images biologiques.

(2) La note intermédiaire présentait un ensemble de pistes détaillées proposant de nouvelles routines d'hygiène et de beauté inspirées du vivant. Ces pistes ont été illustrées à l'aide d'un panel d'images biologiques collectées par les ingénieurs et d'un ensemble de représentations graphiques qui représentaient les différentes pistes sous forme de concepts. Nous pouvons qualifier ces concepts de (3) « concepts projecteurs » ou « *Spotlight concepts* » (Brun et al., 2019). L'objectif de ces concepts projecteurs est d'illustrer de potentielles innovations fournies par les stratégies biologiques identifiées tout en limitant les fixations cognitives (Agogué et al., 2014).

(4) La note d'orientation avait pour but de détailler les stratégies biologiques d'intérêt identifiées grâce à une base de données d'images biologiques, à des organigrammes fonctionnels et grâce à des taxonomies. Cette note, remise à la fin de la première phase, a également fourni à l'équipe de conception, une proposition de positionnement stratégique en reprenant les « *concepts projecteurs* » et en identifiant des partenaires potentiels pour la seconde phase du projet.

En plus de ces notes, (5) un poster formalisant le processus empirique suivi pendant cette première période a été fourni à l'équipe de conception. Ces objectifs étaient de communiquer sur le projet en interne afin de présenter la méthodologie suivie et de fournir une base pour formaliser une méthodologie adaptée.

Au cours de la deuxième période, les designers ont fourni (6) une note d'immersion présentant des explorations contextuelles (sociales, géographiques et temporelles) sur la thématique des « *objets et routines d'hygiène et de beauté de demain* ». Ces explorations ont permis aux designers de fournir également des informations quant à de nouveaux usages d'hygiène et de beauté potentiels au travers d'un ensemble d'images illustratives.

Parallèlement, le consultant stratégique a proposé (7) une note de stratégie d'entreprise pour le déploiement de la conception biomimétique et pour la communication interne et externe des actions menées. Les ingénieurs ont poursuivi la collecte de données biologiques et l'ont présentée en utilisant des (8) arbres taxonomiques et en formalisant des (9) fiches détaillées sur les organismes d'intérêts. A la fin de cette seconde phase, les designers ont produit deux outils graphiques pour une séance d'idéation : (10) une cartographie, dont l'objectif était de décrire l'environnement du projet, en listant les éléments contextuels et les contraintes liées aux utilisateurs, et (11) un ensemble de fiches de modèles biologiques inspirants, dont le but était de fournir de nouvelles sources d'inspiration biologiques à différentes échelles. Après la séance d'idéation, les designers ont fourni un (12) livre d'idées avec un ensemble de représentations graphiques, inspirées du vivant, qui incarnent les solutions potentielles au problème identifié (idées et scénarios).

Enfin, au cours de la troisième phase, les designers ont proposé plusieurs évolutions des concepts et scénarios sélectionnés inspirées du vivant, d'abord au travers de (13) dessins fonctionnels, puis de (14) modèles 3D et enfin de (15) prototypes en vue d'une série préindustrielle. Chacune de ces évolutions a été réalisée grâce à une approche itérative.

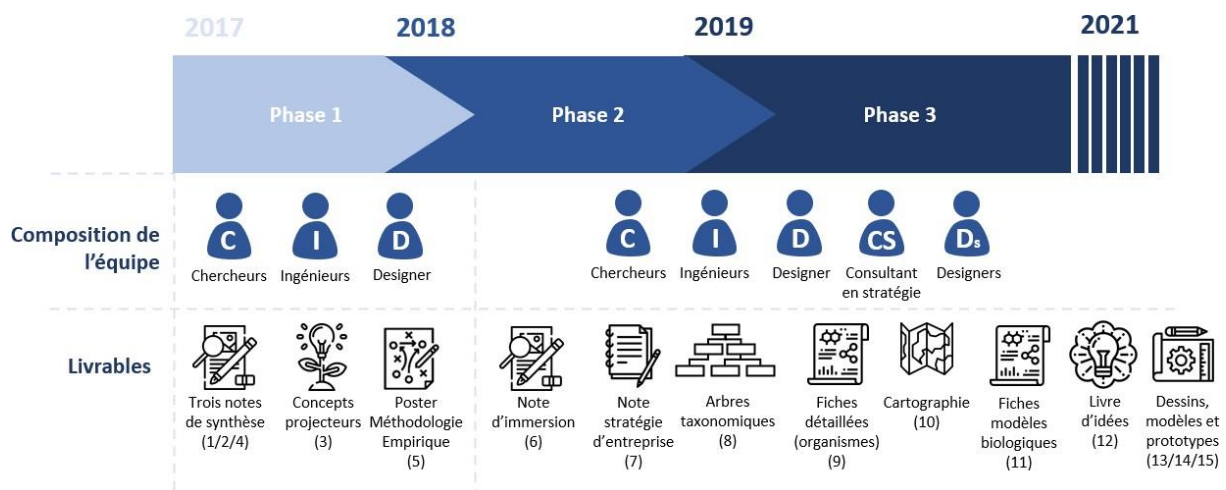


Figure 31. Périodes, années, participants et livrables de l'expérimentation 2 menée chez L'Oréal

Méthodes d'analyses et protocole suivi

Pour tester notre seconde hypothèse, nous avons choisi dans un premier temps, de formaliser le processus développé empiriquement par l'équipe de conception au cours du projet. Cette modélisation a été étudiée et validée avec l'ensemble des parties prenantes au cours de 5 comités de pilotage dédiés. Nous avons demandé aux différentes parties prenantes de valider ou de modifier rétroactivement les étapes du processus au fur et à mesure. Ce processus empirique a ensuite été comparé aux huit étapes du processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017) afin d'identifier les points de convergence et de divergence de ces deux processus (processus empirique vs processus théorique).

Pour compléter ces résultats et sur la base de notre état de l'art, nous avons, dans un second temps, analysé en détail le raisonnement de conception sous-jacent au projet afin d'expliquer et comprendre le processus empirique développé et d'étudier l'impact des différentes parties prenantes durant les différentes étapes du projet. Pour cela, nous avons eu besoin d'un cadre théorique pour modéliser ce raisonnement et analyser le lien entre les acteurs impliqués, les connaissances mobilisées et les concepts générés.

La théorie Concept-Knowledge (C-K) constitue un support intéressant car elle fournit un cadre théorique générique pour la modélisation et l'interprétation du raisonnement de conception. De plus, elle a déjà été appliquée comme cadre théorique pour mettre en évidence les effets de fixation (Agogué et al., 2014), pour comprendre les principaux rôles des connaissances biologiques dans le processus de conception biomimétique (Freitas Salgueiredo, 2013), pour enseigner la conception bio-inspirée (Nagel et al., 2016) et pour étudier les processus génératifs (Brun et al., 2018; Carvajal Pérez et al., 2018).

La théorie C-K est composée de deux espaces, l'espace des concepts (C) et l'espace des connaissances (K). L'espace K rassemble ce qui est connu et décidable, tandis que l'espace C rassemble ce qui est inconnu et indécidable (Brun et al., 2018; Hatchuel & Weil, 2009). L'espace C est un espace organisé et structuré ne permettant que l'addition ou la soustraction de propriétés, ce qui lui donne une structure arborescente. L'espace K est composé de bases isolées (Hatchuel & Weil, 2009), qui représentent chaque poche de connaissance, ajoutées sans ordre ni connexion directe. Selon la théorie C-K, le processus de conception consiste à élargir à la fois l'espace des concepts et celui des connaissances. C'est précisément l'interaction entre les connaissances et les concepts qui permet aux idées innovantes d'émerger.

Cette modélisation a été réalisée grâce à des entretiens effectués auprès de l'ensemble des parties prenantes et a également été partagée au sein d'un comité de pilotage pour validation.

Il est important de noter que dans le cadre de notre expérimentation la théorie C-K a été utilisé uniquement comme cadre de modélisation rétroactive et non comme aide à la génération de concepts innovants. De plus, aucune des parties prenantes n'était formé à la théorie C-K.

3.2.2.3 Résultats

Les « Résultats » de notre seconde expérimentation seront présentés en deux sous-parties : (1) La modélisation du processus empirique et (2) la modélisation et l'analyse du raisonnement de conception.

Modélisation du processus empirique

Nous avons d'abord formalisé le processus empirique suivi au cours du projet. Il se décompose en 12 étapes (A à L) réparties sur les 3 phases présentées précédemment. Pour chaque étape, les parties prenantes impliquées sont précisées (Figure 32). Au cours de la première période, les parties prenantes du projet ont été sélectionnées par notre partenaire industriel avec une forte volonté d'intégrer un designer dès les phases amont du projet. Puis, lors des deuxième et troisième phases, Ceebios a proposé d'intégrer de nouveaux designers (industriels) et un consultant en stratégie. Ce choix a été validé par le partenaire industriel qui a également intégré de nouveaux chercheurs.

Cette formalisation a été comparée au processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017) (Figure 33). Au cours de ce projet, malgré quelques différences sémantiques, nous avons pu identifier que le processus biomimétique problem-driven unifié a été suivi deux fois de suite à deux échelles différentes :

- Echelle macro (ciblée sur le problème global) : le processus biomimétique problem-driven unifié a été suivi d'une manière que nous pouvons qualifier d'accélérée au travers des étapes A, B, C et D du processus biomimétique empirique. L'objectif de ces étapes était d'identifier de grandes opportunités biologiques susceptibles de résoudre le problème initial : « *Comment les habitudes d'hygiène de demain pourront-elles répondre aux grands défis environnementaux, climatiques et sociétaux ?* ». Ces grandes opportunités biologiques ont été abstraites et transposées pour proposer des pistes de solutions inspirées du vivant. Ces étapes ont permis de convaincre les décideurs d'utiliser l'approche biomimétique comme une opportunité d'innovation durable et de poursuivre le projet.
- Echelle micro (ciblée sur une problématique précise) : Le processus biomimétique problem-driven unifié a ensuite été suivi une seconde au travers des étapes G, H, I, J, K et L du processus biomimétique empirique. L'objectif était ici d'analyser en détails les données biologiques d'intérêts identifiées lors des étapes précédente et de formuler une ou plusieurs solutions sous la forme de prototypes sur la thématique des « *objets lavants bio-inspirés* ».

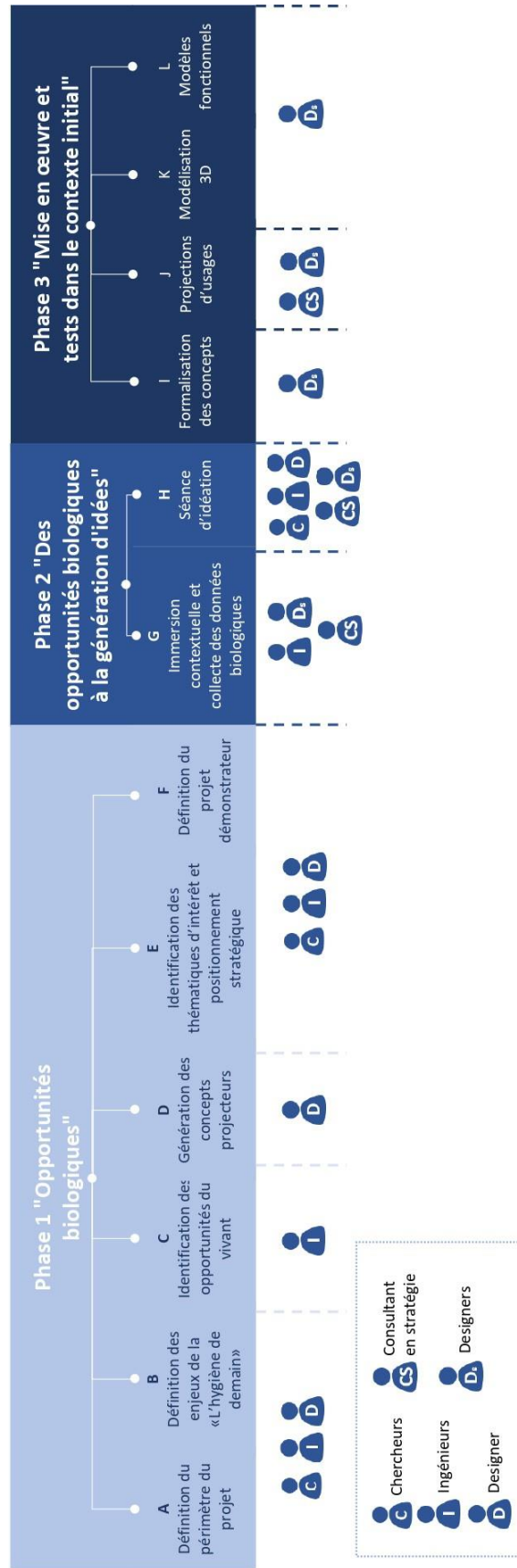


Figure 32. Formalisation des étapes du processus biomimétique empirique 2 menées chez L'Oréal

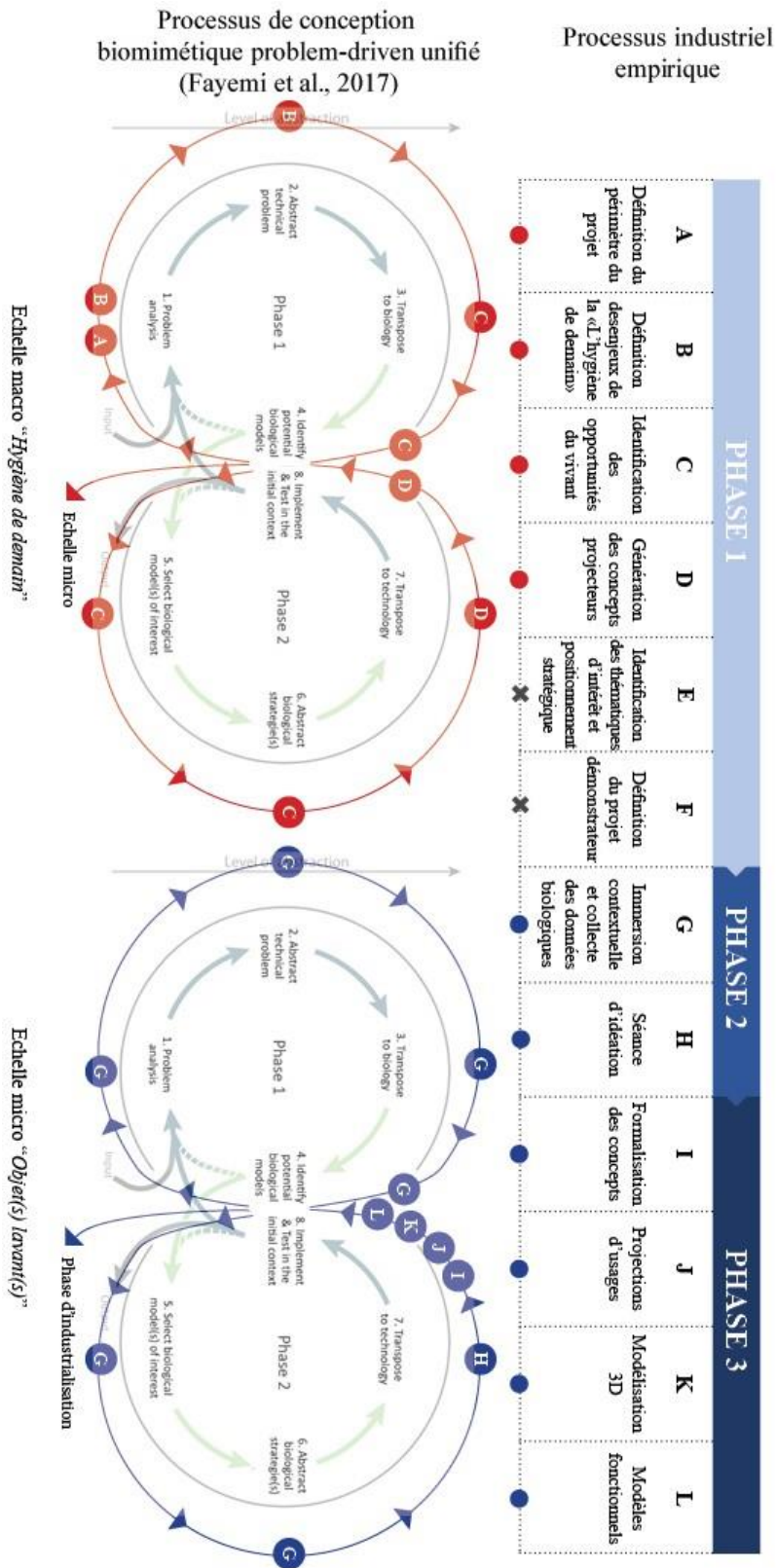


Figure 33. Comparaison entre le processus empirique de la biomimétique et le processus unifié de la biomimétique axé sur les problèmes

Cette comparaison nous a également permis d'identifier deux étapes qui ne correspondent à aucune des étapes du processus biomimétique problem-driven unifié : l'étape E « *Identification des thématiques d'intérêt et positionnement stratégique* » et l'étape F « *définition du projet démonstrateur* ». Ces étapes semblent relier les deux échelles décrites ci-dessus.

Pour compléter ces premiers résultats, nous nous sommes intéressés particulièrement aux étapes où le transfert de connaissances à lieu :

- Les étapes « d'abstraction » : étape 2 et étape 6 du processus biomimétique problem-driven unifié. L'étape 2 « Abstraction du problème technique » correspond aux étapes B (pour l'échelle macro) et G (pour l'échelle micro) du processus empirique. L'étape 6 « Stratégie(s) biologique(s) abstraite(s) » correspond aux étapes C (pour l'échelle macro) et G (pour l'échelle micro) du processus empirique.
- Les étapes de « transposition » : étape 3 et étape 7 du processus biomimétique problem-driven unifié. L'étape 3 « Transposition en biologie » correspond aux étapes C (pour l'échelle macro) et G (pour l'échelle micro) du processus empirique. L'étape 7 « Transposition à la technologie » correspond aux étapes D (pour l'échelle macro) et H (pour l'échelle micro) du processus empirique.

Les ingénieurs et les designers apparaissent comme les acteurs les plus impliqués au cours de ces étapes. Les ingénieurs sont particulièrement présents lors des étapes d'abstraction et de transposition biologiques, ce qui semble cohérent avec le processus car ils collectent et rapportent des données biologiques. Quant aux designers, le designer (de Ceebios) intervient lors des étapes « Abstraction du problème technique » et « transposition à la technologie » de l'échelle macro. Les designers (de Big Bang Project) interviennent à chacune des étapes de transposition et d'abstraction de l'échelle micro en collaboration avec les ingénieurs.

Dans la prochaine section nous présentons la modélisation du raisonnement de conception de ce projet et son analyse afin de relever les leviers qui ont favorisé le transfert de connaissances et la collaboration interdisciplinaire lors de ce projet.

Modélisation et analyse du raisonnement de conception

Pour des raisons de lisibilité et de confidentialité, nous présentons une version synthétique du modèle C-K généré, en distinguant les deux échelles définies ci-dessus et en se concentrant sur les étapes de transfert de connaissances telles que définies dans le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017). Seul le raisonnement de conception qui a conduit au produit breveté « *Catbrush* » est détaillé. De plus, seules les phase 1 (relative à l'échelle macro) et 2 (relative à l'échelle micro) sont modélisées. La troisième phase étant toujours en cours.

Description du raisonnement de conception

Phase 1 « *Opportunités biologiques* » (échelle macro) :

Dans un premier temps, les connaissances internes de l'Oréal sur « *L'hygiène de demain* » ont été collecté afin de relever les principaux enjeux, contraintes et connaissances liées au sujet. Cette collecte a été effectuée lors des premiers comités de pilotage avec les chercheurs (**K0**) et lors d'entretiens avec 18 experts internes de différents départements de L'Oréal (**K1**).

Ces connaissances ont permis de générer les premiers concepts (**C1.1 à C 3.2**). Dans le cadre du produit « *Catbrush* », le raisonnement de conception s'est basé sur le concept « *Une nouvelle routine d'hygiène (C1) qui gère les flux (C1.1)* ».

Ensuite, le designer a collecté des connaissances contextuelles (données sociales, historiques, géographiques et technologiques) relatives au sujet de recherche et à ses enjeux (**K2**). Cela a permis d'étendre les concepts (**C1.1.1 à C1.1.1.3**). Par exemple, le concept « *Une nouvelle routine d'hygiène (C1) qui gère les flux (C1.1)* » a évolué dans le concept « *Être propre sans eau (C1.1.1)* ».

En parallèle les ingénieurs ont identifié et étudié les stratégies biologiques d'intérêt pour le sujet de recherche (**K3**) (Figure 34 (a)).

À la suite de ces recherches, le designer et les ingénieurs ont partagé leurs connaissances lors d'une séance de travail qui a permis au designer d'hybrider les connaissances recueillies (**K0, K1, K2, K3**). Ainsi, le designer est parti des connaissances biologiques apportées et expliquées par les ingénieurs et les a croisées avec les connaissances résultant des entretiens et les connaissances contextuelles (**K4**). Cette action a été suivie par la formalisation de ces hybridations, par le designer, afin d'aider les parties prenantes du projet à construire des ponts cognitifs entre les connaissances contextuelles et biologiques.

Ces formalisations ont été réalisées au travers de concepts projecteurs (Brun et al., 2019) (**CP1 à CP7**). L'objectif était de présenter, aux décideurs industriels, les différentes opportunités d'innovation que l'observation et la compréhension du vivant peut apporter. À la fin de cette première année, l'équipe de conception industrielle a choisi l'un des concepts projecteurs générés pour qu'il soit développé dès la deuxième année : « *Objet(s) inspiré(s) par des surfaces et des sécrétions aux interfaces* » (**CP2**) (Figure 34 (b)).

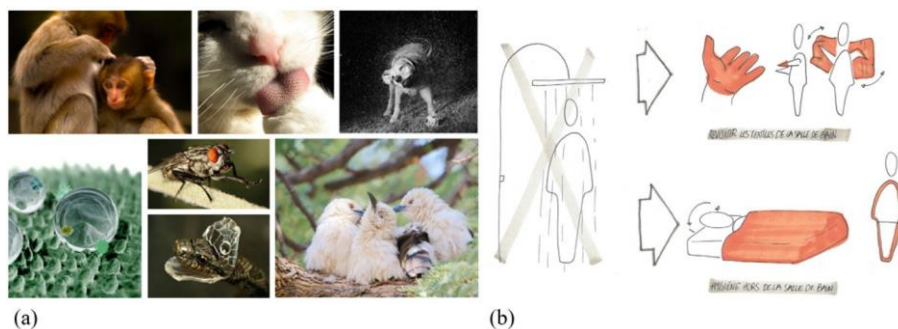


Figure 34. Identification des stratégies développées par la nature (K3) (a) et concepts projecteurs sur "Objet(s) inspiré(s) par des surfaces et des sécrétions aux interfaces" (CP2) (b)

Phase 2 « Des opportunités biologiques à la génération d'idées » (échelle micro)

Au cours de la deuxième phase du projet, un consultant en stratégie et des designers ont rejoint l'équipe de conception. Le processus à l'échelle micro, s'est concentré sur le(s) « *Objet(s) inspiré(s) par des surfaces et des sécrétions aux interfaces* » (**CP2**). Cependant, afin de garantir une exploration efficiente du sujet de recherche, il a été décidé d'étendre ce concept à : « *Objets lavants* » (**C0'**).

Trois actions de recherche ont été menées en parallèle :

- Les designers ont identifié les connaissances manquantes relatives au concept choisi, en particulier les connaissances géographiques et historiques, et ils ont interrogé des experts externes sur le sujet pour compléter les entretiens avec les experts industriels et limiter l'effet de fixation (Agogué et al., 2014 ; Jansson & Smith, 1991) (**K5**). Cela leur a permis d'étendre les concepts (**C1'** à **C7'**). Par exemple : « *Objets de lavants* » (**C0'**) a évolué vers « *Objets lavants à domicile* » (**C1'**).
- Les ingénieurs ont approfondi leurs connaissances biologiques pour identifier et détailler des stratégies biologiques intéressantes (**K6**) pour le concept d'« *Objets lavants* » (**C0'**).
- Le consultant en stratégie a identifié les grandes tendances et initiatives pouvant alimenter la communication et le positionnement stratégique de l'entreprise par rapport à l'intégration de la conception biomimétique dans leurs projets de conception (**K7**).

Les designers et les ingénieurs ont ensuite organisé une session de travail commune pour partager leurs connaissances. Dans un premier temps, il y a eu une restructuration des connaissances (**K8**) effectuée par les designers. En effet, grâce à l'apport de nouvelles connaissances contextuelles, les designers ont restructuré les connaissances biologiques apportées par les ingénieurs, ce qui leur a permis d'identifier certaines typologies de connaissances biologiques ou contextuelles manquantes.

Dans un second temps, les designers ont créé deux outils graphiques pour aider l'équipe de conception à établir des ponts cognitifs entre les connaissances biologiques et contextuelles nécessaires à la génération de concepts biomimétiques. Pour ce faire, ils ont procédé à une hybridation des connaissances, telles qu'identifiées au cours de la première phase de recherche. Ils ont ensuite formalisé cette hybridation à travers une cartographie dont l'objectif était de décrire les environnements potentiels du projet, de lister les éléments contextuels et les contraintes liées aux utilisateurs. En complément ils ont réalisé un ensemble de fiches décrivant des modèles biologiques inspirants, dont l'objectif était d'abstraire et d'expliquer les connaissances biologiques complexes, identifiées par les ingénieurs, pour concevoir des solutions et des routines d'hygiène et de beauté applicables dans la société.

Enfin une session de brainstorming avec toutes les parties prenantes du projet a été organisée autour de ces deux outils graphiques (Figure 35).



Figure 35. Session de brainstorming à travers une cartographie et un ensemble de cartes de modèles biologiques inspirants (Ces images sont délibérément brouillées pour des raisons de confidentialité, © Big Bang Project)

Cela a permis à l'équipe de conception de développer 41 concepts biomimétiques (**C1'2 à C7'1**). Parmi ces 41 concepts, huit ont été choisis par les chercheurs pour être développés et prototypés (**CP4 à CP5**) et un concept a aujourd'hui abouti à un prototype breveté en 2020 : « *Catbrush* », une brosse de nettoyage inspirée de la langue et du mécanisme de nettoyage des animaux comme les chats. Ce choix résulte des connaissances apportées par le consultant en stratégie et de la volonté de l'Oréal de développer un projet de démonstration à court terme. Le projet est toujours en cours de développement. Les prochaines étapes, liées au prototypage étant toujours en cours nous ne les présentons pas dans ce modèle (Figure 36).

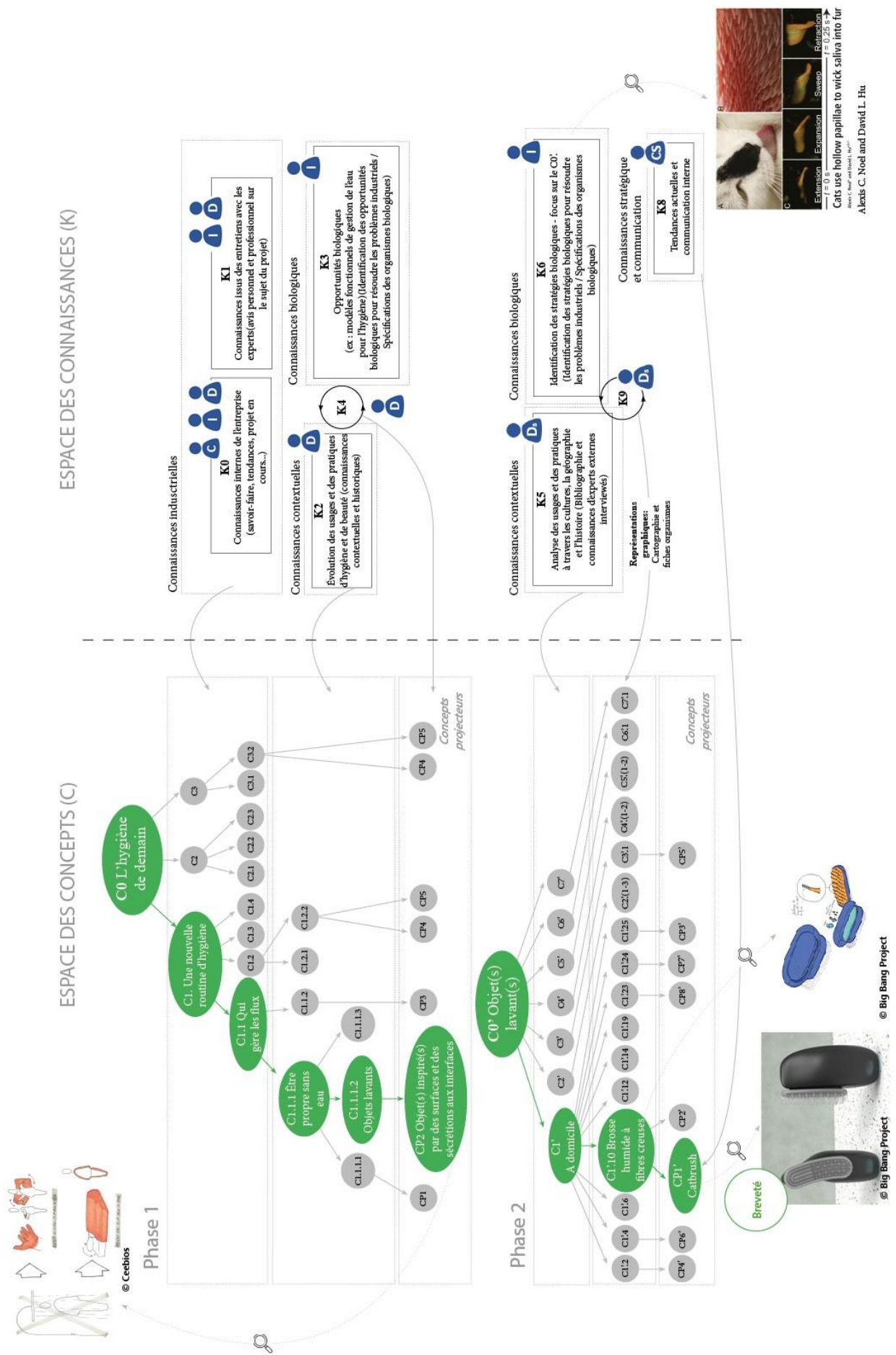


Figure 36. Synthèse de la modélisation du raisonnement de conception du projet industriel analysé

Analyse du raisonnement de conception

Cette modélisation rétroactive du raisonnement de conception nous permet de mettre en évidence cinq actions qui ont facilité le transfert des connaissances biologiques à la génération de concepts (Figure 37). Ces actions ont été mises en place une première fois par le designer (Ceebios) en collaboration avec les ingénieurs, lors de la première phase puis une seconde fois, par les designers (Big Bang Project) en collaboration avec les ingénieurs, lors de la seconde phase sans consultation entre le designer (Ceebios) et les designers (Big Bang Project) quant aux actions à mener.

- Action 1 « Collecte de connaissances » : Les phase 1 et 2 ont commencé par une collecte de connaissances. Il y a d'abord eu une collecte de connaissances contextuelles (connaissances sociales, historiques, géographiques et techniques) par les designers et une collecte de connaissances biologiques par les ingénieurs.
- Action 2 « Partage des connaissances » : Lors de séances de travail, les connaissances collectées ont été partagées entre les designers et les ingénieurs.
- Action 3 « Hybridation des connaissances » : L'explication verbale des connaissances biologiques par les ingénieurs a permis aux designers d'hybrider les connaissances contextuelles et biologiques par le biais d'opérations cognitives. Ces opérations cognitives et leurs descriptions feront l'objet de futures recherches.
- Action 4 « Formalisation de l'hybridation des connaissances » : Les designers ont formalisé l'hybridation des connaissances grâce à des représentations graphiques visant à aider les parties prenantes du projet à construire des ponts cognitifs entre les stratégies biologiques identifiées et la génération d'idées. Lors de la première phase se fût au travers des concepts projecteurs puis dans la seconde phase au travers de la cartographie et des fiches modèles biologiques inspirantes.
- Action 5 « Idéation » : Sur la base des formalisations de l'hybridation des connaissances des séances d'idéations ont été mise en place. Lors de la première phase, les concepts projecteurs ont permis à l'ensemble des parties prenantes de s'approprier les grandes pistes de solutions inspirées du vivant et de faire le choix de la thématique des « *Objets lavants* » pour la suite du projet. Lors de la seconde phase, l'équipe projet s'est réunie lors de session d'idéation pour générer des concepts biomimétiques grâce aux deux outils graphiques développés par les designers.

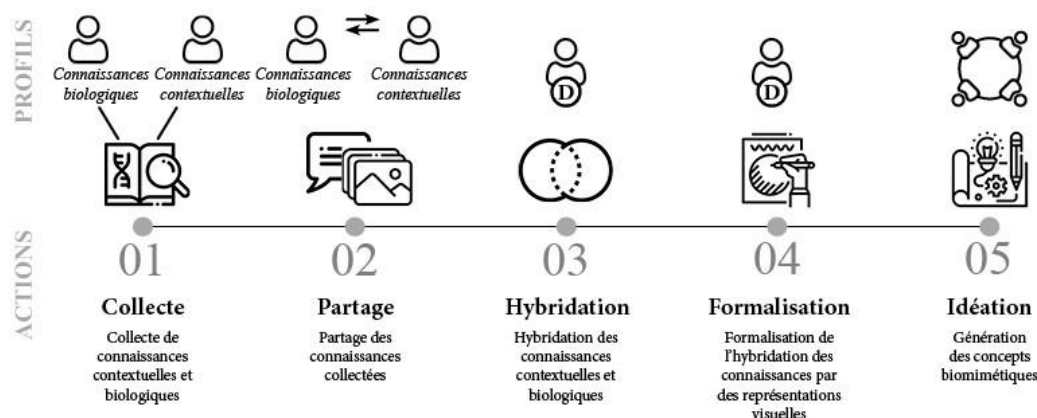


Figure 37. Actions de transfert de connaissances (Letard et al, en révision)

Ainsi, malgré la présence de designers différents durant les deux premières phases, les cinq actions mises en place pour faciliter le transfert des connaissances biologiques vers la génération de concepts furent les mêmes. Cette modélisation n'a pas permis d'identifier les actions qui ont favorisé le transfert des connaissances contextuelles aux connaissances biologiques, correspondant aux étapes 2 et 3 du processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017). Ce transfert a été réalisé lors de séances de travail entre ingénieurs et designers. De futures recherches porteront sur la formalisation de ce transfert et sur les outils utilisés.

Pour conclure cette analyse, nous nous sommes intéressés plus en détail aux types de générativités impliquées lors du transfert de connaissances (Brun et al., 2016) (§2.3.1.2). Cela nous a permis d'identifier les profils correspondant au « *concepteur source* » ou au « *concepteur destinataire* » (Carvajal Pérez et al., 2018). Dans le cadre de ce projet, les designers sont qualifiés de concepteurs source pendant les deux premières phases. Ils ont généré ce que l'on appelle des « *héritages créatifs* », grâce à l'hybridation des connaissances et à la formalisation de ces hybridations. Les autres parties prenantes du projet représentent alors les concepteurs destinataires. Ces héritages créatifs sont facilités par la mise en place de représentations graphiques, c'est-à-dire, la mise en place d'un langage graphique qui permet aux designers de créer un langage de l'inconnu. Le langage de l'inconnu permet aux designers de décrire des objets inconnus et désirables à partir de la connaissance de l'existant (Le Masson & Weil, 2013). Ce nouveau langage a été proposé à toutes les parties prenantes lors de la session d'idéation de la seconde phase. On peut donc qualifier cette générativité de générativité de type III (Carvajal Pérez et al., 2018).

3.2.2.4 Discussion, limites et ouverture

Dans cette expérimentation, nous avons proposé de comparer le processus biomimétique empirique formalisé par l'observation d'une étude de cas industrielle et le processus biomimétique problem-driven-unifié. Cette comparaison nous a permis, d'une part, de mieux comprendre le processus empirique développé au cours du projet industriel et, d'autre part, de révéler que le processus biomimétique problem-driven-unifié a été suivi deux fois de suite au cours de notre étude de cas. La première fois, pour identifier les principales opportunités biologiques d'intérêts pour la thématique de recherche et pour convaincre le décideur industriel de la pertinence de la conception biomimétique pour innover durablement. La seconde fois, pour explorer plus précisément les stratégies biologiques de l'une de ces voies d'opportunités majeures afin de trouver et de formuler des concepts à prototyper.

À la vue de nos résultats nous proposons de compléter les processus théoriques actuels et plus particulièrement le processus biomimétique problem-driven-unifié, par l'ajout d'une nouvelle phase au début du processus appelée Phase 0 « Opportunités biologiques » illustrée dans la figure 39. Cette phase est composée de 5 étapes :

- Étape 1 : « Analyser le problème de conception »
- Étape 2 : « Définir des espaces de solutions englobant les modèles biologiques d'intérêts »
- Étape 3 : « Identifier les opportunités biologiques »
- Étape 4 : « Générer des « concepts projecteurs »
- Étape 5 : « Sélectionner le(s) « concept(s) projecteur(s) à développer »

Cette phase 0 a deux objectifs :

- Valider la pertinence de l'approche biomimétique pour le problème initial à résoudre et cibler les défis clés permettant de passer d'un cadre de recherche large à un cadre de recherche ciblé ce qui facilitera la fouille de la donnée biologique.
- Convaincre les décideurs industriels, avec un investissement moindre, de la pertinence du processus biomimétique.

Nous proposons d'inclure également une base de données des connaissances collectées et des « concepts projecteurs » générés à l'issue de cette phase. Cette phase n'est pas systématique, si une équipe de conception travaille sur un problème industriel similaire, elle peut s'appuyer sur les connaissances stockées, puis sélectionner un concept projecteur pour le développer et ainsi lancer le processus directement à la première étape de la phase 1.

L'analyse du raisonnement de conception nous a permis d'identifier que les designers sont des acteurs originaux de la biomimétique qui influencent les étapes de collecte de connaissances (étapes 1 et 2 du processus biomimétique problem-driven unifié) et les étapes de transfert de connaissances de la biologie à la génération de concepts (étapes 6 et 7 du processus biomimétique problem-driven unifié).

En effet, à travers cette expérimentation, il a été identifié que les designers rassemblent des connaissances plus larges que les connaissances technologiques recommandées dans le processus biomimétique problem-driven unifié. Ils rassemblent également des connaissances sociales, historiques ou géographiques pour formaliser une cartographie mentale du contexte dans lequel se situe le problème initial, nous appelons ces connaissances « connaissances contextuelles ». De ce fait, nous recommandons de modifier la sémantique où le mot « technique » ou « technologie » sont présents pour considérer toutes les connaissances contextuelles sans se limiter aux connaissances technologiques : L'étape 2 « Problème technique abstrait » devient « Problème abstrait » et l'étape 7 « Transposer à la technologie » évolue en « Transposer au contexte ».

Ensuite, ils créent des ponts cognitifs entre les connaissances biologiques recueillies par les ingénieurs et les connaissances contextuelles, par une hybridation des connaissances. Enfin, ils formalisent cette hybridation, c'est-à-dire qu'ils matérialisent et contextualisent les connaissances à l'aide de représentations graphiques. Ces résultats convergent vers les résultats précédents (Brun et al 2016) et les élargissent en montrant que cette hybridation des connaissances se produit dans les processus biomimétiques et a un impact important sur la générativité du processus. En effet, ces représentations graphiques permettent aux designers de créer un dialogue commun avec les experts industriels et les spécialistes qui fournissent les données biologiques.

La création de ponts cognitifs et l'hybridation des connaissances sont des compétences cognitives classiquement attribuée aux designers, mais la création d'outils graphiques se basant sur cette hybridation est originale. En effet, dans un projet d'innovation dit classique, les designers n'ont pas besoin de verbaliser ou de formaliser ces hybridations de connaissances, car ce qui leur est demandé c'est de fournir uniquement les concepts qui en résultent. De plus, ils ne sont pas toujours conscients de la logique cognitive qu'ils mettent en œuvre lors de l'hybridation des connaissances, même s'ils ont été formés à cette action. Dans notre expérimentation, les designers ont choisi de faire des représentations graphiques « dessinées » pour formaliser et partager l'hybridation des connaissances, ce qui a permis à toute l'équipe de conception de construire des ponts cognitifs et de générer des concepts biomimétiques. Ces représentations ont été mobilisées pour créer un langage de l'inconnu et ainsi créer un « héritage créatif » (Carvajal Pérez et al., 2018). Il serait intéressant de poursuivre cette recherche en s'intéressant aux rôles des prototypes et des maquettes développés par les designers afin de comprendre si ces matérialisations participent également à favoriser le dialogue entre les parties prenantes du projet.

Ces résultats nous permettent de valider notre seconde hypothèse de recherche car l'intégration de designers dans le cadre du projet étudié a permis, d'une part, de faciliter le transfert de connaissance grâce à la mise en place de cinq actions clés. D'autre part de favoriser la collaboration interdisciplinaire grâce à la création d'un langage commun au travers de représentations graphiques.

