



Le biomimétisme au-delà de l'inspiration formelle : Recommandations aux designers de produits pour une intégration du biomimétisme dans le processus de développement de produits

Mémoire

Sergio Junio Da Silva

Maîtrise en design - avec mémoire
Maître ès arts (M.A.)

Québec, Canada

© Sergio Junio Da Silva, 2021

Le biomimétisme au-delà de l'inspiration formelle
Recommandations aux designers de produits pour une intégration du
biomimétisme dans le processus de développement de produits

Mémoire

Sérgio da Silva

Sous la direction de :

Claudia Déméné, directrice de recherche

Résumé

Le designer de produits est un acteur incontournable de l'opérationnalisation du développement durable (Ahmad *et al.*, 2018a). De par son activité de conception et de fabrication, il a dorénavant une responsabilité éthique de mettre sur le marché des produits à moindre impact environnemental, social et éthique. Néanmoins, les approches dont il dispose actuellement pour concevoir des produits à moindre impact sur l'environnement présentent certaines limites et ne permettent pas de répondre, de manière globale et systémique, aux enjeux du développement durable (Van Den Abeele, 2011; Cucuzzella, 2011). L'écoconception, la principale approche enseignée et utilisée en design de produits, qui vise la diminution des impacts environnementaux des produits tout au long de leur cycle de vie, propose des solutions fonctionnant généralement sur le court et moyen termes (Cucuzzella, 2011), en tenant moins compte des enjeux sociaux, éthiques et économiques, pourtant intrinsèques au développement durable. Le biomimétisme, qui s'inspire de la nature pour résoudre des problèmes humains (Benyus, 2019), représente une démarche pertinente à explorer afin d'aider le designer de produits à répondre de façon plus systémique aux enjeux du développement durable.

Dans ce contexte, cette étude a pour objectif principal d'analyser le potentiel d'intégration du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit. La recherche descriptive qualitative fut le devis de recherche utilisé dans cette étude pour répondre à l'objectif de l'étude. Dans un premier temps, trois entrevues semi-dirigées menées auprès d'experts réputés en biomimétisme, une en France, une au Brésil et une au Canada ont été réalisées afin de comprendre leur vision de l'utilisation du biomimétisme et les limites qu'ils perçoivent. Dans un deuxième temps, une analyse critique des termes biomimétisme, biomimétique, bionique et conception bio-inspirée, principaux termes utilisés dans la littérature pour qualifier une démarche d'inspiration de la nature, a été réalisée afin de proposer des pistes de recommandations menant à une nouvelle définition plus complète et complexe du biomimétisme. Dans un troisième temps, à partir des données issues des entrevues combinées à une brève analyse des principales méthodes en biomimétisme dans la conception de produits, des pistes menant à l'identification d'étapes exploratoires pour une nouvelle démarche méthodologique conceptuelle baptisée Bio-ADN sont présentées.

Mots-clés : Biomimétisme, design de produits, écoconception, développement durable.

Abstract

The product designer is a key player in the operationalization of sustainable development (Ahmad *et al.*, 2018a). Through its design and manufacturing activities, it now has an ethical responsibility to put on the market products with a lower environmental, social and ethical impact. Nevertheless, the approaches currently available to it to create products with a lower environmental impact have certain limitations and it doesn't allow it to respond, in a global and systemic way, to the challenges of sustainable development (Van Den Abeele, 2011; Cucuzzella, 2011). Ecodesign, the main approach taught and used in product design, which aims to reduce the environmental impacts of products throughout their life cycle offers solutions that generally work in the short and medium-term (Cucuzzella, 2011), taking less account of social, ethical and economic issues, which are intrinsic to sustainable development. Biomimicry, which draws its inspiration from nature to solve human problems (Benyus, 2019), represents a relevant approach to be explored in order to help product designers respond more systemically to the challenges of sustainable development.

In this context, the main objective of this study is to analyze the potential of integrating biomimicry in the product design process. A qualitative descriptive research design was used in this study to meet the objective of the study. Initially, three semi-directed interviews with renowned experts in biomimicry, one in France, one in Brazil and one in Canada were conducted in order to understand their vision of the use of biomimicry and the limits they perceive. In a second step, a critical analysis of the terms biomimicry, biomimetics, bionics and bio-inspired design, the main terms used in the literature to qualify an approach inspired by nature was carried out in order to propose recommendations leading to a new, more complete and complex definition of biomimicry. In a third step, based on the data from the interviews combined with a brief analysis of the main biomimicry methods used in product design, several avenues leading to the identification of exploratory steps for a new conceptual methodological approach called Bio-DNA are presented.

Keywords: Biomimicry, product design, ecodesign, sustainable development.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des acronymes.....	x
Lexique	xi
Remerciements.....	xix
Introduction générale	1
Chapitre 1 : État de lieux.....	6
1.1 La prise de conscience vers le développement durable.....	7
1.2 Le design de produits dans le contexte du développement durable	11
1.3 Les approches de conception/développement de produits s'inscrivant dans une démarche de développement durable	15
1.3.1 L'économie circulaire	17
1.3.2 L'écoconception	22
1.3.3 Le Cradle to cradle (C2C)	30
1.3.4 L'écologie industrielle.....	32
1.4 État des lieux de l'utilisation du biomimétisme dans les disciplines de l'aménagement et du génie	36
1.4.1 Le biomimétisme dans l'ingénierie	36
1.4.2 Le biomimétisme dans l'architecture	40
Conclusion.....	44
Chapitre 2 : Formulation de la problématique.....	45
2.1 L'homme et la métaphore de la nature.....	45
2.2 Le biomimétisme comme outil de recherche pluridisciplinaire.....	46
2.3 Les niveaux d'utilisation du biomimétisme	48
2.3.1 Les éléments composant le biomimétisme	50
2.4 Le potentiel d'innovation du biomimétisme.....	51
2.5 Le biomimétisme en design de produits	53
2.6 Le designer utilise habituellement le biomimétisme comme inspiration formelle.....	58
Conclusion.....	60

Chapitre 3 : Cadre théorique.....	61
3.1 La biologie et la technologie	61
3.2 La méthodologie Biotriz.....	63
3.3 L'opérationnalisation du biomimétisme dans le design de produits à partir de Biotriz.....	64
Conclusion.....	65
Chapitre 4 : Approche méthodologique	66
4.1 Question de recherche et objectifs	66
4.2 Stratégie de recherche	68
4.3 Outils de collecte, analyse et interprétation des données	69
4.3.1 Les entretiens semi-dirigés	69
4.3.2 Profil des experts	70
4.4 Les limites de l'approche méthodologique	74
4.4.1 Limites en lien avec la stratégie de recherche choisie	74
4.4.2 Limite en lien avec le thème étudié (biomimétisme)	75
4.4.3 Limites avec le guide d'entretien (Annexe 1)	75
Conclusion.....	75
Chapitre 5 : Présentation des résultats.....	76
5.1 Une redéfinition du biomimétisme : au-delà de l'outil de conception formelle de la nature	76
5.1.1 Un découplage avec la croissance économique	76
5.1.2 Un outil systémique : la nature, l'homme et le produit.....	79
5.1.3 Un outil de réflexion et d'introspection	81
5.1.4 De l'intelligence naturelle à l'intelligence artificielle.....	83
5.2 Vers une méthodologie du biomimétisme	85
5.3 Les limites pour la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel	89
5.3.1 La complexité d'imiter la nature	89
5.3.2 La problématique de l'organisation industrielle	90
5.3.3 Les contraintes financières	91
5.3.4 Un contexte culturel à apprivoiser.....	92
Conclusion.....	92
Chapitre 6 : Discussion générale.....	94
6.1 Implication des résultats pour la communauté scientifique	94
6.1.1 Vers une définition plus complète et complexe du biomimétisme.....	94
6.1.2 Proposition exploratoire d'une approche méthodologique en biomimétisme	99

6.1.3	Des pistes de recommandation pour soutenir le développement d'une approche méthodologique en biomimétisme	118
6.2	Implication des résultats pour la communauté du design (praticiens)	124
6.2.1	Une approche méthodologique à développer et à enseigner	124
6.2.2	Des pistes de recommandation pour lever certaines barrières à l'utilisation du biomimétisme	126
6.3	Limites des résultats de l'étude	129
6.4	Avenues de recherche	130
	Conclusion.....	131
	Conclusion générale	132
	Bibliographie	134
	Annexe 1 : Guide d'entretien	144
	Annexe 2 : Taxonomie du biomimétisme	146