Sur la base de ces résultats, nous proposons de compléter le processus biomimétique problem-driven unifié, développé dans la littérature, par trois recommandations organisationnelles :

- Intégrer des profils formés au Design (Figure 39) pendant le processus biomimétique et plus particulièrement pendant (i) les étapes de collecte de connaissances (étapes 1', 1 et 2) pour

collecter des données contextuelles, (ii) pendant les étapes d'abstraction et de transposition pour faciliter le transfert de connaissances entre les connaissances biologiques et la génération de concepts biomimétiques et pour favoriser la collaboration interdisciplinaire (étapes 3', 4', 6 et 7) et enfin (iii) pendant l'étape d'implémentation et de test en contexte initial (étape 8)

- Mobiliser les représentations graphiques comme un outil pour favoriser et faciliter la collaboration interdisciplinaire et le transfert de connaissances.
- Appliquer, au cours du processus biomimétique, les 5 actions de transfert de connaissances identifiées par la modélisation du raisonnement de conception, comme illustré dans la figure 38 : collecte, partage, hybridation, formalisation et idée (Figure 38).

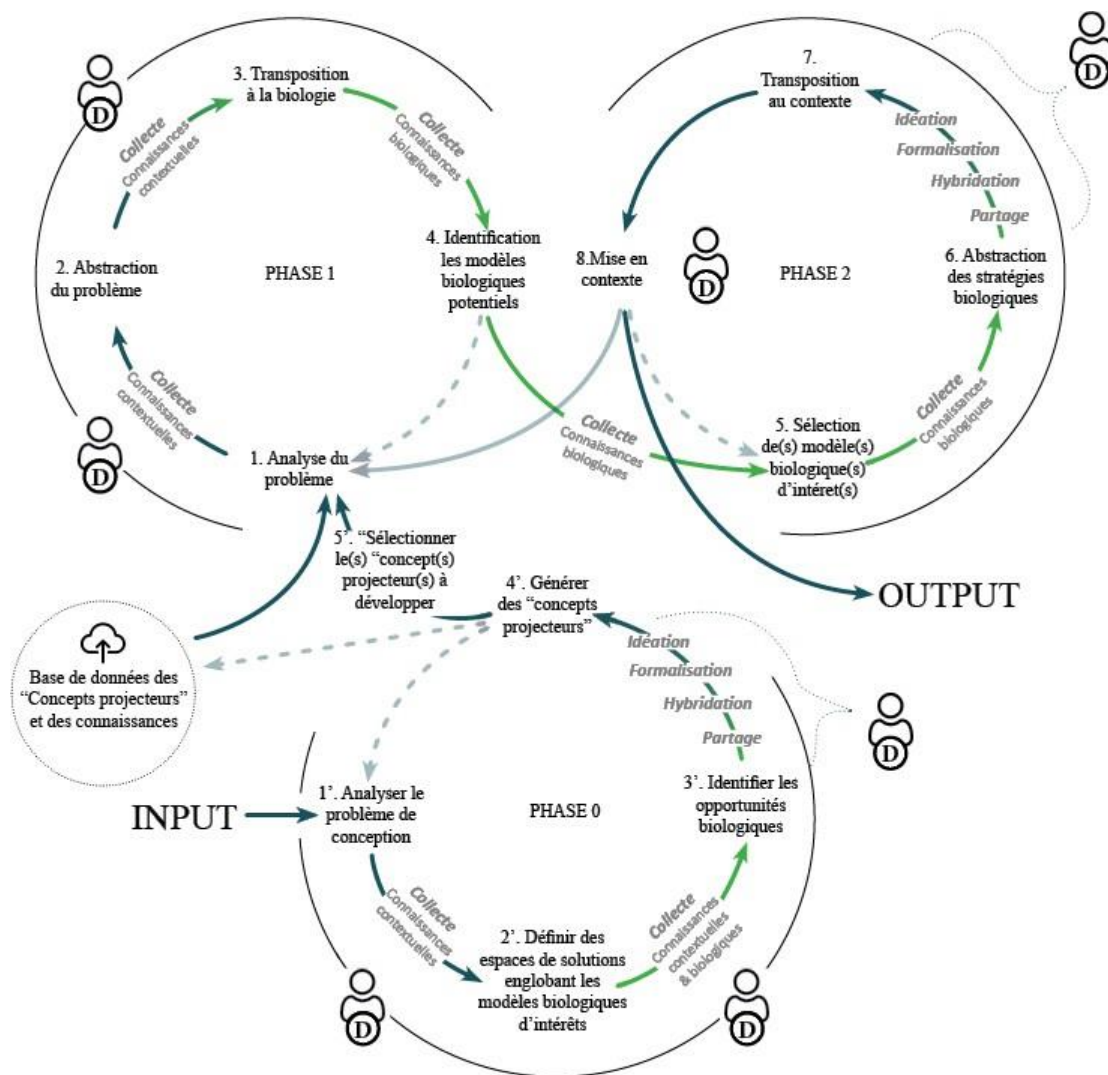


Figure 38. Développement et premières recommandations méthodologiques du processus biomimétique problem-driven unifié

Dans la présente expérimentation, l'accent a été mis sur l'analyse des processus et sur l'analyse de l'impact des parties prenantes, notamment des designers. Cette stratégie de recherche a un certain nombre de limites.

Tout d'abord, un seul projet a été analysé lors de cette expérimentation, ce qui implique qu'un seul processus empirique a été comparé au processus biomimétique problem-driven unifié. Malgré cette limite, des observations similaires ont été faites dans d'autres projets industriels menés par Ceebios ou ses partenaires (Ceebios, non publié). Nos propositions pour compléter le processus théorique sont jusqu'à présent qualitatives et devront donc être validées et complétées par de nouvelles études de cas industrielles.

Deuxièmement, les acteurs de ce projet, ingénieurs, designers et consultant en stratégie, sont tous des acteurs travaillant dans le domaine du biomimétisme et de la conception biomimétique, ce qui peut constituer un biais dans cette étude de cas. Cependant, les actions des designers notées au cours de notre analyse découlent des compétences spécifiques de la formation en Design et ne sont pas spécifiques à la conception biomimétique (Le Masson et al., 2016).

Troisièmement, nous nous sommes concentrés sur les contributions des designers lors de la modélisation du raisonnement de conception car leurs actions ont représenté un levier pour les obstacles majeurs au déploiement de la conception biomimétique : le transfert de connaissances et la collaboration interdisciplinaire. Cependant, il apparaît pertinent de poursuivre et d'approfondir les connaissances sur l'ensemble des profils qui sont présents ou devraient être présents en conception biomimétique.

Enfin, notre étude de cas a été analysée jusqu'à la génération des concepts 3D. Il serait pertinent de poursuivre cette recherche jusqu'à la mise sur le marché afin d'étudier notamment le rôle des objets intermédiaires tels que les modèles ou les prototypes générés par les designers. De plus, la phase allant du concept à la mise sur le marché est encore trop peu étudiée dans la littérature scientifique (Chirazi et al., 2019).

Conclusion et ouverture

Dans cette expérimentation, nous avons démontré que l'intégration de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales (représentations graphiques), validant ainsi notre seconde hypothèse de recherche. De plus nous avons également pu démontrer que l'analyse d'un cas pratique industriel en conception biomimétique permet d'une part, d'approfondir notre compréhension de la mise en œuvre pratique en conception biomimétique dans le contexte industriel, et d'autre part, d'identifier des recommandations méthodologiques manquants dans les processus théoriques de la biomimétique.

Pour ce faire, nous avons proposé de formaliser le processus empirique suivi lors d'un projet industriel initié par L'Oréal. Ensuite, nous avons comparé ce processus avec le processus biomimétique problem-driven unifié, processus théorique de référence développé dans la littérature scientifique.

Nous avons montré que le processus de référence théorique a été suivi deux fois à deux échelles différentes. Ce résultat nous a conduit à ajouter une nouvelle phase, non systématique, en amont du processus de référence théorique, la phase 0 « Opportunités biologiques ».

Enfin, nous avons appliqué la théorie C-K pour modéliser le raisonnement de conception de ce projet afin d'expliquer le processus empirique développé au cours du projet et d'étudier l'impact des parties prenantes avec un focus sur les profils formés au Design. Nos résultats nous ont permis d'identifier que le profil designer représente un levier pour la collaboration interdisciplinaire ainsi que pour les étapes de transfert de connaissances. Ensuite, nous avons mis en évidence cinq actions méthodologiques à mettre en place pour faciliter les étapes de transfert de connaissance : « Collecte des connaissances », « Partage des connaissances », « Hybridation des connaissances », « Formalisation de l'hybridation des connaissances » et « Idéation ».

Sur la base de ces résultats, nous avons proposé trois recommandations organisationnelles. Nous les avons formalisées en de nouveaux paramètres méthodologiques pour compléter le processus biomimétique problem-driven unifié et le faire évoluer en une version adaptable à la pratique.

D'un point de vue scientifique, nos recherches permettent de mieux comprendre la complexité de la mise en œuvre de la conception biomimétique dans un contexte industriel et apportent de nouveaux paramètres méthodologiques issus de la pratique. Ces contributions qualitatives seront validées et testées dans le cadre de futures recherches.

D'un point de vue industriel, ce projet a abouti à un produit prototypé aujourd'hui breveté, consolidant ainsi la volonté de L'Oréal d'intégrer durablement la conception biomimétique dans ses pratiques d'innovation durables. Cette recherche représente la partie méthodologique du programme dédié à la conception biomimétique chez L'Oréal. Ce développement méthodologique est maintenant diffusé en interne au sein de l'entreprise pour former de nouveaux collaborateurs en conception biomimétique, il est également utilisé pour le développement de nouveaux projets biomimétiques chez L'Oréal. D'autres entreprises ont manifesté leur intérêt pour la mise en œuvre de la même méthodologie, ce qui permettra de disposer de nouvelles études de cas pour poursuivre cette exploration.

3.3 Adaptation du cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception et d'innovation

Dans cette seconde partie nous présentons deux nouvelles expérimentations de recherche qui ont vu le jour grâce à deux opportunités de collaborations. Ces expérimentations ne portent pas sur notre cœur de recherche (problématique de recherche ciblée) mais apportent des résultats connexes relatifs à notre problématique initiale « *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* ». Les résultats présentés dans cette seconde partie du Chapitre 3 représentent des premiers apports qui ont pour vocation d'être approfondis dans de futures recherches.

- L'expérimentation 3 est rattachée à l'hypothèse 3 qui suppose qu'« *Adapter le cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception permet de favoriser son déploiement dans un cadre industriel* ». Pour tester cette hypothèse nous avons collaboré avec le Dr Eliot Graeff. Nous avons pu alors identifier des leviers d'adaptation du cadre théorique actuel de la biomimétique, conçu et utilisé par les chercheurs scientifiques, à un cadre théorique favorisant la mise en œuvre de la biomimétique dans la pratique. Pour ce faire, une étude des risques et des freins perçus par les praticiens, liés au processus de conception biomimétique problem-driven unifié ont été analysés.
- L'expérimentation 4 quant à elle est relative à l'hypothèse 4 qui suppose que « *Mobiliser la théorie C-K et le Design Thinking comme cadre de pilotage des projets en conception biomimétique facilite la mobilisation, la modélisation et la structuration des connaissances et permet de sélectionner les parties prenantes d'intérêts tout au long du projet* ». Cette hypothèse a été testée au travers d'une collaboration avec Anne-Sophie Rössler. Un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique qui s'appuie sur la mobilisation de la théorie C-K et du Design Thinking a été généré afin de faciliter le choix des parties prenantes nécessaire à mettre autour de la table lors d'un projet en biomimétique.

3.3.1 Expérimentation 3 : Développement du Processus Technology Pull Interdisciplinary Biomimetic design process

Cette expérimentation a été menée en collaboration avec Eliot Graeff, dans le cadre de ces travaux de thèse au Laboratoire de Conception Produit et Innovation (LCPI) de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers Sciences et Technologies de Paris en juillet 2020.

Cette troisième se base sur un constat commun qu'Eliot Graeff et nous même avons pu faire lors de nos travaux menés dans le même laboratoire de recherches : *malgré un fort développement théorique de la conception biomimétique, cette approche est faiblement mobilisée en pratique lors des projets de conception.*

Nous avons tous deux ciblé nos travaux de thèse sur l'étude et l'intégration de nouveaux profils d'intérêts pour faciliter le déploiement de la conception biomimétique. Eliot Graeff s'est intéressé plus particulièrement à l'intégration de concepts, de méthodes et d'outils issus de la biologie grâce à la formalisation et l'intégration d'un nouveau profil professionnel spécialisé en biomimétique : Le Biomiméticien (§2.2.4.2). Dans le cadre de nos recherches nous nous sommes focalisés sur l'intégration de concepts méthodes et compétences issus du Design au travers l'intégration de designers en conception biomimétique pour faciliter le travail interdisciplinaire et le transfert de connaissances. Afin d'intégrer ces profils de manière efficace il nous a paru important d'adapter le processus de conception biomimétique problem-driven unifié développé dans la littérature, aux pratiques de conception et d'innovation. Nous avons alors décidé de mener cette expérimentation en collaboration.

Notre étude s'appuie sur la méthodologie de recherche DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009) présenté dans la section « Matériels et méthodes ». Cette méthodologie a structuré cette expérimentation en quatre parties :

- Une phase descriptive dans laquelle des leviers d'améliorations ont été identifiés au travers d'interviews de professionnels biologistes et designers, d'une Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) et de l'analyse rétroactive de projets accompagnés par Ceebios.
- Une phase prescriptive initiale qui s'est appuyée sur les résultats de la phase descriptive pour adapter théoriquement le cadre méthodologique grâce au développement du processus biomimétique problem-driven unifié.
- Une phase d'évaluation qui a consisté en l'analyse comparative, par 32 professionnels, du processus biomimétique problem-driven unifié, du processus de la norme ISO TC/266 et du processus adapté développé en phase prescriptive ;
- Une phase prescriptive finale qui s'est appuyé sur les résultats de la phase d'évaluation pour proposer des modifications et des adaptations du cadre théorique développer lors de laphase prescriptive initial. Cela nous a permis de développer le processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB) qui représente une adaptation du processus biomimétique problem-driven unifié aux pratiques de conception et d'innovation.

Bien que l'expérimentation se structure autour de ses quatre phases de recherche, nous avons fait le choix, pour des raisons de lisibilité, de la présenter en trois parties en regroupant les deux phases prescriptives (initiale et finale) en une seule « Phase prescriptive » afin de faciliter la lecture.

Afin d'être clair sur l'implication des auteurs durant les différentes phases de l'expérimentation, nous avons précisé dans le tableau 7 ci-dessous le taux d'implication de chacun :

Etapes	Éléments	A. Letard	E. Graeff
Phase descriptive	Interviews des praticiens	30%	70%
	Récolte des informations sur les projets étudiants	0%	100%
	Récolte des informations sur les projets Ceebios	100%	0%
	Formalisation du cadre de l'AMDEC	0%	100%
	Réponse à l'AMDEC	50%	50%
	Analyse des données	10%	90%
Phase prescriptive initiale	Identification des Go/No go	50%	50%
	Reformulations sémantique	50%	50%
Phase d'évaluation	Construction du protocole	50%	50%
	Analyse des résultats	0%	100%
Phase prescriptive finale	Prise en compte des évaluations	50%	50%
	Arbres décisionnels	10%	90%
	Formalisation graphique	60%	40%

Tableau 7. Implication des auteurs durant l'expérimentation 3

3.3.1.1 Objectif

Cette troisième expérimentation étudie les points clés d'adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié pour son déploiement auprès des praticiens.

Sur la base des leviers d'amélioration généraux identifiés lors de nos revues de littérature et lors de nos expérimentations respectives, nous supposons que la prise en compte de (1) la perception des praticiens quant au(x) processus biomimétique(s) et (2) la prise en compte des risques perçus et réels du processus de conception biomimétique problem-driven unifié permet d'adapter le cadre méthodologique biomimétique théorique au cadre pratique. Ainsi notre objectif principal est de proposer une adaptation du cadre théorique de la conception biomimétique afin de favoriser sa diffusion et son appropriation auprès des praticiens.

3.3.1.2 Matériels et méthodes

Dans le cadre de cette expérimentation nous avons choisi de suivre la méthodologie de recherche DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009).

Sur cette base, notre méthode d'analyse commence par une « phase descriptive » qui s'appuie sur (1) l'interview de professionnels et chercheurs biologistes et designers, sur (2) une Analyse des Modes de Défaillances, de leur Effets et de leur Criticité (AMDEC) appliquée au processus de conception biomimétique problem-driven unifié et (3) sur l'analyse de projets accompagnés par Ceebios.

Puis une « phase prescriptive » qui présente une proposition d'adaptations du processus biomimétique aux pratiques sera formalisé.

Enfin, nous concluons par une « phase d'évaluation », qui a consisté en une évaluation par 32 professionnels adhérents au Ceebios, du processus développé proposé. Notons que tout au long de cette expérimentation, nous allons prendre le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017) comme processus de référence.

Matériels et méthodes de la « Phase descriptive »

Interviews

Des interviews ont été effectuées auprès de 4 chercheurs en biologie et 5 professionnels et chercheurs en design (Tableau 8). Le but était de récolter leur perception générale quant au processus de conception biomimétique problem-driven unifié ainsi que sur les points forts, les points faibles, les difficultés linguistiques et les freins pressentis à son application.

	Profils	Métiers	Secteurs
B1	Biologiste 1	Chercheur	Microbiologie
B2	Biologiste 2	Chercheur	Nano médecine, Biologie moléculaire
B3	Biologiste 3	Chercheur	Microbiologie
B4	Biologiste 4	Enseignant/Chercheur	Microbiologie, Biologie moléculaire
D1	Designer 1	Directeur d'agence	Design industriel et produit, innovation
D2	Designer 2	Doctorant	Design urbain, services, graphisme, UX, ergonomie
D3	Designer 3	Designer industriel spécialisé dans le sonore	Design industriel et produit, acoustique et spatial
D4	Designer 4	Designer graphique	Design de marque, graphisme et design de produits
D5	Designer 5	Doctorant	Design d'espace, design industriel et de produits

Tableau 8. Professionnels interrogés durant l'expérimentation 3

Aucune des personnes interviewées n'avait de connaissances préalables en conception biomimétique. Ces interviews nous ont permis d'évaluer la perception du processus de référence et la quantité d'informations pouvant en être extraites. En pratique, les personnes interrogées ont regardé le processus pendant quelques minutes jusqu'à ce qu'elles aient le sentiment de l'avoir compris autant que possible. Ensuite, une série de questions a été posée¹⁷, d'abord à une échelle générale avant de se concentrer sur des étapes clés spécifiques. Les entretiens ont été utilisés textuellement pour illustrer la phase descriptive. Les résultats de ces entretiens sont apparus plutôt homogène malgré la variabilité des profils.

¹⁷ Les questions posées dans le cadre des interviews de cette troisième expérimentation sont présentées en Annexe 2

Analyse des Modes de Défaillances, de leur Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'AMDEC a été réalisée par les auteurs en se concentrant sur le processus biomimétique de référence. Sans prétendre à l'exhaustivité, l'AMDEC, formalisé par Eliot Graeff sur la base de la littérature scientifique et de nos expériences professionnelles, rassemble 21 modes de défaillances identifiés pour un total de 75 scénarios. L'analyse est alors considérée comme représentative des différents risques, parfois même peu fréquents, auxquels peuvent faire face les praticiens. Ces différents scénarios défaillants sont évalués sur trois critères, la sévérité (S), la détectabilité (D) et l'occurrence (O), dont le produit définit la criticité ($C=S*D*O$).

Les résultats issus de cette analyse ont ensuite été évalués par 6 experts de la conception biomimétique sur la base de leur expérience et de leurs connaissances. Le panel d'experts était composé de chercheurs en conception biomimétique et de membres de Ceebios. Pour élargir notre échantillon et obtenir un point de vue différent, l'évaluation a également été réalisée par 9 étudiants qui ont effectué un projet biomimétique de septembre 2019 à janvier 2020 suivi par Eliot Graeff. Les scénarios considérés comme les plus risqués, tant au total (11) que par chaque expert (13), ont été rassemblés, dans la partie résultats, dans un tableau et illustrés par des références bibliographiques et des citations tirées des entretiens (Tableau 10).

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 problem-driven unifié, durant la phase prescriptive, si : (1) il est noté comme parmi les plus critiques de manière individuelle par les experts, (2) il est noté comme parmi les plus critiques en moyenne par les experts, (3) il est noté comme parmi les plus critiques en moyenne par les étudiants.

Ainsi nous pouvons rendre compte de la diversité des expériences des experts tout en identifiant les risques reconnus par tous.

Analyse des projets

Sur la base d'analyses de projets biomimétiques accompagnés par Ceebios nous avons extraits les résultats de notre analyse concernant le critère de temps dédié à chaque étape du processus de conception biomimétique. Nous avons récolté ces informations grâce à l'interview des membres de Ceebios étant présents lors des projets analysés. A cela, s'ajoute des observations expérimentales qui ont été réalisées durant la supervision de quatre projets d'étudiants sur une période de 2 ans par Eliot Graeff. Ces observations seront utilisées pour illustrer la phase descriptive et fourniront des indications pour la phase prescriptive.

Matériels et méthodes de la « Phase prescriptive »

La phase de description nous a amené à identifier différents éléments clés à aborder afin de tester notre troisième hypothèse. La phase prescriptive propose de s'appuyer sur ces éléments clés afin de proposer un processus adapté du processus de référence. Cette proposition de processus est nommée *Processus Biomimétique Interdisciplinaire (TPIB)*, il prend en compte nos recherches respectives : l'intégration du biologiste et du « Biomiméticien » pour les travaux de Eliot Graeff et l'intégration de profils formés au Design pour nos présents travaux.

Matériels et méthodes de la « Phase d'évaluation »

Le *Processus Biomimétique Interdisciplinaire (TPIB)* a été évalué par 32 industriels, participants au Groupe d'Innovation Stratégique organisé tous les trimestres par Ceebios. L'ensemble des répondants sont adhérents à Ceebios et sont sensibilisés à la conception biomimétique. Pour cette évaluation, trois processus biomimétiques ont été comparés : le processus de conception biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al. 2017), le processus de la norme ISO (ISO, 2015), et notre processus nouvellement optimisé (TPIB). Ils ont été évalués sur leur attractivité, leur compréhensibilité, la richesse de l'information et la capacité à réduire la peur du risque.

Pour se faire, nous avons demandé, dans un premier temps, à l'ensemble des participants de nous indiquer leurs professions puis de noter s'ils avaient déjà effectué un projet en conception biomimétique. Si oui, nous leur demandions de préciser le processus utilisé, s'il s'agissait du processus de référence, du processus de la norme ISO 18458 (ISO, 2015) ou d'un processus de conception empirique. La synthèse de ces réponses est indiquée dans le tableau 9 ci-dessous.

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

Tableau 9. Composition de l'échantillon de participant à la phase d'évaluation de l'expérimentation 3

Puis lors de l'évaluation nous avons demandé aux participants de comparer à l'aveugle (sans mention des auteurs des processus) et de façon individuel les trois processus de conception biomimétique : le processus issu de la norme ISO 18458 (ISO, 2015), le processus de référence (Fayemi et al., 2017) et le Processus Biomimétique Interdisciplinaire (TPIB).

Le protocole d'évaluation était composé de deux étapes, une étape d'appropriation (10 min) suivi d'une étape d'analyse (30 min) via un questionnaire de 15 questions divisé en 5 sections¹⁸.

Durant les 30 minutes de cette évaluation, les participants pouvaient poser des questions sur le contenu du questionnaire, les réponses étaient dites à haute voix afin que chaque répondant puisse avoir l'information.

Les résultats, présentés en pourcentage, ont été traités par Eliot Graeff qui les a comparés à l'aide d'un test de Fisher au vu de la taille relativement faible de l'échantillon.

3.3.1.3 Résultats

Tout comme la partie précédente, nos résultats sont présentés selon la structure de la méthodologie de recherche DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009) : Phase descriptive, Phase prescriptive, Phase d'évaluation.

Résultats de la « Phase descriptive »

Grâce à ces différentes phases de recherche, allant de la collecte des retours d'expériences à l'évaluation des processus en passant par l'AMDEC, il a été possible d'identifier les points clés d'adaptation du processus de référence à développer. Ils peuvent être classés en quatre parties :

(1) les axes de références du processus biomimétique, (2) la définition des étapes et (3) les résultats de criticité (AMDEC).

Notons que pour des raisons de lisibilité les sémantiques présentées, lors de la définition des étapes, sont celles qui ont été validées et modifiées après l'évaluation des professionnels.

(1) Axes de références du processus biomimétique

La forme actuelle du processus biomimétique problem-driven unifié propose un axe vertical qui représente le niveau d'abstraction, mais ne propose pas d'axe horizontal. En effet, la forme globale du processus conduit les praticiens vers un premier cycle, allant de l'étape 1 à l'étape 4 (dans le sens des aiguilles d'une montre). Puis l'orienté vers un second cycle, de l'étape 5 à l'étape 8 (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre). Enfin, le processus propose aux praticiens deux possibilités, soit un retour à la première étape au travers d'un raisonnement itératif soit la fin du processus. Cette structure conduit à un processus de forme organique qui synthétise les phases globales à considérer en biomimétique.

Cependant, en l'absence d'un **axe horizontal** (Figure 40) (généralement un axe temporel) et face à une formalisation en signe de l'infini, le manque d'information sur le temps et les ressources à envisager apparaît rapidement. Si 89% des répondants ont perçu la forme itérative globale comme étant « *logique* », « *classique* » (D.2), sa formalisation spécifique a souvent été remise en question et a été perçue comme synonyme de risques par les deux communautés. En effet, les répondants se sont demandé « *Pourquoi les itérations ne semblent possibles qu'entre deux étapes ?* » (B.1) et on

¹⁸ Le questionnaire est présenté en Annexe 3

soulever les risques pouvant être perçus par les entreprises : « ... lorsque que l'on crée un processus il doit être suffisamment bon pour ne pas avoir à revenir en arrière car cela peut être perçu comme une perte de temps et d'argent » (D.4). Par ailleurs, 50 % des biologistes et 80% des designers ont discuté la forme globale en signe de l'infini du processus qui « peut mener les praticiens à une sensation d'échec » (D.3)

Puis, l'axe vertical (Figure 39) qui présente le niveau d'abstraction a été identifié comme une difficulté par 100% des biologistes, qui n'ont pas su « définir et expliquer les niveaux d'abstraction » (B.3). Alors que 60% des designers ont compris le concept d' « axe d'abstraction », reconnaissant qu'« un axe représentant les niveaux d'abstraction est très intéressant » (D.2). Tous ont remis en question la structure de cet axe vertical qui « n'est pas graduée, ce qui conduit à une difficulté à comprendre le lien entre les étapes et les niveaux d'abstraction » (D.3). Les répondants ont également soulevé plusieurs questions quant au nombre et aux définitions des niveaux d'abstraction : *Y a-t-il trois niveaux d'abstraction ? Si oui, pourquoi seulement trois niveaux ? Que représentent ces différents niveaux ? Les praticiens savent-ils comment passer d'un niveau à l'autre ? Peuvent-ils utiliser cet axe vertical pour obtenir des informations ?*

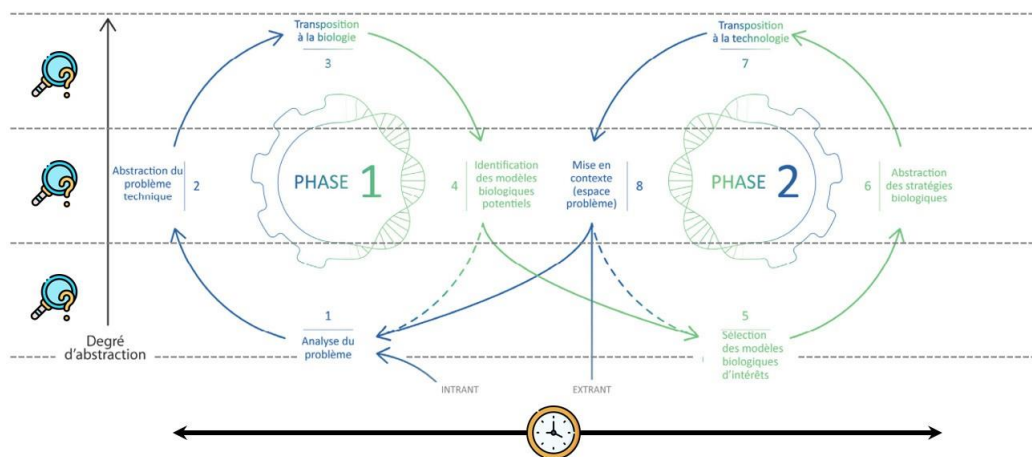


Figure 39. Questions sur les axes du processus biomimétique unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017)

Pour compléter ces résultats, les couleurs ont été instinctivement comprises par toutes les personnes interrogées comme faisant référence aux étapes centrées sur la biologie (vertes) et celles centrées sur la technologie (bleues).

Nous concluons que du point de vue des professionnels non formés à la biomimétiques interrogés, les deux axes du processus de conception biomimétique problem-driven unifié sont mal définis, ce qui entraîne une ambiguïté quant à leur compréhension. Puisque l'objectif de cette expérimentation est de favoriser la mise en œuvre pratique de la conception biomimétique, il est nécessaire de redéfinir ces deux axes. D'une part, en précisant les niveaux d'abstraction, d'autre part, en créant un axe horizontal informant de la temporalité du processus. Nous pensons que la définition fine de ces deux axes devrait permettre aux praticiens d'extraire les informations nécessaires pour mettre en pratique et s'approprier le processus de conception biomimétique. Suivant la même logique, la section suivante étudie la sémantique de chacune des étapes du processus de référence.

(2) Définition des étapes

Les étapes composant le processus de conception biomimétique problem-driven unifié sont décrites du point de vue théorique dans la littérature scientifique. Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons voulu interroger les répondants quant à leur compréhension à la seule vue du processus. Les 8 étapes du processus ont été regroupés en 4 clusters :

- Les étapes communes aux processus classiques de conception et biomimétique (étapes 1 et 8)(Figure 40, A)
- Les étapes d'abstraction (étape 2 et 6) (Figure 40, B)
- Les étapes de transposition (étapes 3 et 7) (Figure 40, C)
- Les étapes ciblées sur les données biologiques (Étapes 4 et 5) (Figure 40, D).

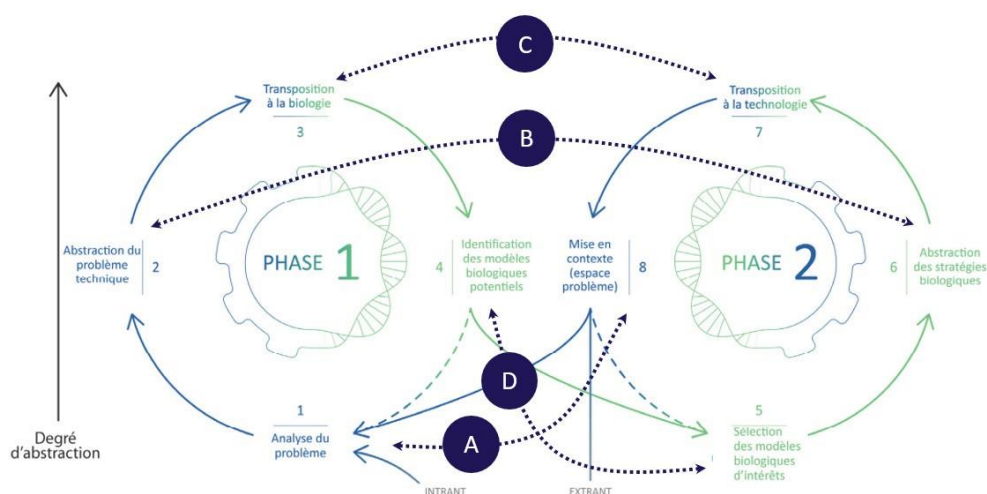


Figure 40. Questions sur les sémantiques associées au processus unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017)

- Étapes communes aux processus classique de conception et biomimétique (étapes 1 et 8) : La première étape « Analyse du problème », et la dernière étape « Implémenter et tester dans le contexte initial », sont les étapes les mieux comprises par toutes les personnes interrogées. Un tel résultat semble logique puisque la sémantique ne présente aucune difficulté et que ces étapes sont similaires aux processus d'innovation classiques (Kruiper et al. 2018) (Figure 41, A). En effet, les répondants arrivent facilement à les reformuler et les expliquer, « *Je vois dans cette première étape, l'analyse du contexte, que ce soit à partir d'un brief clients et/ou du contexte de production* » (D.3), « *On positionne nos résultats dans le contexte initial défini* » (D.4).
- Étapes d'abstraction (étape 2 et 6) : Les étapes d'abstraction, à l'instar de l'axe vertical portant la même sémantique, sont identifiées comme les étapes les plus difficiles à comprendre sémantiquement, selon les personnes interrogées. Lors des entretiens, le concept d'« abstraction » a été considéré comme « *un mot mystérieux* » (B.2), et globalement comme un concept peu clair pour l'ensemble des biologistes. Si les designers semblaient connaître le concept, son application pratique dans le contexte de la conception biomimétique a également été perçue comme une difficulté évidente pour l'étapes 2 (60%) et l'étape 6 (100%). De plus, certains designers pensaient

comprendre le terme « abstraction » cependant ils n'en proposaient pas une bonne définition « *C'est en quelque sorte une synthétisation du problème* » (D.1), « *soit on redéfinir le problème en fonction de sa technicité, soit on met de côté la technicité au profit du problème lui-même* » (D.5). Les répondants se sont le plus souvent concentrés sur le « problème technique » ou les « stratégies biologiques » lorsqu'elles ont décrit leur compréhension des étapes d'abstraction. Ce faisant, elles ont presque remplacé « abstrait » par « identifié », ce qui apparaît comme une façon réductrice de traiter ces étapes. Ainsi, ces étapes sont mal comprises dès le début, ce qui conduit certaines personnes à « *sauter cette étape car il semble plus logique d'effectuer directement la transposition* » (B.4). Ces constats sur la mauvaise compréhension sémantique et pratique des étapes d'abstraction constituent un frein potentiel au déploiement de la conception biomimétique.

- Étape de transposition (étapes 3 et 7) : Une tendance équivalente aux étapes d'abstraction, bien que légèrement plus faible, est constaté pour les étapes de transposition. Le concept de « transposition » a été mieux défini d'un point de vue théorique. Cependant, les personnes interrogées n'extraient que très peu d'informations sur la manière d'effectuer réellement ces étapes. Lorsqu'on leur a demandé ce qu'ils feraient à l'étape 3, plus de 55% des personnes interrogées ont répondu qu'ils « *chercheraient des organismes ayant des solutions pour résoudre la problématique* » (D.1). Ainsi, ils mélangent la « transposition à la biologie » avec « l'identification du modèle biologique » qui est l'étape suivante (étape 4). Cette confusion fréquente entre l'étape 3 et l'étape 4 amène les praticiens à vouloir passer directement à la fouille biologique (étape 4) sans passer par l'étape de transposition (étape 3). Une définition fine de ces étapes tout comme pour les étapes d'abstraction est crucial aussi bien d'un point de vue sémantique que du point de vue pratique. Pour l'étape 7 « transposition à la technologie », le concept a été interprété comme une application au monde technologique. Les répondants ont rapidement compris que cette étape était le moment d'« *adapter et modifier* » (B.4) la ou les stratégies biologiques d'intérêts extraites, aux systèmes technologiques ou « *d'adapter les solutions au cadre défini précédemment* » (D.3).
- Étapes ciblées sur les données biologiques (Étapes 4 et 5) : Ces deux étapes sont comprises sémantiquement par 100% des répondants. Cependant la mise en pratique de ces étapes pose encore aujourd'hui beaucoup de questions largement étudié dans la littérature comme l'illustre le développement croissant d'outils tels que les bases de données pour trouver la donnée biologique ou des outils d'aide au choix des modèles biologiques pertinents (§2.2.2.2). Notons que ces étapes sont largement étudiées dans les travaux de thèse de Eliot Graeff (Graeff, 2020a).

Grâce à l'étude des retours d'expériences et des éléments relevés lors des interviews nous avons pu identifier les points à développer pour une meilleure compréhension du processus par les praticiens. Les étapes d'abstraction et de transposition ressortent comme étant des étapes complexes encore non comprises par les praticiens que ce soit du point de vue sémantique que du point de vue pratique. De plus, ces étapes hébergent les actions complexes de transfert de connaissances ce qui implique la mise en place d'une collaboration interdisciplinaire efficiente. Tous ces défis conduisent à une augmentation du risque perçu de la conception biomimétique. La section suivante évalue et caractérise les risques liés au processus de conception biomimétique problem-driven unifié afin de mieux les comprendre et de les traiter.

(3) Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) appliquée au processus biomimétique de référence

Comme présenté précédemment, le processus biomimétique est perçu comme un processus risqué qui fait encore face à plusieurs défis. Pour les entreprises et les investisseurs, cette approche est synonyme de fort investissement, aussi bien en termes de temps, en termes d'investissement financier mais également en termes de temps homme à mobiliser lors de ce processus. Sur cette base, il semble pertinent d'évaluer les risques du processus de conception biomimétique afin de mettre en lumière les points clés d'amélioration, de limiter ces risques et d'inciter les décideurs stratégiques à mobiliser cette approche pour la résolution de problème. Les résultats les plus critiques selon les individus (N=11) et selon l'ensemble des experts (c'est-à-dire les scénarios ayant obtenu une note de criticité de 27) (N=10) sont présentés dans le tableau 10.

L'ensemble des résultats a permis de mieux comprendre les causes menant aux scénarios jugés les plus critiques : (A) Le manque d'orientation, d'accompagnement et de formations, (B) le manque d'expériences et de recul, (C) les biais cognitifs et (D) le manque de ressources biologiques.

- (A) Le manque d'orientation, d'accompagnement et de formations (tableau 10; R3, R4, R5, R11, R13, R15, R16, R17, R18, R19, R21).

La conception biomimétique est une approche qui a été formalisée récemment (§2.2.2). Cela implique que les praticiens n'ont soit pas accès à l'information nécessaire pour comprendre les attentes et objectifs réels des étapes du processus de conception biomimétique, soit ils y ont accès mais ne la traitent pas. S'ils la traitent, elle peut être basée sur des erreurs, n'être pas complètement ou correctement comprise ou elle peut être comprise sans savoir comment la mettre en œuvre. Comme pressenti précédemment, les concepts sémantiques d'abstractions et de transposition sont encore peu connus et compris par les praticiens surtout si ces derniers ne sont pas formés à effectuer ces actions.

- (B) Le manque d'expérience et de recul (tableau 10; R1/R2/R7/R11/R12/R15/R20/R21)

Le faible déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception induit un manque d'expérience et de recul de la part des praticiens qui sont dans l'incapacité d'identifier et d'anticiper les erreurs mettant le projet en danger. Bien évidemment cette cause est intimement liée au manque d'accompagnement et de formation qui sont nécessaires pour permettre soit à l'équipe entière soit au chef de projet d'avoir la capacité d'identifier les potentiels erreurs, problèmes, difficultés pouvant impacter le projet.

- (C) Les biais cognitifs (tableau 10, R2/R11)

Il a également été identifié que les biais cognitifs tels que les fixations cognitives ou le manque de vision systémique impactent fortement le bon déroulé du processus de conception biomimétique.