Liste des figures

Figure 1 : Les étapes d'un processus d'écoconception	7
Figure 2 : Une représentation du développement durable.....	10
Figure 3 : L'évolution des principales approches s'inscrivant dans le développement durable	15
Figure 4 : La relation entre les approches s'inscrivant dans le développement durable.....	17
Figure 5 : L'économie linéaire.....	19
Figure 6 : L'économie circulaire	20
Figure 7 : La démarche d'écoconception.....	27
Figure 8 : Évaluation des enjeux de l'entreprise par rapport au développement durable	29
Figure 9 : Processus d'évaluation d'un produit	30
Figure 10 : Cycle de nutriment biologique et technique	32
Figure 11 : Le Kalundborg symbiosis.....	35
Figure 12 : La Bionic car, 2005	39
Figure 13 : Inspiration biomimétique dans le concept du TGV Shinkansen.....	40
Figure 14 : L'Eastgate Building et le système de ventilation des termitières	43
Figure 15 : Temps de la formation de la terre.....	47
Figure 16 : Les niveaux d'utilisation du biomimétisme.....	50
Figure 17 : Éléments essentiels du biomimétisme.....	51
Figure 18 : Les vagues de l'innovation depuis la première révolution industrielle	53
Figure 19 : Winehive.....	54
Figure 20 : Bouilloire Nautille.....	56
Figure 21 : Supernatural chair, 2005 – 2008.....	57
Figure 22 : Bone Chair, 1998.....	59
Figure 23 : Analyse comparative des différences fondamentales entre la technologie et la biologie dans la résolution de problèmes.....	62
Figure 24 : Biomimicry design spiral.....	105
Figure 25 : Intégration du biomimétisme avec le design thinking	106
Figure 26 : Le processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique [ISO/TC266, 2015b].....	107
Figure 27 : BioGen.....	108
Figure 28 : La pensée biomimétique.....	109
Figure 29 : Comparaison entre la méthode en design de produit et biomimétisme.....	110
Figure 30 : Les vues réductrice et holistique du biomimétisme	112
Figure 31 : Le double diamant	114
Figure 32 : Méthode conceptuelle Bio-ADN.....	117
Figure 33 : La philosophie du biomimétisme	123

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les implications de l'écoconception.....	25
Tableau 2 : Quelques domaines d'application du biomimétisme	38
Tableau 3 : Principaux thèmes discutés avec les professionnels en biomimétisme pendant les entretiens	70
Tableau 4 : Groupes sélectionnés appliquant une stratégie biomimétique.....	100
Tableau 5 : Problem-based (challenge to biology).....	101
Tableau 6 : Solution-based (biology to design).....	101
Tableau 7 : La présentation générale d'un processus biomimétique et les stratégies appliquées par les différents groupes utilisant l'approche problem-based.....	102
Tableau 8 : État de l'art méthodologique	103

Liste des acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADIQ	Association des designers industriels du Québec
ACV	Analyse du cycle de vie
C2C	<i>Cradle to Cradle</i>
CEEBIOS	Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis
CMED	Commission mondiale pour l'environnement et le développement
CNUCED	Conférence des Nations unies pour le commerce et le développement
CÉRUL	Comités d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université Laval
DRS	<i>Design Research Society</i>
ICSID	<i>International Council of Societies of Industrial Design</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
EDDEC	L'institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire
IISD	<i>International institute for sustainable development</i>
LDD	Loi sur le développement durable
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
ONU	Organisation des Nations unies
PIB	Produit intérieur brut
PNUE	Programme des nations unies pour l'environnement
R&D	Recherche et développement
TIC	Technologie de l'information et de la communication
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
WDO	<i>World Design Organization</i>
WEF	<i>World Economic Forum</i>
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>

Lexique¹

Approche écobénéfique

Approche issue du *Cradle to cradle* (voir la définition plus bas) dans laquelle les matériaux et les flux de matériaux sont conçus pour être bénéfiques pour l'environnement, notamment en les réintégrant dans le cycle de vie, sous la forme de sources biologiques ou de sources techniques (Mc Donough et Braungart, 2011).

Bio-inspiration

La bio-inspiration désigne de manière plus générale le fait de s'inspirer du monde vivant afin de résoudre des problèmes humains (Bœuf, 2014; Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016; Ricard, 2015).

Biomasse

Matière organique d'origine végétale et animale issues de trois sources principales : produits de la forêt, de l'agriculture, et la fraction biodégradable des déchets industriels ou ménagers (Hervé et Paul, 2013; Le Déaut, Courteau et Sido, 2016). Elle peut être distinguée entre biomasse sèche (p. ex. : bois) et biomasse humide (p. ex. : le fumier, les plantes, les déchets).

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 et du transfert et de l'application de ces modèles à la solution (ISO 18458 : 2015).

Biomimétisme

Discipline qui fait appel au transfert et à l'adaptation des principes et stratégies élaborées par les organismes vivants et les écosystèmes afin de produire des biens et des services de manière durable afin de rendre les sociétés humaines compatibles avec la

¹ Bien qu'issues de sources fiables, les définitions proposées dans ce lexique ont été adaptées par l'auteur dans le cadre du présent mémoire.

biosphère (Benyus, 1997).

Bionique

Discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques (ISO 18458 : 2015).

Biosphère

Totalité des écosystèmes terrestres, comprenant l'ensemble des organismes vivants et leurs milieux de vie, que ce soit dans la lithosphère (couche la plus superficielle de l'écorce terrestre), l'hydrosphère (les océans, le milieu aquatique) et l'atmosphère (bulle de gaz entourant la terre) (Actu-Environnement²).

BioTRIZ

Méthodologie pour l'innovation technologique basée sur la jonction de la méthode TRIZ (acronyme russe signifiant Theory of Inventive Problem Solving) et la méthode du biomimétisme (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014a).

Cradle to cradle

Approche de conception basée sur le fonctionnement des systèmes naturels dans laquelle l'étape finale du traitement d'un produit en fin de vie n'est pas l'élimination, mais le recyclage à l'infini : soit le produit retourne au sol sous la forme d'un nutriment biologique non toxique, soit il est réutilisé par l'industrie en tant que nutriment technique (Mc Donough et Braungart, 2011). Le cradle to cradle est basé sur les notions de *upcycle* et *downcycle*. Le *upcycle* est un processus de conversion de matériaux anciens ou mis au rebut en quelque chose d'utile avec l'objectif de réduire la consommation de nouvelles matières premières et la quantité de déchets créée (Mc Donough et Braungart, 2013). Le *downcycling*, à son tour, vise la création des matériaux de qualité inférieure à partir du recyclage, tels que le plastique et le papier recyclés (Braungart, 2016). Lorsque des plastiques sont recyclés, ils sont mélangés à d'autres différents plastiques pour produire un hybride de qualité inférieure, qui est ensuite transformé en quelque chose

² https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biosphere.php4

d'amorphe et bon marché, comme, par exemple, un banc de parc.

Complexité

Ce qui est complexe, ce qui n'est pas simple, ce qui n'est pas simplifiable. La complexité ne se réduit pas à des lois simples, à des causes simples, à l'ordre simple (Fortin, 2005).

Design thinking

Approche d'innovation basée sur l'utilisation d'outils et de méthodes propres aux designers de produits pour la résolution de problèmes (Cross, 2011). Elle s'appuie sur un processus de co-créativité impliquant des retours de l'utilisateur final à travers l'empathie.

Développement durable

Connu également sous le terme de développement soutenable (traduction littérale de l'anglais), le développement durable est une démarche de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Brundtland, 1987). Le développement durable s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement. Cette démarche peut être considérée comme un style de vie pour les consommateurs, un mode de gouvernance pour les politiques (ex. : Responsabilité environnementale et sociale) ainsi qu'un code éthique et déontologique pour les professionnels (ex. : designers).

Écoconception

Approche de conception d'un produit ou d'un service caractérisée par la prévention et la réduction des impacts environnementaux engendrés tout au long de son cycle de vie (Thibault et Leclerc, 2014).

Éco-efficacité

Capacité à produire des biens et des services de qualité et en quantité voulue en ayant pour finalité de réduire les atteintes à l'environnement à travers les notions d'équité, de cycle de vie et de la thermodynamique (lois physiques à la base des conditions du développement durable) (Mc Donough et Braungart, 2011).