Id	Étape	Mode de dysfonctionnement	Cause potentielle	Effet potentiel	Étudiant	Expert	Interview	Littérature
R1	1. Analyse du problème	Problème mal défini	L'équipe de conception ne trouve pas nécessaire de re-questionner et analyser le problème.	L'ensemble du projet est très susceptible d'échouer.	X	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.	La solution peut ne pas fonctionner dans le contexte initial.	X	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.	Frustration de l'équipe. Les étapes 3 et 4 sont mal exécutées et semblent difficiles.	X	X	"C'est le mot que j'ai trouvé mystérieux"	(Rovalo et al., 2019)
R4		Abstraction non pertinente	L'équipe de conception fait des erreurs durant l'abstraction					
R5		Incapacité à transposer à la biologie, l'étape est sciemment ignorée	Le concept de « transposition » est inconnu de l'équipe de conception.				"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.	Frustration de l'équipe. La recherche de solutions est vécue de manière passive à travers des outils, elle semble difficile et restreinte.	X	X		(Rovalo 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.					(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.	Risque de ne pas trouver de modèles adaptés.	X	X		(Mak et Shu, 2004)
R9	4. Identification des modèles biologiques	Les modèles identifiés semblent redondants	L'équipe de conception crée des points de fixation.	Perte de ressources, sentiment d'être coincé.	X	X		(Helms et al., 2009) (Rovalo et al., 2019)
R10		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, expertises).					(Rovalo et al., 2019) (Yen et al., 2013)
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.	Le produit final peut être inapproprié, perte de ressources.	X	X		(Chirazi et al., 2019)
R12			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.	Augmenter fortement le coût ou le risque de fixation sur un modèle inadéquat.	X	X		(Jacobs et al., 2014)
R13		Incapacité à abstraire le modèle biologique, l'étape est considérée comme ignorée par l'équipe	Le concept d'« abstraction » est inconnu de l'équipe de conception.	Conduit à une tentative ratée de transposition directe dans l'étape 7. Passage à du Bio-morphisme, Bio-utilisation, etc.	X	X	"Je saute cette étape quand je m'imagine faire le processus"	(Rovalo et al., 2019) (Chirazi et al., 2019) (Yen et al., 2013)
R14	6. Abstraction de stratégies biologiques	Abstraction mal exécutée	Incompréhension des données biologiques, les mauvais éléments sont abstraits.	Passage à du Bio-morphisme, Bio-utilisation, etc.				
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.	Passé à côté de l'intérêt de l'approche qui semble alors trop complexe.	X	X		(Rovalo et al., 2019)
R16			L'équipe de conception ne sait pas ce qu'est qu'un niveau d'abstraction ou quel niveau rechercher.		X	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.	Passage à du Bio-morphisme, Bio-utilisation, etc.				
R18			L'équipe de conception connaît le concept sémantique de « transposition », mais ne sait pas comment effectuer l'étape.	Très grande frustration, échec du projet.	X	X		(Rovalo et al., 2019)
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.	Grande frustration. L'intérêt de la biomimétique disparaît. Pas de produit biomimétique conçu.				(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.	Grande frustration. Perte de ressources, échec du projet.	X	X		(Rovalo et al., 2019) (Yen et al., 2013) (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	Coût très fort en ressource. Projet potentiellement plus rentable.	X	X		(Chirazi et al., 2019) (Yen et al., 2013)

Tableau 10. Scénarios critiques extraits de l'AMDEC

- (D) Le manque de ressources biologiques (tableau 10, R6, R7, R9, R10, R12, R14, R19, R20)

L'un des risque majeur soulevé est le manque de ressources biologiques, que ce soit en termes de connaissances, d'expertises ou savoir-faire. Ce risque est également largement étudié dans les travaux de thèse d'Eliot Graeff (Graeff, 2020a).

Ces informations tendent à indiquer que les praticiens n'ont pas accès à l'ensemble des informations nécessaires pour s'appropriier complètement le processus de conception biomimétique et pour en tirer l'ensemble de son potentiel. Les résultats de l'AMDEC confirment la nécessité de (1) (re)définir la sémantique et les actions attendues à chaque étape tout en fournissant des informations quant à leurs traitement et leur mise en place. Ces résultats incitent également à mettre en place (2) un accompagnement des équipes au travers de formations, de recommandations et de ressources pour limiter les biais cognitifs et les erreurs et ainsi garantir un suivi efficient du processus.

Dans sa forme actuelle, le processus de conception biomimétique problem-driven unifié apparaît donc encore comme un territoire inconnu et semble risqué pour des praticiens non formés.

En nous appuyant sur l'ensemble des résultats présenté ci-dessus nous proposons ci-dessous de développer le processus de conception biomimétique problem-driven unifié en restructurant les axes et en renommant les étapes afin de permettre aux praticiens d'extraire facilement des informations et de réduire ainsi le risque d'erreurs.

Résultats de la « Phases prescriptives »

En nous basant sur les résultats issus de la phase descriptive ci-dessus, deux développements principaux sont ciblés et présentés ci-dessous : (1) Le développement structurel du processus biomimétique de référence grâce à la restructuration des axes, (2) à la précision sémantique des étapes et (3) la réduction des risques par l'implémentation de point « Go/No Go » et de boucles d'itération associées.

L'ensemble nous a permis de faire évoluer le processus biomimétique problem-driven unifié. Nous avons appelé ce nouveau cadre méthodologique : *Processus Interdisciplinaire de Conception Biomimétique* (Technology Pull Interdisciplinary Biomimetic design process ou TPIB design process). Il est présenté à la fin de cette partie.

(1) Restructuration des axes

Les résultats de la phase descriptive soulignent la nécessité d'une représentation plus informative et plus accessible du processus de conception biomimétique. L'une des préconisations est de développer plus précisément les deux axes structurant du processus afin d'accompagner les équipes de conception à raisonner de manière dynamique et prédictive tout en anticipant les difficultés, les erreurs potentiels et les ressources à fournir (temps, hommes, financières). Cette préconisation a pour but principale de réduire au maximum les risques préexistants du processus de conception biomimétique. Les praticiens doivent comprendre avec précision la démarche à suivre et les actions

à mettre en place afin que l'intégration du processus de conception biomimétique apparaisse pertinente et se systématisse dans les pratiques de conception et d'innovation.

Axe horizontal : Estimation de la répartition du temps

L'une des difficultés identifiées lors de la phase descriptive est le sentiment d'infini induit par la formalisation du processus de conception biomimétique de référence. Ce sentiment est lié au manque d'information permettant de planifier un projet notamment en termes de temps. La planification d'un projet sur la durée est nécessaire pour déterminer les investissements qui doivent lui être associés. Un axe horizontal représentant une estimation des durées de chaque étape est alors proposé.

Pour construire cet axe, nous avons, dans un premier temps, relevé le temps consacré aux différentes étapes du processus de conception biomimétique de 15 projets accompagnés par Ceebios. Pour ce faire une série d'entretiens avec les équipes projets ont été effectués. Le tableau 11 ci-dessous présente les résultats obtenus (Tableau 11, (1)). Puis dans un second temps, en complément, nous avons préconisé une répartition du temps que nous considérons pertinente pour les différentes étapes, qui se base sur nos expériences en tant que praticiens (Tableau 11, (2)).

Ces estimations combinent donc d'une part, des retours descriptifs de projets ayant abouti et nos prescriptions d'amélioration. Nous avons noté que tout comme les processus de conception classiques, les étapes 1 et 8 sont extrêmement variables selon le cadre des projets (ex : sujet déjà défini ou non, souhait de développer une innovation de rupture ou incrémentale, mission de conseil ou R&D interne, etc.), ce qui nous a amené à ne pas proposer d'estimation temporelle pour ces étapes. Les données récoltées ont permis de développer un axe horizontal représentant le pourcentage de temps moyen à consacrer aux six étapes restantes du processus biomimétique (Tableau 11, (3)).

Nous notons que nos préconisations sont en accord avec les temps issus de l'analyse des projets accompagnés par Ceebios. Cependant, en nous basant sur la phase descriptive, nous orientons les praticiens vers des étapes de l'abstraction plus longue.

Processus	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 5	Étape 6	Étape 7
	Retours d'expérience industriels					
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 %).

Tableau 11. Résultats de l'analyse du cadre temporel de l'expérimentation 3

Ce nouvel axe, permet aux praticiens d'estimer rapidement le temps moyen qu'ils devront consacrer aux différentes étapes lors d'un projet de conception biomimétique. Ce qui permet notamment de favoriser : (A) Le dimensionnement temporel d'études potentielles, (B) la formalisation de diagrammes de Gantt pour les projets biomimétiques dont la durée est prédéfinie, (C) l'estimation du temps à consacrer aux étapes restantes si la durée totale du projet n'est pas définie initialement, (D) l'évaluation des avancées ou des retards d'un projet et (E) l'estimation des coûts, des risques et des investissements nécessaires aux différentes étapes.

Loin d'être une représentation statique où l'ensemble des données sont figées, cet axe doit être considéré comme une ligne directrice générique évolutive. Il est conçu comme une base pouvant être ajustée et alimenté grâce à la prise en compte de retours d'expériences internes, d'avancées à venir issues de la recherche en biomimétique, de préférences des équipes, etc.

La nouvelle définition de cet axe conduit à la disparition du sentiment d'incertitude des praticiens quant au temps à mobiliser pour effectuer le processus de conception biomimétique. Néanmoins il fait également disparaître la structuration itérative largement reconnue comme un des avantages principaux du processus biomimétique problem-driven unifié. Par conséquent, nous avons porté une attention particulière à la mise en place de nouvelles boucles itératives au travers de Go/No go présentés plus tard dans cette sous-partie.

Axe vertical : définition des niveaux d'abstraction

L'ensemble des travaux sur l'axe vertical sont au cœur des travaux de recherche d'Eliot Graeff, nous en présentons donc ici une synthèse. Pour avoir les détails du développement de cet axe nous vous invitons à consulter les travaux de thèse concernés (Graeff, 2020). L'ensemble des résultats a été discuté et validé par l'ensemble des auteurs de cette expérimentation collaborative.

Comme soulevé lors de la phase descriptive la compréhension et la maîtrise du concept d'abstraction est encore complexe. Le fossé entre théorie et pratique apparaît ici particulièrement important. Il semble alors nécessaire de définir plus en détail les niveaux d'abstraction du processus biomimétique de référence.

En s'appuyant sur les définitions des niveaux d'abstraction publiés dans la littérature (Keshwani et al., 2015 ; Cheong et al., 2012 ; Gentner, 1989), Eliot Graeff (2020) à définit quatre niveaux d'abstraction : Réalité, Bas, Intermédiaire et Haut.

Ces quatre niveaux ont été développés et détaillés pour chacune des étapes du processus (Graeff, 2020a; Graeff et al., 2021).

Synthèse de la définition de l'axe horizontal et de l'axe vertical

Grâce à la définition de l'axe horizontal, proposant une estimation de la répartition temporelle des étapes, et la formalisation des niveaux d'abstraction, un nouveau cadre méthodologique a pu être proposé, nous l'illustrons dans la figure 41 ci-dessous.

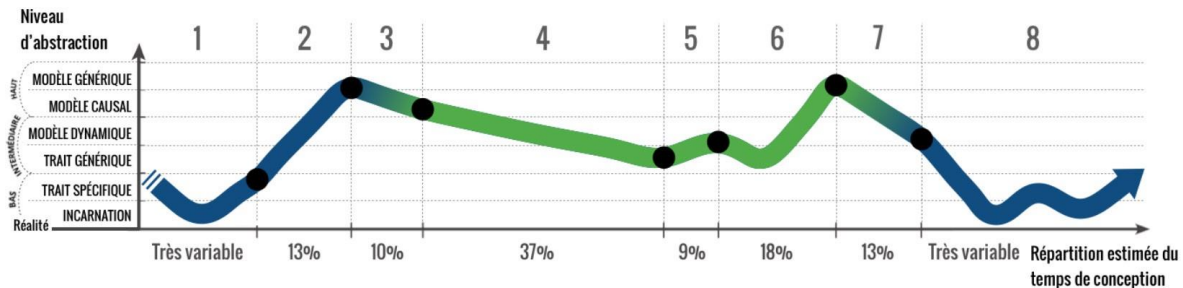


Figure 41. Axes du Processus Interdisciplinaire de Conception Biomimétique (TPIB)

La forme « infini » du processus biomimétique de référence a été déployée de manière à apporter visuellement aux praticiens les informations nécessaires quant aux temps à dédier à chaque étape et à l'évolution du niveau d'abstraction. Pour compléter ce cadre méthodologique, nous nous sommes penchés sur le développement sémantique des huit étapes du processus de conception biomimétique.

(2) Développement sémantique

Ici nous présentons étape par étape les modifications sémantiques apportées aux étapes du processus biomimétique problem-driven unifié. Ces étapes sont formalisées de manière à fournir des informations concernant les actions à mener et sont complétées par les données d'entrées et de sorties attendues afin de guider les praticiens.

- Étape 1 : Comme indiqué lors de la phase descriptive, cette première étape est commune aux étapes de conception classique. Les praticiens comprennent son intitulé et les actions à mettre en place afin d'aboutir à un « *problème analysé et reformulé* ». Nous modifions simplement la sémantique pour qu'elle corresponde au format établi pour l'ensemble des étapes, ce qui conduit au nom suivant : « *Analysez le problème* ».
- Étape 2 : L'abstraction englobe l'extraction, le raffinement, la structuration et la dynamisation de l'information qui caractérise le(s) problème(s) à traiter en modèles causaux que l'on considère dans un environnement conceptuel formant un modèle générique (Graeff, 2020a; Graeff et al., 2021). Par conséquent, la 2ème étape est renommée : « *Identifiez les problèmes techniques, leurs modélisations génériques, leurs causes et leurs effets* ». Cette deuxième étape a pour but de définir un « *modèle générique du problème technique* » initial.

- Étape 3 : Sur la base des résultats de la phase descriptive, l'étape 3 est redéfinie. Dans le contexte de la biomimétique, la transposition est un processus cognitif par lequel des modèles génériques conceptuels indépendants du champ scientifique peuvent être associés à des éléments des deux champs scientifiques, ici le champ biologique. En d'autres termes, la transposition est une projection dans un champ conceptuel, rendue possible par les modèles définis grâce à l'abstraction de l'étape 2. La troisième étape est alors renommée : « *Projetez les problèmes dans le champ de la biologie pour identifier des espaces de résolution* ». Les espaces de résolution peuvent être de deux type : les espaces environnementaux de résolution ou les espaces fonctionnels de résolution. Le but de cette troisième étape est de fournir un ensemble « *d'espace de résolution contenant les modèles biologiques d'intérêts* ».
- Étape 4 : Cette étape permet d'identifier des modèles biologiques pouvant apporter de potentielles solutions au(x) problème(s). Cette étape bien que majoritairement comprise et étudié dans la littérature est complexe et pose encore aujourd'hui un certain nombre de questions quant aux ressources à aller interroger. L'étape 4, tout comme la première, est renommée de façon à correspondre à la formalisation globale de l'ensemble des étapes : « *Recherchez et identifiez les modèles biologiques potentiels* ».
- Étape 5 : Cette étape est parfaitement comprise par les praticiens, néanmoins 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* ». Cette étape nous amène donc à fournir un ensemble de « *modèles biologiques sélectionnés* ».
- Étape 6 : Selon la même logique que la deuxième étape, l'étape 6 est renommée : « *Identifiez les éléments biologiques de résolution, leurs modélisations génériques, leurs causes et leurs effets* ». Ici le but est d'apporter des « *modèles génériques de solutions biologiques* » permettant de passer à la septième et avant dernière étape.
- Étape 7 : De manière similaire à l'étape 3, l'étape 7 est renommée « *Projetez les solutions en principes de conception et en solutions technologiques conceptuelles* ». Nous entendons par principe de conception, la projection de solutions abstraite vers la formalisation d'instructions conceptuelles. L'application, lors de séances de créativité, de ces principes de conception au problème traité permet de développer des solutions conceptuelles. Cette étape met en lumière le rôle important du raisonnement créatif pour effectuer ce passage entre principe de conception et solutions conceptuelles. L'objectif de cette étape est de définir des « *principes de conception et des concepts projetés* ».
- Étape 8 : Une fois les solutions conceptuelles générées, il est nécessaire que les praticiens les intègrent dans le contexte initial. Cette intégration se formalise le plus souvent par des phases de prototypage et des tests itératif afin de s'assurer de l'efficacité réelle des solutions choisies et parfois de choisir la solution la plus adéquat au projet. L'étape 8 est alors renommée : « *Appliquez les principes de conception et les solutions conceptuelles dans le contexte initial et les testez* ». Cette dernière étape permet alors de développer un ou plusieurs « *concept(s) et produit(s) optimisé(s)* » afin de passer aux étapes de formalisation finales et de mise sur le marché.

Ces nouvelles sémantiques sont alors ajoutées au cadre méthodologique (Figure 42).

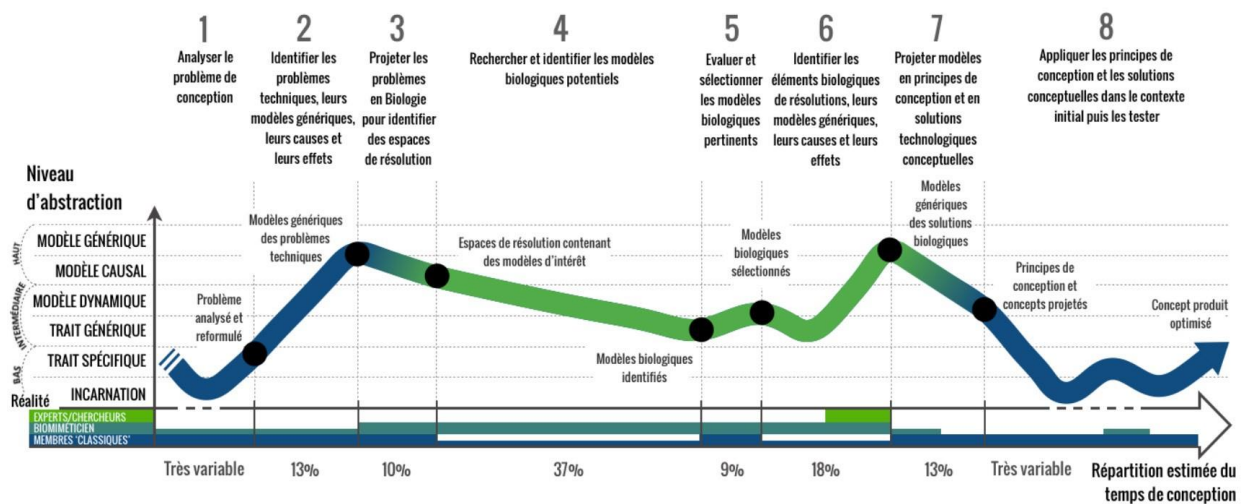


Figure 42. Formalisation des étapes du Processus Interdisciplinaire de Conception Biomimétique (TPIB)

Nous allons maintenant nous intéresser à la question soulevée du manque de recul identifié lors de l'AMDEC.

(3) Définition des boucles d'itération «Go/No go»

Avec le déploiement formel du processus biomimétique problem-driven unifié, nous proposons d'intégrer dans notre cadre méthodologique des boucles itérative « Go/No go » permettant notamment de limiter les risques durant le processus. En nous appuyant sur nos résultats trois « Go/No go » sont préconisés. Ces « points de validation intermédiaire » ont pour but d'accompagner les praticiens à limiter les risques lors de l'application du processus, soit en effectuant une boucle itérative si le résultat n'est pas satisfaisant, soit en stoppant le projet pour éviter ou limiter les pertes. Ces points de validation intermédiaire permettent également de regrouper l'ensemble des parties prenantes concernées lors de comités de pilotage, assurant alors une cohésion d'équipe ainsi que la prise en compte des avis et du travail de tous.

Nous avons pu, grâce à l'AMDEC appliquée au processus de conception biomimétique de référence, identifier quatre sous espaces clés :

- Espace 1 : Cet espace comprend les étapes 1,2 et 3 où 7 des 21 risques ont été identifiés.
- Espace 2 : Cet espace comprend les étapes 4 et 5 où 5 des 21 risques ont été identifiés.
- Espace 3 : Cet espace comprend seulement l'étape 6 où 4 des 21 risques ont été identifiés.
- Espace 4 : Cet espace comprend les deux dernières étapes la 7 et la 8 où 5 des 21 risques ont été identifiés.

C'est à la fin des trois premiers espaces que les « Go/No go » ont été positionnés. Le premier en fin de l'étape 3, le second à l'étape 5 et le troisième à l'étape 6. Le dernier espace, quant à lui propose aux praticiens, si les ressources sont disponibles, d'effectuer à la fin de l'étape 8 une boucle itérative « globale » pour préciser ou résoudre de nouveaux éléments émergents. Ces « Go/No go » incitent donc les praticiens à prendre un temps de recul, de validation des progrès du projet et de déterminer si les ressources disponibles sont suffisantes pour effectuer les étapes restantes, limitant ainsi les risques.

Bien que ces « Go/No go » implique un potentiel arrêt du projet à l'étape 3, 5 et 6, les efforts des praticiens ne sont pas perdus. En effet, chacun de ces points de contrôle proposent des résultats intermédiaires pouvant être utilisés pour d'autres études au cas où le projet serait amené à s'arrêter. Le but ici est de rendre le processus de conception biomimétique plus agile, moins risqué et donc plus attractif pour les entreprises. Cette prise en compte des risques au cours du processus permet de rassurer les praticiens et les investisseurs.

Formalisation finale du processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB)

L'ensemble des contributions prescriptives ((1) définition des axes structurant, (2) précisions sémantique, (3) définition des « Go/No go ») sont alors synthétisé dans un seul et même processus : *le processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB)*.

Nous proposons ici une adaptation et une évolution du processus biomimétique problem-driven unifié ayant pour objectif de fournir une meilleure gestion des risques, facilitant ainsi l'appropriation de la démarche par les praticiens. Pour des raisons de lisibilité une version synthétique est présentée en figure 43.

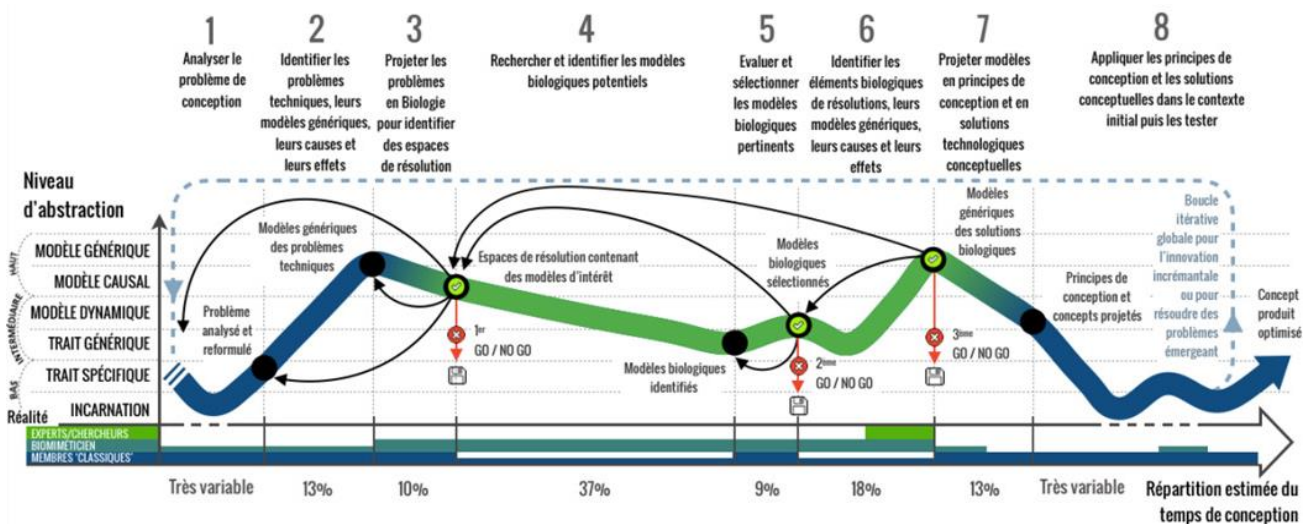


Figure 43. Le processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB)

Pour finir cette expérimentation, une comparaison et une évaluation de ce nouveau processus a été faite et est présentée dans la partie suivante.

Résultats de la « Phase d'évaluation »

Cette phase d'évaluation avait pour objectif de récolter les avis de professionnels quant au processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB). Pour ce faire, nous avons demandé aux répondants d'analyser et comparer le processus TPIB, le processus biomimétique problem-driven unifié (processus unifié) et celui développé dans les norme ISO TC/266 (processus ISO).

Les évaluations ont porté dans un premier temps sur la (1) formalisation visuelle générale des processus, dans un second temps sur la (2) formalisation sémantique, dans un troisième temps sur la (3) gestion des risques et enfin les professionnels ont été invité à (4) choisir le processus le plus pertinent à intégrer dans leurs pratiques de conception et d'innovation.

Ces évaluations nous ont permis de valider nos premiers apports et d'identifier de nouveaux leviers potentiels d'amélioration du processus de conception biomimétique.

Comme indiqué en début des résultats de la phase prescriptive, la nouvelle formalisation sémantique des étapes présentée plus tôt, n'est pas celle qui a été évaluée par les professionnels. En effet, les professionnels ont évalué la sémantique issue de la phase prescriptive initial, ce sont leurs retours qui nous ont permis de définir, en phase prescriptive finale, l'intitulé des étapes présentées ci-dessus. L'évolution des sémantiques est précisée et détaillée dans les résultats présentés ci-dessous.

(1) Évaluation de la formalisation visuelle générale

L'aspect visuel général d'un processus est un facteur impactant pour son acceptabilité et son appropriation par les praticiens, il est donc important d'évaluer ce paramètre. Les répondants ont évalué les trois processus 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 12)

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.

Tableau 12. Comparaison des trois processus sur leur aspect visuel (n=32)

Là où le processus TPIB semble mieux noté que le processus de l'ISO, le processus unifié est considéré comme le plus esthétique par les professionnels interrogés. Même si ces résultats n'apparaissent pas strictement significatifs, les résultats montrent une tendance claire qui devra être prise en compte pour d'autres optimisations graphiques.

Les professionnels ont été ensuite interrogés sur les axes horizontaux et verticaux ajoutés des processus (Tableau 13).

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.

Tableau 13. Comparaison de la perception de la logique des axes (n=32)

Sur la base des résultats, les axes vertical et horizontal du processus TPIB ont reçu le taux le plus élevé de réponses positives sur leur logique. La combinaison de ces résultats confirme l'idée que la restructuration des axes est un levier pertinent pour améliorer la lisibilité et la compréhension du processus. Nous avons également évalué la sémantique des axes, mais les résultats n'ont pas montré de différences significatives et soulignent donc une voie d'amélioration.

(2) Évaluation de la formalisation sémantique

Nous avons noté que la nouvelle sémantique proposée pour les étapes du processus a été moins comprises que sur le processus unifié (nombre moyen d'étapes mal comprises ; P1 vs P3 ; - 0,71 vs - 1,4 ; p-value (t-test) = 0,02).

La sémantique, présentée plus tôt dans les résultats de la phase prescriptive, prend 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 14).

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	Incarnes 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.

Tableau 14. Évolution des sémantiques des étapes à la suite de la phase d'évaluation

(3) Évaluation de la gestion du risque

Les professionnels ont ensuite évalué la perception des risques et les orientations apportées par les boucles itératives « Go/No Go », nouvellement intégrées (Tableau 15).

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.

Tableau 15. Comparaison de la capacité du processus à détecter les risques et à corriger les erreurs

Les différentes boucles itératives intégrées au processus TPIB ont été reconnues comme des leviers permettant de mieux gérer les risques. Ces résultats permettent donc d'apporter un premier élément de validation sur nos contributions.

(4) Choix final

Enfin, il a été demandé aux répondants de choisir le processus qu'ils préféreraient utiliser dans le cas d'un projet pratique (Tableau 16).

Les résultats obtenus montrent que le processus unifié et le processus TPIB sont significativement plus sélectionnés que le processus issu de la norme ISO. Nous notons que le processus TPIB est le processus le plus choisi malgré des résultats non significatifs.

Les répondants ont justifié leur choix en soulignant 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 unifié est considéré comme « plus facile à appréhender », « plus intuitif », « clair et simple », « représentant la pensée circulaire requise en biomimétique » tandis que le processus TPIB est perçu comme « plus précis et détaillé », « plus complet », « moins risqué », « intégrant l'aspect planification et gestion de projet ».

Processus	Quel processus choisiriez-vous ? (Échantillon total, n = 27)	Quel processus choisiriez-vous ? (Échantillon ayant déjà utilisé P1 ou P2, n = 10)
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.

Tableau 16. Comparaison de l'acceptabilité finale des processus

Il est intéressant de noter que si nous nous intéressons au choix des répondants ayant déjà utilisé le processus unifié ou le processus issu de la norme ISO, la proportion de professionnels choisissant le processus TPIB augmente. Ainsi, les professionnels du panel ayant déjà fait face aux difficultés décrites dans la phase descriptive ont plus tendance à choisir le processus TPIB.

Les apports prescriptifs proposés dans le cadre du processus TPIB ont donc tendance à être accueillies de manière positive par les professionnels.

Ces évaluations, bien que limité en nombre de répondants, nous ont permis de valider en partie un ensemble d'apports prescriptifs (Axes et Go/No Go) et nous ont permis de proposer des leviers d'amélioration, notamment sur la formalisation sémantique des étapes. Ces résultats ont ainsi permis la formalisation d'une seconde version du processus TPIB présentée plus tôt lors des phases prescriptives pour des raisons de facilité de lecture.

3.3.1.4 Discussion, limites et ouverture

Dans la littérature scientifique (§2.2) les recherches concernant l'évolution du cadre méthodologique en conception biomimétique ont pour objectif de guider les équipes dans leurs pratiques. Ces avancées sont développées afin d'augmenter l'efficacité des équipes, de diminuer les risques et d'augmenter la diffusion de la conception biomimétique. Actuellement, bien que la conception biomimétique soit perçue comme une nouvelle démarche d'innovation prometteuse, les entreprises semblent encore frileuses à intégrer cette approche notamment pour les risques qui lui sont associés, notamment dû au manque de formation disponible et au manque d'expertises, d'expériences et compétences dédiées. Ainsi, afin de pousser les entreprises et industries à intégrer la conception biomimétique, il est important de justifier et de garantir l'efficacité de ce processus. Cette dualité entre opportunités et risques amène à une situation paradoxale, les entreprises voulant atteindre une efficacité et une systématisation de l'approche doivent investir dans des projets vus comme risqués tant du point de vue de l'investissement temps que de l'investissement financier et humain. Ce constat conduit alors à un accroissement du fossé entre le développement théorique en conception biomimétique et le déploiement dans les pratiques de conception et d'innovation comme identifié lors de notre état de l'art. C'est dans ce cadre que nous avons décidé de mener cette troisième expérimentation.

Cette dernière s'est alors intéressée à l'identification des risques perçus et réels liés au processus de conception biomimétique problem-driven unifié et à la proposition de divers leviers d'amélioration. Ainsi grâce aux différentes phases de recherche de la méthodologie DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009) nous avons pu proposer un développement du processus de référence que nous avons appelé *processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB)*. Ce processus propose d'une part, la prise en compte des risques et des leviers d'amélioration identifiés lors de nos recherches et d'autre part, propose un cadre méthodologique adapté à la pratique qui nous semble propice à l'intégration de nouveaux profils tels que le Biomiméticien et le designer.

Toutefois, cette étude présente plusieurs limites que nous souhaitons discuter dans cette section afin de permettre aux lecteurs de bien comprendre nos contributions.

Tout d'abord lors de la phase descriptive nous avons (1) interrogé un faible nombre de professionnels, quatre biologistes et cinq designers. Il serait intéressant de récolter les ressentis de nouveaux professionnels issus de disciplines différentes connaissant ou non la conception biomimétique au préalable, afin d'avoir une vue la plus exhaustive possible. Puis (2) nous nous sommes concentrés sur les 8 étapes du processus de conception biomimétique problem-driven qui ne représente pas la phase d'industrialisation. Ainsi, il nous semble important, au vu de l'évolution d'intérêt pour la conception biomimétique, de poursuivre nos recherches sur cette phase fondamentale de l'industrialisation et de la mise sur le marché. Enfin, (3) afin d'estimer la durée des étapes du processus de référence nous avons analysé 15 projets accompagnés par Ceebios qui par conséquent ont suivi la même approche de travail. C'est pour cela que nous avons précisé dans la section résultats que ce nouvel axe temporel n'est pas figé mais amené à évoluer et être complété par de futures recherches. Nous restons convaincus que le fait de poser cet axe permet d'aider les praticiens à cadrer leurs projets afin de convaincre les décideurs d'investir dans l'approche biomimétique. De plus, l'adaptabilité de cet axe qui propose des estimations de temps en pourcentage permettra aux équipes de conception d'optimiser cette répartition du temps en fonction de leurs pratiques et contraintes internes.

Puis dans la phase prescriptive nous nous sommes intéressés particulièrement à la redéfinition sémantique des étapes qui composent le processus. Notre objectif était de fournir aux praticiens des informations précises quant aux actions à mener tout au long du processus. Comme nous l'avons mentionné, notre première formulation sémantique ne fût pas concluante étant considérée par les évaluateurs comme étant trop académique et restrictive. La nouvelle version, qui prend en compte les remarques de la phase d'évaluation c'est focalisé sur l'explication la plus claire possible des termes complexes d'« abstraction » et de « transposition ». Il sera intéressant de soumettre cette nouvelle sémantique à une nouvelle évaluation dans les recherches à venir.

Pour finir sur les limites de cette recherche, nous sommes conscients que ce processus développé devra être testé et évalué dans le cadre de projets pratiques afin de justifier de ces apports pour le déploiement de la conception biomimétique. Pour ce faire, nous avons noté que pour effectuer ces tests de manière efficiente il sera important de travailler l'ergonomie et l'esthétique visuelle du processus interdisciplinaire de conception biomimétique comme soulevé lors de la phase d'évaluation.

Nous pouvons alors conclure que cette recherche ouvre un nouveau champ d'étude quant à l'adaptation du cadre méthodologique théorique aux pratiques de conception et d'innovation relatif à notre problématique de recherche initiale : « *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* ».

Au vues des limites énoncées plus tôt nous pouvons dire que notre hypothèse 3 qui suppose qu'« *Adapter le cadre théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception permet de favoriser son déploiement dans un cadre industriel* » n'est pas encore validée. Cependant nos résultats représentent une base pour les futures recherches qui traiterons cette hypothèse.

3.3.2 Expérimentation 4 : Développement d'un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique

Cette expérimentation a été menée en collaboration avec Anne-Sophie RÖSSLER qui a soutenu ces travaux lors de son Master 2 en Management de l'Innovation et de la Conception Innovante (MICI) au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) en octobre 2019. Le taux d'implication a été le même pour l'ensemble des auteurs. Les travaux présentés ci-dessous ont été réalisés lors de séance de travail commune avec les auteurs.

Cette quatrième expérimentation est le résultat de la convergence de constats issues de la littérature scientifique et d'observations pratiques issues de notre activité professionnelle à Ceebios et relevé également lors de notre expérimentation 2 (§3.2.2).

D'une part, dans le cadre de notre état de l'art il a été identifié que la théorie C-K proposent un cadre théorique permettant de modéliser, structurer et étudier les connaissances mobilisées et les concepts générés lors des projets de conception et que le Design Thinking représente un modèle d'intérêt à mobiliser pour développer une agilité cognitive qui permet la structuration des connaissances. Ce constat nous a amené à proposer une hypothèse de recherche qui suppose que « *Mobiliser la théorie C-K et le Design Thinking comme cadre de pilotage des projets en conception biomimétique facilite la mobilisation, la modélisation et la structuration des connaissances et permet de sélectionner les parties prenantes d'intérêts tout au long du projet* » (Hypothèse 4). Cette hypothèse est relative à notre question de recherche initial : « *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* ».

D'autre part, sur la base de notre activité professionnelle à Ceebios et sur les observations menées lors de l'expérimentation 2, nous avons identifié que le choix des parties prenantes, lors d'un projet en conception biomimétique, était aujourd'hui fait de manière empirique et qu'aucune indication, quant à ce choix, n'est détaillée dans la littérature scientifique. De plus, nous avons relevé que l'intégration de profils formés au Design permet notamment d'identifier des poches de connaissances manquantes et favorise le transfert de connaissances entre différents domaines.

Ainsi, sur la base de ces constats, de ces observations et de l'opportunité qu'il nous a été donné de collaborer avec Anne-Sophie Rössler dans le cadre de son Master 2, nous avons fait le choix de tester l'hypothèse 4 mentionnée ci-dessus.

Nous avons ainsi réalisé cette quatrième expérimentation en trois temps :

- Dans un premier temps, nous avons proposé un modèle prescriptif de pilotage du processus biomimétique problem-driven unifié ayant pour but de faciliter le choix des parties prenantes tout au long du processus.
- Dans un second temps, nous avons testé ce modèle en l'appliquant rétrospectivement à un projet de conception biomimétique.
- Enfin nous nous sommes entretenus avec l'un des concepteurs du projet analysé afin d'avoir son ressenti par rapport à notre modèle prescriptif.

3.3.2.1 Objectifs

Nous avons soulevé lors de notre état de l'art que de récentes recherches s'intéressent à l'étude des profils, tels que les biologistes, comme axe de recherche pour limiter les freins liés à l'interdisciplinarité en conception biomimétique (§2.2.4). Dans ce contexte, nous nous sommes alors intéressés aux profils formés en Design, ici les designers, et leurs apports pour la conception biomimétique, lors de nos expérimentations détaillées dans la première partie de ce Chapitre. Malgré ces avancés scientifiques, aucune étude ne précise :

- Comment choisir les parties prenantes nécessaires ?
- A quelles étapes du processus de conception biomimétique ?

Ces questions sont récurrentes lors des projets accompagnés par Ceebios. En effet, en début des projets en conception biomimétique, les entreprises s'interrogent quant aux profils internes et externes à mobiliser afin d'évaluer les coûts financiers et humains.

Sur la base de ces constats, l'objectif de cette première expérimentation collaborative était d'identifier et de proposer des recommandations méthodologiques permettant de faciliter le choix des parties prenantes tout au long d'un projet en conception biomimétique.

3.3.2.2 Matériels & méthodes

Retours d'expérience

Lors de notre seconde expérimentation (§3.2.2) nous avons observé que les designers, se sont appuyé, de manière empirique, sur les connaissances apportées par les parties prenantes et sur les connaissances manquantes identifiés pour d'une part, sélectionner les profils des personnes à interroger lors des étapes de collecte des connaissances et d'autre part, pour proposer de nouvelles parties prenantes potentielles lors des changements de phase. Sur la base de cette observation nous avons formalisé une première proposition méthodologiques prescriptive qui s'appuie sur notre hypothèse 4 : *La mobilisation du cadre de la théorie C-K pour piloter le processus de conception biomimétique permet de faciliter le choix des parties prenantes impliquées tout au long du processus biomimétique problem-driven unifié.*

Nous illustrons cette proposition dans la Figure 44.

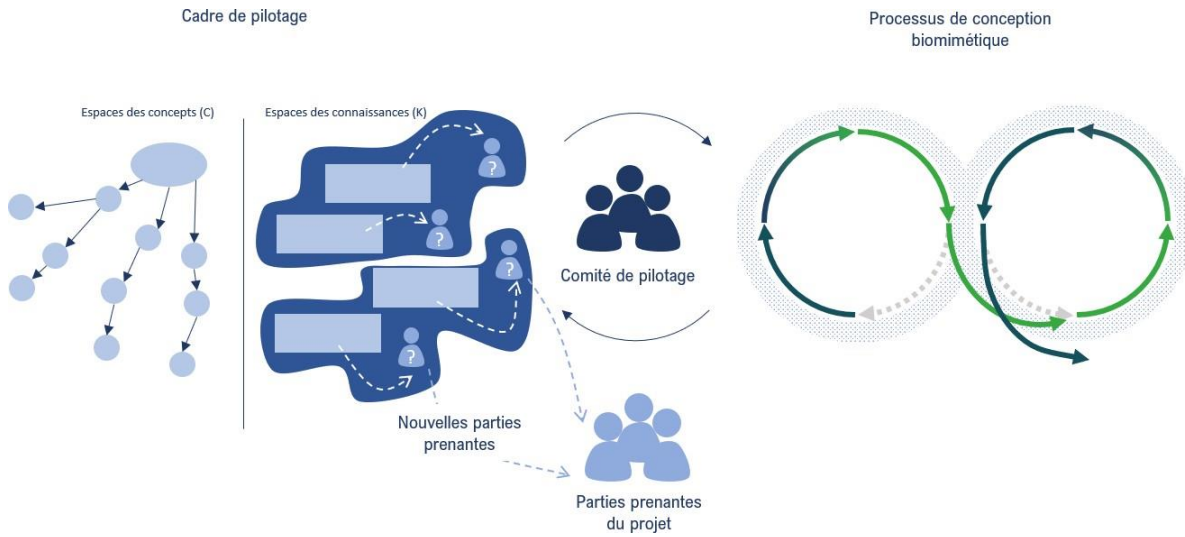


Figure 44. Proposition méthodologique prescriptive 1

De plus, les résultats de notre seconde expérimentation nous ont permis de relever que l'intégration de profils formés au Design favorise notamment le transfert de connaissances et ce grâce à cinq actions : (1) la collecte de connaissances, (2) le partage de connaissances, (3) l'hybridation de connaissances, (4) la formalisation de l'hybridation et (5) l'idéation. Sur la base de ces résultats nous faisons une seconde proposition méthodologique prescriptive (Figure 45) : *L'intégration d'actions issues du Design lors du processus biomimétique problem-driven unifié permet de faciliter l'identification de connaissances manquantes, le partage des connaissances, l'hybridation des connaissances et leurs formalisations afin de faciliter le choix des parties prenantes.*

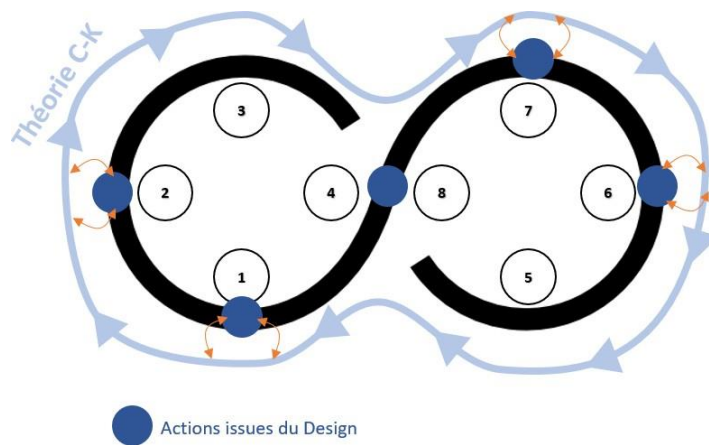


Figure 45. Proposition méthodologique prescriptive 2

Dans le cadre de notre modèle théorique prescriptif présenté ci-dessous, nous avons choisi de faire appel au modèle du Design Thinking pour incarner notre seconde proposition méthodologique prescriptive. En effet, ce modèle nous intéresse car il se base sur les modes de pensée et de travail des designers (§2.3.2.2). Cependant, le Design Thinking est aujourd'hui controversé, nous avons donc fait le choix de n'utiliser que certains éléments de ce modèle qui correspondent aux résultats de notre seconde expérimentation (§3.2.2).

Modèle théorique prescriptif

Pour construire notre modèle prescriptif nous nous sommes appuyés sur des outils connus qui permettent l'expansion des connaissances, identifiées lors de notre état de l'art : la théorie C-K pour notre proposition méthodologique prescriptive 1 et le Design Thinking pour notre proposition méthodologique prescriptive 2.

Que ce soit pour la mobilisation de la théorie C-K et celle du Design Thinking nous avons fait le choix d'utiliser les éléments qui nous semblaient les plus pertinents pour enrichir notre modèle afin de ne pas le complexifier.

Pour ce modèle théorique prescriptif nous posons que : *Un Donneur d'Ordre (D.O) rencontre son interlocuteur principal que nous appellerons le Receveur d'Ordre (R.O).*

Etape 1 – Analyse du problème

Sous-étape A : Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet

Le D.O présente au R.O la thématique de recherche souhaitée ou sa problématique avec un cahier des charges comprenant un certain nombre de paramètres et/ou fonctions clés qui correspond au Concept de départ (C0). Le D.O apporte alors à ce moment-là toutes les connaissances de bases (K0) et les connaissances dérivées et récoltées en lien avec le problème initial (K1'). Nous pouvons donc modéliser cela avec du côté gauche le concept initial (C0) dans l'espace des Concepts (C), et les connaissances (K1 et K1') à droite l'espace des connaissances (K) (Figure 46).

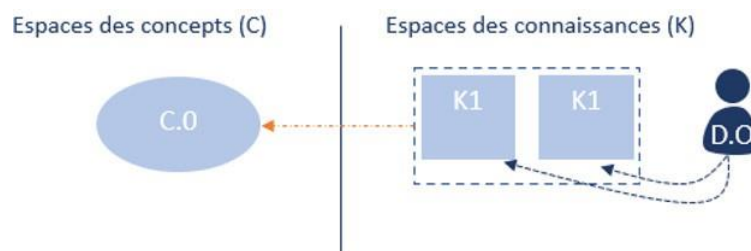


Figure 46. Modèle théorique prescriptif, étape 1, sous-étape A.

Sous-étape B : Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet

Le R.O. mène en interne une phase d'exploration de type C-K afin d'apporter de nouvelles poches de connaissances pertinentes supplémentaires que l'on nommera K2 à Kn. En s'appuyant sur ces nouvelles poches de connaissance le R.O. pourra alors extraire de la modélisation C-K les parties prenantes (PP1 à PPn) à intégrer correspondant aux différents champs de ces connaissances les plus pertinentes pour le problème. Cela impliquera une première évolution des concepts dans l'espace des concepts (C) (Figure 47).

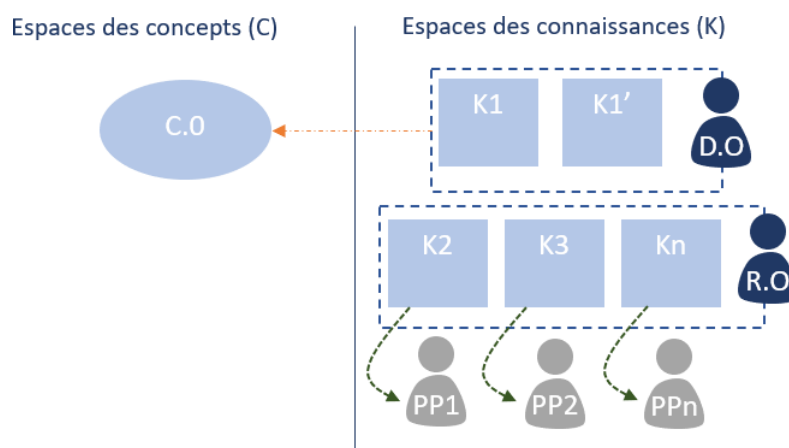


Figure 47. Modèle théorique prescriptif, étape 1, sous-étape B.

Sous-étape C : Intégration du Design Thinking

On intègre à cette étape du processus, l'étape « Emphasize » de la phase « Explore » du Design Thinking. C'est-à-dire que l'on propose comme recommandation méthodologique d'interviewer les parties prenantes identifiées qu'elles soient internes ou externes à l'entité du D.O. (PP1 - PPn). Le mode d'interviews sera alors adaptable, elles pourront se faire par l'intermédiaire d'un questionnaire, en face à face, par téléphone, par mail, en ligne et s'adresse en priorité aux équipes interne concernées par le problème ou la thématique initiale pour mieux comprendre les points de vue, expériences et l'environnement étudié et impliqué. Puis suivront les interviews des usagers et des parties prenantes externes au D.O. L'objectif ici est d'avoir une cartographie mentale systémique du problème ou de la thématique initiale.

Sous-étape D : Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet

Au terme de ces interviews de nouvelles poches de connaissances ont été identifiées et viendront enrichir la modélisation afin de continuer l'expansion des colonnes (C) et (K). Cette nouvelle expansion permettra soit la validation des parties prenantes identifiées soit la sélection de nouvelles parties prenantes manquantes à intégrer (Figure 48).

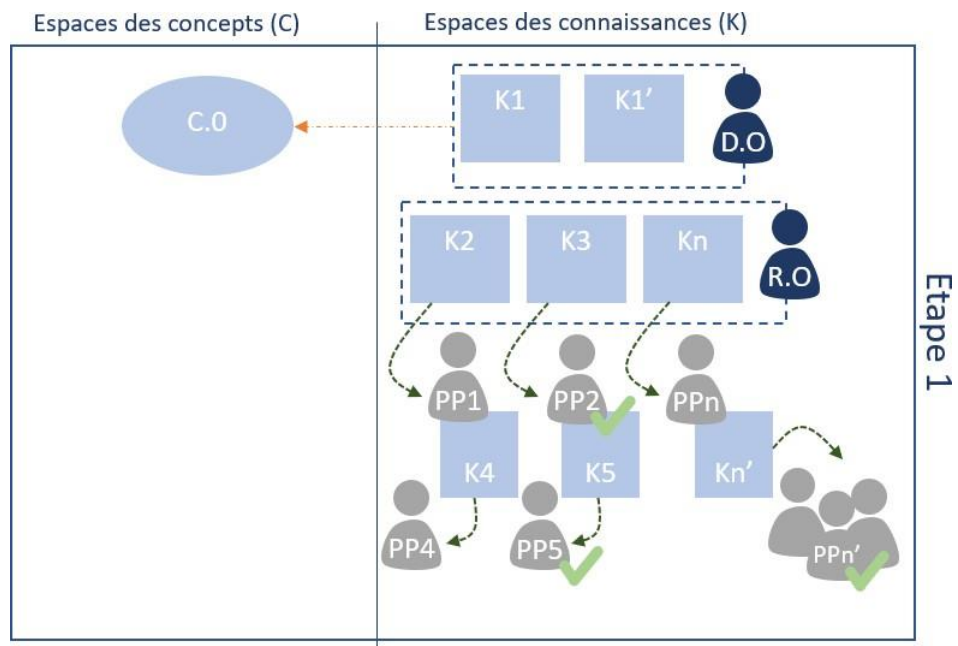


Figure 48. Modèle théorique prescriptif, étape 1

Sous-étape E : Intégration du Design Thinking

A cette étape du projet, toutes les parties prenantes sélectionnées au cours des sous-étapes 2 et 4, le D.O et R.O se réunissent pour redéfinir le problème initial et le valider. Cette étape serait comparable à la phase « Define » du Design Thinking.

Etape 2 : Abstraction du problème technique (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet)

Lors de cette seconde étape seront présent le D.O et le R.O et l'ensemble des parties prenantes sélectionnées à la suite de la sous-étape E.

Pour faciliter la démarche d'abstraction du problème technique on peut faire intervenir des connaissances compatibles ou incompatibles venant principalement des parties prenantes identifiées lors de l'étape 1 (Brun, 2017; Vourc'h et al., 2018). Les connaissances incompatibles peuvent restructurer l'espace K et sont alors génératrices de concepts en expansion, tandis que les connaissances compatibles ne changent pas la structure de l'espace K et sont génératrices de concepts restrictifs.

Les nouvelles poches de connaissances qui vont en découler, liées le plus souvent à la biologie dans le cadre de la biomimétique, permettront de cibler les nouvelles parties prenantes dans le vaste domaine de la biologie et de cibler les experts des domaines d'intérêt pour poursuivre le processus.

Pour illustrer nos propos nous prenons comme exemple une modélisation CK issue des travaux de Vourc'h et al. (Vourc'h et al., 2018) (Figure 49).

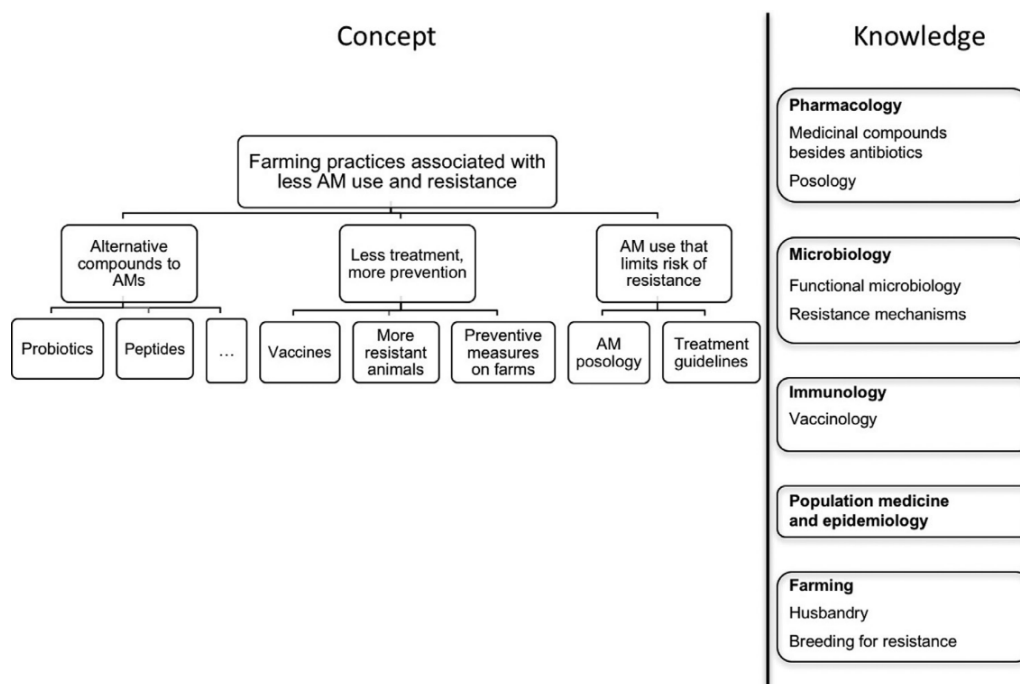


Figure 49. Modélisation C-K issues des travaux de (Vourc'h et al., 2018)

Sur la base de cette modélisation, nous pouvons alors extraire, des poches des connaissances de l'espace K, de nouvelles parties prenantes potentielles, ici un pharmacologue, un microbiologiste, un immunologiste, un expert en épidémiologie et médecine des populations. Parmi ces profils les parties prenantes d'intérêts seront sélectionnés et deviendront les interlocuteurs principaux des étapes 3 et 4 du processus biomimétique. Ils seront considérés comme les experts qui pourront fournir les connaissances biologiques pertinente pour le problème ou la thématique à traité.

Etape 3 : Transposition à la biologie (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet)

Etape 4 : Identification des modèles biologiques potentiels (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet)

Dans les étapes 3 et 4, la modélisation C-K du projet est utilisée comme cadre de suivi où les nouvelles connaissances biologiques apportées par les experts sont ajoutées. Lors de ces étapes, aucune nouvelle partie prenante n'est identifiée.

Etape 5 : Sélection des modèles biologiques d'intérêt (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet)

Lors de cette cinquième étape la sélection de nouvelles parties prenantes n'est pas systématique. Ici seule de nouveaux experts peuvent être identifiés s'il manque des informations précises pour un modèle biologique précis. Le ou les experts sont sélectionnés à partir des connaissances acquises lors de l'étape 4.

Etape 6 : Abstraction des stratégies biologiques (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet)

A l'instar de l'étape 2, l'action d'abstraction se fait ici avec l'ensemble des parties prenante permettant ainsi aux experts biologistes de fournir les informations nécessaires concernant le(s) modèle(s) biologique(s) d'intérêt afin de les abstraire vers des concepts inspirés de ces modèles. C'est ici que nous intégrons 3 des 5 actions du transfert de connaissance définies à l'issu de notre expérimentation 2 (§3.2.2) (Figure 38) : *le partage de connaissances et l'hybridation des connaissances*. Nous rappelons que les profils formés au Design favorisent l'hybridation des connaissances. Nous conseillons fortement d'avoir un ou plusieurs designers dans les parties prenantes notamment à cette étape et lors des étapes à venir.

L'action 3 correspond à la transition entre l'étape 6 et l'étape 7. A ce stade, nous observons une nouvelle expansion de connaissances spécialisées. Ces connaissances seront la base pour la génération de concepts biomimétiques.

Etape 7 : Transposition de la technologie (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet)

Cette étape consiste en la transposition des principes sous-jacents abstraits au(x) modèle(s) biologique(s) vers des principes dits « technologiques ».

Lors de cette étape l'action d'hybridation des connaissances est toujours en cours. Nous intégrons également lors de cette étape deux autres actions définit lors de notre seconde expérimentation (§3.2.2) : La formalisation de l'hybridation des connaissances et la génération de concepts biomimétiques (Figure 38).

Nous proposons ici une réunion entre le R.O et le D.O afin de lister et répondre aux questions à se poser dans le cadre d'une projection de mise sur le marché. Les poches de connaissances qui en ressortiront rappellent qu'il faut avoir pris où prendre en compte les politiques environnementales, les normes, brevets, organismes clés de transferts de technologie (SATT, ...), les matériaux (durables), ... indiquant ainsi les parties prenantes importantes à prendre en compte. La notion de durabilité doit bien évidemment être au centre de cette étape. Ces connaissances permettront l'émergence de contraintes à prendre en compte pour l'étape 8 dudit processus.

Etape 8 : Implémentation et test dans le contexte initial (Intégration de la théorie C-K comme pilotage de projet et intégration du Design Thinking)

« *Le cycle peut être achevé avec succès sous la forme d'un résultat de conception biomimétique. Si le résultat ne correspond pas aux attentes de conception, le processus peut soit être réinitié intégralement ou proposer une itération de la seconde phase en sélectionnant un ou plusieurs nouveaux modèles d'intérêts.* » (Fayemi, 2016).

Cette ultime étape s'apparente à la phase de prototypage et test en Design Thinking, où l'on transforme les idées en « actions » (Gurusamy et al., 2016), l'objectif est de formaliser les idées en formes physiques qui serviront d'interfaces de travail avec les futurs usagers.

Afin de vérifier notre modèle théorique prescriptif, l'étape suivante consiste à le tester, au travers d'une étude rétroactive d'un cas de conception biomimétique réel, afin de définir les apports de ce nouveau modèle.

Protocole d'analyse suivi

Afin de tester notre modèle théorique prescriptif, nous avons fait le choix de faire une étude de cas. Nous nous sommes intéressés au projet « *Nautille* », une bouilloire innovante dont la conception a été inspirée par le vivant, pour réduire son impact environnemental de Michka Melo, bioingénieur et du designer Guillian Graves.

L'objectif de ce projet était de (re)concevoir un objet du quotidien de manière durable grâce à la conception biomimétique sur tout ou partie du cycle de vie de leur produit (Guillian Graves et Michka Mélo, 2014). Pour ce faire ils ont décidé de tester l'approche de la biomimétique pour repenser l'objet « *Bouilloire* ».

Ce projet représente un cas d'étude intéressant car, d'une part, l'ensemble du processus et des actions suivis ont été décrit par les concepteurs dans un carnet de recherche nommé « *Versus* » (Guillian Graves et Michka Mélo, 2014), ce qui nous a permis d'avoir accès à un grand nombre d'information. Cet essai relate également les écueils d'une collaboration pluridisciplinaire avec ses divergences méthodologiques, de syntaxe, d'outils, ou encore d'objectifs. D'autre part, il a été possible d'échanger avec l'un des concepteurs, Guillian Graves, afin d'avoir ses retours quant au modèle prescriptif proposé appliqué à son projet.

Notre étude de cas a été réalisée en trois étapes : (1) Collecte de connaissances, (2) Modélisation du raisonnement de conception et (3) Evaluation.

Pour la première étape nous nous sommes appuyés sur le carnet de recherche « *Versus* » (Guillian Graves et Michka Mélo, 2014). A partir de ce dernier nous avons extrait un certain nombre d'informations qui nous ont permis d'identifier les poches de connaissances mobilisées durant ce projet. Puis nous avons complété ces connaissances lors d'un premier entretien avec Guillian Graves.

Lors de la seconde étape nous avons modélisé rétroactivement le raisonnement de conception grâce à notre modèle prescriptif et en nous appuyant sur les poches de connaissances identifiées et les informations concernant le développement des concepts de ce projet.

Enfin, nous avons terminé en présentant cette modélisation à Guillian Graves afin de l'interroger quant au potentiel de notre modèle prescriptif. L'objectif de cette dernière étape était de comprendre si le projet « *Nautille* » aurait pu être optimisé par le choix de parties prenantes d'intérêt si les concepteurs avaient utilisé le modèle prescriptif proposé.

3.3.2.3 Résultats

Etape 1 : Collecte des connaissances

Grâce au carnet de recherche « *Versus* » (Guillien Graves et Michka Mélo, 2014), nous avons extrait page par page un certain nombre de poches de connaissances. Nous en présentons un échantillon ci-dessous dans l'ordre de découverte, puis, à partir de ces poches de connaissances nous avons proposé des parties prenantes potentielles d'intérêt pour le projet (Tableau 17)¹⁹.

Poches de connaissances	Parties prenantes potentielles
Réseau trophique, ensemble de chaînes alimentaires, relations alimentaires entre organismes	Chercheur en écologie
Objet(s) qui se nourrit des sources locales d'énergie (exemple : chaleur émise par un radiateur), interactions entre des objets de l'habitat : transmissions de flux (matière, énergie)	Spécialiste des flux dans l'habitat
Matériaux biosourcés - ressources locales	Ingénieur en matériaux biosourcés Organisme/spécialiste des matériaux locaux
Objets générateurs d'énergie	Spécialiste des énergies (ex : EDF, GDF, RTE...)
Analyse du cycle de vie ; décomposition des objets pour revenir à son origine	Biologiste Spécialiste de l'ACV Eco-concepteur/trice
Bio-utilisation, question d'éthique rattaché à la bio-utilisation, vie artificielle, statut moral des êtres vivants	Expert, chercheur en Éthique
Multiplication cellulaire, mutation, mort cellulaire	Spécialiste de biologie cellulaire
Usage des objets, dissection des usages, usage à l'échelle du temps	Psychologue Anthropologue Design UX
L'approche Cradle to cradle	Spécialistes de l'approche Cradle to cradle (ex : l'architecte William Mc Donough et le chimiste Michael Braungart)

Tableau 17. Poches de connaissances issues de la bouilloire « Nautile »

Etape 2 : Modélisation du raisonnement de conception

Afin de tester notre modèle prescriptif qui suppose que (1) *La mobilisation du cadre de la théorie C-K pour piloter le processus de conception biomimétique permet de faciliter le choix des parties prenantes impliquées tout au long du processus biomimétique problem-driven unifié* et que (2) *L'intégration d'actions issues du Design lors du processus biomimétique problem-driven unifié permet de faciliter l'identification de connaissances manquantes, le partage des connaissances, l'hybridation des connaissances et leurs formalisations afin de faciliter le choix des parties prenantes*, nous avons modélisé rétroactivement, grâce à notre modèle prescriptif, le raisonnement de conception du projet « Nautile » (Figure 50).

Pour des raisons de lisibilité, nous avons noté dans l'espace des connaissances (K), les poches de connaissances les plus impactantes dans le déploiement des concepts et dans l'espace des concepts (C) nous n'avons détailler que les concepts qui ont amené au développement de la bouilloire « Nautile ».

¹⁹Le tableau 17 est présenté dans son ensemble en Annexe 4

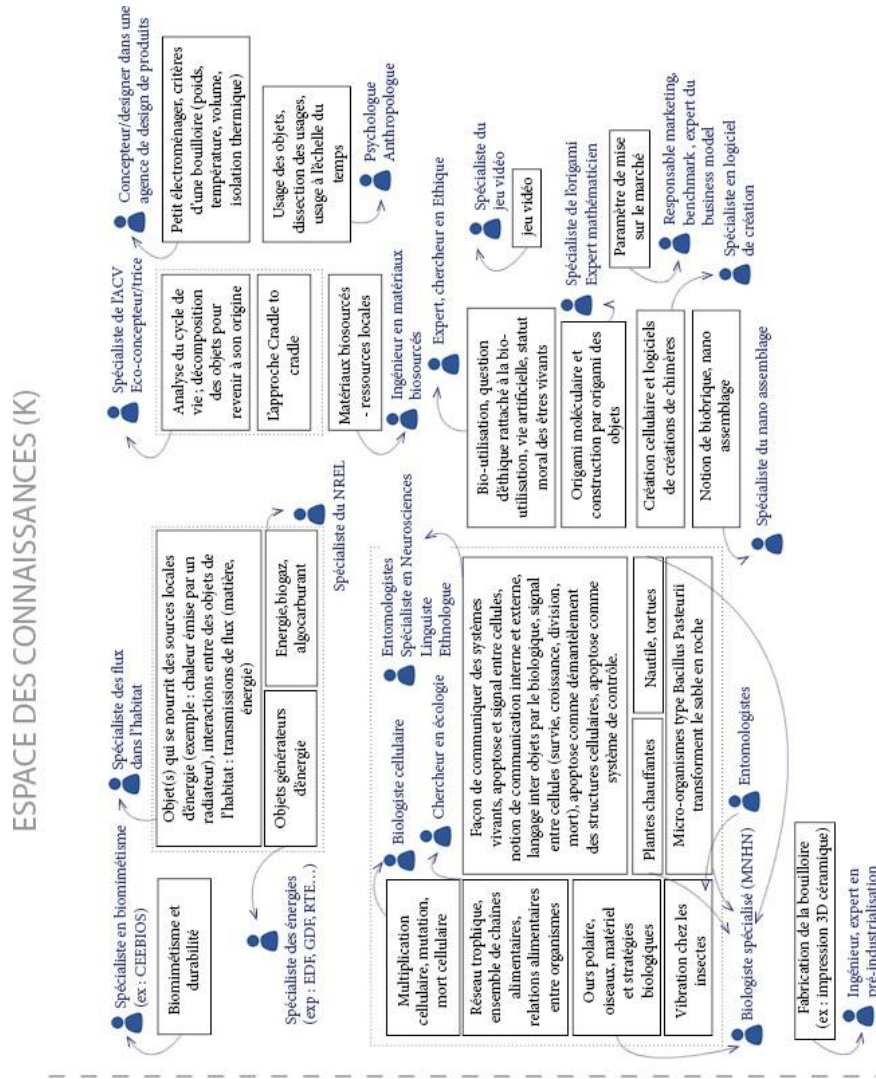
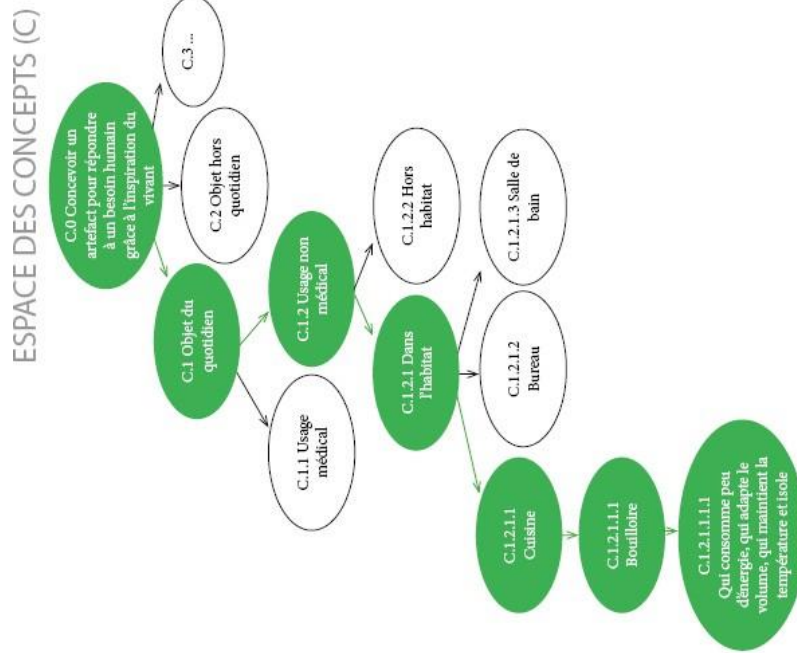


Figure 50. Modélisation du raisonnement de conception de la bouilloire « Nautile »

Ainsi, grâce à cette modélisation et sur la base de notre modèle prescriptif nous avons pu proposer des parties prenantes potentielles. L'intérêt ici est de rendre le processus biomimétique agile du point de vue organisationnel en proposant d'identifier les parties prenantes pertinentes en fonction des étapes du processus, c'est-à-dire que toutes n'ont pas forcément besoin d'être présentes à toutes les étapes. Le choix des parties prenantes sera contraint par le temps et les moyens disponibles pour le projet.

Le cahier de recherche des deux concepteurs permet d'extraire de nombreuses parties prenantes, cependant nous supposons que de nouvelles parties prenantes aurait pu être identifiées grâce à l'application du modèle théorique prescriptif. En effet, l'intégration de parties prenantes pertinentes lors des différentes étapes du processus permet d'apporter de nouvelles connaissances et donc potentiellement des nouveaux acteurs d'intérêts.

Etape 3 : Evaluation

La dernière étape a consisté à interroger l'un des concepteurs de la bouilloire « *Nautile* » sur la modélisation proposée de leur projet et d'avoir ses retours quant au modèle théorique prescriptif développé²¹.

Cette étape nous a permis de relever que la bouilloire « *Nautile* » n'est aujourd'hui pas commercialisé malgré ses apports d'un point de vue fonctionnel et environnemental. En effet, l'objectif de cette bouilloire était de respecter l'environnement par une diminution des coûts en énergie, en consommation d'eau, avec des matériaux peu chers et une technique également moins consommatrice d'énergie tout en étant un produit accessible à tous. Cependant lors de la conception les concepteurs ont parié sur l'impression 3D céramique à haut niveau de précision. Ce choix se basant sur le faible coût de la matière première. L'idée ici était de s'appuyer sur une technologie émergente qui permettrait de développer un produit durable et accessible à tous. Ce pari n'a pas été gagnant, car cette technique ne s'est pas démocratisée, elle est restée cantonnée à deux domaines très spécifiques : certains spécialistes de matériel médicaux et les artistes. Nous pensons que grâce à un choix pertinents des parties prenantes lors des projets en conception biomimétique, il serait possible d'éviter cette typologie de risques.

De plus, lors de cet interview²⁰ Guillian Graves a exprimé le fait que pour lui, lors du projet deux experts ont manqué à des étapes clé du processus, à savoir un ingénieur en pré-industrialisation et un expert du business model, expert identifié lors de la modélisation rétroactive du projet.

²⁰L'interview de Guillian Graves est présentée en Annexe 5

Synthèse des résultats

Pour cette expérimentation nous avons souhaité tester un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique que nous avons développé pour faciliter le choix des parties prenantes. Pour ce faire nous avons réalisé une étude de cas rétroactive sur un projet biomimétique, la bouilloire « *Nautile* » conçu en 2012 par Guillian Graves et Michka Mélo.

Nous avons dans un premier temps collecté les connaissances identifiées et mobilisées pour la conception de ce produit, grâce au carnet de recherche réalisé par les deux concepteurs. Puis sur cette base nous avons modélisé le raisonnement de conception de ce projet en prenant le cadre de la théorie C-K comme le propose le modèle théorique prescriptif développé. Enfin, nous avons eu un entretien avec l'un des concepteurs afin de recueillir son ressenti et ses remarques quant au modèle développé et ses apports potentiels.

Sur la base de ces trois actions, la collecte de connaissance, la modélisation du raisonnement de conception du projet et l'interview de l'un des concepteurs nous proposons de reprendre notre modèle théorique prescriptif afin de l'alimenter de recommandations organisationnelles issues de notre étude de cas.

Etape 1 : Analyse du problème

Le ou les personnes à l'initiative du projet (dans notre étude de cas, Guillian Graves et Michka Mélo) font une première analyse de leur problématique en identifiant les poches de connaissance à l'origine de leur idée ou projet ainsi que les contraintes qu'ils formalisent grâce au cadre de la théorie C-K. Ils vont alors sélectionner les poches de connaissances identifiées qui semblent « incontournables » pour la suite du projet. Cette identification va permettre de sélectionner les parties prenantes qui formeront le groupe de pilotage du projet (groupe clé du projet).

Une fois le comité de pilotage réuni, une nouvelle phase d'analyse du projet va permettre d'identifier de nouvelles poches de connaissances, d'où il sera alors possible d'extraire de nouvelles parties prenantes potentielles.

Puis, si de nouvelles parties prenantes sont sélectionnées, une phase de travail collectif entre le groupe de pilotage et les nouvelles parties prenantes est mise en place afin d'aboutir à une analyse de la problématique rigoureuse et une formulation d'un nouveau cahier des charges, prenant en compte les recommandations issues des différentes expertises des parties prenantes. Ce cahier des charges permettra de ne pas perdre de vue les objectifs premiers fixés lors du passage aux différentes étapes à suivre. De cette étape découlera la formulation du concept C0, qui sera indiqué dans l'espace des concepts (C) du modèle théorique prescriptif.

Dans le cas du projet « Nautile », ces différentes sous-étapes auraient pu permettre d'identifier comme clé les expertises de spécialistes en business model, ainsi qu'en ingénierie préindustrielle. Notons que d'après le concepteur Guillian Graves, l'absence de ces deux profils en début de process a représenté l'un des plus gros facteurs de « non-aboutissement » et de « non-commercialisation » de ce projet.

Ainsi, avec le modèle théorique prescriptif proposé nous mettons en lumière que certaines étapes sont itératives.

Etape 2: Abstraction du problème

L'abstraction du problème va consister à extraire du cahier des charges les grandes fonctions clés, d'où l'importance d'identifier les bons acteurs à mettre autour de la table dès l'étape 1. Ces fonctions découlent des poches de connaissances identifiées lors de la première étape du processus. Elles pourront être formalisées dans l'espace concept (C) comme première expansion du concept C0. Dans le cadre de la conception biomimétique, ces fonctions clés vont devoir trouver leurs homologues en termes de poches de connaissances biologiques lors de l'étape 3.

Pour y arriver, il est important d'avoir un ou plusieurs acteurs qui auront pour rôle de « traduire » et « transposer » les sémantiques entre les connaissances contextuelles et la biologie. Ainsi, pour réaliser cette action, la littérature scientifique nous propose d'intégrer, s'ils ne le sont pas encore, un biologiste horizontal (Graeff et al., 2019) ainsi qu'un profil formé au Design (Letard et al., en cours de publication pour Creativity and Innovation Management 2020).

Etape 3: Transposition à la biologie

A cette étape est présent le comité de pilotage en plus du biologiste horizontal et du profil formé au Design (s'il ne sont pas déjà présent). Ces deux acteurs vont identifier les fonctions biologiques d'intérêts grâce à l'identification de poches de connaissances biologiques correspondant aux fonction clé du projet sélectionnées lors des étapes précédentes.

Etape 4: Identification des modèles biologiques potentiels

Grâce aux poches de connaissances identifiées et aux fonctions biologiques extraites, le biologiste horizontal pourra identifier un certain nombre de modèles biologiques d'intérêts répondant aux fonctions recherchées.

Etape 5: Sélection des modèles biologiques d'intérêts

Le comité de pilotage ainsi que le biologiste horizontal et le profil formé au Design (s'il ne sont pas déjà présents) se réunissent. A partir du cahier des charges défini lors de l'étape 1, ils vont évaluer les modèles biologiques proposés et sélectionner ceux qui leur paraissent les plus appropriés au projet. A cette étape ils vont également établir s'ils ont besoin d'informations complémentaires sur les principes biologiques sélectionnés, afin de pouvoir comprendre plus finement les organismes vivants identifiés. Ils vont alors identifier à partir des poches de connaissances biologiques amenées par le biologiste horizontal, de nouvelles parties prenantes : des biologistes « verticaux » (Graeff, Maranzana, & Aoussat, 2019b). Si des biologistes verticaux sont intégrés, soit une nouvelle phase de sélection est effectuée, soit, si certains modèles biologiques semblent manquants, une nouvelle boucle itérative vers l'étape 4 d'identification des modèles biologiques est mise en place. Cette étape se termine lorsque le comité de pilotage est satisfait des modèles biologiques sélectionnés.

Étape 6 : Abstraction des stratégies biologiques

A cette étape le biologiste horizontal et les nouvelles parties prenantes (si nécessaire), les biologistes verticaux, vont transmettre au comité de pilotage une analyse fine des principes biologiques d'intérêts (sélectionnées en étape 5) afin que chacune des parties prenantes puissent les comprendre et se les approprier. Le biologiste horizontal et le profil formé au Design vont avoir un rôle de traducteur afin de faciliter le choix des modèles biologiques et le transfert de connaissances qui s'effectuera entre cette étape et l'étape 7 de transposition au contexte. Ainsi lors de cette étape commence l'action d'hybridation des connaissances le plus souvent effectué par le profil formé au Design.

L'étape 7 : Transposition au contexte

Lors de cette étape le profil formé au Design continue l'hybridation des connaissances biologiques et des connaissances contextuelles identifiées dès la première étape du processus. Ces hybridations permettront de générer des outils de collaboration interdisciplinaire afin de développer des préconcepts (Brun et al., 2019). L'hybridation des connaissances ainsi que la génération des préconcepts induisent la mobilisation de nouvelles poches de connaissances et/ou la mise en lumière de poches de connaissances identifiées en étape 1. Ces poches de connaissances vont ainsi permettre de sélectionner les parties prenantes d'intérêts pour la dernière étape du processus.

Dans le cadre du projet « Nautile », c'est à cette étape que vont pouvoir revenir l'expert en business model, expert en matériaux et l'ingénieur en pré-industrialisation par exemple.

L'étape 8 : Mise en contexte

Le comité de pilotage ainsi que les experts sélectionnés lors de la septième étape vont passer à une phase formalisation des idées et des concepts intégrés dans le contexte défini lors de l'étape 1. Cette formalisation pourra se faire grâce à la modélisation et le test de maquettes et prototypes, ce qui pourrait également s'apparenter à la phase de « prototypage et test » en Design Thinking. A la fin de cette phase débutera la phase de mise sur le marché et d'industrialisation. Cette étape pourra être également itérative en fonction de l'évolution des maquettes et des prototypes.

3.3.2.4 Discussion, limites et ouverture

Cette expérimentation menée en collaboration avec Anne-Sophie Rössler avait pour objectif de tester l'hypothèse 4 qui suppose que « Mobiliser la théorie C-K et le Design Thinking comme cadre de pilotage des projets en conception biomimétique facilite la mobilisation, la modélisation et la structuration des connaissances et permet de sélectionner les parties prenantes d'intérêts tout au long du projet ».

Pour ce faire nous avons formalisé un modèle théorique prescriptif de pilotage de projet qui s'est appuyé sur deux propositions méthodologiques prescriptives :

- Proposition méthodologique prescriptive 1 : *La mobilisation du cadre de la théorie C-K pour piloter le processus de conception biomimétique permet de faciliter le choix des parties prenantes impliquées tout au long du processus de conception biomimétique problem-driven unifié.*
- Proposition méthodologique prescriptive 2 : *L'intégration d'actions issues du Design lors du processus de conception biomimétique problem-driven unifié permet de faciliter l'identification de connaissances manquantes, le partage des connaissances, l'hybridation des connaissances et leurs formalisations afin de faciliter le choix des parties prenantes.*

Nous avons testé ce modèle dans le cadre d'une étude de cas qui a consisté en l'analyse rétroactive du projet de bouilloire biomimétique « *Nautile* » et en l'interview de l'un des concepteurs pour avoir ses retours quant à notre proposition de modèle.

Cette expérimentation nous a permis de mieux comprendre la pratique, avec pour objectif de faciliter l'appropriation du processus par des équipes de conception et ainsi de favoriser le déploiement de la conception biomimétique (Problématique de recherche initiale). En facilitant le choix des parties prenantes, nous souhaitons limiter le risque de ne pas faire aboutir le projet soit par un manque de connaissances ou de parties prenantes expertes, ou contrairement à cause d'un trop grand nombre de connaissances et/ou une mauvaise sélection des parties prenantes.

Cette étude de cas nous a permis de valider et compléter notre modèle théorique prescriptif de pilotage du processus de conception biomimétique. Nous avons pu soulever les apports de ce modèle et la complémentarité de nos résultats avec ceux de notre seconde expérimentation (§3.2.2). Cette expérimentation nous permet de mieux comprendre la pratique en conception biomimétique et notamment les freins pratiques que rencontrent les concepteurs.

D'après Guillian Graves : « *la sélection des parties prenantes est un garant* ». Néanmoins il précise « *Cela peut être le garant d'un échec, si on met trop de monde autour de la table et s'il n'y a pas les bons outils..., clairement cela peut facilement impacter négativement un projet, mais cela peut-être aussi un bon critère de succès. A mon avis il faut l'intégrer finement, mais en mettant différentes de conditions* ». Ce commentaire nous invite donc à valider que le choix des bonnes parties prenantes au bon moment dans le processus est un point clé pour les projets de conception biomimétique mais qui ne garantit pas seul le succès et la réussite d'un projet. En effet, l'interview avec Guillian Graves nous a ouvert sur d'autres notions importantes à prendre en compte pour faire aboutir le projet, comme celles du temps disponible et des moyens financiers. Ces deux paramètres sont à prendre en compte parallèlement à la sélection des parties prenantes.

Nous sommes conscients que notre expérimentation et nos préconisations restent théoriques, ce qui représente l'une des limites majeures de notre études. Nous souhaitons dans de futures recherches tester ce modèle théorique de pilotage de projets biomimétique lors d'un projet pratique. Il sera également intéressant de tester notre modèle théorique prescriptif de pilotage du processus biomimétique sur le processus biomimétique problem-driven unifié développé en conclusion de notre seconde expérimentation (§3.2.2). Enfin, il nous semble également important de tester ce modèle pour le pilotage d'autres processus en conception biomimétique développés dans la littérature.

Nous soulevons que cette quatrième expérimentation est qualitative et non quantitative, nous souhaitons ici discuter des apports et des limites d'une étude de cas. D'après Gagnon, « *l'étude de cas, donne accès à une compréhension profonde des phénomènes, des processus qui les composent et des acteurs qui en sont les parties prenantes...* » (Gagnon, 2005). C'est ce que nous a apporté l'étude de cas de la bouilloire, qui nous a permis de tester notre modèle prescriptif de pilotage du processus de conception biomimétique problem-driven unifié. Néanmoins l'étude de cas comme méthode de recherche présente ses failles et points faibles : « *elle est difficilement reproductible par un autre chercheur, elle présente des lacunes importantes quant à la généralisation des résultats qu'elle permet d'obtenir... La spécificité, la particularité et la diversité que favorise l'étude de cas ne font pas bon ménage avec l'universalité* » (Gagnon, 2005). De plus, selon Dumez « *une étude de cas, une démarche compréhensive ou qualitative ne peuvent servir à vérifier une théorie ou les hypothèses* » (Dumez, 2013; page 34). Une étude de cas ne permet certes pas de généraliser complètement une théorie ou, dans notre cas, notre approche. Néanmoins, comme le souligne Dumez (Dumez, 2013; page 34) : « *Si l'étude d'un cas n'apporte rien au regard de la confirmation d'une théorie, il peut en revanche, à lui seul, infirmer ou réfuter une théorie* » (Dumez, 2013; Koenig, 2009; Popper, 1998). Dans notre cas, notre analyse du carnet de recherche « *Versus* », la modélisation rétroactive du projet et l'interview de l'un des concepteurs nous ont permis de ne pas réfuter la théorie et voire de l'infirmer.

Nous sommes conscients que notre recherche ne représente qu'un début dans l'accompagnement du choix des parties prenantes en conception biomimétique. En effet, ce sujet pourrait constituer lui-même un sujet de recherche de doctorat.