Écologie industrielle

Domaine d'études et de gestion des systèmes de production industrielle organisés par rapprochement géographique visant la réduction de leurs effets négatifs sur l'environnement, tout en s'inspirant du fonctionnement des industries (symbiose ou métabolisme industriel) (Frosch et Gallopoulos, 1989). L'écologie industrielle s'inspire des cycles et des systèmes biologiques en vue de créer des systèmes non biologiques, tout en facilitant les flux de matériaux, d'énergie, d'information, de produits, etc., comme le propose le biomimétisme.

Économie circulaire

Système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en s'assurant du bien-être des individus (Aurez *et al.*, 2016).

Écoproduit

Produit qui génère moins d'impact sur l'environnement tout au long de son cycle de vie (extraction de matières premières, fabrication, transport, consommation et élimination) (Agence de la transition écologique (c), 2017).

Pensée systémique

Approche opposée à la pensée cartésienne qui considère un système dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique propre en privilégiant la globalité plutôt que la vision fragmentée et rationnelle (Durand, 2013; Fortin, 2005; Rosnay, 1977).

Permaculture

Cadre innovant systémique et global qui vise à concevoir des modes de vie durables (par exemple des habitats humains et des systèmes agricoles) en s'inspirant de l'écologie naturelle (biomimétisme) et de la tradition (AskNature³). La permaculture prend en considération la biodiversité de chaque écosystème, tout en objectivant une production agricole durable, économe en énergie, respectueuse des êtres vivants et de leurs relations

³ <https://asknature.org/idea/the-land-institute-permaculture/>

récioproques (p. ex. : La Ferme du Bec Hellouin⁴ en France et la Ferme des Quatre-Temps⁵ et le Jardin de la Grelinette⁶ au Québec (agriculture) (Taylor Aiken, 2017).

Produits

Les produits comprennent les objets, les services et les systèmes de produits — services.

Produit intérieur brut

Indicateur économique qui permet de mesurer la production économique intérieure réalisée par un pays. Le PIB représente la valeur totale de tous les biens et services générés dans un pays (État ou ville) dans une période donnée (année, mois, etc.) par les agents économiques résidant à l'intérieur de ce territoire (ménages, entreprises, administrations publiques, etc.), sans égard au caractère étranger ou non de la propriété des facteurs de production (Institut de la statistique du Québec).

Responsabilité sociale des entreprises

La Responsabilité sociale des Entreprises (RSE), aussi appelée Responsabilité sociétale des Entreprises, regroupe l'ensemble des pratiques mises en place par les entreprises dans le but de générer des effets sociaux, environnementaux et économiques de ses activités de façon responsable et conforme aux attentes du public (Banque de développement du Canada – BDC).

Symbiose industrielle

Stratégie de production s'inscrivant dans le contexte de l'économie circulaire (Aurez *et al.*, 2016). Cette stratégie est appliquée à un réseau industriel sur un territoire donné au sein duquel des partenaires (entreprises de service et industries, publiques ou privées) échangent des résidus, coproduits et/ou de l'énergie (Sauvé, Normandin et McDonald, 2016). La symbiose industrielle s'inspire des écosystèmes naturels dans le but de fabriquer leurs produits en boucle fermée, c'est-à-dire sans production de déchets ultimes (*Ibid.*).

⁴ <https://www.fermedubec.com/>

⁵ <http://www.fermequatretemps.com/>

⁶ <http://lagrelinette.com/>

TRIZ

Théorie développée par Guenrich Altshuller. Acronyme russe TRIZ de la théorie de résolution de problèmes innovants basée sur 39 paramètres de conception et 40 principes reconnus comme communs aux principales innovations (Terrier, Glaus et Raufflet, 2017). Ces paramètres et principes ont été définis à partir d'analyse de plusieurs centaines de milliers de brevets d'invention et des modèles descriptifs de développement des systèmes techniques dans les champs de connaissances, tels que l'ingénierie, la chimie, la physique et les mathématiques (*ibid.*).

À mes amours, Monique et Tom.

« L'homme ne trouvera jamais une invention plus belle,
plus simple ou plus directe que la nature, car dans ses
inventions rien ne manque et rien n'est excessif ».

Léonard de Vinci

« Il arrive toujours une heure où l'on n'a plus intérêt à chercher le nouveau sur les traces de l'ancien, où
l'esprit scientifique ne peut progresser qu'en créant des méthodes nouvelles ».

Gaston Bachelard

Remerciements

En premier lieu, j'aimerais témoigner toute la reconnaissance, le respect et l'admiration que j'ai à l'égard de ma directrice de recherche, Claudia Déméné, qui m'a accompagné et orienté tout au long de cette belle aventure qui m'a permis de connaître une évolution personnelle, professionnelle et académique. Tout d'abord, je la remercie pour son grand soutien, sa patience, sa sensibilité et sa grande disponibilité, car ce n'est pas du tout facile d'entreprendre une maîtrise dans une autre langue. Ensuite, je tiens à souligner son professionnalisme remarquable et sa passion inspirante pour l'enseignement et pour la recherche. Je suis vraiment ravi d'avoir côtoyé Claudia pendant ces années d'études à la fois difficiles et enrichissantes. Je la remercie pour la confiance toujours témoignée à mon égard et pour l'opportunité qu'elle m'a donnée de travailler au sein de ses projets de recherche.

En deuxième lieu, j'aimerais exprimer toute ma gratitude aux professionnels en biomimétisme qui ont été interviewés pendant cette recherche : Moana Lebel (Institut biomimétisme francophone, Montréal, Canada), Chloé Lequette (Enzyme & co et Biomimicry Europa, région d'Orléans, France) et Fred Gelli (Tátil design, Rio de Janeiro, Brésil). Je les remercie d'avoir consacré une partie de leur précieux temps rempli d'engagements professionnels aux entrevues. Leur contribution à travers leur partage d'expérience et leur passion envers le design et le biomimétisme ont été très enrichissantes pour le résultat de l'étude.

J'aimerais également remercier Michel de Blois de m'avoir aidé à découvrir le fascinant domaine de la pensée systémique et Guillaume Blum d'avoir encadré mon stage de recherche et de m'avoir donné l'opportunité de travailler dans l'organisation du Colloque Impression 3D et technologies émergentes dans le cadre du 84e du Congrès de l'Acfas. Je remercie aussi les Fonds d'enseignement et de recherche (FER) pour l'appui financier permettant ma participation au Sommet mondiale du design 2017.

Enfin, la réalisation de ce travail n'aurait pas pu être possible sans le soutien de ma famille. Tout d'abord, j'aimerais adresser un merci très spécial à mon épouse, Monique Sant'Ana, qui m'accompagne et qui croit toujours en moi depuis 17 ans. Son amour et appui inconditionnel ainsi que sa patience à écouter mes réflexions complexes et abstraites, ses corrections de textes et ses encouragements m'ont beaucoup aidé à relever ce défi. Je t'aime ! Ensuite, je me permets d'écrire quelques mots en portugais pour ma famille au Brésil. Aos meus pais Sérgio e Ângela, meus queridos irmãos, Rodrigo e Fernanda, e minha linda sobrinha Mariana, obrigado pelo amor e incentivo de sempre. Mesmo com a distância, vocês continuam sendo a minha base e inspiração para continuar sempre em frente. Amo vocês !

Finalement, ces remerciements ne seraient pas complets sans avoir une pensée pour les membres du jury, dont les commentaires participeront à l'amélioration de ce travail de recherche.

Introduction générale

Le designer de produits joue un rôle central dans l'atteinte des objectifs de développement durable puisque son travail vise à satisfaire ou améliorer la vie des individus. Vial (2015) souligne que « le design s'étend désormais au-delà du champ des objets et ne se concerne plus seulement leurs qualités formelles, mais les multiples facettes de leurs qualités » (p. 39), mais aussi « les procédés, services et des systèmes dans lequel ils [les produits] sont intégrés au cours de leur cycle de vie » (ICSID, 2012, cité dans Vial, 2015, p. 39). Le cycle de vie regroupe toutes les étapes de développement d'un produit, de l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie, en passant par son transport, sa fabrication, sa distribution et son utilisation (Thibault et Leclerc, 2014). En fait, le design « relie l'innovation, la technologie, la recherche, les entreprises et les clients pour apporter une valeur ajoutée et un avantage concurrentiel sur les plans économique, social et environnemental⁷ » (*World Design Organization* (WDO), 2015).