Pour conclure nous notons qu'en complément de notre modèle théorique, il est important de prendre en compte la typologie du projet (industriel, étudiant ou recherche), la temporalité, ainsi que les moyens financiers et humains disponibles, car nous avons bien conscience, que notre modèle qui préconise l'intégration de nouvelles parties prenantes nécessite dans la pratique un budget et un temps dédiés à cet effet, non négligeables.

3.4 Synthèse et conclusion du troisième chapitre

3.4.1 Synthèse du troisième chapitre

Dans ce chapitre nous venons de présenter l'ensemble de nos expérimentations qui représentent le cœur de cette thèse de doctorat.

Ce chapitre se compose de deux parties :

La première partie s'est intéressé à notre problématique de recherche ciblée « *Comment l'intégration de profils formés au Design, au sein des équipes de conception, peut optimiser le processus de conception biomimétique problem-driven unifié et favoriser sa diffusion ?* » Pour y répondre nous avons effectué deux expérimentations (Expérimentation 1 & 2) relatives aux hypothèses 1 et 2 :

- L'expérimentation 1 a interrogé le rôle des profils formés en Design dans la génération de concepts inspirés du vivant (Hypothèse 1).
- L'expérimentation 2 a étudié si l'intégration de profils formés au Design favorise, d'une part, le transfert de connaissances et d'autre part, si cela favorise le travail interdisciplinaire entre les parties prenantes du projet (Hypothèse 2.1). Un focus particulier a été porté sur les représentations non-verbales générés par les profils formés au Design (Hypothèse 2.2).

La seconde partie s'est appuyé sur deux collaborations de recherche qui nous ont permis de débiter une exploration de notre problématique de recherche initiale : « *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* ». Ces collaborations de recherches ont permis d'aboutir à deux expérimentations (Expérimentation 3 & 4) qui ont eu pour objectif de tester respectivement les hypothèses 3 et 4 :

- L'expérimentation 3 a étudié les risques et les freins perçus par les praticiens, liés au processus de conception biomimétique problem-driven unifié afin d'identifier des leviers d'adaptation de ce processus aux pratiques de conception et d'innovation (Hypothèse 3).
- L'expérimentation 4 a proposé un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique qui s'appuie sur la mobilisation de la théorie C-K et du Design Thinking (Hypothèse 4).

Bien que les résultats de ces deux dernières expérimentations de recherche n'aient pas aboutit à une réponse complète pour notre problématique de recherche initiale, elles ont pu mettre en lumière des résultats connexes et ont proposé des pistes à explorer lors de futurs travaux de recherche.

3.4.2 Synthèse des résultats

Nous avons constaté que malgré les opportunités de la conception biomimétique et le développement croissant des recherches associées, sa diffusion dans les pratiques de conception et d'innovation reste marginale (§2.2). Cela s'explique par (1) la difficulté liée à sa mise en œuvre pratique qui implique la mise en place d'une collaboration interdisciplinaire efficace, (2) le transfert entre différentes typologies de connaissances qui ne sont que très rarement amenées à se rencontrer et (3) la compréhension fine de processus théorique complexe. Pour surmonter ces défis, nous avons exploré les facteurs de succès développer en conception innovante (§2.3), ce qui nous a permis de mettre en lumière une discipline et les profils associés : le Design et les designers.

Nous nous sommes alors demandé : « *Comment l'intégration de profils formés au design peut optimiser le processus de conception biomimétique problem-driven unifié et favoriser sa diffusion ?* » (Problématique de recherche ciblée).

Pour répondre à cette problématique nous avons, dans un premier temps, supposé que l'intégration de profils formés au design favorise la génération de concepts inspirés du vivant (Hypothèse 1). Cette première hypothèse a été testée lors de notre première expérimentation qui a souligné l'intérêt d'intégrer des designers lors de projets de conception biomimétique afin de **favoriser la génération de concepts inspirés du vivant originaux et contextualisés**. Ces deux critères de concepts vont dans le sens des tendances relevées lors de notre revue de littérature. En effet, dans le cadre de cette première expérimentation, les designers ont notamment eu un impact important durant l'étape d'analyse de la problématique, lors de laquelle ils ont formalisé le contexte d'étude grâce à la recherche de connaissances contextuelles (historiques, géographique, sociale ...). Cela leur a permis de contextualiser les concepts proposés. Puis, ils ont, grâce aux connaissances techniques apportées par les ingénieurs, effectué un lien entre les modèles biologiques d'intérêts identifiés et le contexte d'application leur permettant d'être originaux. **Ces résultats nous permettent alors de valider notre première hypothèse de recherche.**

Dans un second temps, nous avons supposé que l'intégration de profils formés au Design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales (Hypothèse 2). Cette seconde hypothèse a pu être testée dans un cadre industriel, grâce au suivi du déploiement de la conception biomimétique chez L'Oréal et à l'étude du développement d'un projet portant sur « *l'hygiène de demain* ». Deux résultats clés sont à retenir de cette expérimentation: (1) **l'intégration de designers au sein du projet étudié a permis d'une part de favoriser le travail interdisciplinaire grâce à la production de représentation non-verbales (préconcepts, outils d'idéation)** et (2) **l'intégration des designers a permis de faciliter le transfert de connaissances grâce notamment à (i) l'identification de connaissances manquantes, à (ii) l'hybridation des connaissances biologiques et technologiques apportés par les experts ingénieurs et métier et les connaissances contextuelles pour générer des concepts bio-inspiré et grâce à (iii) la formalisation de ces hybridations au travers d'objets intermédiaires et de représentations non-verbales (croquis, schémas, prototypes, maquettes).**

Cette seconde expérimentation nous a permis de valider nos deux hypothèses et nous a également permis d'aller plus loin en proposant un développement du processus de conception biomimétique problem-driven unifié : (1) **l'ajout d'une phase 0**, non systématique, permettant de générer les grandes opportunités du vivant pour un sujet ou une problématique donnée, (2) **la formalisation de l'ajout de profils formés au Design durant les étapes clés de collecte et de transfert de connaissances** et enfin (3) **l'ajout de cinq actions d'intérêts pour faciliter les étapes de transfert des connaissances**.

Sur la base de ces deux premières expérimentations nous pouvons caractériser les apports de l'intégration de profils formés au Design et proposer une réponse à notre problématique de recherche :

Intégrer des designers et/ou des profils formés au Design lors de projet en conception biomimétique favorisera le travail interdisciplinaire, le transfert des connaissances et la génération de concepts originaux et contextualisés, défis majeurs du déploiement de la conception biomimétique.

Cette première phase expérimentale nous a également permis de formuler une première réponse à notre problématique de recherche initiale « *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* » : **Par l'intégration de profils au Design.**

Pour compléter ces résultats nous avons eu l'opportunité collaborer avec deux chercheurs, le Dr Eliot Graeff (expérimentation 3) et Anne-Sophie Rössler (expérimentation 4).

Ces expérimentations nous ont permis de formaliser deux résultats majeurs :

- Le développement du processus de conception biomimétique problem-driven unifié en un **processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB)** fournissant des informations fines aux praticiens afin d'éviter les échecs de projets en conception biomimétique.
- La proposition d'un **modèle théorique prescriptif de pilotage de projets** en conception biomimétique facilitant le choix des parties prenantes d'intérêts selon les étapes.

Ainsi l'ensemble de nos résultats nous permettent de (1) **justifier du rôle originale et important des designers dans les projets de conception biomimétique** et (2) **d'apporter aux praticiens des informations fines pour mettre en pratique le processus de conception biomimétique et pour le piloter.**

En conclusion nous avons répondu à notre problématique de recherche ciblée grâce à la validation de nos deux premières hypothèses de recherches et nous apportons des pistes de recherches à explorer pour répondre à notre problématique de recherche initiale grâce à la validation de nos hypothèses 3 et 4 lors de nos deux dernières expérimentations.

La formalisation de nos contributions et de leurs limites sont présentés dans le chapitre suivant.



CHAPITRE 4

Originalité, contributions et limites des travaux

© Anneline LETARD

4.1 Originalité des travaux

4.2 Contributions

- *Contribution 1 : Intégration des designers comme leviers pour le déploiement de la conception biomimétique*
- *Contribution 2 : Augmentation des connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique*
- *Contribution 3 : Evolution du cadre méthodologique pour favoriser son déploiement*
- *Contribution 4 : Adaptation du cadre méthodologique de la conception biomimétique*

4.3 Limites globales de nos travaux

- *Limites du contexte des travaux*
- *Limites du contexte académique et de la cible d'étude de ces recherches*

4.1 Structure du chapitre 4

Depuis près de vingt ans, la littérature scientifique montre un fort développement du domaine de la conception biomimétique (structuration du cadre méthodologique, formalisation des processus et des outils). Son déploiement au sein du monde industriel reste cependant limité, et souvent cantonné à des domaines scientifiques très précis tels que la robotique ou l'ingénierie de pointe.

En parallèle, le contexte industriel (§1.2) a permis de mettre en lumière l'intérêt croissant que portent les entreprises et les organisations à innover de manière responsable et durable, afin de répondre aux enjeux sociétaux, industriels et scientifiques de ces travaux. Cet intérêt les pousse ainsi à s'intéresser aux approches du biomimétisme.

Ce constat révèle une réelle bascule entre la biomimétique et le biomimétisme, illustrée par la volonté de s'inspirer des modèles biologiques, non pas pour innover techniquement, mais pour repenser l'ensemble de nos paradigmes de conception, de production et d'innovation.

Les présents travaux visent à poser les premières fondations de cette bascule entre biomimétique et biomimétisme dans le monde industriel. Pour ce faire, nous avons proposé dans cette thèse de doctorat, de nous intéresser aux leviers pour le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation (Problématique initiale).

Notre état de l'art (§Chapitre 2) nous a permis de mettre en lumière (1) les freins au déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation et (2) d'identifier des leviers de résolution de ces freins issus de la conception innovante nous permettant de définir l'axe de recherche de cette thèse de doctorat : Etudier les apports du Design pour le déploiement et la diffusion de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation.

Ainsi nos recherches ont abordé une problématique de recherche ciblée, rapprochant le Design et la conception biomimétique, deux champs rarement associés : « *Comment l'intégration de profils formés au Design, au sein des équipes de conception, peut optimiser le processus de conception biomimétique problem-driven unifié et favoriser sa diffusion ?* » (§2.4).

L'originalité de ces recherches est qu'elles sont les premières, à notre connaissance, à poser l'hypothèse générale que l'étude des profils, particulièrement l'étude des profils designers, représente un levier pour le déploiement et l'appropriation de la conception biomimétique par les industriels, entreprises et organisations. De plus, l'originalité de ces travaux se traduit par mon positionnement particulier de designer praticien (au sein de Ceebios) et de chercheur (au sein du LCPI) qui a permis d'allier observations de terrains et formalisations scientifiques.

Toujours dans un objectif de valoriser l'originalité de ces travaux, ce quatrième chapitre propose un résumé de l'ensemble de nos résultats de recherches au travers la présentation de quatre contributions scientifiques, industrielles et pédagogiques de cette thèse de doctorat avant de conclure sur les limites globales de nos recherches.

4.2 Contributions

Sur la base de nos expérimentations (§Chapitre 3) nous avons pu démontrer que l'intégration de profils formés au Design, dans les équipes de conception, représente un levier pour le déploiement de la conception biomimétique (§3.2.1; 3.2.2) (Contribution 1). Nous avons pu également, grâce au suivi d'un projet industriel (§3.2.2) et à l'étude de cas pratiques accompagnés par Ceebios (§3.3.1) apporter de nouvelles connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique, notamment sur le temps à dédier pour chacune des étapes du processus et sur les leviers d'appropriations industriels (Contribution 2). Nos résultats de recherches nous permettent également de développer le cadre méthodologique de la conception biomimétique grâce (1) à l'ajout d'une phase initiale non systématique au processus de conception biomimétique problem-driven unifié (§3.2.2), (2) à la formalisation et l'intégration d'actions facilitant les étapes de transfert des connaissances (§3.2.2), (3) à la proposition d'un modèle de pilotage de projet (§3.3.2) et (4) à l'adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié aux pratiques de conception industrielles (§3.2.2; 3.3.1) (Contribution 3). Enfin, les présents travaux de thèse offrent également aux lecteurs des éléments permettant d'adapter le cadre méthodologique de la conception biomimétique à leurs pratiques de conception (Contribution 4). En effet, les résultats de l'étude de cas industrielle (§3.2.2) proposent un protocole d'étude rétroactive de projets pour alimenter les connaissances sur les pratiques en conception biomimétique. Ils constituent également aujourd'hui une base pour les offres d'accompagnement du Ceebios afin d'aider les entreprises à s'approprier la conception biomimétique et l'approche du biomimétisme.

Ces quatre contributions sont composées chacune de différents apports, nous les synthétisons dans le tableau ci-dessous. Ce tableau souligne l'impact tant scientifique qu'industriel de nos travaux de thèse tout en présentant de manière synthétique l'ensemble de nos résultats expérimentaux.

Contribution 1 : <i>Proposition d'intégration des designers comme leviers pour le déploiement de la conception biomimétique</i>	Apport scientifique (1)	Le rôle des designers dans le cadre de la conception biomimétique
	Apport industriel (1)	Intégration opérationnelle des designers
	Apport pédagogique (1) et apport scientifique (2)	Formation des praticiens designers et biomiméticiens
Contribution 2 : <i>Augmentation des connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique</i>	Apport scientifique (3)	Etude de cas industriel
	Apport scientifique (4) et industriel (2)	Répartition temporelle
Contribution 3 : <i>Evolution du cadre méthodologique pour favoriser son déploiement</i>	Apport scientifique (5) et industriel (3)	Proposition d'une nouvelle phase de processus de conception biomimétique problem-driven unifié « <i>Opportunité biologique</i> »
	Apport scientifique (6) et industriel (4)	Formalisation d'actions pour faciliter les étapes de transferts des connaissances.
	Apport scientifique (7) et industriel (5)	Modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique
	Apport industriel (6)	Adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié aux pratiques industrielles (Processus TPIB)
Contribution 4 : <i>Adaptation du cadre méthodologique de la conception biomimétique</i>	Apport scientifique (8)	Protocole d'analyse d'un cas d'étude industriel en conception biomimétique
	Apport industriel (7)	Offre d'accompagnement des entreprises dans l'appropriation du cadre méthodologique de la conception biomimétique

Tableau 18. Synthèse des contributions scientifiques, industrielles et pédagogique des travaux de thèse

4.2.1 Contribution 1 : Intégration des designers comme leviers pour le déploiement de la conception biomimétique

Cette première contribution valide l'intérêt d'intégrer une expertise en design au sein des équipes en conception biomimétique. Cette mise en relation du design et de la conception biomimétique s'est concrétisée par la réalisation de deux expérimentations (§3.2.1 ; 3.2.2). L'expérimentation 1 avait pour objectif de tester notre première hypothèse de recherche : *L'intégration de profils formés au design favorise la génération de concepts inspirés du vivant*. La seconde expérimentation s'est quant à elle portée sur notre deuxième hypothèse : *l'intégration de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales*.

Ces expérimentations nous ont permis dans un premier temps de formaliser théoriquement le rôle des designers dans le cadre de la conception biomimétique (**Apport scientifique 1**) puis nous nous sommes questionnés sur l'intégration opérationnelle de ces profils (**Apport industriel 1**). Enfin, sur la base de nos résultats nous proposons des apports quant à la formation des futurs praticiens (Apport pédagogique) notamment pour la formation des « biomiméticiens » (**Apport scientifique 2**). Nous détaillons ces apports ci-dessous.

4.2.1.1 Apport scientifique (1) : le rôle des designers dans le cadre de la conception biomimétique

Nos résultats expérimentaux ont permis de valider nos deux hypothèses (dans un contexte étudiant puis dans un contexte industriel) en démontrant que les compétences acquises par les designers durant leur formation, leur permettent de **favoriser le transfert de connaissances** issues de champs différents, de **mettre en place une collaboration interdisciplinaire** entre les différentes parties prenantes grâce à la création d'un langage commun au travers de représentations (§3.2.2) et de **générer des idées originales inspirées du vivant**, ancrées dans un contexte (historique, géographique, sociétal, environnemental ...) (§3.2.1).

Ces résultats confortent ainsi les définitions du design proposées par Visser qui définit le design comme une « *construction de représentations* » (Visser, 2010) ou encore proposées par Bila-Deroussy qui définit le design comme une « *science de la représentation* » dont le but est de « *construire des représentations permettant d'atteindre des buts au sein d'un contexte social* » (Bila-Deroussy, 2015).

En ce sens, nous souhaitons ici proposer une formalisation du rôle des designers dans le cadre de la conception biomimétique :

Les designers « collectent et hybrident les connaissances qu'ils partagent en générant des représentations (le plus souvent non verbales) ayant pour objectif de favoriser la collaboration et la coopération interdisciplinaire et le transfert de connaissances pour générer des concepts originaux et contextualisés ».

Cette formalisation représente un des apports majeurs de nos travaux qui tend à évoluer avec les futures recherches. En effet, ces travaux étant les premiers portant sur ce sujet, nous préconisons d'approfondir les recherches concernant les apports des designers notamment pour effectuer la bascule entre la biomimétique et le biomimétisme. Sur la base de nos résultats et de nos observations, nous supposons que les profils designers ont également un impact sur la prise en compte et l'adaptation des projets au contexte social et environnemental globale permettant ainsi le développement d'innovations durables et responsables, inspirées du vivant. Ainsi nous pourrions ajouter au rôle du designer, formalisé ci-dessus : « ...**afin d'atteindre des buts qui s'adaptent au contexte social et environnemental actuel** ».

À la suite de ce premier apport scientifique, nous nous sommes interrogés sur l'intégration opérationnelle de ces profils dans un cadre industriel.

4.2.1.2 Apport industriel (1) : intégration opérationnelle des designers

Après avoir démontré l'intérêt d'intégrer une expertise en design au sein de la conception biomimétique, nous pouvons nous appuyer sur les résultats de nos expérimentations pour proposer des recommandations opérationnelles pour intégrer ces nouveaux profils.

Sur cette base, nous proposons d'intégrer deux typologies de profils formés au Design durant les projets de conception biomimétique :

- Des designers que nous qualifions de « designers généralistes » ou « designers biomiméticiens » qui seront intégrer tout au long du processus de conception biomimétique afin de garantir la collaboration et la coopération interdisciplinaire et le transfert de connaissances efficient (§3.2.2) pour la génération de concepts, originaux et contextualisé, inspirés par le vivant (§3.2.1). Ces profils auront un impact plus important sur la phase 0 du processus développé, sur l'étape d'analyse de la problématique, les étapes liées aux transferts de connaissances (étapes d'abstraction et de transposition) et sur l'étape de mise en contexte. De plus, grâce à leurs capacités d'identification des connaissances contextuelles et manquantes lors d'un projet, ils représentent des profils d'intérêts pour piloter les projets de conception biomimétique grâce à notre modèle théorique prescriptif de pilotage proposé lors de notre quatrième expérimentation (détaillé lors de la présentation de la contribution 3).
- Des designers qualifier de « designers experts » qui seront mobilisé ponctuellement lors de l'étape d'analyse du processus de conception biomimétique et lors de l'étape de mise en contexte. L'intervention de ces designers « experts » ne sera pas systématique. Ils seront sélectionnés grâce aux connaissances formalisées à l'aide du modèle théorique prescriptif de pilotage (détaillé lors de la présentation de la contribution 3). Les « designers experts » apporterons des connaissances d'intérêts adaptées au cadre du projet (ex : designers textiles, designers sonore, designers d'espaces ...).

Pour des raisons de lisibilité, nous les positionnons sur une version linéaire du processus de conception biomimétique problem-driven unifié développé, proposé à la suite de notre seconde expérimentation (§3.2.2). Ce processus est détaillé lors de la présentation de notre troisième contribution.

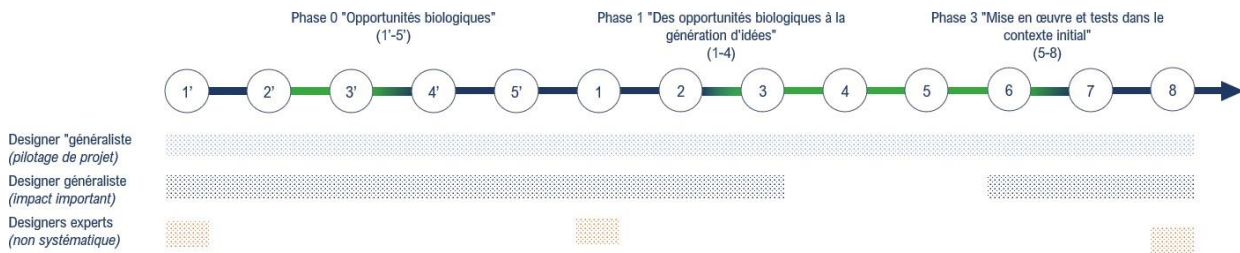


Figure 51. Intégration opérationnelle des designers dans le cadre de la conception biomimétique.

Dans ce cadre, les « designers généralistes » s’alimentent des connaissances apportées et expliquées par les experts et fournissent aux experts des représentations formalisant soit des connaissances hors du secteurs d’expertise des experts, soit des hybridations de connaissances issues de différents champs (idées, concepts ...). Ainsi un réel dialogue se met en place au sein de l’équipe de conception (Figure 52).

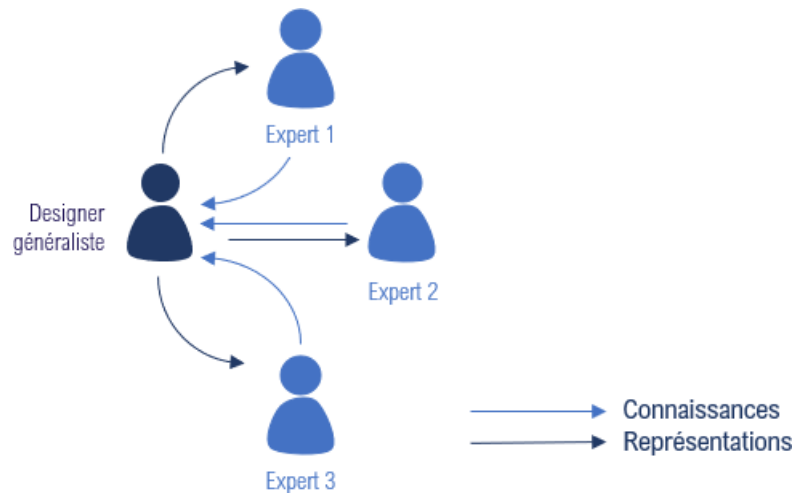


Figure 52. Dialogue entre les « Designers généralistes » et les experts

4.2.1.3 Apport pédagogique et apport scientifique (2) : Formation des praticiens designers et biomiméticiens

Ce nouveau positionnement du designer implique une modification de l’enseignement donné aux designers ayant la volonté de travailler au sein d’une équipe de conception biomimétique. Nous proposons ici **trois scénarios de formation** dans un court, moyen et long terme :

- A court terme, les designers, étudiants ou professionnels, devront intégrer des briques de formations de la conception biomimétique et du biomimétisme afin de comprendre les enjeux

associés à ces approches et s'approprier leur rôle au sein d'une équipe de conception²¹. Pour les étudiants, des écoles de design tels que l'ENSCI les Ateliers, LISAA Paris Architecture d'intérieur & Design ou l'Ecole Européenne Supérieure d'Art de Bretagne (EESAB), proposent déjà ces modules de formations. Pour les professionnels cela est aujourd'hui possible en France notamment par le biais de formations dédiées telles que la Focus lab biomimétisme donnée par l'Institut des Futurs Souhaitables en collaboration avec le MNHN, l'ENSCI les Ateliers et Ceebios ou encore les webinaires publics créés depuis 2020 par Ceebios.

- A moyen terme, il est proposé d'une part de développer des cursus complets alliant expertise Design et expertise en conception biomimétique et biomimétisme tels que propose L'ENSCI les Ateliers au travers de son Master NATURE-INSPIRED DESIGN® (N.I.D)²². D'autre part, d'intégrer des modules d'expertises en Design dans la formation des futurs praticiens de la conception biomimétique et du biomimétisme tels que les biologistes, les ingénieurs ou encore les sociologues. Ce dernier point permettra également de faciliter l'intégration de designers au sein des équipes de conception.
- Enfin à long terme, il est proposé que les deux voies proposées en moyen terme se mutualisent pour former de nouveaux profils : les « Biomiméticiens » (Graeff, 2020b) (§2.2.4.2).

C'est en ce dernier point que réside notre second apport scientifique. Sur la base de nos résultats nous proposons d'intégrer en complément des compétences issues de la biologie proposées par Eliot Graeff (Graeff, 2020b) des compétences issues du Design tels que la capacité de créer des ponts cognitifs entre différentes connaissances (Le Masson & Subrahmanian, 2013), la capacité de matérialiser et contextualiser les idées et les connaissances par le biais d'un artefact, d'une représentation ou d'un cas d'utilisation (Driver et al., 2011; J. Kim et al., 2010; Letard et al., 2018; Visser, 2011) ou encore la capacité d'aider les autres profils à comprendre et à générer des idées (Driver et al., 2011) (§2.3.1.2).

²¹ <https://ceebios.com/se-former-au-biomimetisme/>

²² <https://formation-continue.ensci.com/developpement-durable/nature-inspired-design/>

4.2.2 Contribution 2 : Augmentation des connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique

Aujourd'hui la littérature scientifique n'a que très peu d'informations concernant la pratique de la conception biomimétique et très peu de retour d'expériences ce qui rend d'autant plus complexe l'optimisation des processus pour favoriser leur déploiement. Nos présentes recherches ont mis en lumière deux apports scientifiques constituant cette seconde contribution, détaillés ci-dessous : (1) l'analyse d'un cas d'étude industriel sur l'entièreté du processus (§3.2.2) (**Apport scientifique 3**) et (2) la répartition temporelle (en pourcentage) des étapes du processus de conception biomimétique problem-driven unifié (§3.3.1) (**Apport scientifique 4 et industriel 2**).

4.2.2.1 Apport scientifique (3) : Etude de cas industriel

Dans le cadre de notre seconde expérimentation (§3.2.2) nous avons pu suivre durant trois ans un projet industriel mené au sein de la Recherche Avancée de L'Oréal. Au-delà de notre cible de recherche, cette étude de cas nous a permis de **rendre compte scientifiquement du déploiement de la conception biomimétique au sein de l'entreprise**. Cela nous a permis de relever les aspects organisationnels sous-jacent à l'appropriation de ce nouveau processus et de mettre en lumière les contraintes, les leviers et les freins rencontrer par les praticiens en entreprise tels que les contraintes de temps ou encore le choix des parties prenantes. Cette dernière contrainte étant à l'origine de notre quatrième expérimentation (§3.3.2). Ainsi nous apportons à la littérature un cas d'étude pratique pouvant constituer une base pour les prochaines études de cas et offrant une possibilité d'être alimenté, comparé et requestionné.

4.2.2.2 Apport scientifique (4) et industriel (2) : Répartition temporelle

Comme présenté lors de notre troisième chapitre concernant nos expérimentations nous avons pu élargir notre cadre de recherche en nous appuyant sur les grands questionnements soulevés durant nos deux premières expérimentations. L'une des questions principales fût le temps à accorder pour chacune des étapes du processus de conception biomimétique. Pour y répondre nous nous sommes appuyés sur les données collectées au sein de Ceebios. Nous avons ainsi pu analyser rétrospectivement 17 projets accompagnés par Ceebios, avant de faire une estimation basée sur l'expérience des deux auteurs, nous permettant d'apporter **une estimation des temps accordés à chacune des étapes** (Figure 53).

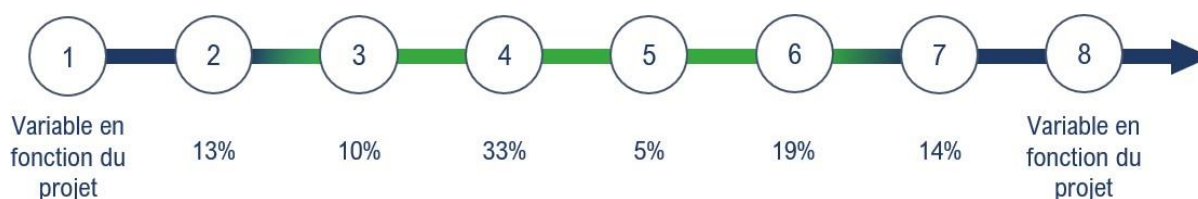


Figure 53. Répartition moyenne du temps (en pourcentage) à consacrer aux étapes du processus de conception biomimétique problem-driven unifié

Cette estimation constitue un apport pour la littérature scientifique et a pour vocation d'être complété au fur et à mesure de l'évolution de nos connaissances concernant la pratique de la conception biomimétique. Notons que cet apport peut être également qualifié d'apport industriel car il offre **des informations temporelles aux entreprises leur permettant de planifier des projets en conception biomimétique** en donnant la possibilité aux équipes de conception d'optimiser cette répartition en fonction de leurs pratiques et contraintes internes.

Cette seconde contribution propose de premières fondations pour les études de cas futurs (§5.2).

4.2.3 Contribution 3 : Evolution du cadre méthodologique pour favoriser son déploiement

Cette troisième contribution est composée de quatre apports qualifiés à la fois de scientifiques et d'industriels : l'ajout d'une nouvelle phase, non systématique, en amont du processus de conception biomimétique problem-driven unifié (**Apport scientifique 5 et industriel 3**), la formalisation d'actions pour faciliter les étapes de transferts des connaissances (Apport scientifique 6 et industriel 4), la proposition d'un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique (**Apport scientifique 7 et industriel 5**), et le développement du processus TPIB, qui propose une adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié aux pratiques industrielles (**Apport industriel 6**).

4.2.3.1 Apport scientifique (5) et industriel (3) : Proposition d'une nouvelle phase de processus de conception biomimétique problem-driven unifié « Opportunité biologique ».

Comme détaillé dans la première partie de l'état de l'art, les processus de conception biomimétique peinent à se déployer dans les pratiques de conception et d'innovation. Fort de l'écosystème industriel de Ceebios nous avons pu, dans le cadre de cette recherche, explorer les pratiques industriels pour identifier des leviers favorisant l'adaptation et l'appropriation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié dans un contexte industriel. Plus précisément, lors de notre seconde expérimentation, (§3.2.2) nous avons proposé de comparer le processus de conception biomimétique problem-driven unifié développé par Pierre-Emmanuel Fayemi en 2017 (Fayemi et al., 2017) avec le processus suivi empiriquement par l'équipe projet. Cette comparaison nous a permis de mettre en lumière la mise en place empirique d'une phase amont au processus de conception biomimétique problem-driven unifié (Figure 54). Cette phase avait pour objectif d'identifier les grandes opportunités biologiques susceptibles de résoudre le problème initial et de fournir des informations permettant de planifier stratégiquement la suite du projet. Nous avons appelé cette phase **la phase 0 « Opportunités biologiques »**. Elle se compose de cinq grandes étapes (Figure 55) : Analyser le problème de conception (Etape 1'), Définir des espaces de solutions englobant les modèles biologiques d'intérêts (Etape 2'), Identifier les opportunités biologiques (Etape 3'), Générer des « concepts projecteurs » (Etape 4') et Sélectionner le(s) « concept(s) projecteur(s) à développer (Etape 5').

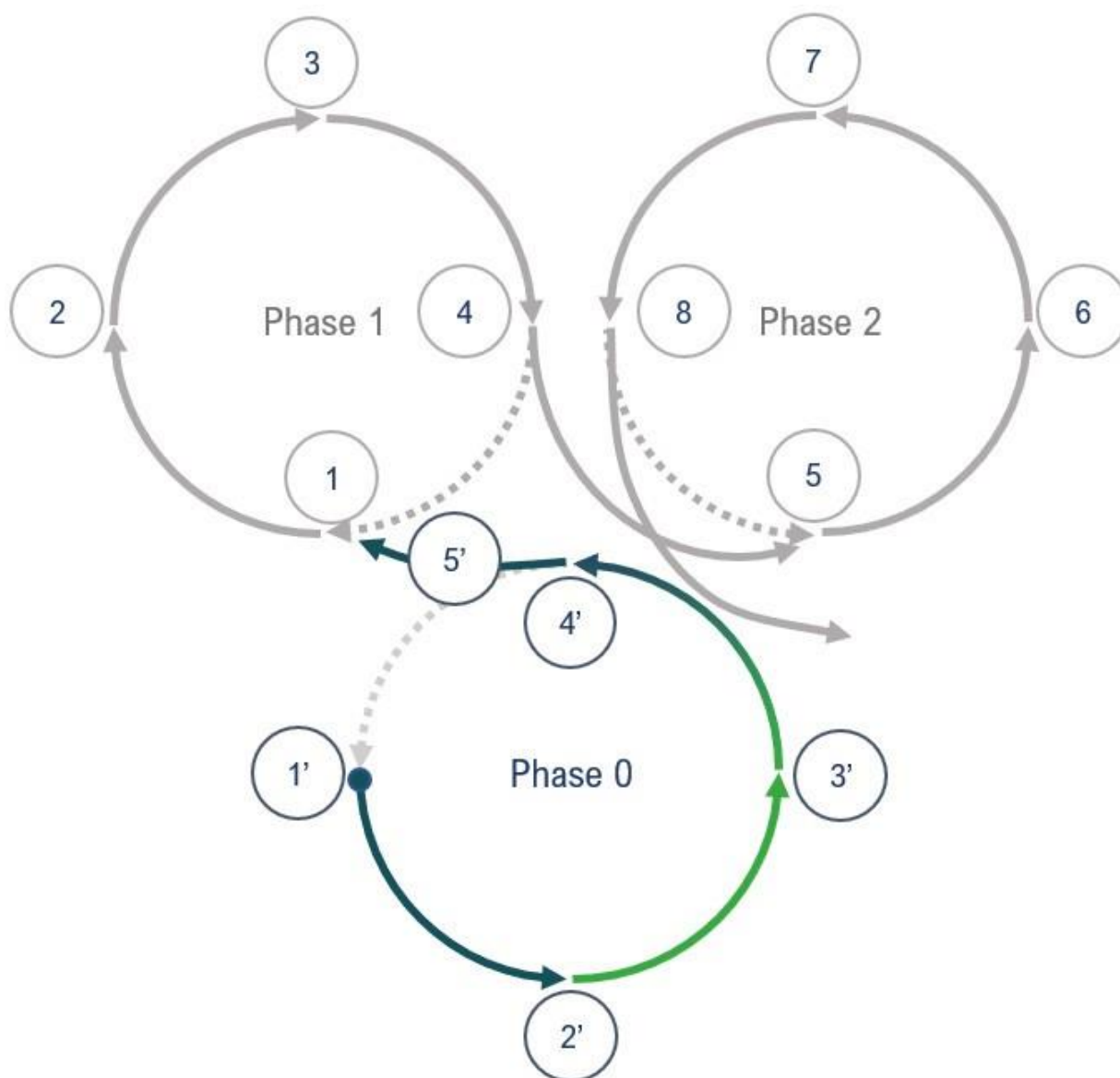


Figure 54. Résumé graphique de l'apport de la nouvelle phase « Opportunités biologiques »

Comme nous l'avons précisé en discussion de notre seconde expérimentation (§3.2.2) cette phase n'est pas systématique puisqu'une équipe de conception peut, si elle le souhaite, s'appuyer sur les grandes opportunités biologiques proposées lors d'un autre projet interne à l'entreprise.

D'un point de vue scientifique, cet apport propose **une optimisation opérationnelle du processus biomimétique problem-driven unifié** par rapport aux observations de la pratique industrielle. D'un point de vue industriel cette nouvelle phase permet aux praticiens de valider de la pertinence d'aborder leur problème avec l'approche biomimétique. Elle permet également d'effectuer une analyse fine du problème et de relever les différentes possibilités de résolution, offrant ainsi aux industrielles la possibilité de planifier la suite des projets en fonctions des moyens disponibles. Par exemple, lors de cette phase 0, certaines opportunités biologiques pertinentes se basent sur l'analyse

d'organismes encore peu étudiés dans la littérature, tandis que d'autre, tout aussi pertinentes, se baserons sur des modèles biologiques connues des chercheurs. Ainsi, l'industriel concerné pourra en fonction de ces contraintes (Temps disponibles, moyens humains et financiers dédiés, volonté de se démarquer des concurrents) choisir une ou plusieurs des grandes opportunités à explorer pour générer des innovations inspirées du vivant.

4.2.3.2 Apport scientifique (6) et industriel (4) : Formalisation d'actions pour faciliter les étapes de transferts des connaissances.

En complément de la nouvelle phase 0 « Opportunités biologiques » présentée ci-dessus, notre seconde expérimentation nous a permis de formaliser **cinq actions qui ont facilité le transfert des connaissances biologiques à la génération de concepts** détaillé (§3.2.2) :

- Action 1 « Collecte de connaissances »
- Action 2 « Partage des connaissances »
- Action 3 « Hybridation des connaissances »
- Action 4 « Formalisation de l'hybridation des connaissances »
- Action 5 « Idéation »

Ces cinq actions menées durant les étapes d'abstraction et de transposition mette en lumière la nécessité d'une collaboration interdisciplinaire efficiente entre les parties prenantes. C'est pour cela que nous préconisons l'intégration d'un « designer généraliste » ou « designer biomiméticien » afin de faciliter le dialogue entre les acteurs et formaliser les connaissances partagées (§4.2.1.2). Ainsi cette formalisation détail d'un point de vue scientifique les actions à mener pour passer d'une typologie de connaissances à une autre et du point de vue industriel permet aux praticiens d'être guider opérationnellement lors des étapes complexes du transfert de connaissances.

4.2.3.3 Apport scientifique (7) et industriel (5) : Modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique

Notre quatrième expérimentation (§3.3.2) menée en collaboration avec Anne-Sophie Rössler s'est basée sur une problématique opérationnelle majeur soulevé durant notre activité professionnelle au Ceebios et durant la mise en place de nos deux premières expérimentations : *Le choix des parties prenantes tout au long du processus de conception biomimétique.*

Cette problématique, annexe à notre cible de recherche, nous a permis d'une part, de **déterminer l'intégration des profils designers dans le cadre de projet en conception biomimétique** (§4.2.1.2). D'autre part, de fournir un **modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique**, basé sur la mobilisation de la théorie C-K comme cadre de pilotage et l'intégration d'actions issues du Design lors des étapes d'intérêts du processus de conception biomimétique problem-driven unifié. Nous proposons qu'un comité de pilotage intégrant un « Designer généraliste » (§4.2.1.2) soit garant de l'efficacité de ce modèle en le formalisant et en intégrant les actions clés à mettre en place.

Ce modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique permet au comité de pilotage de formaliser les connaissances apportées par l'ensemble des parties prenantes tout au long du projet et de modéliser le déploiement des concepts en fonction des connaissances apportées. Ce cadre de pilotage, au-delà de modéliser le raisonnement de conception, permet au comité de pilotage de sélectionner les parties prenantes d'intérêts en se basant sur les connaissances formalisées et ce durant l'ensemble des étapes du processus. Nous résumons graphiquement cet apport dans la figure ci-dessous (Figure 55).

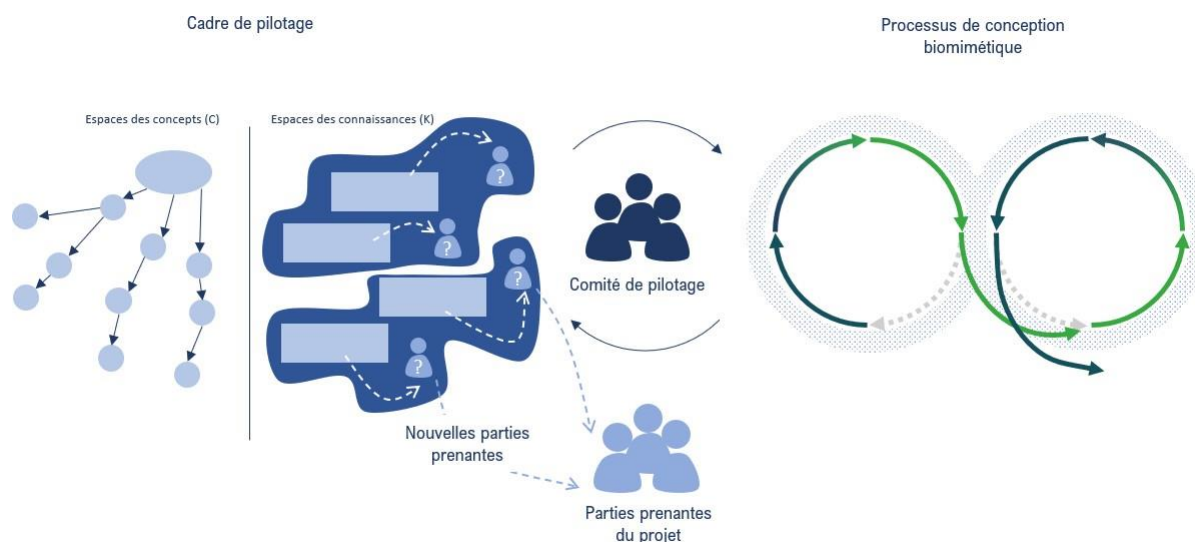


Figure 55. Résumé graphique du modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique

4.2.3.4 Apport industriel (6) : Adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié aux pratiques industrielles (Processus TPIB)

Enfin nous concluons cette troisième contribution par un apport industriel commun entre nos travaux et ceux de Eliot Graeff (Graeff, 2020b) : le développement du **processus de conception biomimétique TPIB (technology pull interdisciplinary biomimetic design process)** (§3.3.1).

Ce processus fût développé afin d'adapter le processus de conception biomimétique problem-driven unifié à la pratique et à la gestion des risques formalisant ainsi une proposition théorique visant à combler le fossé entre recherche et pratique. Ainsi la formalisation d'axes restructurés, de nouvelles sémantiques, et l'ajout de boucles itératives permet d'apporter aux concepteurs un accompagnement pratique (Figure 56). Nos apports personnels sont précisés dans le tableau 7 (§3.3.1).

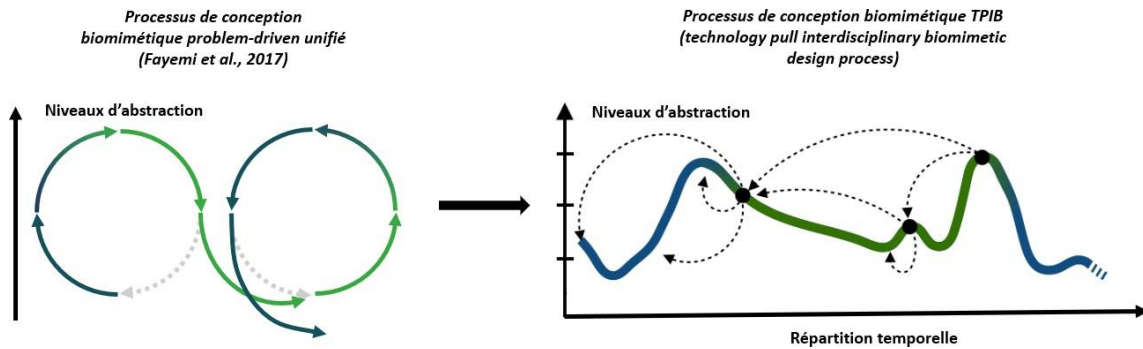


Figure 56. Résumé graphique des apports du processus TPIB

Ce processus a pour vocation d'évoluer tant du point de vue scientifique, avec l'apport de nouvelles connaissances pratiques, que du point de vue industrielle car il propose de s'adapter aux spécificités de chaque projet.

4.2.4 Contribution 4 : Adaptation du cadre méthodologique de la conception biomimétique

Cette quatrième est dernière contribution se compose d'un apport scientifique portant sur la proposition d'un protocole systématique d'analyse d'études de cas pour alimenter les présentes recherches (**Apport scientifique 8**) et d'un apport industriel présentant une offre d'accompagnement des entreprises issue de nos travaux (**Apport industriel 7**).

4.2.4.1 Apport scientifique (8) : Protocole d'analyse d'un cas d'étude industriel en conception biomimétique

Lors de notre seconde expérimentation (§3.2.2) nous avons soulevé comme limite le fait qu'un seul cas d'étude a été analysé dans le cadre de notre thèse. Pour dépasser cette limite, nous souhaitons ici proposer **un protocole théorique permettant de reproduire cette expérimentation afin d'alimenter et comparer les résultats notamment sur le rôle des différents profils dans le cadre de la conception biomimétique.**

Ce protocole se découpe en six actions opérationnelles :

1. Modélisation (rétroactive) des étapes suivies durant le projet étudié (processus employé)
2. Identification des parties prenantes présentes à chacune des étapes
3. Comparaison du processus employé avec le processus de conception biomimétique développé
4. Modélisation du raisonnement de conception à l'aide du cadre théorique de la théorie C-K
5. Identification des apports et actions clés du ou des profils étudiés
6. Formalisation des recommandations méthodologiques issues des résultats de l'étude de cas

Nous espérons que cet apport permettra d'alimenter les recherches quant aux impacts des profils dans le cadre de la conception biomimétique.

4.2.4.2 Apport industriel (7): Offre d'accompagnement des entreprises dans l'appropriation du cadre méthodologique de la conception biomimétique.

Les connaissances acquises tout au long de nos recherches nous permettent de formaliser **une démarche d'accompagnement des entreprises au sein du pôle design & méthodologies transverses de Ceebios** (§1.2.2.2). A ce jour, cette offre d'accompagnement est proposée à l'écosystème industriel de Ceebios et a pour objectif l'adaptation et le déploiement du processus de conception biomimétique au sein des pratiques de conception et d'innovation des entreprises. Cette thèse de doctorat et les résultats associés nous permettent d'accompagner différents types d'entreprises allant des petites entreprises aux grands groupes industriels. Les demandes d'accompagnements méthodologiques étant croissante depuis 1 an, il nous semble possible d'affirmer que les enjeux industriels (§1.4.2) ont bien été adressés par les présents travaux de recherche.

Pour conclure ce quatrième chapitre nous présentons les limites globales de ces travaux de thèse.

4.3 Limites globales de nos travaux

Nos travaux de thèse possèdent un ensemble de limites liées au contexte industriel, au contexte académique et à la cible d'étude de ces recherches. Nous les détaillons dans cette section. Ces limites ainsi que les résultats expérimentaux obtenus ouvrent de nouvelles perspectives de recherche que nous détaillons dans le chapitre 5 « Conclusion et perspective ».

L'ensemble des limites, associés aux expérimentations, sont détaillées en conclusion de chacune d'elles dans le chapitre 3. Nous présentons ici les limites globales de nos travaux.

4.3.1 Limites du contexte des travaux

Les présentes recherches et les différentes contributions détaillées ci-dessus sont issues de réflexions ancrées dans le contexte industriel de Ceebios (§1.2.2). Comme nous l'avons présenté ce contexte est selon nous un atout et représente l'originalité de nos travaux. Néanmoins il nous semble nécessaire de noter que l'écosystème industriel sur lequel nous nous sommes appuyés est composé d'acteurs connaissant et convaincu par l'approche de la conception biomimétique et du biomimétisme. Nous pouvons alors supposer que certaines contraintes liées à l'intégration de nouveaux profils ou liées au déploiement de ces approches n'aient été prises en compte dans nos travaux telles que la contrainte d'acceptabilité des changements de paradigme de conception et d'innovation. On peut alors supposer que nos résultats sont aujourd'hui valables uniquement pour les entreprises intéressées et favorables à l'intégration de la conception biomimétique dans leurs pratiques et que des recherches supplémentaires seront à prévoir pour convaincre et diffuser plus largement ces approches.

D'autre part, la conception biomimétique et le biomimétisme étant deux approches récentes, nous avons eu accès à très peu d'informations concernant la mise en œuvre de ces approches. Cette limite

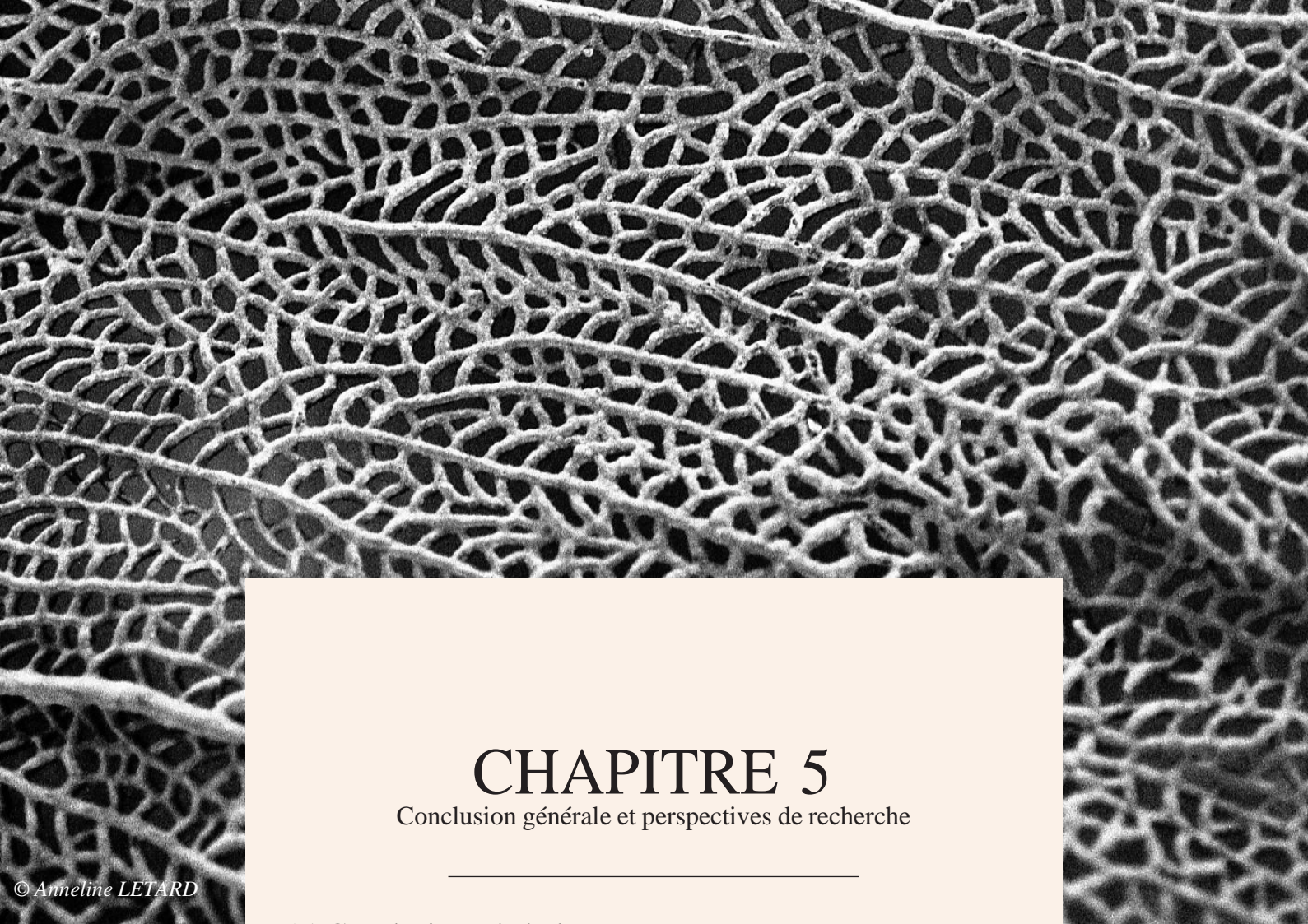
fût accentuée par le fait que la majorité des projets suivis dans le cadre professionnel de Ceebios sont des projets confidentiels impactant ainsi les données pouvant être utilisées durant nos travaux. Ainsi nous n'avons pu analyser qu'un seul cas d'étude industriel durant ces trois années de doctorat.

4.3.2 Limites du contexte académique et de la cible d'étude de ces recherches

Notre contexte académique (§1.3.2) au sein du Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI) pourrait également constituer une limite de nos travaux. En effet, ces recherches se positionnent initialement en science de la conception et en conception biomimétique, nous pouvons supposer que si ces derniers avaient été réalisés en sciences du design ou en sciences sociales, les résultats auraient sans doute pu être différents et/ou complémentaires. Cette supposition s'appuie sur la différence des méthodes de recherche employées dans le cadre de chacune de ces sciences impactant ainsi le corpus bibliographique ou encore les choix méthodologiques effectués. De plus notre position de « praticien-chercheur » (§1.3.2.4) peut également constituer une limite à nos travaux. En effet, appuyé par ma formation de designer, j'ai volontairement orienté et conduit ces recherches en fonction des découvertes et observations de terrain et de mes intuitions de praticien-chercheur. Cette prise de position nous a permis d'élargir notre cœur de recherche en effectuant nos expérimentations 3 et 4. Certains pourrons y voir de réels apports à la recherche, d'autres y verront une dispersion des recherches. Néanmoins nous assumons ces choix de recherche qui nous semblent les plus pertinents pour formaliser des apports méthodologiques applicables opérationnellement. La production de connaissances scientifiques et de résultats quantitatifs robustes sera, à notre avis, générée grâce à l'avancé des recherches sur ce sujet.

Enfin, nous avons choisi de cibler nos recherches sur le rôle et les impacts des designers pour l'optimisation du processus de conception biomimétique et sur sa diffusion auprès des praticiens. Nous pouvons ici poser une limite portant sur le choix de la typologie de designer à observer. En effet, comme le définit l'Alliance Française des Designers, le métier de designer ne cesse d'évoluer et de s'adapter aux changements sociétaux, culturels et industriels. Ainsi de nouvelles spécialités associées aux métiers de designer ne cessent d'apparaître (UX designer, designer sonore ...). Nous avons fait le choix ici d'observer soit des designers étudiants n'ayant pas encore de spécialité façonnée par une expérience professionnelle, soit des designers travaillant dans le domaine du biomimétisme. Ce choix peut alors être perçu comme un biais de recherche et nous invite à poursuivre nos travaux pour justifier des apports communs soutenus par les designers toutes spécialités confondues. Pour ce faire, nous préconisons de poursuivre cette recherche en analysant les fondements de l'enseignement au Design.

L'ensemble des limites présentées ouvrent de nouveaux axes de réflexion que nous présentons dans le chapitre de conclusion de cette thèse de doctorat.



CHAPITRE 5

Conclusion générale et perspectives de recherche

5.1 Conclusion générale

5.2 Perspectives de recherche

5.3 Synthèse graphique des travaux de thèse

5.4 Publications et communications scientifiques

Ce dernier chapitre aborde séparément, la conclusion générale de ces travaux, puis présente les perspectives de recherche envisagées pour conclure sur la présentation des publications & communications effectuées durant ces trois années de thèse de doctorat.

5.1 Conclusion générale

Cette thèse de doctorat s'est intéressée aux leviers de déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation. Plus précisément, ces recherches proposent de mettre en relation le Design, au travers de l'observation des pratiques des designers, et la conception biomimétique. Cet axe de recherche représente l'originalité de cette thèse puisque sans précédent d'exploration. Pour ce faire, nous avons mis en place une démarche de praticien-chercheur combinant le travail de recherche au Laboratoire de Conception Produit et Innovation (LCPI) et le travail de terrain en tant que designer au sein du centre d'études et d'expertises en biomimétisme (Ceebios).

Nous avons poursuivi quatre objectifs principaux : (1) identifier des leviers favorisant le déploiement et la mobilisation de la conception biomimétique comme approche de résolution de problème, auprès des acteurs industriels, (2) contribuer au développement interne du cadre méthodologique et des pratiques de Ceebios, (3) identifier les apports de l'intégration de profils formés au Design lors de projets en conception biomimétique, (4) développer et adapter le cadre méthodologique théorique de la conception biomimétique aux pratiques de conception et d'innovation.

Pour tendre vers ces objectifs nous avons dans un premier temps effectué une étude bibliographique afin, d'une part, de mettre en lumière les freins au déploiement de la conception biomimétique, et d'autre part d'identifier des leviers d'intérêts pouvant aider à les surmonter en conception innovante. Cet état de l'art nous a ainsi permis d'identifier trois freins majeurs au déploiement de la conception biomimétique : (1) la difficulté de mettre en place une collaboration interdisciplinaire efficiente, (2) la difficulté à effectuer les étapes du processus demandant un transfert de connaissance d'un champ à un autre et (3) la complexité des processus de conception biomimétique développés dans un cadre théorique. Ainsi nous avons pu justifier scientifiquement nos premières observations pratiques qui supposaient que l'intégration de profils formés au Design représente un levier pour le développement et l'appropriation du processus de conception biomimétique en pratique. Nous avons alors formulé la problématique de recherche suivante : « *Comment l'intégration de profils formés au design peut optimiser le processus de conception biomimétique problem-driven unifié et favoriser sa diffusion ?* ».

Pour y répondre, deux hypothèses ont été formulées sur la base des compétences des designers soulevées lors de notre revue de littérature :

Hypothèse 1 : *L'intégration de profils formés au design, au sein des équipes de conception, favorise la génération de concepts inspirés du vivant.*

Hypothèse 2 : *l'intégration, au sein des équipes de conception biomimétique, de profils formés au design permet de favoriser le transfert de connaissances et le travail interdisciplinaire notamment par la formalisation de représentations non verbales.*

Ces hypothèses ont pu être testées et validées lors de deux expérimentations. La première, dans le cadre de trois ateliers étudiants, nous a permis de relever le rôle clé des profils formés au Design pour la génération de concepts originaux et contextualisés inspirés du vivant. La seconde, dans le cadre d'une étude de cas industrielle, nous a permis, d'une part, de mettre en lumière que l'intégration de profils formés au Design, au sein des équipes de conception biomimétique, permet de faciliter la collaboration interdisciplinaire et de favoriser le transfert de connaissances entre les connaissances technologiques, contextuelles et biologiques, notamment grâce à la génération de représentation non-verbales. Ces représentations restent encore à caractériser dans de futures recherches, néanmoins nous avons pu observer qu'elles représentent un support de traduction et de discussion entre les différentes parties prenantes d'un projet en conception biomimétique.

D'autre part, cette expérimentation nous a permis de mieux comprendre la mise en œuvre pratique de la conception biomimétique dans un cadre industriel. En effet, cette analyse détaillée d'un cas d'étude industriel, nous a permis d'identifier des leviers d'optimisation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié, tels que l'ajout d'une phase amont au processus, non systématique, permettant d'identifier les grandes opportunités biologiques susceptibles de résoudre le problème initial et de fournir des informations permettant de planifier stratégiquement la suite du projet ou l'ajout d'actions clés facilitant les étapes complexes où ont lieu les transferts de connaissances. Ainsi, en plus de valider notre seconde hypothèse, cette deuxième expérimentation propose une évolution du cadre méthodologique de la conception biomimétique afin de favoriser son déploiement et son appropriation auprès des praticiens.

La synthèse des résultats de ces deux premières expérimentations nous a amené à proposer du point de vue scientifique, une définition du rôle des designers dans le cadre de la conception biomimétique, d'un point de vue industriel, des recommandations organisationnelles pour l'intégration de designers dans les projets de conception biomimétique et d'un point de vue pédagogique, de formaliser des recommandations pour la formation à court, moyen et long terme des designers et des Biomiméticiens.

En complément de ces premières expérimentations, nous avons eu l'opportunité de collaborer avec deux autres chercheurs, nous permettant la mise en place de deux expérimentations connexes à notre cible de recherche, relatives à notre problématique initiale : « *Comment favoriser le déploiement de la conception biomimétique dans les pratiques de conception et d'innovation ?* ».

Tout comme les résultats de nos deux premières expérimentations, ceux formalisés lors des expérimentations 3 et 4 nous permettent de proposer des premiers éléments de réponses à approfondir dans de nouvelle recherche pour proposer une réponse exhaustive à cette problématique initiale.

Ainsi, les expérimentations 3 et 4 ont étudié le cadre méthodologique de la conception biomimétique au travers de deux axes de recherches identifiés lors de notre état de l'art et de nos deux premières expérimentations : (1) l'adaptation du processus de conception biomimétique au cadre pratique et (2) le choix des parties prenantes lors d'un projet en conception biomimétique. Cela nous a amenés à :

- Proposer, une adaptation du processus de conception biomimétique problem-driven unifié aux pratiques industrielles et à la gestion des risques : le processus de conception biomimétique TPIB (technology pull interdisciplinary biomimetic design process (Expérimentation 3).
- Proposer un modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique, basé sur la mobilisation de la théorie C-K comme cadre de pilotage et sur l'intégration d'actions issues du Design, justifiant notamment l'intérêt d'intégrer des designers dans les équipes de conception (Expérimentation 4).

En conclusion, cette thèse de doctorat apporte un nouveau regard sur le métier de designer et ses apports pour repenser nos paradigmes de conception et d'innovation et pour accompagner nos sociétés aux changements de nos modes de vie nécessaires au vu du contexte sociale, sanitaire et environnementale dans lequel nous évoluons. Elle met également en lumière les opportunités prometteuses de mobiliser la conception biomimétique et le biomimétisme pour repenser nos modes de conception, de production et de consommation de manière durable et responsable.

Modestement, nous espérons que ces travaux apporteront des premières briques à de futures recherches ayant pour objectif de consolider la bascule naissante entre la biomimétique et le biomimétisme. En effet, les prochaines étapes de recherches, détaillées dans la section « perspectives » ci-dessous, ont pour objectifs d'une part, de détailler le rôle des designers dans cette bascule avec notamment la prise en compte en amont des projets de conception biomimétique des connaissances liées aux enjeux environnementaux présents et futurs. D'autre part, de faire évoluer le cadre méthodologique de la conception biomimétique afin qu'il s'adapte aux pratiques de conception et d'innovation tout en intégrant des outils et des leviers issues de l'éco-conception.

5.2 Perspectives de recherche

Dans cette dernière section, nous abordons les perspectives de nos travaux au travers de trois grands axes : (1) le développement des recherches concernant le rôle et les impacts des designers et du Design, (2) le développement méthodologique, (3) les axes de recherche complémentaires.

Perspectives de développement des recherches concernant le rôle et les impacts des designers et du Design

Une première perspective de recherche concerne le développement et l'approfondissement des travaux concernant le rôle et les impacts des designers et du Design pour l'optimisation et le déploiement de la conception biomimétique. En effet, notre première contribution de thèse « Proposition d'intégration des designers comme leviers pour le déploiement de la conception biomimétique » constitue une avancée et non une réponse définitive à la caractérisation des profils designers au sein de la conception biomimétique. Il nous semble important, d'approfondir nos recherches au travers de nouvelles expérimentations afin de valider ou de questionner nos résultats expérimentaux et de fournir des résultats quantitatifs, en étudiant de nouvelles études de cas industriels, en observant des designers non formés à la conception biomimétique, en comparant des projets industriels avec ou sans présence de « designer généraliste » ou encore en formalisant les apports des « designers généralistes » et des « designers experts » afin de développer leur caractérisation.

Une seconde perspective de recherche concerne une spécificité apportée par les designers durant le processus de conception biomimétique. Nous avons mis en lumière, lors de notre seconde expérimentation, l'utilisation de représentation non verbale par les designers pour faciliter le dialogue entre les parties prenantes. Cependant nous n'avons pas questionné la typologie de ces représentations. De plus, faute de temps, nous n'avons pas pu étudier le rôle des prototypes et maquettes développés par les designers durant la phase d'industrialisation. Il nous semble donc pertinent d'effectuer de nouvelles recherches.

Enfin à plus long terme, nous proposons d'étudier le rôle que jouent ou pourront jouer les designers dans la bascule entre la biomimétique et le biomimétisme. Pour ce faire nous préconisons de mener de nouveaux travaux concernant les apports de ces profils sur les impacts sociétaux et environnementaux des artefacts (produits, services, organisations ...) produit dans le cadre de projets bio-inspirés.

Perspectives de développement méthodologique

Une quatrième perspective de recherche concerne la diffusion opérationnelle de nos résultats expérimentaux. En effet, lors de nos expérimentations nous avons formaliser un développement et des recommandations méthodologiques. Il nous semble aujourd'hui pertinent de tester, dans le cadre de projets industriels, le modèle théorique prescriptif de pilotage de projet en conception biomimétique développé lors de notre troisième expérimentation et le processus de conception TPIB formalisé lors de notre quatrième expérimentation, afin de relever leurs apports et leurs limites.

A long terme nous pensons que notre travail de recherche pourrait être poursuivi par la formalisation d'une méthodologie adaptable aux contraintes opérationnelles et ce grâce au développement de deux points :

- D'une part, en travaillant sur la formalisation d'un processus de conception biomimétique unifié développé prenant en compte nos résultats expérimentaux ainsi que ceux d'Eliot Graeff (Graeff, 2020b). Ce processus aura pour vocation de fournir aux praticiens les informations nécessaires pour résoudre leurs problèmes de conception par l'approche de la conception biomimétique, tout en limitant les risques (phase 0, boucles itératives, arbres décisionnels ...)
- D'autre part, en proposant des recommandations organisationnelles, tels que l'emploi du modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique ou l'intégration de nouveaux profils tels que les designers et les biologistes, pour guider les praticiens dans la mise en œuvre de la conception biomimétique.

Sur la base de nos recherches nous pensons que ces deux points sont complémentaires pour favoriser le déploiement de la conception biomimétique et du biomimétisme.

Perspectives de recherches complémentaires

Les perspectives de plus long terme sont liées à deux recherches complémentaires soulevé durant ces travaux de thèse :

- Nous venons, dans le cadre de ces travaux, de présenter les apports des designers et du design pour la conception biomimétique, il nous semble pertinent d'effectuer la recherche inverse afin de relever les apports de la conception biomimétique et du biomimétisme pour l'évolution du métier de designer.
- Compléter les recherches quant aux profils dans le cadre de la conception biomimétique, d'une part en étudiant de nouveaux profils d'intérêt comme les profils sociologues ou les profils relatifs à la stratégie d'entreprise comme le « Consultants en stratégie » présent lors de notre seconde expérimentation. D'autre part, en effectuant une recherche dédiée au choix des parties prenants que nous avons initié lors de notre troisième expérimentation.

5.3 Synthèse graphique des travaux de thèse

Avant de conclure ce chapitre par la présentation de nos publications et de nos communications, nous résumons de manière graphique la structure de ces travaux de thèse de doctorat (Figure 57).

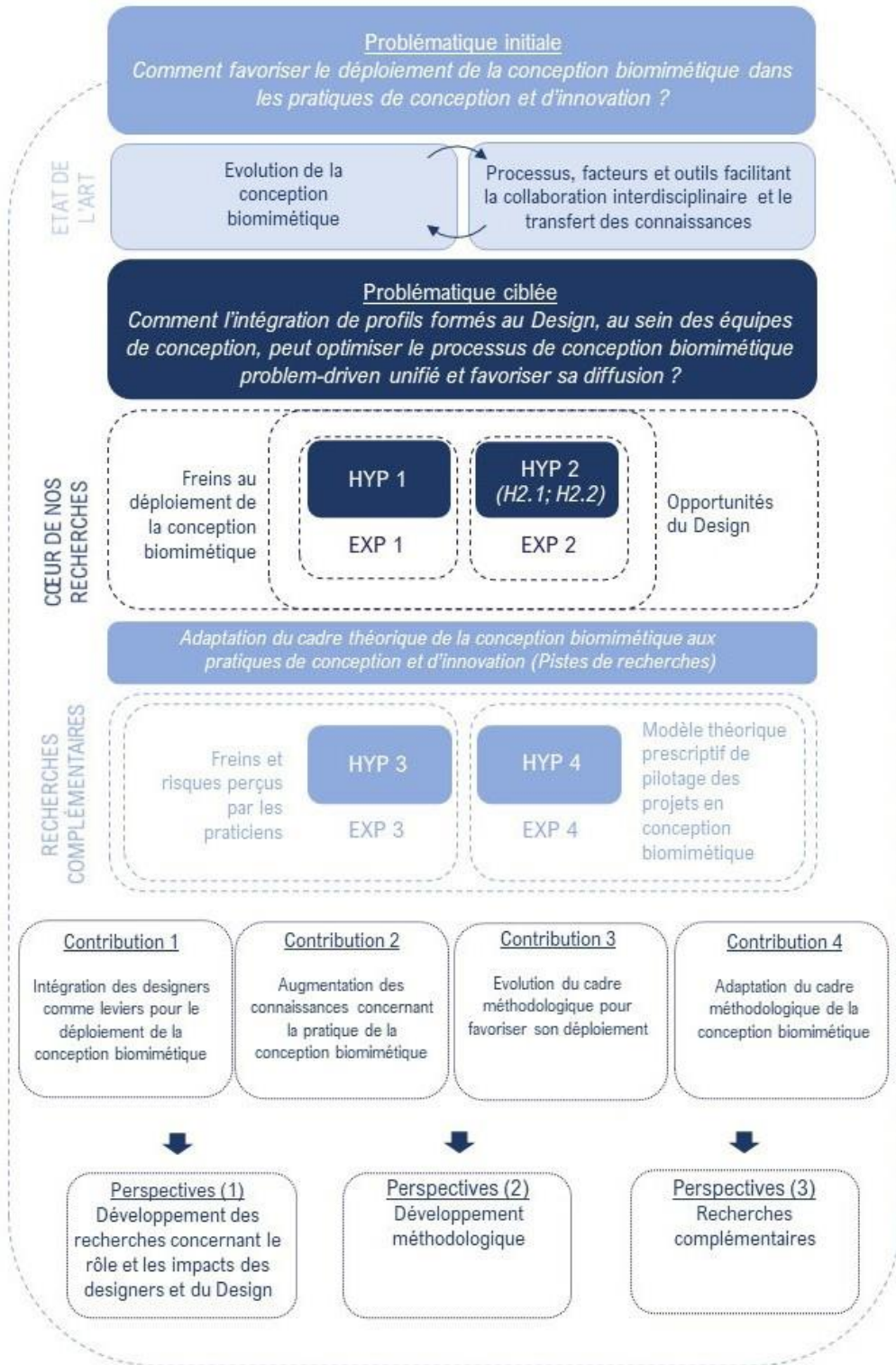


Figure 57. Synthèse des travaux de thèse

5.4 Publications et communications scientifiques

Les résultats des expérimentation 1, 2 et 4 présentées dans ce manuscrit ont conduit à la publication d'articles et de communications scientifiques listés ci-dessous :

Journaux internationaux

Letard, A., Raskin, K., Maranzana, N., & Aoussat, A. (soumis le 09.03.2021). "Biomimetics practice in industrial context: methodological parameters to promote interdisciplinary collaboration and knowledge transfer." *Creativity and Innovation Management*.

Graeff, E., **Letard, A.**, Raskin, K., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2021). "Biomimetics from practical feedback to an interdisciplinary process." *Research in Engineering Design*. <https://doi.org/10.1007/s00163-021-00356-x>

Conférence internationale

Letard, A., Graeff, E; Raskin, K., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2020). "How Do designers impact the biomimetic concepts typology?." *22e International Conference of Engineering and Product Design Education (E&PDE 2020)*.

Conférence nationale

Letard, A., Maranzana, N., Raskin, K., & Aoussat, A. (2018). "Design et biomimétisme : quel rôle pour le designer ?" *CONFERE 2018*, Budapest, Juillet 2018.

Nous précisons également que le cadre industriel de ces travaux nous a permis de présenter les avancées des présentes recherches lors des Groupes d'Innovation Stratégique organisé par Ceebios, lors des Conseils Scientifique de Ceebios et lors des éditions 2018, 2019 et 2020 de la Biomim'Expo, grand rassemblement annuel des acteurs et des parties prenantes du biomimétisme et des approches qui s'inspirent du vivant pour innover. Lors de l'édition 2020 nous avons eu le plaisir, avec les équipes de L'Oréal de présenter une synthèse des travaux menés ensemble dans le cadre de notre seconde expérimentation.

REFERENCES

A

Afnor (2017). Biomimétisme - Intégration de la biomimétique dans les démarches d'éco-conception - XP X42-502.

Agogué, M. (2012). Modéliser l'effet des biais cognitifs sur les dynamiques industrielles : innovation orpheline et architecte de l'inconnu. Thèse de doctorat, Sciences de Gestion, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Agogué, M., Le Masson, P., Dalmaso, C., Houdé, O., & Cassotti, M. (2015). Resisting classical solutions: The creative mind of industrial designers and engineers. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 9(3), 313–318.

Agogué, M., Poirel, N., Pineau, A., Houdé, O., & Cassotti, M. (2014). The impact of age and training on creativity: A design-theory approach to study fixation effects. *Thinking Skills and Creativity*, 11, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2013.10.002>

Alberti, P. (2009). La créativité en conception industrielle : notions et méthodes. *Techniques de l'Ingénieur*.

Altshuller, G. (1984). Creativity as an exact science: the theory of the solution of inventive problems. Gordon and Breach Science Publishers.

Altshuller, G. (1997). 40 Principles: TRIZ Keys to Innovation. Technical Innovation Center, Inc.

Altshuller, G., Altov, H., & Shulyak, L. (1997). And Suddenly the Inventor Appeared: Triz, the Theory of Inventive Problem Solving. Technical Innovation Center, Inc.

Amabile, T. M., Conti, R., Coon, H., Lazenby, J., & Herron, M. (1996). Assessing the Work Environment for Creativity. *Academy of Management Journal*, 39(5), 1154–1184.

Andreasen, M. M. (1987). Integrated product development, IFS (Publications) Ltd.

Aoussat, A. (1990). La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle, Laboratoire Conception de Produits et Innovation.

Aoussat, A., Christofol, H., & Le Coq, M. (2000). The new product design - A transverse approach. *Journal of Engineering Design*, 11(4), 399–417. <https://doi.org/10.1080/09544820010000971>

Appio, F. P., Achiche, S., Martini, A., & Beaudry, C. (2017). On designers' use of biomimicry tools during the new product development process: an empirical investigation. *Technology Analysis & Strategic Management*, 29(7), 775–789.

Arnheim, R. (1971). New Essays on the Psychology of Art. Paperback - University of California Press.

- Badarnah, L. (2017). Towards the LIVING envelope: Biomimetics for building envelope adaptation. Delf University of Technology; Israel Institute of Technology.
- Badarnah, L., & Kadri, U. (2014). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), 120–133.
- Baer, M., Oldham, G. R., Jacobsohn, G. C., & Hollingshead, A. B. (2008). The Personality Composition of Teams and Creativity: The Moderating Role of Team Creative Confidence. *The Journal of Creative Behavior*, 42(4), 255–282.
- Barry, B., & Stewart, G. L. (1997). Composition, process, and performance in self-managed groups: The role of personality. *Journal of Applied Psychology*, 82(1), 62–78.
- Basadur, M., & Head, M. (2001). Team Performance and Satisfaction: A Link to Cognitive Style Within a Process Framework. *The Journal of Creative Behavior*, 35(4), 227–248.
- Baumeister, D., Smith, J., Tocke, R., Dwyer, J., Ritter, S., & Benyus, J. (2013). Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices. Biomimicry 3.8. Missoula. 280 p.
- Baxter, M. (1995). *Product Design: A Practical Guide to Systematic Methods of New Product Development*. Nelson Thornes Ltd
- Benami, O., & Jin, Y. (2002). Creative stimulation in conceptual design. In: *ASME 2002 Design Engineering Technical Conference, and Computer and Information in Engineering Conference*, 1–13.
- Benyus, J. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired By Nature*. William Morrow.
- Bila-Deroussy, P. (2015). Approche systémique de la créativité : outils et méthodes pour aborder la complexité en conception amont. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur.
- Blessing, L. T. M. (1994). A process-based approach to computer supported engineering design.
- Blessing, L.T.M., & Chakrabarti, A. (2009). DRM: A Design Reseach Methodology. In *DRM, a Design Research Methodology* (pp. 13–42). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1_2
- Blok, V., & Gremmen, B. (2016). Ecological Innovation: Biomimicry as a New Way of Thinking and Acting Ecologically. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 29(2), 203–217.
- Boehm, B. W. (1988). A Spiral Model of Software Development and Enhancement. *Computer*, 21(5), 61–72.

Bogatyrev, Nikolaj R., & Vincent, J. F. V. (2008). Microfluidic Actuation in Living Organisms: a Biomimetic Catalogue, Proceedings of the *1st European Conference on Microfluidics*.

Borja de Mozota, B. (2018). Quarante ans de recherche en design management : une revue de littérature et des pistes pour l'avenir.

Bouchard, C. (1997). Modélisation du processus de design automobile - Méthode de veille appliquée au desin du composant d'aspect.

Bouchard, C, & Aoussat, A. (2002). Design process perceived as an information process to enhance the introduction of new tools Design process perceived as an information process to enhance the introduction of new tools. *Int. J. of Vehicle Design*, 1–14. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2003.003181>

Bouchard, C. (2010). Modélisation et computation des processus cognitifs et informationnels en conception amont : une investigation chez les designers et les concepteurs. Mécanique [physics.med-ph]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français.

Brown, T. (2008). Design Thinking Design Thinking.

Brown, T. (2009). Change by Design. HarperCollins. <https://www.harpercollins.com/products/change-by-design-tim-brown?variant=32122020692002>

Brown, T., & Katz, B. (2011). Change by Design. *Journal of Product Innovation Management*, 28(3), 381–383.

Brun, J. (2017). Modéliser le pouvoir expansif de la structuration des connaissances en conception innovante : mise en évidence des effets génératifs du K-preordering grâce à l'étude du non-verbal. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

Brun, J., Le Masson, P., & Weil, B. (2018). Getting Inspiration or Creating Inspiration? the Role of Knowledge Structures in Idea Generation. Proceedings of the *DESIGN 2018 15th International Design Conference*, May 2018, Dubrovnik, Croatia.

Brun, J., Masson, P. Le, & Weil, B. (2016). Designing with sketches: the generative effects of knowledge preordering. *Design Science*, 2(13), 1–26.

C

Carlgren, L., Rauth, I., & Elmquist, M. (2016). Framing Design Thinking: The Concept in Idea and Enactment. *Creativity and innovation management*, 25(1), 38–57.

- Carvajal Pérez, D., Araud, A., Chaperon, V., Le Masson, P., & Weil, B. (2018). Generative heritage: driving generativity through knowledge structures in creative industries. Lessons from cuisine generative heritage: driving generativity through knowledge structures in creative industries. Lessons from cuisine. In: *The International Design Conference (DESIGN 2018)*, 1523–1534
- Catroux, M. (2002). Introduction à la recherche-action : modalités d'une démarche théorique centrée sur la pratique. *Recherche et Pratiques Pédagogiques En Langues de Spécialité - Cahiers de l'APLIUT*, Vol. XXI N° 3, 8–20. <https://doi.org/10.4000/apliut.4276>
- Ceebios. (2018). Biomimétisme en France - Etat des lieux
- Ceebios, & Myceco. (2020). Biomimétisme : Quels leviers de développement & quelles perspectives pour la France ? (France Stratégie (ed.)).
- Chakrabarti, A., Sarkar, P., Leelavathamma, B., & Nataraju, B. S. (2005). A functional representation for aiding biomimetic and artificial inspiration of new ideas. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 19(2), 113–132.
- Chang, C. M. (2011). Journal of Engineering and New organizational designs for promoting creativity: A case study of virtual teams with anonymity and structured interactions. *Journal of Engineering and Technology Management*, 28(4), 268–282.
- Chayaamor-Heil, N., & Freitas Salgueiredo, C. (2016). A framework for biomimetic design in architecture Biomimicry.
- Cheong, H., Chiu, I., Shu, L. H., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2011). Biologically meaningful keywords for functional terms of the functional basis. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 133(2), 1–11.
- Cheong, Hyunmin, Hallihan, G., & Shu, L. H. (2014). Understanding Analogical Reasoning in Biomimetic Design: An Inductive Approach. *Design Computing and Cognition*.
- Chien, Y.-J. (2013). How did international agencies perceive the avian influenza problem? The adoption and manufacture of the 'One World, One Health' framework. *Sociology of Health & Illness*, 35(2), 213–226.
- Chirazi, J., Wanieck, K., Fayemi, P.-E., Zollfrank, C., & Jacobs, S. (2019). What Do We Learn from Good Practices of Biologically Inspired Design in Innovation? *Applied Sciences*, 9, 1–16.
- Choi, H. S., & Thompson, L. (2005). Old wine in a new bottle: Impact of membership change on group creativity. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 98(2), 121–132.
- Chouki, M., Mozota, B. B. De, & Persson, S. (2018). Les compétences des designers en question : quelle alchimie ? *Management & Avenir*, 99, 63–84.
- Cross, N. (2000). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Wiley.

D

- Da Vinci, L. (2012). *The Notebooks of Leonardo da Vinci*. Courier Corporation.
- Delannoy, E. (2016). La biodiversité, une opportunité pour le développement économique et la création d'emplois.
- Dell, M. (2006). Bioniquity® - How to benefit from Nature's IQ for new product development, *presented at the XVII ISPIM Conference*, Athens, Greece.
- Design Council. (n.d.). *The Double Diamond: A universally accepted depiction of the design process*. Design Council.
- Dicks, H. (2018). *Nature as Mentor: Foundations of Biomimetic Epistemology*.
- Domke, M., & Farzaneh, H. H. (2018). Research in bio-inspired design - what is its current focus ?. In: *The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC2018)*.
- Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution. *Design Studies* (22). 425–437.
- Drack, M., Limpinsel, M., De Bruyn, G., Nebelsick, J. H., & Betz, O. (2017). Towards a theoretical clarification of biomimetics using conceptual tools from engineering design. *Bioinspiration & Biomimetics*, 13(1).
- Driver, A., Peralta, C., & Moultrie, J. (2011). Exploring How Industrial Designers Can Contribute to Scientific Research. *International Journal of Design*, 5(1), 17–28.
- Duchamp, R. (1988). *La conception de produits nouveaux*.
- Dumez, H. (2013). Qu'est-ce que la recherche qualitative ? Problèmes épistémologiques, méthodologiques et de théorisation. *Gérer et comprendre*, 112, 29–42.