Bien que le terme « développement durable » soit de plus en plus critiqué dans la littérature parce qu'il se présenterait comme synonyme de croissance économique, il a été volontairement utilisé dans ce mémoire, car il reflète mieux la finalité de l'étude qui vise à outiller le designer de produits afin qu'il puisse concevoir des produits répondant mieux aux sphères environnementale, sociale et éthique du développement durable. Le terme « développement durable » est critiqué dans un contexte de crise environnementale, « soit en raison des dérives dont il fait parfois l'objet (p. ex. : pratiques d'éco-blanchiment ou *greenwashing*) ou en raison des multiples notions concurrentes qui prétendent l'avoir dépassé (p. ex. : la croissance verte, la décroissance, l'économie circulaire, l'anthropocène, l'effondrement, la collapsologie , etc.) » (Vial et Proulx, 2019, p. 7). Comme certains auteurs le défendent (Vial et Proulx, 2019), la notion de développement durable est toujours d'actualité puisqu'elle souligne le grand potentiel de transformation sociale et économique devant être atteint, tout en maintenant un équilibre avec l'environnement :

Le développement durable préfère mettre l'accent sur un développement qui ne se définit pas seulement par les seules forces et demandes du marché et de la consommation, mais qui vise une distribution plus équilibrée des ressources, des pouvoirs et des richesses dans le monde. Il s'agit donc d'un projet global qui valorise un modèle redistributif à portée sociale plutôt qu'une seule réponse capitaliste à un problème de croissance. Jusqu'à quel point les designers sont capables de relever ce défi complexe pour contribuer à une vraie transformation sociale et économique, voilà qui nécessite entre autres choses un renouvellement pédagogique majeur dans les écoles de design (Paixão-Barradas et Melles, 2019).

⁷ Définition ratifiée par (*The International Council of Societies of Industrial Design* (ICSID), 2015) (désormais *World Design Organization* (WDO)).

Ainsi, comme le rappellent Vial et Proulx (2019), le développement est une caractéristique inhérente et essentielle du vivant dans toutes ses dimensions : physique, intellectuelle, psychologique, sociale, technologique et économique. Le développement économique est une composante importante pour l'évolution de notre société dont l'enjeu principal est de trouver l'équilibre entre nos besoins de développement économique, d'une part, et la capacité de charge de nos écosystèmes, la disponibilité des ressources naturelles et les implications sociales, d'autre part.

L'opérationnalisation du développement durable se produit dans un contexte de plus en plus complexe, comme en témoigne le changement climatique qui se manifeste, dans différentes parties du monde, au travers d'événements climatiques extrêmes (p. ex. : inondations, incendies, tempêtes hivernales, ouragans) amenant les pays développés et surtout ceux en développement, plus démunis, à relever de multiples défis sur différents fronts (p. ex. : famine, sécheresse, perte de biodiversité). Cette complexité interpelle le designer de produits qui a dû faire évoluer sa pratique pour répondre à ces besoins environnementaux et sociétaux. Le designer de produits, en raison de ses valeurs éthiques et déontologiques⁸, a la responsabilité de concevoir des produits (objets, services et/ou systèmes de produits-services) qui intègrent « des critères écologiques, des aspects sociaux et des principes d'équité intergénérationnels et interculturels » (Thibault et Leclerc, 2014, p. 19). Cette responsabilité s'inscrit dans la finalité du développement durable qui, selon sa définition officielle et historique, doit permettre à la société actuelle de répondre à ses besoins, sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs (CMED, 1987). Les enjeux du développement durable ont conduit à la recherche d'alternatives globales, pensées de façon systémique, afin de répondre aux besoins des sociétés en pleine mutation.

La pensée systémique, avec son précepte de globalité, est une approche opposée au rationalisme classique, priorisant l'analyse par le réductionnisme (Durand, 2013). Selon Rosnay (1977), une approche systémique « considère un système dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique propre » (p. 109) où « le tout est plus que la somme des parties » (Fortin, 2005, p. 28). Plus spécifiquement, les interactions et les rétroactions entre les parties génèrent et enrichissent le tout. D'après Fortin (2005), il est impossible de réduire le tout en partie pour ensuite les analyser séparément, comme le propose la pensée rationaliste classique. La pensée systémique pourrait être utilisée comme une approche permettant de comprendre les interrelations et l'organisation entre tous les éléments (parties prenantes, aspects environnementaux, sociaux et économiques,

⁸ Ensemble des règles et des devoirs qui régissent la conduite de ceux qui exercent une profession (Association des designers industriels du Québec [ADIQ] et *International Council of societies of industrial design* [ICSID]).

etc.) composant les problématiques dans lesquelles les designers sont impliqués. La compréhension de ces éléments est extrêmement importante pour que les alternatives identifiées par le designer de produits soient créatives et/ou innovantes et surtout compatibles avec les trois sphères du développement durable : (i) économique ; (ii) sociale et (iii) environnementale.

Le design est un acte de conversion « de situations actuelles en des situations souhaitables » (Simon, 1969, cité dans De Blois, 2007, p. 54). En effet, la finalité du design (de produits) est de résoudre les problèmes des individus en améliorant, ou du moins en maintenant, l'habitabilité du monde dans toutes ses dimensions : physique, matérielle, psychologique, cognitive, émotionnelle, spirituelle, culturelle et symbolique (Findeli, 2010). Dans ce contexte, le designer de produits est un acteur essentiel pouvant jouer un rôle stratégique dans le dense processus de restructuration de la société contemporaine qui appelle à une forte « redirection écologique » (Collectif, 2019). Sa formation universitaire lui permet d'allier certains enjeux propres aux sciences pures, humaines et sociales au développement technologique et technique des procédés de fabrication/production et des matériaux. L'acte de design est, en même temps, social et critique, lorsque le designer de produits transforme un problème rencontré dans la société en projet de design (Vial, 2015). Par ailleurs, Montana-Hoyos (2010) souligne que l'enseignement du design industriel (ou du design de produits) doit être constamment redéfini afin de répondre aux nouveaux défis inhérents d'une société en constante évolution. Selon cet auteur, les problématiques engendrées par la production industrielle traditionnelle ne peuvent être résolues avec la même pensée et les mêmes outils qui les ont créées.

Les approches dont disposent actuellement les designers pour développer des produits, comme l'écoconception et le *cradle to Cradle*, présentent des limites (Van Den Abeele, 2011; Cucuzzella, 2011) et ne permettent pas de répondre pleinement, et de façon systémique, aux enjeux du développement durable. L'écoconception, approche la plus couramment utilisée en design de produits, considère principalement dans sa méthodologie les impacts environnementaux en proposant des solutions fonctionnant généralement sur le court et moyen terme (Cucuzzella, 2011), en tenant moins compte des enjeux sociaux, éthiques et économiques, pourtant intrinsèques au développement durable. Le *cradle to cradle* se concentre principalement sur les flux chimiques et biologiques des matériaux dans une perspective d'économie circulaire, tout en restant marginal en ce qui concerne l'évaluation approfondie des flux d'énergie (Toxopeus, De Koeijer et Meij, 2015).

Compte tenu de ces limites actuelles, d'autres d'approches, comme le biomimétisme, méritent qu'on s'y intéresse puisqu'elles ont le potentiel de soutenir le développement d'alternatives compatibles avec les trois sphères du développement durable. Le biomimétisme s'inspire de modèles et des structures issus des êtres

vivants dans l'optique de résoudre des problèmes humains (Benyus, 1997). Cette approche, plus globale que l'écoconception et le *cradle to cradle*, pourrait offrir des alternatives qui fonctionneraient sur le long terme et qui pourraient représenter pour le designer de produits une option pour opérationnaliser le développement durable et résoudre des problèmes complexes. Les disciplines de l'aménagement offrent un cadre d'expérimentation idéal et unique, puisqu'elles sont à l'origine de projets complexes (Kakangu, 2007), c'est-à-dire des projets où la collaboration entre les acteurs est cruciale pour le développement d'une vision holistique, elle-même indispensable pour répondre aux objectifs du développement durable (Waridel, 2017). En fait, la principale dimension proposée par le biomimétisme est justement la durabilité, qui peut être transposée de la nature aux solutions de design (Ricard, 2015) au travers de dispositifs, procédés et stratégies naturels (Fayemi, 2016). Selon P. Ricard (2015), le biomimétisme pourrait constituer un levier pour soutenir la mise en œuvre du développement durable, tout en limitant la consommation de matériaux, ressources naturelles et d'énergie. Terrier, Glaus et Raufflet (2017) soulignent que les processus et les matériaux naturels ne génèrent pas forcément de rejets toxiques, et respectent la capacité de charge des écosystèmes. En plus, la plupart des éléments d'un écosystème sont interconnectés sur une boucle fermée sur leur cycle de vie global (*Ibid.*).