E

- Edmondson, A. C. (2004). Psychological safety, trust, and learning in organizations: A Group-level lens. *Trust and Distrust in Organizations: Dilemmas and Approaches*. 239–272.
- Edmondson, A., & Roloff, K. (2008). Overcoming Barriers to Collaboration: Psychological Safety and Learning in Diverse Teams. In: *Team Effectiveness in Complex Organizations: Cross-disciplinary Perspectives and Approaches*.

- Falzon, P., & Visser, W. (2011). Variations in expertise: Implications for the design of assistance systems. In: *HCI'89 - Third International Conference on Human-Computer Interaction*, Sep 1989, Boston, United States. 121-128.
- Falzon, P., & Visser, W. (1989). Variations in expertise: Implications for the design of assistance systems. In: *HCI'89 - Third International Conference on Human-Computer Interaction*, 121–128.
- Fay, D., Borrill, C., Amir, Z., Haward, R., & West, M. A. (2006). Getting the most out of multidisciplinary teams: A multi-sample study of team innovation in health care. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*, 79(4), 553–567.
- Fayemi, P.-E. (2016). Innovation par la conception bio-inspirée : proposition d ' un modèle structurant les méthodes biomimétiques et formalisation d ' un outil de transfert de connaissances. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur.
- Fayemi, P.-E., Wanieck, K., Zollfrank, C., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2017). Biomimetics: Process, tools, and practice. *Bioinspiration and Biomimetics*, 12, 1–20.
- Fayemi, P. (2015). Modeling biological systems to facilitate their selection during a bio-inspired design process. In: *International Conference on Engineering Design, ICED15*, July 1–10.
- Felk, Y., Le Masson, P., Weil, B., Cogez, P., & Hatchuel, A. (2011). Designing patent portfolio for disruptive innovation - A new methodology based on C-K theory. In: *18th International Conference on Engineering Design ICED 11*. 214–225.
- Fink, A., Grabner, R. H., Gebauer, D., Reishofer, G., Koschutnig, K., & Ebner, F. (2010). Enhancing creativity by means of cognitive stimulation: Evidence from an fMRI study *NeuroImage*, 52(4), 1687–1695.
- Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative Cognition: Theory, Research and Application*. MIT Press. Cambridge.
- Fischer, G., Giaccardi, E., Eden, H., Sugimoto, M., & Ye, Y. (2005). Beyond binary choices: Integrating individual and social creativity. *International Journal of Human Computer Studies* (63).
- Ford, C. M. (1996). A Theory of Individual Creative Action in Multiple Social Domains. *The Academy of Management Review*, 21(4).
- Freitas Salgueiredo, C. (2013). Modeling biological inspiration for innovative design.
- Freitas Salgueiredo, C., & Hatchuel, A. (2016). Beyond analogy: A model of bioinspiration for creative design. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 30(2), 159–170.
- Frisendal, T. (2012). Design Thinking for Business Analysis. In: *Design Thinking for Business Analysis*. Springer, Berlin, Heidelberg, 15–24.

- Gagnon, Y.-C. (2005). L'Étude de Cas Comme Méthode de Recherche : Guide de Réalisation.
- Garel, G., & Rosier, R. (2008). Régimes d'innovation et exploration. *Revue Française de Gestion*, 187(7), 127–144.
- Gebeshuber, I. C., & Drack, M. (2008). An attempt to reveal synergies between biology and mechanical engineering. In: *The Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222(7), 1281–1287.
- Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function-behaviour-structure framework. *Design Studies*, 25(4), 373–391.
- Goel, A. K., McAdams, D. A., & Stone, R. B. (2014). Special Issue on Biologically Inspired Design. *Journal of Mechanical Design*, 136(11).
- Goel, A. K., Vattam, S., Wiltgen, B., & Helms, M. (2012). Cognitive, collaborative, conceptual and creative - Four characteristics of the next generation of knowledge-based CAD systems: A study in biologically inspired design. *Computer Aided Design*, 44(10), 879–900.
- Goel, A. K., Vattam, S., Wiltgen, B., & Helms, M. (2014). Information-Processing Theories of Biologically Inspired Design. In: *Biologically Inspired Design*. Springer London, 127–152.
- Goel, V. (1995). Sketches of Thought. *The MIT Press*.
- Graeff, E. (2020). Innovation bio-inspirée : Modélisation d'un processus interdisciplinaire de conception nouvel acteur, le Biomiméticien. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Graeff, E., Letard, A., Raskin, K., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2021). Biomimetics from practical feedback to an interdisciplinary process. *Research in Engineering Design*.
- Graeff, E., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2018). Role of Biologists in Biomimetic Design Processes: Preliminary Results. *International Design Conference (Design 2018)*, 1149–1160.
- Graeff, E., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2019). Biomimetics, where are the biologists? *Journal of Engineering Design*, 30(8–9), 289–310.
- Graeff, E., Maranzana, N., & Aoussat, A. (2019b). Engineers' and biologists' roles during biomimetic design processes, towards a methodological symbiosis. In: *22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, August.
- Guilford, J. P. (1967). The nature of human intelligence.

Gurusamy, K., Srinivasaraghavan, N., & Adikari, S. (2016). An Integrated Framework for Design Thinking and Agile Methods for Digital Transformation. In A. Marcus (Ed.), *Design, User Experience, and Usability: Design Thinking and Methods*. Springer International Publishing, 34–42.

H

Hashemi Farzaneh, H. (2015). Visual representations as a bridge for engineers and biologists in bio-inspired design collaborations. 1–10.

Hashemi Farzaneh, H. (2020). Bio-inspired design: the impact of collaboration between engineers and biologists on analogical transfer and ideation. *Research in Engineering Design*.

Hashemi Farzaneh, H., & Lindemann, U. (2019). A Practical Guide to Bio-inspired Design. In: *A Practical Guide to Bio-inspired Design*. Springer Berlin Heidelberg.

Hatchuel, A. (2001). Towards Design Theory and Expandable Rationality: The Unfinished Program of Herbert Simon. *Journal of Management & Governance*, 260–273.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2002). C-K theory: Notions and applications of a unified design theory. Hatchuel, 1–22.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A New Approach of Innovative Design: an Introduction To C-K theory. In: *International Conference on Engineering Design*, January, 1–15.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2009). C-K design theory: An advanced formulation. *Research in Engineering Design*, 19(4), 181–192.

Hatchuel, A., Weil, B., Masson, P. (2013). Towards an ontology of design: lessons from C-K design theory and Forcing. *Research in Engineering Design*, 24(2), 147–163.

Helms, M. E., Vattam, S. S., Goel, A. K., Yen, J., & Weissburg, M. (2008). Problem-driven and solution-based design twin processes of biologically inspired design. In: *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 4, 94–99.

Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*, 30(5), 606–622.

Hoegl, M., & Parboteeah, K. P. (2007). Creativity in innovative projects: How teamwork matters. *Journal of Engineering and Technology Management*, 19.

Hoegl, M., Weinkauff, K., & Gemuenden, H. G. (2004). Interteam Coordination, Project Commitment, and Teamwork in Multiteam R&D Projects: A Longitudinal Study. *Organization Science*, 15(1).

Holloway, M. (2009). How tangible is your strategy? How design thinking can turn your strategy into reality. *Journal of Business Strategy*, 30(2–3), 50–56.

- Horn, R., Dahy, H., Gantner, J., Speck, O., & Leistner, P. (2018). Bio-Inspired Sustainability Assessment for Building Product Development—Concept and Case Study. *Sustainability*, 10, 1–25.
- Howard, T. J., Culley, S. J., & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*, 29(2), 160–180
- Hubka, V., Eder, W. E., Hubka, V., & Eder, W. E. (1996). Design Science and its Goals. *Design Science*. Springer London, 71–76.
- Hulsheger, U. R., Anderson, N., & Salgado, J. F. (2009). Team-Level Predictors of Innovation at Work: A Comprehensive Meta-Analysis Spanning Three Decades of Research. *Journal of Applied Psychology*, 94(5), 1128–1145.
- Hunter, S. T., Bedell, K. E., & Mumford, M. D. (2007). Climate for creativity: A quantitative review. *Creativity Research Journal*, 19(1), 69–90.
- Hyysalo, S. (2006). Representations of Use and Practice-Bound Imaginaries in Automating the Safety of the Elderly. *Social Studies of Science*, 36(4), 599–626.

I

- Ilgen, D. R., Hollenbeck, J. R., Johnson, M., & Jundt, D. (2005). Teams in organizations: From input-process-output models to IMO models. *Annual Review of Psychology*, 56, 517–543.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Service*. *Debating Nature's Value*, 6 May, 1–12.
- Iouguina, A., & Dawson, J. W. (2016). Biologically informed disciplines: A comparative analysis of bionics, biomimetics, biomimicry, and bio-inspiration, among others. *Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics*. Vol. 9, No. 3. 197–205.
- ISO (2015). ISO 18458:2015(en) Biomimetics — Terminology, concepts and methodology. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:en>.

J

- Jacobs, S., Nichol, E. C., & Helms, M. (2014). “Where Are We Now and Where Are We Going?” The BioM Innovation Database. *Journal of Mechanical Design*, 136(11), 1–10.
- Jin, Y., & Chusilp, P. (2006). Study of mental iteration in different design situations. 25–55.

Johansson-sköldberg, U., & Woodilla, J. (2013). Design Thinking: Past , Present and Possible Futures. *Creativity and Innovation Management*, 22(2), 121–146.

John, C. J. (1992). Design Methods.

K

Kaiser, M. K., Hashemi Farzaneh, H., & 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.

Kennedy, E. B., & Niewiarowski, P. H. (2018). Biomimicry: Do frames of inquiry support search and identification of biological models? *Designs*, 2(3), 1–13.

Kennedy, E. B., Fechey-Lippens, D. C., Hsiung, B.-K., Niewiarowski, P. H., & Kolodziej, M. E. (2015). Biomimicry: A Path to Sustainable Innovation. *Design Issues*, 31(3), 2–16.

Kennedy, Emily Barbara, & Marting, T. A. (2016). Biomimicry: Streamlining the front end of innovation for environmentally sustainable products. *Research Technology Management*, 59(4), 40–48.

Keshwani, S., Lenau, T. A., Ahmed-Kristensen, S., & Chakrabarti, A. (2017). Comparing novelty of designs from biological-inspiration with those from brainstorming. *Journal of Engineering Design*, 28(10–12), 654–680.

Kim, J., Bouchard, C., Omhover, J.-F., & Aoussat, A. (2010). Towards a model of how designers mentally categorise design information. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3, 218–226.

Kim, S. J., & 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, 16–41.

King, N., Anderson, N., & West, M. A. (1991). Organizational innovation in the UK: A case study of perceptions and processes. *Work and Stress*, 5(4), 331–339.

Koenig, G. (2009). L'étude de cas à visée infirmationniste. *Le Libellio d'Aegis*, 5(4), 07–13.

Kratzer, J., Leenders, R. T. A. J., & van Engelen, J. M. L. (2006). Team Polarity and Creative Performance in Innovation Teams. *Creativity and Innovation Management*, 15(1), 96–104.

Kruiper, R., Vincent, J. F. V., Abraham, E., Soar, R. C., Konstas, I., Chen-Burger, J., & Desmulliez, M. (2018). Towards a Design Process for Computer-Aided Biomimetics. *Biomimetics*, 3(3), 14.

Kryssanov, V. V., Tamaki, H., & Kitamura, S. (2001). Understanding design fundamentals: How synthesis and analysis drive creativity, resulting in emergence. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(4), 329–342.

Kucharavy, D., & De Guio, R. (2007). Application of S-shaped curves. *Procedia Engineering*, 9, 559–572.

L

Laffitte, P., & Saunier, C. (2007). Les apports de la science et de la technologie au développement durable, Tome II : « La biodiversité : l'autre choc ? l'autre chance ? ».

Lahonde, N. (2010). Proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur.

Landoni, P., Dell'Era, C., Ferraloro, G., Karlsson, H., Peradotto, M., & Verganti, R. (2016). Design Contribution to the Competitive Performance of SMEs: The Role of Design Innovation Capabilities. *Creativity and Innovation Management*, 25(4).

Lawson, B. R. (2014). Acquiring design expertise.

Le Coq, M. (1992). Approche intégrative en conception de produits. In *Assistive Technology*. Vol. 6(2).

Le Masson, P., Hatchuel, A., & Weil, B. (2016). Design theory at Bauhaus: teaching “splitting” knowledge. *Research in Engineering Design*, 91–115.

Le Masson, P., & Subrahmanian, E. (2013). Special Issue on Design Theory: history, state of the arts and advancements.

Le Masson, P., & Weil, B. (2010). La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée : les expériences oubliées aux origines des Bureaux d'études. *Entreprises et Histoire*, 58(1), 51–73.

Le Masson, P., & Weil, B. (2013). Design theories as languages of the unknown: insights from the German roots of systematic design (1840 – 1960). 105–126.

Lebahar, J. C. (1993). Aspects cognitifs du travail du designer industriel. *Design Recherche*.

Lenau, T. (2013). Bio-inspired design - Biomimetics inspiration from nature to create new and improved products.

Lepora, N. F., Verschure, P., & Prescott, T. J. (2013). The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration and Biomimetics*, 8(1).

- Lestari, D. (2020). Biomimicry Learning as Inspiration for Product Design Innovation in Industrial Revolution 4.0. *International Journal of Creative and Arts Studies*, 7(1), 1–18.
- Letard, A., Maranzana, N., Raskin, K., & Aoussat, A. (2018). Design et biomimetisme : quel rôle pour le designer ? In *CONFERE 2018*, Budapest, Juillet 2018.
- Levine, J. M., & Choi, H.-S. (2004). Impact of personnel turnover on team performance and cognition. In: *Team cognition: Understanding the factors that drive process and performance*. 153–176.
- Levine, J. M., Choi, H.-S., & Moreland, R. L. (2003). Newcomer Innovation in Work Teams. In *Group Creativity: Innovation through Collaboration*. 202–224. Oxford University Press.
- Lewin, K. (1946). Action Research and Minority Problems. *Journal of Social Issues*, 2, 34–46.
- Lindemann, U., & Gramann, J. (2004). Engineering Design Using Biological Principles. Proceedings of *DESIGN 2004, the 8th International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, 355–360.

M

- Mackinnon, R. B., Oomen, J., & Zari, M. P. (2020). Promises and Presuppositions of Biomimicry. 1–14.
- Madjar, N., Oldham, G. R., & Pratt, M. G. (2002). There's No Place like Home? The Contributions of Work and Nonwork Creativity Support to Employees' Creative Performance. *Academy of Management Journal*, 45(4), 757–767.
- Maher, M. Lou, & Poon, J. (1996). Modeling design exploration as co-evolution. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 11(3), 195–209.
- Mann, D. (1999). Using S-Curves and Trends of Evolution in R&D Strategy Planning. *TRIZ Journal*.
- Marks, M. A., Mathieu, J. E., & Zaccaro, S. J. (2001). A temporally based framework and taxonomy of team processes. *Academy of Management Review*, 26(3), 356–376.
- Martensen, A., & Dahlgaard, J. J. (1999). Strategy and planning for innovation management - supported by creative and learning organisations. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 16(9), 878–891.
- Martin, R. (2009). *The Design of Business: Why Design Thinking Is the Next Competitive Advantage*. Harvard Business Press.

- Massey, A. P., & Wallace, W. A. (1996). Understanding and facilitating group problem structuring and formulation: Mental representations, interaction, and representation aids. *Decision Support Systems*, 17(4), 253–274.
- Mathisen, G. E., Martinsen, Ø., & Einarsen, S. (2008). The Relationship between Creative Personality Composition, Innovative Team Climate, and Team Innovativeness: An Input - Process - Output Perspective. *The Journal of Creative Behavior*, 42(1), 13–31.
- Mccardle, J., Angus, R., & Trott, J. (2019). Transdisciplinary design practices in education: a complex search for innovation in nature.
- McCoy, J. M., & Evans, G. W. (2002). The potential role of the physical environment in fostering creativity. *Creativity Research Journal*, 14(3–4), 409–426.
- Mcinerney, S. J., Khakipoor, B., Garner, A. M., Houette, T., Unsworth, C. K., Rupp, A., Weiner, N., Vincent, J. F. V., Nagel, J. K., & Niewiarowski, P. H. (2018). *E2BMO: Facilitating User Interaction with a Interface Design*. *Designs*, 2(53), 1–20.
- Mélo, M., De Neubourg, S., & Chekchak, T. (2015). Introduction to nature inspired solutions.
- Merrill, C. (1982). Biomimicry of the Dioxygen Active Site in the Copper Proteins Hemocyanin and Cytochrome Oxidase.
- Milliken, F. J., Bartel, C. A., & Kurtzberg, T. R. (2003). Diversity and Creativity in Work Groups: A Dynamic Perspective on the Affective and Cognitive Processes That Link Diversity and Performance. *In Group creativity : Innovation through collaboration*. 32–62.
- Mougenot, C. (2009). Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée.

N

- Nagel, J. K. S., Nagel, R. L., Stone, R. B., & McAdams, D. A. (2010). Function-based, biologically inspired concept generation. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 24(4), 521–535. 5
- Nagel, J. K. S., Rose, C., Beverly, C., & Pidaparti, R. (2019). Bio-inspired Design Pedagogy in Engineering. In *Design Education Today*. 149–178. Springer International Publishing.
- Nagel, J. K. S., Schmidt, L., & Born, W. (2018). Establishing Analogy Categories for Bio-Inspired Design. *Designs*, 2(47).

- Nagel, J. K. S., & Stone, R. B. (2012). A computational approach to biologically inspired design. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 26(2), 161–176.
- Nagel, J. K. S., Stone, R. B., & Mcadams, D. A. (2010). An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design.
- Nagel, J. K. S., C., Pittman, P., Pidaparti, R., & Rose, C. (2016). Teaching bioinspired design using C-K theory.
- Nagel, Jacquelyn K, & Mcadams, D. A. (2014). Function-Based Biologically-Inspired Design. In: *Biologically Inspired Design: Computational Methods and Tools*.
- Nagel, Jacquelyn Kay, Christopher, P., & Rose, S. (2019). Preliminary findings from a comparative study of two bio-inspired design methods in a second-year engineering curriculum.
- Nolan, V. (1989). *The Innovator's Handbook: The Skills of Innovative Management: Problem Solving, Communication, and Teamwork*. Penguin Books.
- Nonaka, I., & Kono, N. (1998). The Concept of “Ba”: Building a foundation for knowledge creation. In *California Management Review*. 40 (3). 40–54.

O

- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Taylor & F.
- Olivero, J., Fa, J. E., Real, R., Márquez, A. L., Farfán, M. A., Vargas, J. M., Gaveau, D., Salim, M. A., Park, D., Suter, J., King, S., Leendertz, S. A., Sheil, D., & Nasi, R. (2017). Recent loss of closed forests is associated with Ebola virus disease outbreaks. *Scientific Reports*, 7(1).
- Osborn, Alex F. (1953). *Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Thinking*. <https://www.goodreads.com/book/show/2913077-applied-imagination>
- Osborn, Alex F. (1953). *Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Thinking*.
- Oxman, R. (1997). Design by re-representation: A model of visual reasoning in design. *Design Studies*, 18(4), 329–347.

P

- Pahl, G. (Gerhard), & Beitz, W. (1996). *Engineering design: a systematic approach*. Springer.
- Park, J. A., Yilmaz, S., & Kim, Y. S. (2008). Using visual reasoning model in the analysis of sketching process. In: *The Workshop Proceedings of 3rd International Conference on Design Computing*.
- Paulus, P. B., Nakui, T., Putman, V. L., & Brown, V. R. (2006). Effects of task instructions and brief breaks on brainstorming. *Group Dynamics*, 10(3), 206–219.
- Paulus, P. B., & Paulus, L. E. (1997). Implications of research on group brainstorming for gifted education. *Roeper Review*, 19(4), 225–229.
- Plante, P., & Bernèche, R. (2009). L'art-thérapie : un espace favorable à la résurgence du potentiel créateur. *Revue Québécoise de Psychologie*, 30(3), 11–28.
- Popper, K. R. (1998). *La connaissance objective*.

Q

- Quarante, D. (1994). *Éléments de design industriel*. *Economica*.

R

- Reason, P., & Bradbury, H. (2001). *Handbook of action research: participative inquiry and practice*.
- Reiter-Palmon, R., & De Vreede, T. (2011). Team Creativity and Innovation: The Effect of Group Composition, Social. In *Handbook of Organizational Creativity*.
- Rias, A. (2017). *Créativité par et pour la fabrication additive : proposition d'une méthodologie outillée*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Ricard, P. (2015). *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*. *CESE*.
- Robert, C., & Cheung, Y. H. (2010). An examination of the relationship between conscientiousness and group performance on a creative task. *Journal of Research in Personality*, 44(2), 222–231.
- Roche, P., Geijzendorffer, I., Levrel, H., & Maris, V. (2016). *Valeurs de la biodiversité et services écosystémiques Perspectives interdisciplinaires*

- Roozenburg, N. F. M. (1995). *Product design: fundamentals and methods*. Wiley & Sons.
- Rosa, F., Cascini, G., & Baldussu, A. (2014). UNO-BID: unified ontology for causal-function modeling in biologically inspired design. In: *International Journal of Design Creativity and Innovation*. 1–34. Taylor & Francis.
- Roth, R. R. (1983). The Foundation of Bionics. *Perspectives in Biology and Medicine*, 26(2), 229–242.
- Rovalo, E., & McCardle, J. (2019). Performance Based Abstraction of Biomimicry Design Principles using Prototyping. *Designs*, 3(3), 38.
- Rovalo, E., McCardle, J., Smith, E., & 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*, 1–17.
- Rowe, P. G. (1991). *Design thinking*. MIT Press.
- Roy, M., & Prévost, P. (2013). La recherche-action : origines, caractéristiques et implications de son utilisation dans les sciences de la gestion. *Recherches qualitatives*, 32(2), 129–151.
- Rugaber, S., Bhati, S., Goswami, V., Spiliopoulou, E., Azad, S., Koushik, S., Kulkarni, R., Kumble, M., Sarathy, S., & Goel, S. (2016). Knowledge extraction and annotation for cross-domain textual case-based reasoning in biologically inspired design. *Lecture Notes in Computer Science*.

S

- Salas, E., Sims, D. E., & Shawn Burke, C. (2005). Is there A “big five” in teamwork? *Small Group Research*. 36(5), 555–599.
- Santanen, E. L., Briggs, R. O., & De Vreede, G. J. (2004). Causal relationships in creative problem solving: Comparing facilitation interventions for ideation. *Journal of Management Information Systems*, 20(4), 167–198.
- Sartori, J., Pal, U., & Chakrabarti, A. (2010). A methodology for supporting “transfer” in biomimetic design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, 24(4), 483–505.
- Savransky, S. D. (2000). *Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving*.
- Schmitt, O. H. (1969). Some interesting and useful biomimetic transforms. In: *Third Int. Biophysics Congress*.

- Schöfer, M. (2015). Processes and Methods for Interdisciplinary Problem Solving and Technology Integration in Knowledge-Intensive Domains. *Mechanical engineering*. Arts et Métiers ParisTech, Paris.
- Schöfer, M., Maranzana, N., Aoussat, A., Bersano, G., & Buisine, S. (2018). Distinct and combined effects of disciplinary composition and methodological support on problem solving in groups. *Creativity and Innovation Management*, 27, 102–115.
- Schön, D. A. (1983). *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. Routledge.
- Scott, S. G., & Bruce, R. A. (1994). Determinants of Innovative Behavior: A Path Model of Individual Innovation in the Workplace. *Academy of Management Journal*, 37(3), 580–607.
- Sethi, R., Smith, D. C., & Park, C. W. (2001). Cross-Functional Product Development Teams, Creativity, and the Innovativeness of New Consumer Products. *Journal of Marketing Research*, 38(1), 73–85.
- Shah, J. J., Vargas-hernandez, N., & Smith, S. M. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. 24, 111–134.
- Sharma, S., & Sarkar, P. (2019). Biomimicry: Exploring research, challenges, gaps, and tools. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 134, 87–97.
- Shin, S. J., & Zhou, J. (2003). Transformational Leadership, Conservation, and Creativity: Evidence From Korea. *Academy of Management Journal*, 46(6), 703–714.
- Simon, H. A. (Herbert A. (1996). *The sciences of the artificial*. MIT Press.
- Speck, O., Speck, D., Horn, R., Gantner, J., & Sedlbauer, K. P. (2017). Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments. *Bioinspiration and Biomimetics*, 12, 1–15.
- Speck, T., Harder, D., & Speck, O. (2006). BIODON centers in brief–Freiburg. 4–6.
- Speck, T., & Speck, O. (2008). Process sequences in biomimetic research. *Transactions on Ecology and the Environment*, 114, 3–11.
- Srinivasan, V., Chakrabarti, A., Pal, U., Ranjan, B. S. C., & Prasad Ojha, S. (2011). Supporting process and product knowledge in biomimetic design. *International Journal of Design Engineering*, 4(2), 132–158.
- Stevens, L., De Vries, M. J., Bos, M. J. W., & Kopnina, H.; (2019). *Biomimicry Design Education Essentials*. 5–8.
- Stroble, J. K., Stone, R. B., McAdams, D. A., & Watkins, S. E. (2014). An engineering-to-biology thesaurus to promote better collaboration, creativity and discovery. In: *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference*, March, 355–362.

Suh, N. P. (1999). Applications of Axiomatic Design. In *Integration of Process Knowledge into Design Support Systems*. Springer Netherlands. 1-46.

Svendsen, N., & Lenau, T. A. (2019). How Does Biologically Inspired Design Cope with Multi-Functionality? In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 349–358.

T

Tavsan, F., & Sonmez, E. (2015). Biomimicry in Furniture Design. In: *Social and Behavioral Sciences*, 197(February), 2285–2292.

Tesluk, P. E., Farr, J. L., & Klein, S. R. (1997). Influences of Organizational Culture and Climate on Individual Creativity. *The Journal of Creative Behavior*, 31(1), 27–41.

Töre Yargin, G., Moroşanu Firth, R., & Crilly, N. (2018). User requirements for analogical design support tools: Learning from practitioners of bio-inspired design. *Design Studies*.

U

Ullman, D. (2009). *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill Education.

Ulrich, K. (2000). *Product Design and Development*. Eppinger.

V

Vadcard, P. (1996). Aide à la programmation de l'utilisation des outils en conception de produit. ENSAM. Paris

Vakili, V., & Shu, L. H. (2001). Towards Biomimetic Concept Generation. *Design Engineering Technical Conferences*, 1–9.

Van der Lugt, R. (2000). Developing a graphic tool for creative problem solving in design groups. 21, 505–522.

Van Der Lugt, R. (2000). Developing a graphic tool for creative problem solving in design groups. *Design Studies*, 21(5), 505–522.

Vandevenne, D., Pieters, T., & Dufrou, J. (2016). Enhancing novelty with knowledge-based support for Biologically-Inspired Design. *Design Studies*, 46, 152–173.

- VanGundy, A. B. (1984). Brainwriting for new product ideas: An alternative to brainstorming. In : *Journal of Consumer Marketing* 1(2). 67–74.
- Vattam, S., Helms, M., & Goel, A. K. (2007). Biologically-Inspired Innovation in Engineering Design: A Cognitive Study. Technical Report, Graphics, Visualization and Usability Center.
- Vattam, S. S., Helms, M. E., & Goel, A. K. (2008). Compound analogical design: Interaction between problem decomposition and analogical transfer in biologically inspired design. In: *the 3rd International Conference on Design Computing and Cognition*, 377–396.
- Vehar, J. R. (1997). Creativity unbound: An introduction to creative problem solving. Innovation Systems Group, NY.
- Verganti, R. (2009). Design driven innovation: changing the rules of competition by radically innovating what things mean, *Harvard Business Press*.
- Vincent, J. F. V. (2017). The trade-off: a central concept for biomimetics. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 6(2), 67–76.
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: Its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471–482.
- Vincent, J. F. V., & 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), 159–173.
- Vinck, D. (2003). L'instrumentation du travail interdisciplinaire : cadrage des échanges et médiation par les objets intermédiaires.
- Visser, W. (2007). Designing as Construction of Representations: A Dynamic Viewpoint in Cognitive Design Research. *Human-Computer Interaction, Taylor & Francis, Special Issue «Foundations of Design in HCI»*, 21 (1), pp.103-152.
- Visser, W. (2011). Visser: design as construction of representations. *Art + Design & Psychology*, 2, 1–15.
- Volstad, N. L., & Boks, C. (2008). Biomimicry – a useful tool for the industrial designer? *NordDesign*.
- Von Gleich, A., Pade, C., Petschow, U., & Pissarskoi, E. (2010). Potentials and trends in biomimetics. Springer.
- Von Krogh, G., Nonaka, I., & Nishiguchi, T. (2000). Knowledge Creation: A Source of Value. In: *Knowledge Creation*. Palgrave Macmillan UK.
- Vourc'h, G., Brun, J., Ducrot, C., Cosson, J., & Le Masson, P. (2018). Using design theory to foster innovative cross-disciplinary research: lessons learned from a research network focused on antimicrobial use and animal microbes' resistance to antimicrobials ... Using design theory to foster innovative cross-disciplinary research. *Veterinary and Animal Science*, April, 0–1.

W

Wanieck, K., Fayemi, P.-E., Maranzana, N., Zollfrank, C., & Jacobs, S. (2017). Biomimetics and its tools. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 6(2), 53–66.

Weidner, B. V., Nagel, J. K., & 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), 211–234.

Woodman, R. W., Sawyer, J. E., & Griffin, R. W. (1993). Toward a Theory of Organizational Creativity. *Academy of Management Review*, 18(2), 293–321.

Y

Yannou, B., Jankovic, M., Leroy, Y., & Kremer, O. (2013). Observations From Radical Innovation Projects Considering the Company Context. *Journal of Mechanical Design*, 135(2).

Z

Zeiler, W., Savanovic, P., & Quanjel, E. (2007). Design decision support for the conceptual phase of the design process. *IASDR'07, Conference by the International Association of Societies of Design Research*.

INDEX DES FIGURES

Figure 1. Structure du premier chapitre – contexte des travaux.....	12
Figure 2. Structure du deuxième chapitre – Etat de l’art	12
Figure 3. Structure du troisième chapitre - Expérimentations.	13
Figure 4. Structure du troisième chapitre - Originalité, contributions, limites et perspectives des travaux.....	14
Figure 5. Structure du cinquième chapitre - Conclusion générale et perspectives de recherche	14
Figure 6. Richesse de la biodiversité française. « Quels leviers de développement & quelles perspectives pour la France ? » – Restitution de la journée de travail France Stratégie- Ceebios & Myceco	20
Figure 7. Positionnement de nos travaux de thèse par rapport aux missions de Ceebios.....	23
Figure 8. Positionnement de nos travaux de thèse par rapport aux pôles de Ceebios.	24
Figure 9. Rosace représentant les axes, les thèmes de recherche et les domaines d’activités poursuivis par le LCPI.....	28
Figure 10. Cycle de l’approche recherche action (D’après Roy & Prévost ,2013).....	32
Figure 11. Approche de « Recherche-action » déployée pour nos travaux.	32
Figure 12. Approche biology push.....	40
Figure 13. Approche technology-pull	41
Figure 14. Le processus biomimétique problem-driven unifié (Fayemi et al., 2017).	43
Figure 15. Le Biomiméticien (Graeff, 2020).	52
Figure 16. Modèle macro du processus de conception proposé par Cross (Cross, 2000).	56
Figure 17. Le modèle Double-Diamant (Design Council, 2006).	57
Figure 18. Modélisation du processus de conception amont (design), alternance des phases de divergence, convergence, matérialisation (Carole Bouchard, 2010).....	58
Figure 19. Modèle co-evolutif du processus de conception d’après Dorst (Dorst & Cross, 2001).....	59
Figure 20. Modèle du processus de conception proposé par Yannou (Yannou et al., 2013).....	60
Figure 21. Circulation entre les espaces C et K d’après (Hatchuel & Weil, 2003).....	60
Figure 22. Genèse du système cognitif (Bila-Deroussy, 2015).	72
Figure 23. Modèle général d’un cycle de re-représentations (Oxman, 1997).	73
Figure 24. Liens entre les problématiques (initiale et ciblée) et les hypothèses.....	80
Figure 25. Liens entre les problématiques (initiale et ciblée), les hypothèses et nos quatre expérimentations.....	83
Figure 26. Composition des équipes de l’expérimentation étudiante	85
Figure 27. Protocole de l’expérimentation 1.	86
Figure 28. Formalisation des concepts (expérimentation étudiante, photo de l’atelier 3).....	87
Figure 29. Exemples de fiches concepts de l’expérimentation étudiante	88
Figure 30. Phases de l’expérimentation industrielle menée chez L’Oréal	94
Figure 31. Périodes, années, participants et livrables de l’expérimentation industrielle menée chez L’Oréal	96
Figure 32. Formalisation des étapes du processus biomimétique empirique industriel menée chez L’Oréal.....	99
Figure 33. Comparaison entre le processus empirique de la biomimétique et le processus unifié de la biomimétique axé sur les problèmes.....	100
Figure 34. Identification des stratégies développées par la nature (K3) (a) et concepts projecteurs sur « Objet(s) inspiré(s) par des surfaces et des sécrétions aux interfaces « (CP2) (b).	102
Figure 35. Session de brainstorming à travers une cartographie et un ensemble de cartes de modèles biologiques inspirants (Ces images sont délibérément brouillées pour des raisons de confidentialité, © Big Bang Project).	104
Figure 36. Synthèse de la modélisation du raisonnement de conception du projet industriel analysé.....	105
Figure 37. Actions de transfert de connaissances.	107
Figure 38. Développement et premières recommandations méthodologiques du processus biomimétique problem-driven unifié.....	110

Figure 39. Questions sur les axes du processus biomimétique unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017).....	120
Figure 40. Questions sur les sémantiques associées au processus unifié (modifiée de Fayemi et al., 2017).	121
Figure 41. Axes du Processus Interdisciplinaire de Conception Biomimétique (TPIB).	128
Figure 42. Formalisation des étapes du Processus Interdisciplinaire de Conception Biomimétique (TPIB).	130
Figure 43. Le processus interdisciplinaire de conception biomimétique (TPIB).	131
Figure 44. Proposition méthodologique prescriptive 1.	139
Figure 45. Proposition méthodologique prescriptive 2.	139
Figure 46. Modèle théorique prescriptif, étape 1, sous-étape A.	140
Figure 47. Modèle théorique prescriptif, étape 1, sous-étape B	141
Figure 48. Modèle théorique prescriptif, étape 1.	142
Figure 49. Modélisation C-K issues des travaux de (Vourc'h et al., 2018).	143
Figure 50. Modélisation du raisonnement de conception de la bouilloire « Nautile ».	147
Figure 51. Intégration opérationnelle des designers dans le cadre de la conception biomimétique	163
Figure 52. Dialogue entre les « Designers généralistes » et les experts.	163
Figure 53 Répartition moyenne du temps (en pourcentage) à consacrer aux étapes du processus de conception biomi- métique problem-driven unifié.....	165
Figure 54. Résumé graphique de l'apport de la nouvelle phase « Opportunités biologiques ».	167
Figure 55. Résumé graphique du modèle théorique prescriptif de pilotage des projets en conception biomimétique	169
Figure 56. Résumé graphique des apports du processus TPIB	170
Figure 57. Synthèse des travaux de thèse	179

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1. Outils de conception biomimétique	45-46
Tableau 2. Synthèse sur les axes de recherche sur la biomimétique.....	48
Tableau 3 Méthodes intuitives et outils associés (Bila Deroussy, 2015).	69
Tableau 4. Méthodes systématiques et outils associés (Bila Deroussy, 2015).....	70
Tableau 5. Nombre d'idées générés par les groupes avec ou sans designers (partie gauche) et évaluation de la contextua- lisation des concepts par les experts de la conception biomimétique (partie droite).	89
Tableau 6. Evaluation de l'originalité (partie gauche) et de la faisabilité (partie droite) par les experts en conception biomimétique	89
Tableau 7. Implication des auteurs durant l'expérimentation 3	115
Tableau 8. Professionnels interrogés durant l'expérimentation 3.....	116
Tableau 9. Composition de l'échantillon d'industriel participant à l'expérimentation collaborative 2.....	118
Tableau 10. Scénarios critiques extraits de l'AMDEC.	124
Tableau 11. Résultats de l'analyse du cadre temporel de l'expérimentation collaborative 2.....	126
Tableau 12. Comparaison des trois processus sur leur aspect visuel (n=32).	132
Tableau 13. Comparaison de la perception de la logique des axes (n=32).	133
Tableau 14. Évolution des sémantiques des étapes à la suite de la phase d'évaluation.....	133
Tableau 15. Comparaison de la capacité du processus à détecter les risques et à corriger les erreurs.	134
Tableau 16. Comparaison de l'acceptabilité finale des processus.....	134
Tableau 17. Poches de connaissances issues de la bouilloire « Nautile ».	146
Tableau 18. Synthèse des contributions scientifiques, industrielles et pédagogique des travaux de thèse	160



ANNEXES

Annexe 1 : Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

Annexe 2 : Questionnaire interviews des experts designers
(Expérimentation 3)

Annexe 3 : Questionnaire d'évaluation comparative des
processus (Expérimentation 3)

Annexe 4 : Tableau complet des poches de connaissances
issues de la bouilloire « Nautile » (Expérimentation 4)

Annexe 5 : Interview complète de Guillian Graves, co-
auteurs de la bouilloire « Nautile »

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

Organisation, rôles et interactions

Groupe : ...

Equipe :

-
-
-
-

Vue d'ensemble :

A large rectangular area defined by a dotted border, intended for a comprehensive overview or diagram of the workshop organization.

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 1 - Analyse

Groupe : ...

A. Définissez en quelques phrases la problématique :

B. Formulez sous forme de question :
ex: Comment pourrions-nous ...

C. Quels sont les critères d'acceptabilité :

D. Définissez un cahier des charges idéal :

E. Définissez des sous problématiques, et choisissez un challenge technique :

F. Listez les connaissances / les champs d'expertises dont vous avez besoin :

1/8

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 1 - Analyse

Groupe : ...

G. Mots clés / Fonctions clés liés au challenge technique (Fonctions à mettre en oeuvre pour arriver à la situation souhaitable) :

H. Analogie(s) biologique(s) de la problématique :
ex: Comment le vivant ...



2/8

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 2 - Exploration

Groupe : ...

I. Définir l(es) environnement(s) naturel(s) qui se rapproche de l'environnement de mon challenge technique :

J. Exploration du vivant, identifiez les modèles biologiques d'intérêt :

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 2 - Exploration		Groupe : ...
IDENTIFIER Modèles biologiques / Organes / Ecosystème ...	ABSTRAIRE Principes / Fonctionnements / Stratégies ...	CONTEXTUALISER Situations / Contextes ...

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 2 - Exploration					Groupe : ...
Mécanismes					
Environnement					
Fonctions					
Modèles biologiques					
Famille taxonomique	Plantes	Arthropodes	Reptiles	Oiseaux	Mammifères

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 2 - Exploration		Groupe : ...	
Modèle biologique :			
	Challenge technique		Modèle biologique
Environnements			
Fonctions			
Spécification			
Critères de performance			
Modèle biologique :			
	Challenge technique		Modèle biologique
Environnements			
Fonctions			
Spécifications			
Critères de performance			
V: pareil / =: Similaire / X: Différent			

ANNEXE 1 - Fiches supports ateliers (Expérimentation 1)

PHASE 3 - Mise en contexte		Groupe : ...
IDEE N°: ...		
Organisme(s):	Principe(s):	Piste:
Description générale:		
Vue d'ensemble:		
Avantage(s):	Inconvénient(s):	
Innovation :	Innovation :	
<input type="checkbox"/> Rupture <input type="checkbox"/> Incrémentale	<input type="checkbox"/> Low-tech <input type="checkbox"/> High-tech	
		8/8

ANNEXE 2 - Questionnaire interviews des experts designers (Expérimentation 3)

FICHE INFORMATION PROFIL

Formation :

Poste actuel :

INTERVIEW

1. Temps d'analyse du processus unifié (1-2min)
2. Remise dans un contexte : « Vous êtes dans une équipe de conception et un client vient vous demander de résoudre un problème en utilisant la biomimétique. »
3. Décrire avec vos mots quelles sont selon vous les attentes à chacune des étapes.
4. Décrire la logique globale du processus, la forme en 8 les flèches, comment vous l'analysez ?
5. Pouvez-vous à présent plus précisément me décrire les étapes 1,2 et 3 en déterminant des sous-étapes pratiques et en définissant les termes « abstraction » et « transposition ».
6. Pouvez-vous lister un ensemble d'éléments que tu peux tirer du processus, les aspects positifs ?
7. Pouvez-vous identifier quelques points faibles ? Des informations manquantes pour que son utilisation soit possible ?

RETRANSCRIPTION

.....

ANNEXE 3 - Questionnaire d'évaluation comparative des processus (Expérimentation 3)

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

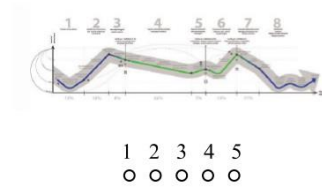
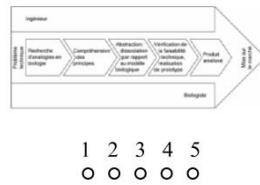
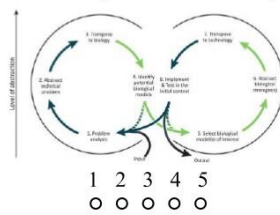
Avez-vous déjà suivi l'un des processus présenté :

Oui Non

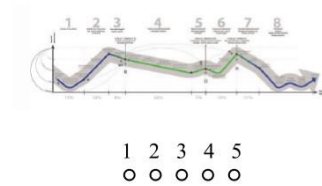
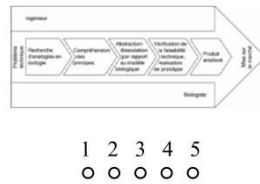
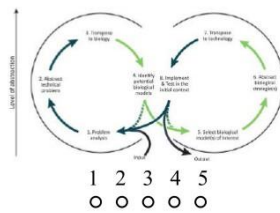
Si oui lequel :

1 Perception générale, ergonomie et logique de construction

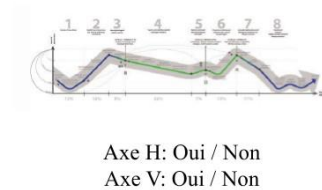
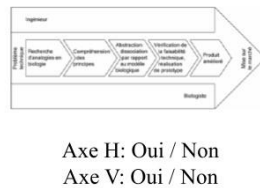
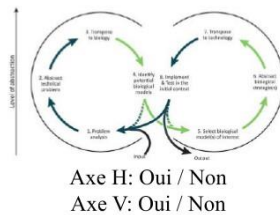
Je trouve le processus attractif (1(Peu attractif) -5 (très attractif))



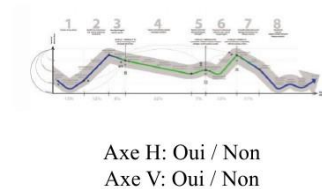
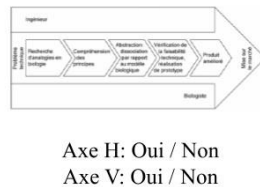
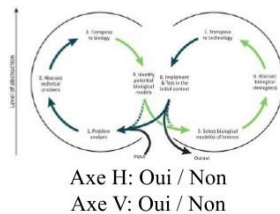
Je peux utiliser le processus tel quel dans un futur projet (1(Non, pas du tout) -5 (Oui, facilement))



Je comprends la logique des axes structurants le processus (entourer la réponse de votre choix)

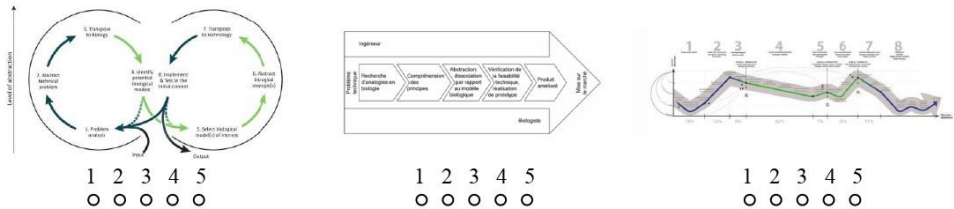


Je comprends la sémantique des axes structurants le processus (entourer la réponse de votre choix)



ANNEXE 3 - Questionnaire d'évaluation comparative des processus (Expérimentation 3)

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

- 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 clés 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: Incarner les stratégies biologiques très abstraites dans des concepts
- E8: Mettre en œuvre et tester

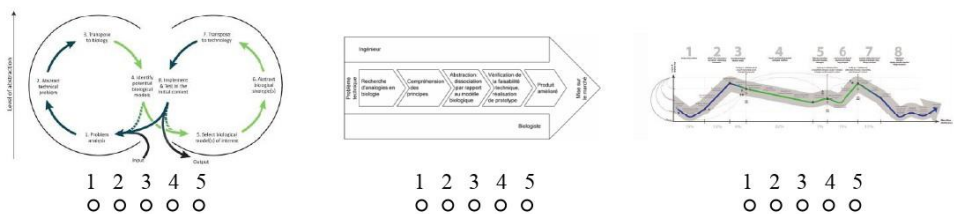
1 2 3 4 5
○ ○ ○ ○ ○

1 2 3 4 5
○ ○ ○ ○ ○

1 2 3 4 5
○ ○ ○ ○ ○

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))



ANNEXE 3 - Questionnaire d'évaluation comparative des processus (Expérimentation 3)

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))

1 2 3 4 5
○ ○ ○ ○ ○

1 2 3 4 5
○ ○ ○ ○ ○

1 2 3 4 5
○ ○ ○ ○ ○

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 4 - Tableau complet des poches de connaissances issues de la bouilloire « Nautilé » (Expérimentation 4)

Poches de connaissances	Parties prenantes potentielles
Réseau trophique, ensemble de chaînes alimentaires, relations alimentaires entre organismes	Chercheur en écologie
Objet(s) qui se nourrit des sources locales d'énergie (exemple : chaleur émise par un radiateur), interactions entre des objets de l'habitat : transmissions de flux (matière, énergie)	Spécialiste des flux dans l'habitat
Matériaux biosourcés - ressources locales	Ingénieur en matériaux biosourcés Organisme/spécialiste des matériaux locaux
Objets générateurs d'énergie	Spécialiste des énergies (ex : EDF, GDF, RTE...)
Analyse du cycle de vie ; décomposition des objets pour revenir à son origine	Biologiste Spécialiste de l'ACV Eco-concepteur/trice
Bio-utilisation, question d'éthique rattaché à la bio-utilisation, vie artificielle, statut moral des êtres vivants	Expert, chercheur en Ethique
Multiplication cellulaire, mutation, mort cellulaire	Spécialiste de biologie cellulaire
Usage des objets, dissection des usages, usage à l'échelle du temps	Psychologue Anthropologue Design UX
L'approche Cradle to cradle	Spécialistes de l'approche Cradle to cradle (ex : l'architecte William Mc Donough et le chimiste Michael Braungart)
Procédé de conception d'organismes vivants ; création de génome ; synthèse cellulaire programmation de génome de A à Z	Chercheur en biologie synthétique
Biomimétisme - Notion de durabilité – écoresponsable : utilisation des ressources locales, Modèle bottom-up	Spécialiste en biomimétisme (ex : CEEBIOS)
Le projet biosynthétique axé sur le Do it Yourself de la Paillasse	Responsable de la Paillasse
Les principes d'autorégulation	Chercheur en Biologie cellulaire
Micro-organismes type Bacillus Pasteurii transforment le sable en roche	Chercheur spécialiste Bacillus Pasteurii
Le jeu vidéo Mine Craft	Spécialiste du Jeu vidéo

ANNEXE 4 - Tableau complet des poches de connaissances issues de la bouilloire « Nautilé » (Expérimentation 4)

Création cellulaire et logiciels de créations de chimères	Spécialiste en logiciel de création
Façon de communiquer des systèmes vivants, apoptose et signal entre cellules, notion de communication interne et externe, langage inter objets par le biologique, signal entre cellules (survie, croissance, division, mort), apoptose comme démantèlement des structures cellulaires, apoptose comme système de contrôle.	Entomologistes Biologiste cellulaire Spécialiste en Neurosciences Linguiste Ethnologue
Récupération de déchets pour transformation	Spécialiste en Upcycling
Notion de biobrique, nano assemblage	Spécialiste du nano assemblage
Origami moléculaire et construction par origami des objets	Spécialiste de l'origami Professeur de mathématiques
Fabrication du verre	Ex : Responsable de chez Saint Gobain
La « Biomimicry taxonomy »	Interlocuteur de chez Biomimicry institute
Matériel biologique niveau atomique, moléculaire et supra-moléculaire	Chimiste Spécialiste de la Biologie cellulaire
Petit électroménager, critères d'une bouilloire (poids, température, volume, isolation thermique)	Concepteur/designer dans une agence de design de produits ménagés Physicien mécanique des fluides Spécialiste de la thermodynamique
Températures pour du thé, du café, ...	Torréfacteur et Spécialiste du thé
Vibration chez les insectes	Entomologiste
Paramètre de mise sur le marché, Business model	Responsable marketing, benchmark, expert du business model
Plantes chauffantes	Botaniste
Biogaz, algocarburant	Spécialiste du NREL
Ours polaire et oiseaux	Biologiste spécialisé (MNHN)
Raréfaction des ressources	Géographe
Nautilé et ses 4 cavités, Tortues ...	Spécialiste de la Biologie marine
Cuisson solaire	Historien
Fabrication de la bouilloire (ex : impression 3D céramique)	Ingénieur pré-industrialisation

ANNEXE 5 - Interview complète²⁴ de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q1: *Quels sont les principaux freins et leviers à prendre en compte dans votre projet ?*

Guillian Graves (GG): Je travaillais déjà dans Design et Sciences où on parlait du principe qu'un designer ne pouvait pas travailler dans le champ scientifique sans scientifique, ce qui paraît être du bon sens, mais, qui ce qui ne l'est pas, quand on regarde la structuration des entreprises ou des centres de recherche et encore moins il y a 8-9 ans. Le premier levier a donc été la rencontre de Michka Melo rendue possible grâce à Nicolas HENCHOZ, Directeur de l'EPFL et ECAL Lab, qui fait la passerelle entre les recherches menées au centre de l'école polytechnique fédérale de Lausanne et l'ECAL qui est l'école d'Art Cantonale de Lausanne, pour se dire on a besoin de construire une entité qui puisse faire la transition, la passerelle entre les sciences, les techniques et la société. Pour cela il faut favoriser la transition, la transmission de technologie et de savoir-faire entre design et sciences. C'est donc Nicolas HENCHOZ qui a permis de faire le lien avec Micka.

Premier verrou : quand tu es designer ou scientifique, tu ne sais pas, parce que tu ne connais pas le monde qui est en face de toi, ni ses codes, ni sa structure, tu ne sais pas identifier les compétences et la personne dont tu vas avoir besoin. Avoir une personne ou un outil qui puisse te permettre d'identifier les besoins dans une structure plus ou moins grosse. Là Nicolas a fait ce travail. Les freins souvent sont l'opacité, les murs qui séparent les différentes entités et disciplines.

Q2: *Et tu penses que cela se retrouve dans tous les milieux ?*

GG : Oui on retrouve ce problème dans tous les milieux. En effet, inversement quand le scientifique va vouloir développer et imaginer une innovation, il ne va pas savoir à qui il doit s'adresser et du coup devoir chercher ; on est donc dans le même cas de figure.

Guillian nous raconte qu'ils ont dû lever plusieurs verrous. Ils en discutaient souvent avec Michka, ils ne parlent pas le même langage, pas le même vocabulaire, pas la même définition des choses, du coup cela peut mener à des grosses confusions, qu'ils peuvent ne pas détecter tout de suite, ils n'ont pas les mêmes outils, pas les mêmes méthodologies, pas les mêmes finalités de problèmes, pas les mêmes notions d'éthique, pas la même temporalité de projet. Un designer travaille à l'échelle de mois voire d'années de travail, un scientifique va travailler sur un sujet de recherche 3 ans, 5 ans, 15 ans, sa vie entière ... On est sur des temporalités radicalement différentes et à un moment donné il faut aussi être en phase et approcher une question commune au bon moment, et quand il y a des choses qui prennent beaucoup de temps, cela peut rallonger le processus de développement d'une innovation, par exemple.

Pour lever ce problème il faut acculturer les gens aux disciplines des autres, cela se travaille, il faut concevoir une méthodologie commune, créer des outils communs, créer un lexique commun, des notions d'éthique qui soient partagées... Cela peut se faire pour différents projets, mais cela veut dire que cela doit être outillé, il faut que cela soit aussi appuyé. Il faut donc avoir des soutiens pour construire des passerelles entre différents départements et qui en plus nécessitent d'avoir des outils spécifiques. Tout cela prend du temps à construire et coûte et peut se faire si c'est soutenu politiquement, au sein d'une entité, que cela soit une société ou un laboratoire, financièrement aussi. D'autre part, cela peut s'apprendre aussi pendant les études à collaborer. Cela fait d'ailleurs l'objet d'enseignements pluridisciplinaires, pour apprendre à collaborer entre plusieurs disciplines et à manager des projets qui vont faire appel à différentes disciplines issues de différents départements.

²⁴ Interview retranscrite par Anne-Sophie Rössler

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q3 : *Au sein du projet bouilloire, comment avez-vous réussi avec Micka à dépasser ces difficultés de langage, de méthodes... ?*

GG : Guillian, dans son analyse sur cette époque, nous fait part du constat qu'ils ont eu la chance d'avoir le temps et l'espace pour regarder ce qu'ils étaient en train de faire, et du coup pour donner un espace et un temps pour identifier les verrous et pouvoir passer outre : construction d'un lexique, terminologie, première visualisation de la méthodologie qu'ils étaient en train de mettre en place.

« On avance sur des problématiques, en prenant du temps pour apporter une réponse sur un produit ou nouveau service, mais on a toujours un espace à côté qui nous permet d'outiller cette avancée dans le projet tout au long ». Ils ont conçu en amont une méthodologie dans les grandes lignes et certains outils qu'ils ont voulu éprouver en cours de projet et voir à construire des choses nouvelles pour aider à avancer justement, car ils ont eu conscience justement de certains verrous.

Q4 : *... tout en essayant toujours de maintenir cette observation de ce que tu fais ?*

GG : En permanence.

Q5 : *... Est-ce un temps de pause ?*

GG : En fait c'est une posture, il y a le temps, mais aussi la posture de se dire : « je dois avoir le réflexe de quand je le fais, de regarder ce que je fais. » Du coup je réfléchis à la question qui est posée et en même temps je me regarde le faire pour dire « comment est-ce que je le fais » ? N'y a-t-il pas des choses qui pourraient être améliorées ou outillées. Ce n'est pas quelque chose qui est écrit, mais c'est une posture ; C'est cognitif et tout se fait en même temps.

Q6 : *Est-ce que vous l'avez fait en interne entre vous, ou est-ce qu'il y a eu un dialogue avec des personnes externes pour avoir un nouveau regard ?*

GG : Nous avons eu quelques interactions, au final on en a eu à l'époque bien moins qu'on en a aujourd'hui. Aujourd'hui sur une question donnée on va aller voir 10-15 personnes, c'est un réflexe du coup d'aller prendre l'information dans plein d'endroits différents. A l'époque on avait moins ce réflexe-là.

Guillian nous raconte que la première personne qu'ils ont rencontrée était Gauthier Chapelle, qui les a reçus plusieurs heures pour discuter du projet et pour également leur donner des conseils méthodologiques. Gauthier Chapelle est ingénieur agronomie et docteur en biologie. La deuxième personne était Suren Erkman, Directeur du laboratoire d'écologie industrielle à l'université de Lausanne, le pape de l'écologie industrielle. Ce dernier est sur des sujets de la conception systémique d'écosystèmes industriels et développe un programme de recherche à l'interface entre sciences naturelle et sciences humaines dans la perspective de l'écologie industrielle. Il avait un parcours lettres et sciences : biologie. On se rend compte que c'est aujourd'hui plus efficace de croiser les disciplines.

Enfin, Alain Cadix, qui est très dans les méthodes d'innovation l'a aussi aidé.

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Les échanges avec ces personnes-là étaient ponctuels, et se sont faits tout au long de la première partie du projet. Pendant la partie développement du projet, ils ont aussi rencontré des gens qui étaient plutôt orientés business pour voir un peu que business model ils pouvaient créer autour de cet objet-là, comment on pourrait le développer.

Q7: *On en arrive à l'autre question : pourquoi l'objet n'est-il pas sur le marché aujourd'hui ?*

GG : C'est à la fois lié à une question d'argent et à une question de temps, notamment sur le fait que nous avons parié sur de l'impression 3D céramique, qui permettait justement de produire finement des structures internes pour optimiser de la gestion de flux de chaleur et au final ce genre de chose-là ne s'est jamais vraiment développé ou elle s'est développée, mais de façon très très experte. Aujourd'hui on en trouve beaucoup à Limoges, mais ce sont des gens qui ont de superbes machines destinées à la base à des prothèses dentaire ou encore pour tout le corps en céramique Ce sont donc des choses très précises. Les machines sont donc très chères. Ces procédés n'ont pas eu un développement qui a permis d'abaisser les coûts de production et de produire la bouilloire telle qu'elle est dans les images que l'on peut voir. Elle coûte 1000 euros en coût de production, ce qui est énorme.

Après ils ont eu une cinquantaine de propositions pour la commercialiser ; des acteurs plutôt du luxe, vu l'esthétique de l'objet, qui découle de choses fonctionnelles. Une des grandes marques de luxe française leur disait qu'ils la vendraient à 2000 euros. La volonté qui était cachée derrière la conception de cet objet-là était de faire chuter l'impact environnemental pour faire la démonstration de la méthodologie qu'ils étaient en train de mettre en place. Mais en développant ce produit dans un cadre de produit de luxe l'abaissement de l'impact généré à partir de cela serait quasi inexistant et toucherait peu de monde. Si on repense la conception, on peut être en mesure de faire chuter un petit peu la production. Il vaut mieux l'adresser à 99,9% de la population, du coup toucher plus de monde et avoir un réel impact. Le pari qu'ils ont fait (mais Guillian n'est pas sûr que ce fût une bonne stratégie) était de dire non à ces acteurs et de repenser le produit pour faire chuter les prix. Il avait pris le temps de le retravailler un petit peu pour appliquer une technique de moulage, qui permettait de descendre drastiquement les prix, après il fallait du temps de développement qu'il n'avait plus. C'est donc toujours dans le placard, malgré le fait qu'ils aient eu de belles propositions. Le projet n'a finalement pas abouti pour cause de temps aussi.

Q8: *En vision rétro analyse du projet, est-ce que tu penses que cela aurait pu être prévu en amont du projet si oui grâce à quoi ?*

GG : Oui en intégrant le profil justement de quelqu'un qui a connaissance de ces enjeux développement préindustriel, industriel et business. Quelque chose qui nous était complètement inconnu.

Q9: *Matériaux également ?*

GG : Matériaux ça va encore, je pense que les blocages n'ont pas reposé sur les matériaux ou la connaissance des procédés de production.

Guillian nous explique qu'ils se sont trompés sur le pari du développement de l'impression 3D céramique.

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Après si on avait eu les gens spécialisés dans la pré industrialisation, industrialisation, des ingénieurs process, des gens qui connaissent le parc industriel et ses développements à venir, ils auraient su que c'était un mauvais pari. En discutant avec des personnes de l'ESCP sur les business model, je pense aussi que nous n'aurions peut-être pas dû fermer la porte au luxe, que nous avons été trop réfractaires en écartant ce marché. Nous aurions pu avoir un financement pour sortir une première gamme - haut de gamme qui aurait permis alors de payer la recherche et développement sur des gammes beaucoup moins chères en termes de production et du coup en termes de prix de vente pour rendre cela accessible. Il y a des produits qui peuvent sortir très chers, qui sont là pour donner une vision, mais en même temps permet peut-être une R&D pour sortir des produits à moindre coût pour toucher plus de monde.

On a eu une mauvaise stratégie parce qu'on avait un à-priori sur le marché du luxe... Il y a de très belles choses qui en sortent mais souvent ce n'est pas le milieu le plus éthique et le plus responsable, mais il peut servir pour pouvoir développer des choses, servir de tremplin.

Q10: *Est-ce que tu aurais aimé rencontrer des personnes pour ton business model dès le début du projet ?*

GG : Je ne pense pas qu'il faut les mettre dès le début, mais en tout cas largement avant la fin. Il faut s'affranchir de ces contraintes là en amont, sinon cela bride. C'est bien de dialoguer avec eux, mais il ne faut pas que ce soit un élément contraignant, sinon tu vas te fermer.

Q11: *A quel moment donc faut-il qu'ils interviennent ?*

GG : La façon dont on travaille : on a une problématique, on va extraire les fonctions que l'on a besoin de remplir, interroger le vivant, on va imaginer tout un tas d'idées avant que cela devienne des vrais concepts. On va évaluer ces idées avec des grilles d'évaluation avec ce qui est performance environnementale (très polluant, insoutenable ...), donc un critère de facteur environnemental, un critère plutôt d'usage, un critère d'acceptabilité, un critère de maturité (est-ce une piste plutôt à court, moyen ou long terme ?) qui rentre en compte dans la sélection des idées qu'on va pousser en concepts derrière. Je pense que cela peut-être un critère à rajouter, est-ce que le business model que l'on peut construire autour de cette idée-là est existant ou viable.

Q12: *Cette grille d'évaluation des concepts, elle évolue en fonction de tes projets ? Est-ce à ce moment-là que tu intégrerais, pas forcément des outils, mais une personne qui va avoir des connaissances pour ce business model, soit comme tu le disais des ingénieurs pré-industrialisation ?*

GG : Oui ces personnes, qui vont pouvoir commencer à se projeter et ré-évaluer ces idées. Là c'est le premier endroit où on a besoin d'intégrer tout cela. Et une fois qu'on a ces concepts, on commence à avoir les premiers objets un peu ficelés, les plans... là on aura beaucoup plus d'éléments pour évaluer ces concepts-là, la question du business model doit être intégrée absolument à cet endroit-là, comme la question des procédés de production matériaux, au même titre que l'on conçoit les scénarios d'usage.

Q13: *Une fois que vous aviez fait les plans, vous avez rencontré les personnes du business model ?*

GG : oui, mais trop tard du coup.

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q14: *Il faut qu'ils restent à cet endroit-là, mais il faut aussi qu'ils interviennent plus tôt ?*

GG : Oui, car ils peuvent aider à guider justement dans l'évaluation. L'évaluation permet de sélectionner certaines des idées. Si on n'a pas l'ensemble des critères, on va peut-être sélectionner quelque chose qui est à côté. Et si on avait eu des critères, économiques, commerciaux ou process en plus, on n'aurait peut-être pas fait les choses de cette manière.

Q15: *Tu ne penses pas que cela t'aurait trop bridé ? Ce n'est peut-être pas forcément la même échelle de questions ?*

GG : Non parce qu'au début cela reste un indicateur. On peut aussi après retravailler les pistes si on a vraiment l'intuition qu'une piste est bonne, mais que le score, point de vue business, n'est pas terrible. Du coup on peut le retravailler un peu.

Q16: *du coup on peut même hybrider les concepts en se disant celui-ci il nous intéresse, mais ... ?*

GG : Oui d'ailleurs c'est ainsi que cela fonctionne, ce n'est jamais une seule idée qui est poursuivie après le passage au crible.

Q17: *Est-ce que dans le projet vous aviez d'autres profils pour lesquels, après coup, vous vous êtes dit que vous auriez dû les faire intervenir ?*

GG : Les manques reposaient, pour moi, sur la question business et la question d'ingénierie de pré-industrialisation pour le développement. Michka, comme il est bio-ingénieur, il a un regard bio, mais c'est très large, car il s'intéresse à plein de choses, mais pareil, ce n'est pas une question de personne, autant que de compétences, Michka a un regard très transverse sur pas mal de champs scientifiques et de champs d'ingénierie et donc c'est très très riche.

Q17: *Et vous avez rencontré les différents spécialistes en biologie ?*

GG: En biologie, c'était Michka et quand il avait des questions il avait son réseau, notamment des gens dans le département des sciences et technologies du vivant de l'EPFL, qui ont aidé, mais en tout cas Michka allait les voir.

Q18: *Pour sélectionner ces personnes-là, dès lors que vous identifiez un principe qui vous intéresse, pour le comprendre plus finement, c'est à ce moment-là que Michka allait trouver le spécialiste ?*

GG: Oui

Q19: *Nous avons vu qu'il y avait pas mal de workshop, invitations à des brainstorming ?*

GG : Pour générer le maximum d'idées, nous avons organisé pas mal de workshop sur l'ENSCI et sur l'ensemble du projet une quarantaine de personnes de profil designer ont participé/contribué sur ces workshop-là.

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q20: *Vous leur donniez le cahier des charges de la bouilloire et après c'était à eux d'agir ?*

GG : Oui on disait on a étudié tel ou tel organisme capable de faire cela, du coup qu'est-ce qu'on peut imaginer faire ?

Q21: *Quand le cahier de laboratoire s'arrête vous aviez sélectionné le nautille et l'ours, mais pas encore les autres. Le cahier s'est arrêté en mars et après ?*

GG : La présentation finale a eu lieu en octobre, novembre. On a pas mal avancé entre mars et novembre, mais je ne me souviens plus pourquoi on s'était arrêté de documenter les choses. Ce cahier de laboratoire nous a vraiment appris beaucoup de choses l'un sur l'autre et sur nous-même. L'avantage c'est qu'on n'était pas convaincu que cela fonctionne. En 2011 c'était le début du biomimétisme, il n'y avait pas grand-chose en France sur le sujet et il y avait un livre sur le sujet. Au final, cela nous a beaucoup aidé. Aujourd'hui on aurait été « parasités », pas dans le mauvais sens du terme, par pas mal de méthodes, d'outils, d'écoles différentes, de littérature et du coup on a eu la chance d'évoluer dans un domaine relativement vierge, ce qui a fait qu'on avait envie de construire un truc ; ce qui nous a permis de nous remettre en question. Aujourd'hui ce serait beaucoup plus difficile.

Q22: *Ce carnet de recherche est un peu la matérialisation de ce regard sur le travail qui est fait, qui aujourd'hui se fait cognitivement ?*

GG : Oui c'est devenu un réflexe.

Q23: *si on essayait de faire le C-K ? Il nous faudrait le « storytelling » de la bouilloire : quel était le sujet de départ et comment avez-vous avancé ? Quel était le concept de départ ?*

GG : Le vrai projet était une méthodologie, plutôt que la bouilloire. La bouilloire était un objet test pour éprouver la méthodologie. Il fallait plutôt un objet prétexte, qui puisse faire état de plusieurs problématiques. La bouilloire nous semblait être un objet candidat parfait, car derrière il y a la question de l'énergie, de la production, de sa gestion, la question des matériaux, car à l'époque les bouilloires étaient faites en plastique et il y a eu beaucoup de scandales car elles contenaient tout un tas de d'éléments toxiques, comme le bisphénol A qui était libéré dans l'eau, ou dans l'air. Tout ce qui était conception définitive. J'avais des copains qui travaillaient chez XXX, ils disaient qu'ils concevaient des objets, de manière qu'ils ne puissent pas être désassemblés, car c'est moins cher à faire, mais il y a aussi une notion derrière de non réparabilité, ce qui devient criminel aujourd'hui. En gros il y avait derrière cette notion de fin de vie qui était importante et la question que l'on fait chauffer, l'eau qui devient une ressource de plus en plus rare dont il faut limiter la consommation. Si on arrive à imaginer quelque chose dans lequel la source d'énergie est bien gérée, dans lequel on limite la consommation d'eau, on change le matériau. Ce sont des principes pour lesquels on pourrait être amenés à changer facilement d'échelle. Si on passe de la bouilloire au ballon d'eau chaude, puis du ballon d'eau chaude à l'eau chaude... Notre idée était celle-ci. On est donc parti de l'usage et nous avons regardé un peu comment une bouilloire fonctionne, on s'est rendu compte qu'il y avait plusieurs traits dans l'usage sur lesquels nous allions pouvoir potentiellement jouer grâce au biomimétisme, en isolant notamment 4 travers à l'usage :

Source d'énergie à optimiser → travailler sur les flux d'énergie

Volume trop important → à Contrôler

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Chauffage systématique à 100° → contrôle de la température, car la température optimale pour pas mal de boissons est 70 ou 80°C.

Réchauffer l'eau plusieurs fois → idée de mieux isoler pour éviter consommation d'énergie.

De ces travers d'usage on est arrivé à un cahier des charges pour aller interroger le vivant, pour aller voir comment le vivant règle ces 4 grandes fonctions :

- Isoler,
- Contrôler une température,
- Contrôler un volume,
- Optimiser les flux d'énergie.

Nous avons exploré le vivant, identifié tout un tas de stratégies qui ont été développées par différents organismes qui permettaient justement de remplir chacune de ces fonctions indépendamment les unes des autres et avons commencé à imaginer séparément autour de ces 4 grandes thématiques, des idées qu'on a ensuite cherché à évaluer selon les critères de maturité, faisabilité, usages et facteurs environnementaux et qu'on a ensuite hybridé pour en arriver à cette bouilloire qu'on a travaillé plus finement après en 3D avec des outils beaucoup plus complexes pour ensuite avoir besoin de la réévaluer derrière à la fin.

Q24: *Donc il y a bien l'idée de briques de construction dont il a été question plusieurs fois dans le cahier ?*

GG: Dans l'objet ?

Q: *oui.*

GG: Finalement l'objet on peut le casser. La céramique se casse et vu que cela se casse on peut donc séparer les éléments. Tout est imprimé en 3D. On a les 4 sphères, avec le volume optimal pour délimiter les déperditions de chaleur, imbriquées les unes dans les autres, que l'on va pouvoir remplir en faisant piloter le bouchon, pour décider si on veut une tasse, deux, trois ou quatre. Tout est imprimé en céramique. Pareil pour les canaux et la cheminée centrale, c'est une même conception. Cependant, on a quelques parties métalliques qui permettent de chauffer, car cela fonctionne par électricité et par combustion. On s'était posé la question de la séparabilité et on s'est rendu compte qu'il suffit de casser la céramique pour récupérer d'un côté le métal et de l'autre côté la céramique. La céramique peut se ressouder rapidement. Et du coup le métal aussi, on n'a pas besoin de chercher plus loin que cela.

Q25: *Une fois que vous avez trouvé des données biologiques, c'est là que vous avez fait des concepts plus des workshops ?*

GG: Oui

Q26: *Combien de concepts ont été sortis du coup ?*

GG: Environ une centaine.

Q27: *Ces concepts sont alors passés par le filtre de l'évaluation et du cahier des charges et c'est à ce moment-là que vous êtes allés voir les interlocuteurs des matériaux et du business model ?*

GG: Non eux sont arrivés tout à la fin

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q28: *Il y a donc eu l'évaluation, puis la modélisation et ensuite ...*

GG: oui c'est cela.

Q29: *C'est donc tout à la fin que sont arrivées les personnes du business ?*

GG: oui, c'est pour cela que c'était beaucoup beaucoup trop tard.

Q30: *Avez-vous vu beaucoup de personnes du business ?*

GG: Les personnes pour les business model c'était 2 personnes de l'ESCP et après on a rencontré des gens de boîtes qui n'étaient pas censés monter un business model autre que le leur. Ils avaient plutôt vocation à tirer les choses vers chez eux.

Q31: *Et l'éthique, le fait que cela doit être accessible pour tout le monde, était-ce quelque chose que vous aviez mis dans votre cahier des charges ?*

GG: Non et c'est ce qu'on aurait dû faire. Ce sont des choses qui se retrouvent sur certains projets. La question est « est-ce qu'on le met tout de suite dans le cahier des charges ou on le met plutôt dans la grille d'évaluation ? Je ne sais pas. J'ai peur que cela bride pour pas grand-chose.

On avait parié sur le développement d'une technologie et sa démocratisation et si celle-ci ne se démocratisait pas tu perds le pari. Raté.

Q32: *C'est bizarre que cette technologie de l'impression en 3D de céramique n'ait pas évolué.*

GG: Oui je n'ai pas compris, car cela peut être utilisé dans beaucoup de champs d'application et on peut faire des choses assez géniales.

Q33: *La céramique de base ne coûte pas cher ?*

GG: Non. Cela ne coûte absolument rien. A la base ce n'est pas mauvais pour l'environnement, ce sont des composés simples, non toxiques et puis là tu n'as pas forcément besoin de cuisson.

Q34: *Ce qui est étonnant c'est que ça a pris dans 2 domaines, dans le domaine de précision médicale et dans le domaine de l'art, mais pas entre 2.*

GG: Tu commences à en avoir un peu dans les Fablab et cela coûte 200 euros pour une bonne. Cependant, tu n'as pas le degré de fiabilité qu'il faut pour quelque chose qui contient de l'eau. Nous avons été confrontés à des problèmes de fuite. Du coup la question de la résolution est super importante et la question du Food grade, car nous on est application alimentaire et cela change tout.

Q35: *Et du coup quelqu'un de la Qualité et du réglementaire aurait dû intervenir plus tôt aussi peut-être.*

GG: Pour moi cela serait intervenu au même moment dans l'évaluation, ce sont des questions de faisabilité, donc en gros est-ce faisable techniquement mais aussi est-ce que ça répond aux normes en vigueur dans tel ou tel environnement ? Pour moi ce serait au même moment de l'évaluation des grilles de faisabilité.

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautille », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q36: *Donc c'est au moment de l'évaluation des possibilités. Donc là cela aurait été bien d'avoir quelqu'un du réglementaire ?*

GG : Souvent les gens qui sont dans la pré industrialisation, les ingénieurs connaissent bien cela, car ils connaissent les normes avec lesquelles ils bossent. En général ce sont des choses qui sont faites par des bureaux d'étude, par des ingénieurs qui te disent : là il faut être « IPV 6 pour ... »

Q37: *Vous avez eu ces personnes-là ?*

GG : Oui oui. Après ce sont des questions techniques qui peuvent être résolues par des changements. C'est à intégrer et donc on a besoin de cela pour le mettre sur le marché. Dans les biotech on est sur quelque chose de plus costaud.

Au cours de la suite de notre entretien nous avons expliqué à Guillian nos propositions et l'objectif qui est de se dire que en faisant cette cartographie mentale ou posée, c'est ce que propose la théorie CK où on fait une map des connaissances existantes avant le projet et c'est assez intéressant, car si tu fais cette première map, tu peux dire à ce moment-là : « je vais avoir besoin d'un juriste », tu avances dans ton projet, mais comme tu gardes toujours en fond ce C-K où tu mets tes connaissances, tu mets l'avancée de ton projet, à un moment donné tu vas pouvoir te dire : « Tien, là je me rends compte que je vais avoir besoin d'un spécialiste de telle espèce parce que c'est ressorti en priorité. Nous c'était un peu comme cela qu'on présente les choses, d'utiliser le support C-K comme canevas, ce n'est pas réinventer une méthodologie, mais plutôt utiliser le canevas CK ou KCP pour piloter le processus de Pierre-Emmanuel FAYEMI.

Nous montrons à Guillian l'extraction des connaissances et le C-K faits à partir de son cahier de laboratoire. Le concept de départ correspond bien à ce qu'ils voyaient. Proposer un « artefact », c'est proposer « quelque chose de matériel ou immatériel », donc un service ou un produit.

Q38: *Est-ce que notre hypothèse te paraît cohérente ?*

GG : Je pense de plus en plus que la sélection des parties prenantes est un garant. Cela peut être le garant d'un échec, si on met trop de monde autour de la table et s'il n'y a pas les bons outils..., clairement cela peut facilement plomber un projet, mais cela peut-être aussi un bon critère de succès. A mon avis il faut l'intégrer finement, mais en mettant tout un tas de conditions.

Q39: *C'est une question de personnes de « qui » tu mets autour de la table et « quand » tu mets autour de latable. En effet si tu mets certaines personnes dès le début tu risques de contraindre et de tout fermer et de faire que le projet ne puisse aboutir dans le chemin souhaité. On commence à faire face dans la méthode biomimétique a beaucoup de process, a beaucoup d'outils et à un moment le côté humain n'est pas forcément pris en compte.*

GG : C'est très important. Michka est un alien dans les bio-ingénieurs. Un bio-ingénieur d'habitude va te faire des modélisations de comportements de micro-organismes qu'ils ont appris par cœur dans leurs études. Tandis que Michka est quelqu'un qui réfléchit. Il est plus dans la pensée que dans l'ingénierie. Ce projet avec un autre bio-ingénieur, on n'aurait pas forcément pu le faire.

ANNEXE 5 - Interview complète de Guillian Graves, co-auteurs de la bouilloire « Nautile », par Anneline LETARD et Anne-Sophie RÖSSLER le 12 septembre 2019

Q40 : *Donc pour toi tu penses que le noyau dur doit quand même être fait avec des profils hybrides ?*

GG : Il faut une ouverture. C'est une question de posture. Il faut des gens capables de se mettre dans une posture constructive, savoir se mettre en arrière, amener les briques quand il faut, savoir aussi se retenir et ne pas oublier tout cela.

Q41 : *Le C-K c'était un peu ça. Là il nous aurait fallu quelques années de plus, notre recherche pourrait faire l'objet d'un sujet de thèse en soi pour pouvoir modéliser cela finement, mais l'objectif était de se dire que dans les C-K que l'on peut trouver dans la littérature, il y a la première étape des premières poches de connaissances qui vont ressortir et tu vas par exemple te dire « là je vais avoir besoin du philosophe et du juriste autour de la table. ». Quand tu vas passer à l'étape 2 tu vas te rendre compte que le philosophe va être mis en retrait. Là tu te dis « je n'ai plus besoin de ses connaissances, elles restent là, mais je n'en ai plus besoin, mais cependant, j'ai le biologiste qui va ressortir. » C'est donc notre hypothèse que de se dire que ce canevas associé à un profil capable d'identifier si la poche de connaissances est importante ou non, va nous permettre de nous dire : ok à ce moment-là j'ai cette personne là et à ce moment-là je n'ai plus besoin de cette personne-là. Cette approche est importante, car souvent dans la conception c'est tout l'un ou tout l'autre, soit il y a juste un noyau dur les personnes travaillent dans leur coin et le produit n'est pas forcément efficient à la fin parce qu'il nous manque des personnes et de l'autre côté on va être 15 autour de la table, on va rester et faire tout le produit ensemble et là on se rend compte que cela n'avance pas et que le produit ne sera pas efficient. C'est un ajustement entre 2, entre chaque étape du projet.*

GG : Il y a quelque chose qui est intéressant de dire aussi, c'est que mobiliser toutes ces poches de connaissances c'est bien, mais cela dépend du contexte économique dans lequel tu es, car il faut des moyens. Du coup tu es dans des expertises qui coûtent cher. Cela dépend de la posture dans laquelle tu es. Est-ce une commande ou un projet de recherche que tu as monté ? Déjà cela te met dans deux rapports différents avec les experts qu'ont donné ces poches de connaissances là. Comme tu disais ce n'est plus forcément toi qui es en posture de décider si c'est une commande et même si tu l'es, et même si tu n'as pas de rapport de hiérarchie, tu en as quand même un, car il y a le rapport de financeur et financé, ce qui fait que tu as nettement moins de liberté pour pouvoir agir sur ces chose-là. Dans ce processus cela joue sur énormément de choses et on ne le dit jamais, car justement ce sont des choses qui ne se disent pas, car c'est compliqué.

Du coup c'est peut-être important de se dire, à quel moment, selon mon budget, je vais pouvoir le faire intervenir, cela va reconfigurer justement...

Anneline LETARD

Contribution au développement du cadre méthodologique de la conception biomimétique : intégration de l'expertise des profils formés au Design pour favoriser le déploiement de l'approche dans les pratiques de conception et d'innovation

Résumé

Bien que prometteuses et connaissant une évolution croissante, la mise en œuvre de la conception biomimétique et de l'approche du biomimétisme reste complexe et rencontre de nombreux freins méthodologiques et pratiques. Dans ce contexte, cette thèse de doctorat explore comment l'intégration de designers dans les équipes de conception, permet de favoriser le déploiement de la conception biomimétique. Cet axe de recherche nous a permis de définir le rôle des designers dans le cadre de projet en conception biomimétique notamment pour faciliter le transfert de connaissances et la génération de concepts inspirés du vivant. Pour favoriser leur intégration et pour structurer les apports globaux du Design pour la conception biomimétique, des préconisations méthodologiques et organisationnelles sont proposées. De plus, un ensemble de modifications sur le processus de conception biomimétique problem-driven unifié ont été formalisées afin qu'il s'adapte aux pratiques de conception et d'innovation. Les résultats de ces recherches nous permettent d'enrichir conjointement le champ scientifique et le champ industriel de la conception biomimétique. Ces travaux ouvrent des perspectives de recherche à court, moyen et long terme pour développer les recherches concernant le rôle et les impacts des designers et du Design en conception biomimétique, sur le développement du cadre méthodologique et enfin sur la bascule entre la biomimétique et le biomimétisme.

Mots-clés : conception bio-inspiré, biomimétique, processus de conception, interdisciplinarité, management des connaissances

Abstract

Although promising and undergoing a growing evolution, the implementation of the biomimetic design and biomimicry approach remains complex and faces many methodological and practical obstacles. In this context, this thesis explores how the integration of designers in design teams can promote the deployment of biomimetics. This research axis allowed us to define the role of designers within the framework of biomimetic design projects, in particular to facilitate the knowledge transfer and the generation of concepts inspired by biological models. To facilitate their integration and to structure the global contributions of Design for biomimetic design, methodological and organizational recommendations are proposed. Moreover, a set of modifications on the unified problem-driven process of biomimetics are formalized in order to adapt it to design and innovation practices. The results of this research allow us to jointly enrich the scientific and industrial fields of biomimetic design. This work opens short, medium and long term research perspectives to develop research on the role and impacts of designers and Design in biomimetic design, on the development of the methodological framework and finally on the switch from biomimetics to biomimicry.

Keywords : bio-inspired design, biomimetics, design process, interdisciplinarity, knowledge management