Malgré le grand potentiel que représente l'approche du biomimétisme, elle comporte aussi quelques limites, principalement sur le plan méthodologique avec des conséquences sur son utilisation dans l'industrie (Fayemi *et al.*, 2013; Fayemi, 2016; Bogatyrev et Bogatyreva, 2015). À l'heure actuelle, il n'existe pas de méthodologie capable de garantir des résultats concernant le transfert des mécanismes biologiques vers les réalités non biologiques, telles que l'industrie et l'économie (Bogatyrev et Bogatyreva, 2015).

La complexité des problématiques actuelles en lien avec le changement climatique, la raréfaction des ressources naturelles, l'abondance des déchets, etc., nécessite une adaptation de la façon de travailler du designer de produits, de façon à l'outiller à relever les défis en lien avec le développement de produits économiquement viables, socialement équitables et qui s'inscrivent dans une perspective de développement durable. L'enrichissement de la boîte à outils du designer de produits, au-delà des outils habituels dont il dispose, *via* l'approche du biomimétisme, pourrait fournir une contribution significative au design de produits. C'est dans ce contexte que le présent projet de recherche vise à analyser le potentiel d'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit.

Le chapitre 1 offre un tour d'horizon des principaux enjeux entourant le développement durable ainsi que du rôle du designer de produits dans son opérationnalisation. Ensuite, une revue critique des principales approches actuellement utilisées par la profession, telles que l'écoconception, le *cradle to cradle*, l'écologie circulaire et

l'économie circulaire, est présentée. Le chapitre 2, qui se consacre au biomimétisme, contribue à l'ancrage théorique de la problématique en analysant, à partir d'une recension exhaustive des écrits, des exemples des projets issus de l'industrie et mettant en exergue la façon dont le biomimétisme est mis en œuvre. Cette analyse permet de présenter la question de recherche et les objectifs de l'étude dans ce deuxième chapitre. Le chapitre 3 expose l'approche méthodologique de nature qualitative et exploratoire, à travers les outils de collecte (analyse de textes clés dans la littérature, entrevues semi-dirigées) et d'analyse de données (transcription verbatim partielle), les limites méthodologiques et considérations éthiques, utilisées pour répondre à la question de recherche et aux objectifs de l'étude. Le profil des experts en biomimétisme qui ont été interviewés i) Moana Lebel, directrice et fondatrice de l'Institut de biomimétisme (Montréal, Canada) ; ii) Chloé Lequette cofondatrice du collectif de design Enzyme & Co et Chargée de mission du projet Ville biomimétique chez CEEBIOS (région d'Orléans, France) ; iii) Fred Gelli, cofondateur et directeur artistique de *Tátil Design de Idéias (Rio de Janeiro, Brésil)* sont également présentés dans le chapitre 3 ainsi que le guide d'entretien montrant les catégories et les questions abordées lors des entrevues. Puis, le chapitre 4 présente le cadre théorique de l'approche BIOTRIZ et met en perspective la relation entre la biologie et la technologie. Le chapitre 5 révèle les principaux résultats issus de l'analyse de la littérature et des entrevues menées auprès des professionnels spécialisés en biomimétisme. Enfin, le chapitre 6 contribuant à l'avancement des connaissances souligne l'implication des résultats pour la communauté académique et celle des designers praticiens en proposant des pistes de recommandations en vue de soutenir l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits.

Chapitre 1 : État de lieux

La naissance et la théorisation du développement durable ont révélé les problèmes liés à la dégradation de l'environnement et la nécessité de préserver les ressources naturelles pour les générations futures. En 1971, Papanek a été un des premiers designers industriels à critiquer sa profession dans son ouvrage intitulé *Design for the Real World : Human Ecology and Social Change*⁹. Il explique leur responsabilité morale et sociale par rapport aux problèmes de pollution. Cet auteur, considéré comme le père de l'écoconception ou l'un de ses précurseurs, propose un « design écologiquement responsable » comme une façon de réduire les impacts environnementaux et sociaux causés par la pollution, résultat de la « consommation ostentatoire » des usagers. Alors que les défis sociétaux inhérents au développement durable deviennent de plus en plus complexes, les concepteurs (p. ex. : designers de produits et industriel, ingénieurs, architectes, etc.) sont invités à combiner les connaissances de différentes sources afin d'innover durablement (Appio *et al.*, 2017).

Le designer de produits dispose d'un répertoire d'approches dont l'écoconception demeure la plus enseignée et utilisée actuellement puisqu'elle s'intègre harmonieusement au processus traditionnel de développement de produits tout en permettant de diminuer les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un produit (Caya *et al.*, 2012). La Figure 1, ci-dessous, illustre les principales étapes d'un processus d'écoconception selon Caya *et al.* (2012, p. 601). Les trois premières étapes sont représentées dans un entonnoir, car elles correspondent à un processus de raffinement visant à faire évoluer les idées, souvent floues et indéterminées, vers des concepts préliminaires et détaillés qui mèneront à l'identification d'une solution. L'étape des idées est plus générale et abstraite, car c'est le moment où les différentes opportunités en lien avec les contraintes du projet sont identifiées. Dans l'étape d'étude préliminaire, les concepts préliminaires identifiés à partir des idées sont raffinés et un seul concept est détaillé à la prochaine étape visant à proposer une solution. D'après ces auteurs, le moment opportun pour mettre en œuvre une démarche d'écoconception demeure le plus en amont possible du processus de développement de produits (idéalement dès le début). Les enjeux d'écoconception ont plus de chances de représenter de véritables leviers à l'innovation s'ils sont identifiés dès les phases initiales du projet.

⁹ Traduit en français en 1974 sous le titre de *Design pour un monde réel : Écologie humaine et changement social*.

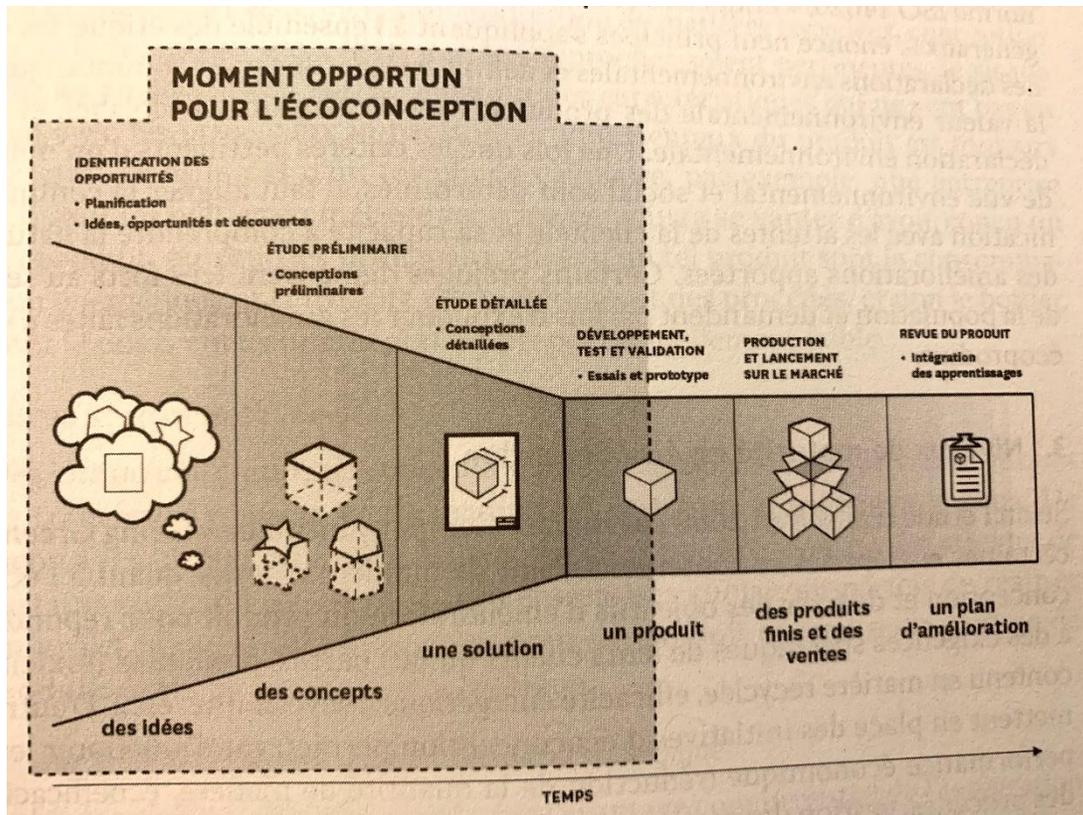


Figure 1 : Les étapes d'un processus d'écoconception
 Source : Caya *et al.* (2012, p. 601)

Ce premier chapitre commencera par la présentation du contexte historique entourant la prise de conscience ayant mené à la définition du développement durable ainsi que le rôle du designer de produits dans ce contexte. Puis, l'évolution du concept et la relation entre ses trois sphères (i) économique (ii) environnementale et (iii) sociale seront brièvement analysées. Finalement, un retour critique des approches, telles que l'économie circulaire, l'écoconception, le *cradle to cradle* et l'écologie industrielle, enseignées et utilisées en design de produits, sera offert.

1.1 La prise de conscience vers le développement durable

Les premières réflexions autour des conséquences négatives que les activités humaines génèrent sur les écosystèmes ne sont pas récentes et certaines remontent aux années 1960, notamment avec la biologiste Rachel Carson qui établit un lien entre les pesticides utilisés dans l'agriculture et les préjudices causés aux espèces animales (oiseaux) et à la santé humaine. Puis, dans les années 1970, la publication du rapport Meadows, « Halte à la croissance ! » commandé par le Club de Rome¹⁰, permettra d'attirer l'attention sur la prise

¹⁰ <https://www.clubofrome.org>

de conscience au sujet de la limitation de la capacité de charge des écosystèmes ainsi que de la finitude des ressources mondiales. En effet, la décennie 1970, marquée par les questions énergétiques liées à la crise du pétrole, a connu l'émergence des premières stratégies de mise en œuvre d'un développement socio-économique équitable et durable. Ces stratégies ont été proposées dans le rapport de Founex (1971), la déclaration de Stockholm (1972) ainsi que dans la déclaration de Cocoyoc (1974) (Sachs, 1997), un colloque organisé dans la ville de Cocoyoc au Mexique par la Conférence des Nations unies pour le commerce et le développement et le Programme des Nations unies pour l'environnement visant à soutenir le développement plus soutenable de modèles d'utilisation des ressources (The declaration of Cocoyoc, 1975). En 1972, le premier concept visant la conciliation entre l'économie, la société et l'environnement a été présenté au Sommet de Stockholm sous le terme évocateur « d'écodéveloppement » (Figuère *et al.*, 2018; Belem et Revéret, 2014). Ce concept visait à concilier le développement économique aux contraintes sociales et environnementales, tout en considérant l'interdépendance de ces trois dimensions. C'est ainsi que sont apparues les premières bases théoriques de construction du concept du « développement durable »¹¹ qui se sont graduellement développées et affinées à partir des années 1970 (Belem et Revéret, 2014).

Le terme de développement durable est apparu, quant à lui, explicitement pour la première fois en 1980 avec la publication intitulée *Stratégie mondiale de la conservation : la conservation des ressources vivantes au service du développement durable*¹² (MDDELCC)¹³. Ce document, écrit par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), proposait des stratégies pour la conservation des ressources vivantes au service du développement durable, à partir d'un cadre théorique et pratique de mesures de conservation (Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources, 1980). Quelques années plus tard, le terme « développement durable » a été popularisé dans le monde entier grâce à la publication du rapport de la Commission mondiale sur l'environnement (Côté, 2006 ; Belem et Revéret, 2014) et le développement de l'Organisation des Nations Unies en 1987. Plus connu sous le nom de rapport Brundtland en référence au nom de la présidente de la commission, M^{me} Gro Harlem Brundtland, ce rapport considérait le développement durable comme une stratégie visant à répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Le rapport Brundtland a souligné certaines limites dans la notion du développement durable. Premièrement, il y a des limites concernant les techniques (p. ex. : processus industriel, traitement des déchets solides et liquides, contrôle de la pollution, matériaux utilisés dans le développement de produits, etc.) utilisées par la production industrielle. Des techniques plus propres et des systèmes de production plus sûrs, équitables et qui tiennent compte des impacts environnementaux pourraient constituer un levier pour la mise en

¹¹ L'expression « développement durable » est la traduction du terme en anglais « *sustainable development* ».

¹² <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/WCS-004-Fr.pdf>

¹³ <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/definition.htm>

œuvre du développement durable. Deuxièmement, l'organisation sociale (p. ex. : adoption d'un mode de vie qui respecte les limites écologiques de la planète, croissance démographique en harmonie avec le potentiel productif de l'écosystème, etc.) peut être considérée comme une barrière au développement durable qui exige une orientation des relations sociales, à l'échelle tant régionale qu'internationale, pour la croissance durable à long terme. En effet, la démographie et la croissance économique (flux de produits et de capitaux) doivent évoluer en harmonie avec la capacité des écosystèmes à (re-) générer leurs ressources. Finalement, il y a une limite dans la capacité de la biosphère à supporter les effets de l'activité humaine. Ce contexte exige des choix politiques visant le bien-être collectif, tout en changeant la manière dont les ressources sont exploitées ainsi que l'orientation du développement technique et des décisions institutionnelles.

Dans cette optique, le développement durable s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte les dimensions des activités humaines. La relation entre les trois dimensions du développement durable (économique, sociale et environnementale) crée de nouvelles opportunités pour le designer de produits. Le premier s'inscrit dans un contexte « viable » créé à partir de la relation des sphères environnementale et économique. Un produit viable est en équilibre avec les intérêts économiques, intrinsèques aux produits industriels, et les considérations environnementales prises en compte depuis l'étape d'extraction des ressources jusqu'à la fin de vie (notion de cycle de vie). Le deuxième contexte renvoie à la notion d'« équitable », créée à partir de la relation des sphères sociale et économique. Un produit équitable est bénéfique pour l'économie locale en assurant aux petits producteurs un revenu décent et une bonne qualité de travail (sécurité) et de vie des travailleurs, tout en créant un développement social continu. Le dernier contexte est créé par la relation entre les sphères environnementale et sociale. Un produit « durable » est utilisé généralement sur une période à long terme (robustesse, fiabilité, réparabilité). Dans ce cas, il y a un bénéfice pour l'environnement et, par conséquent, pour le bien-être social.

Selon Belem et Revéret (2014), le développement durable ne représente pas un « amalgame d'activités sociales, environnementales et écologiques, mais bien un ensemble d'activités répondant chacune à leur façon à la préservation de l'environnement d'une part, et au développement individuel et social d'autre part, tout en étant économiquement efficient et porteur d'équité » (p. 4). La Figure 2 ci-dessus présente une hiérarchie des trois dimensions du développement durable proposées par ces auteurs. L'intégrité écologique, c'est-à-dire la préservation des équilibres écologiques et de l'environnement, est une condition nécessaire afin de soutenir le développement durable, dont la finalité est le développement des individus et des sociétés (Gendron et Revéret, 2010). L'économie, pour sa part, représente le moyen d'arriver à mettre en œuvre le développement durable, tout en privilégiant des activités moins dangereuses pour l'environnement et à haut rendement social (*Ibid.*).

Finalement, la gouvernance rend possible, par le biais de politiques/stratégies soutenant et incitant les acteurs (des individus, des organisations ou l'État), l'interrelation entre les trois dimensions du développement durable

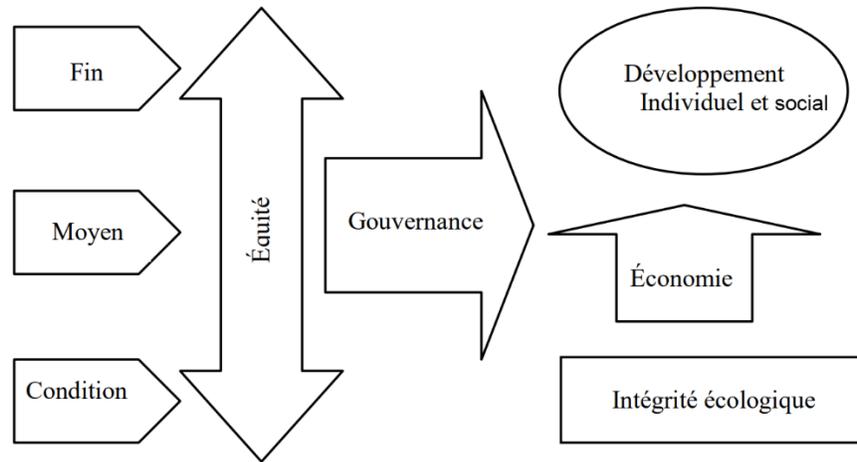


Figure 2 : Une représentation du développement durable

Source : Gendron et Revéret (2010), p. 5

Gendron et Revéret (2010) soulignent que « le développement durable exige donc de revoir nos façons de faire, et contestent tout spécialement nos modes de consommation et de production » (p. 4). Dans cette situation, le designer de produits devient un important acteur dans la mise en œuvre du développement durable, principalement en ce qui concerne le développement de produits dans le contexte industriel. Il joue également un important rôle dans la conscientisation auprès des entreprises et dans la diffusion de nouvelles approches pouvant mener à la mise en marché d'écoproduits innovants. Un écoproduit est un produit qui génère moins d'impact sur l'environnement tout au long de son cycle de vie (extraction de matières premières, fabrication, transport, consommation et élimination) (ADEME, 2017). D'ailleurs, Thibault et Leclerc (2014) affirment que le designer est la bougie d'allumage de l'écoconception, alors que Caya *et al.* (2012) font remarquer que l'écoconception est un levier à l'innovation dans la conception de produits.

En fait, le dialogue entre tous les départements de l'entreprise est essentiel pour que les décisions environnementales optimales puissent être prises par toutes les parties prenantes (McAloone et Bey, 2009). Le développement durable incite les entreprises à trouver de nouvelles façons de faire, compte tenu des (i) pressions économiques et politiques visant le développement de produits, services et systèmes de produit-service respectueux de l'environnement dès les premières étapes du processus de développement de nouveaux

produits et des (ii) pressions technologiques et du marché obligeant les entreprises à réadapter rapidement leurs routines organisationnelles pour répondre aux besoins des consommateurs (Appio *et al.*, 2017).

Après avoir présenté le contexte général de naissance du concept du développement durable, la section suivante offrira un bref tour d'horizon au sujet du rôle du designer de produits dans l'opérationnalisation du développement durable.

1.2 Le design de produits dans le contexte du développement durable

Le processus de fabrication des produits a des impacts sur l'environnement (p. ex : consommation des matériaux et d'énergie, émissions de polluants, génération de déchets, etc.) (Schiesser, 2011). McAloone et Bey (2009) ainsi que Caya *et al.* (2012) estiment qu'environ 80 % des impacts environnementaux et « 70 % des coûts environnementaux et sociaux des produits et services » (Ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec¹⁴) sont déterminés lors de l'étape de conception, car c'est à cette étape du cycle de vie que les matériaux, procédés, les technologies et la durée de vie du produit sont définies. Ce pourcentage, très communément cité dans la littérature pour illustrer les impacts environnementaux d'un produit lors de sa conception, résulte d'une recherche financée par l'Agence danoise de protection de l'environnement, en collaboration avec la Confédération de l'industrie danoise (DI), l'Union interparlementaire¹⁵ (IPU) et l'Université technique du Danemark (DTU) en 2009. Cette recherche visait à réaliser une analyse des méthodes existantes en matière de conception de produits plus respectueux de l'environnement dans des entreprises danoises (Coloplast, Fritz Hansen, Gabriel, Grundfos Management et LEGO Group) et internationales, ainsi que sur une série d'ateliers avec des entreprises industrielles.

Les décisions prises par les designers de produits et toute l'équipe de conception (ingénieur, marketing, etc.) lors du développement d'un produit (p. ex problèmes de gaspillage, surexploitation des ressources naturelles), principalement à l'étape de conception, peuvent avoir une incidence sur l'environnement (Åkermark, 2003). En effet, la complexité en matière de développement durable se transpose dans la conception de produits à travers la forte compétitivité entre les entreprises, les prix des produits, la conformité à la législation environnementale et au marché. Ce contexte place la conception et la production de produits durables dans une position stratégique pour atteindre la durabilité et les objectifs de production plus propres (Ahmad *et al.*, 2018b). La

¹⁴ https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/ameliorer/developpement-durable/page/en-entreprise-22980/?tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=&tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BparentPid%5D=&cHash=780a48bcd22e1017e8aeb91af613366

¹⁵ <https://www.ipu.org/fr/luip-en-bref>

durabilité dans la conception de produits peut être définie comme la capacité d'un produit à fonctionner au fil du temps (robustesse), tout en garantissant de faibles impacts environnementaux, ainsi que des avantages sur les plans économique et social pour toutes les parties prenantes (p. ex. : utilisateurs, fournisseurs, etc.) (*Ibid.*). Néanmoins, il est également admis dans la littérature (Mc Donough et Braungart, 2011; Thibault et Leclerc, 2014) que parfois, la meilleure approche pour minimiser les impacts environnementaux et répondre aux besoins des usagers sera de concevoir un produit à courte durée, impliquant une approche monomatériau, par exemple, afin que lesdits matériaux soient recyclés et/ou compostés en fin de vie du produit (p. ex. : la vaisselle jetable). Les produits électroniques seraient un autre exemple où des produits plus récents (p. ex. : les réfrigérateurs) consomment parfois moins d'énergie qu'un produit plus vieux que le consommateur veut conserver. Ainsi, la mise en œuvre du développement durable vise, entre autres, « l'amélioration des modes de consommation et de production par la mise en œuvre de la pensée cycle de vie » (Belem et Revéret, 2014, p. 7). La pensée cycle de vie comporte une grande pertinence dans le contexte de l'augmentation de la durée de vie des produits et, en conséquence, dans le progrès vers la consommation durable (Cooper, 2005). Elle prend en compte l'intégration des aspects environnementaux dans toutes les étapes composant le développement d'un produit, soit l'extraction, la fabrication, la distribution, l'utilisation, et l'élimination (*Ibid.*).

La pensée cycle de vie est un principe central en écoconception et en écologie industrielle (voir section 1.3.4, chapitre 1). Belem et Revéret (2014) présentent quatre sources qui inciteraient les entreprises à avoir recours à l'analyse du cycle de vie (ACV) :

- a) La réglementation : le concept de responsabilité de la chaîne de production fait en sorte que chaque fabricant et détaillant sont poussés à assumer leurs responsabilités en tant que membre de la chaîne de valeur du produit. De cette façon, ils sont responsables du financement et de la gestion en fin de vie des produits qu'ils mettent sur le marché, une fois que les consommateurs s'en débarrassent. C'est la *responsabilité élargie des producteurs (REP)* qui oblige les fabricants à récupérer leur produit en fin de vie en vue de les recycler selon les meilleures techniques disponibles sur le marché. Une autre mesure accompagnant la REP, la directive européenne (2005/32/CE), a pour objectif d'améliorer, depuis 2005, la performance environnementale des appareils liés ou consommant à l'énergie tout au long de leur cycle de vie. Cette directive vise concrètement soutenir la mise en œuvre de l'écoconception des produits. Il n'y a pas d'équivalent réglementaire au Canada.
- b) Les consommateurs : Les « produits verts » sont de plus en plus ce qui permet aux entreprises d'accroître leur part sur ce marché en pleine croissance. Ces entreprises peuvent se démarquer en intégrant une préoccupation environnementale et ayant, généralement, une analyse cycle de

vie simplifiée (ACVS) ou des déclarations environnementales comme outil de conception écologique par l'apposition d'un label environnemental (p. ex. : labels Ange Bleu en Allemagne, NF Environnement en France, le Cygne nordique dans les pays scandinaves et l'éco label européen pour toute la communauté européenne) ;

- c) Les marchés financiers : orientent de plus en plus leurs investissements et placements (p. ex. : *Fidelity Investments Canada*¹⁶, Caisse de dépôt et placement du Québec¹⁷, etc.) afin d'encourager les entreprises à adopter des pratiques responsables à travers le développement durable. Ces investissements peuvent inciter les entreprises à adopter des pratiques et stratégies durables qui sont de plus en plus reconnues par le marché (consommateurs, marchés financiers, etc.). À cet effet, l'Autorité des marchés financiers¹⁸ a été instituée le 1er février 2004 par le gouvernement du Québec à travers la Loi sur l'encadrement du secteur financier en vue d'encadrer le secteur financier québécois et prêter assistance aux consommateurs de produits et services financiers ;
- d) Les coûts d'utilisation de matières premières : l'augmentation du coût des matières premières liée à leur raréfaction.

La responsabilisation des designers de produits concernant les problématiques environnementales coïncide avec l'émergence de l'écoconception dans les années 1970. Plusieurs auteurs ont contribué à l'émergence de l'écoconception et par conséquent à la définition du rôle du designer de produits dans le contexte du design durable, notamment Buckminster Fuller (1895-1983), designer, architecte, inventeur et écrivain américain qui est considéré comme le pionnier du design appliqué aux problématiques environnementales avec sa notion d'efficacité énergétique et sa vision technocentriste (Petit, 2015). Fuller est devenu une référence pour toute une gamme d'approches contemporaines telles que l'écoconception. Parmi ses œuvres connues mondialement, on compte le Pavillon des États-Unis de l'Expo 67 qui se tenait à Montréal (Massey, 2012). Massey (2012) souligne que Fuller aspirait à la maximisation du bien-être humain à travers l'efficacité technocratique et énergétique pour contrer le gaspillage, la minimisation de l'utilisation des ressources et la production de déchets avec l'objectif de tracer une voie plus durable pour l'humanité. Selon Petit (2015), « le dôme géodésique de Fuller inclura aussi une série de "géoscopes" et une base de données du système-terre ; il était la manifestation du rêve de Fuller, cet architecte de la maison-terre dont le but fut d'optimiser les ressources du "vaisseau-spatial terre" » (p. 33).

¹⁶ <https://www.fidelity.ca/developpementdurable/index.html>

¹⁷ <https://www.cdpq.com/fr/investissements/investissement-durable>

¹⁸ <https://lautorite.qc.ca/grand-public/a-propos-de-lautorite/programme-de-partenariats-strategiques-en-education-financiere-sensibilisation-et-recherche/depot-de-projets/developpement-durable/>

Dans les décennies suivantes, Pauline Madge a souligné la responsabilité des concepteurs (designers, ingénieurs, architectes, etc.) face aux problèmes environnementaux avec une analyse des notions historiques du *vert design* à l'écodesign. Selon Madge, il y a un consensus sur le fait que les concepteurs ne peuvent pas ignorer les problèmes environnementaux. Par ailleurs, l'auteure affirme que l'adoption d'une approche écologique par le designer signifie remettre en question et s'opposer au *statu quo*. Dans ce contexte, le designer assume une implication plus critique par rapport aux problèmes environnementaux générés par les modes de production et consommation traditionnels. Selon Madge (1997), « la transition des termes "vert (vert)" à "éco" à "durable (sustainable)" dans le domaine du design représente un élargissement constant du champ d'application théorique et pratique et, dans une certaine mesure, une perspective de plus en plus critique sur l'écologie et le design » (p. 44). Dans les années 2000, Ezio Manzini, sociologue du design, auteur de plusieurs ouvrages et professeur italien, s'est positionné dans le champ de l'innovation sociale et du développement durable en utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour faire travailler de manière collaborative toutes les parties prenantes d'un projet. Manzini (1994) souligne deux changements de perspective nécessaires pour faire face à l'évolution des enjeux environnementaux dans notre société. Le premier implique un changement par rapport à la question de l'environnement qui passe d'une critique minoritaire à un problème officiellement reconnu et inscrit à l'ordre du jour de tous les acteurs de la société, y compris le gouvernement. Le deuxième changement positionne la question environnementale au centre d'un phénomène plus vaste représenté par la crise généralisée causée par notre modèle économique capitaliste dominant et son développement depuis la révolution industrielle jusqu'à aujourd'hui.

Finalement, il y a eu Stuart Walker, professeur de design pour la durabilité et codirecteur du centre de recherche *ImaginationLancaster*¹⁹ de l'Université de Lancaster, au Royaume-Uni. Selon Walker (2011), le véritable esprit du design consiste à attribuer des références symboliques aux notions plus profondes de sens des objets quotidiens. En effet, le sens d'un objet dépasse ses caractéristiques physiques et fonctionnelles et peut comporter un sens plus profond de possession et de valeur. D'après Pantaleão (2017), le travail de Walker propose une « typologie esthétique » du design contemporain basée sur la sensibilisation et la promotion des nouvelles relations d'utilisation des objets, fondées sur la redéfinition de ses fonctions esthétiques et fonctionnelles en vue de concevoir des produits durables.

À la suite de la présentation de ce bref historique de certains auteurs clés dans la littérature ayant contribué à l'émergence de l'écoconception et à la responsabilisation des designers de produits face aux défis sociétaux, la

¹⁹ <https://www.lancaster.ac.uk/lica/research/imaginationlancaster/>

prochaine section consistera en une analyse des principales approches utilisées par le designer de produits visant la conception de produits compatibles avec le développement durable.

1.3 Les approches de conception/développement de produits s'inscrivant dans une démarche de développement durable

Le designer de produits a à sa disposition divers approches et outils qui visent la diminution des impacts environnementaux de produits sur l'environnement. Un outil peut être compris comme un moyen, un instrument utilisé avec le but d'accomplir une activité (p. ex. : l'analyse du cycle de vie, un outil dans l'approche de l'écoconception) (Belem et Revéret, 2014; Thibault et Leclerc, 2014). Une approche, à son tour, est plus globale qu'un outil (p. ex. : l'économie circulaire) et peut représenter une progression, procédure, démarche, cheminement ou méthode qui aborde un sujet en fonction d'une perspective (Fortin et Gagnon, 2015). La Figure 3 ci-dessous présente une synthèse de l'évolution de ces approches au fil des décennies.

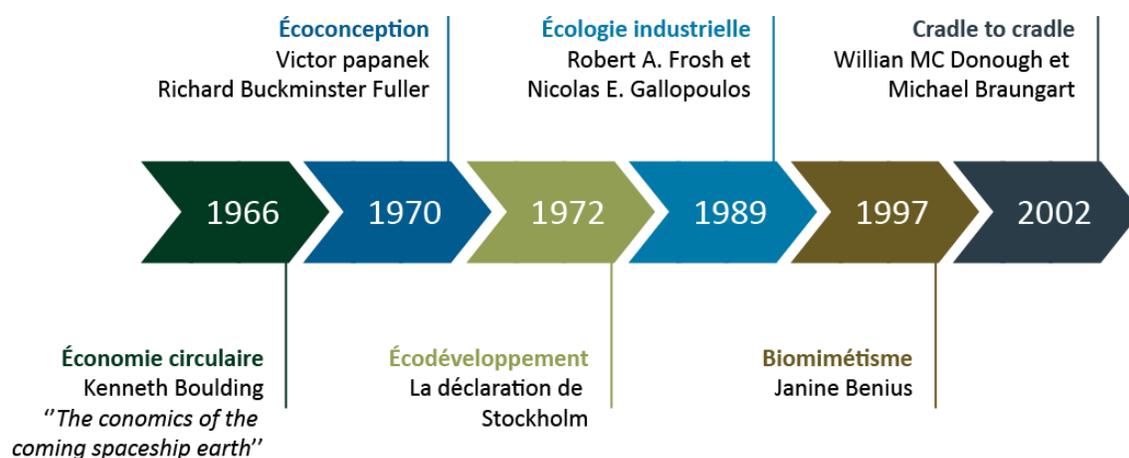


Figure 3 : L'évolution des principales approches s'inscrivant dans le développement durable

Certaines études ont réalisé une analyse des différentes méthodologies de développement de produits (De Pauw *et al.*, 2014 ; Montana-Hoyos, 2010). De Pauw *et al.* (2014) ont effectué une étude exploratoire ayant pour but de comparer le biomimétisme et *cradle to cradle*, deux stratégies de conception inspirées par la nature, à l'écoconception. Pour ce faire, ils ont utilisé les résultats issus de travaux d'étudiants en design industriel de 1^{er} et 2^e cycles à partir du cours intitulé *Sustainable Design Strategies* pendant deux années académiques consécutives (2011 et 2012). Au total, 27 groupes d'étudiants (129 étudiants au total) du baccalauréat et de la maîtrise à la *Delft University of Technology, Faculty of Industrial Design Engineering (IDE)* aux Pays-Bas ont participé à l'étude. Les étudiants ont été appelés à développer un écoproduit en utilisant, soit le biomimétisme, soit le *cradle to cradle*, soit l'écoconception. Les résultats soulignent que les groupes d'étudiants qui ont utilisé

autant l'approche du biomimétisme que l'approche *cradle to cradle* ont constaté des améliorations significatives de leurs produits (vaisselle et couverts et machine à café). La plupart des étudiants qui avaient recours à l'écoconception changeaient de matériaux et modifiaient la forme des produits, alors que plus de 80 % des étudiants qui utilisaient le biomimétisme et le *Cradle to cradle* ont proposé des solutions offrant différentes fonctions pour les produits ou les systèmes de produits proposés (p. ex. : système de boîte à repas à trois composants : boîte à repas, plateau et assiette). Dans le cas de cette étude, le biomimétisme et le *cradle to cradle* offraient un scénario plus fertile et créatif en comparaison à l'écoconception.

L'écoconception, le *cradle to cradle* et l'écologie industrielle sont des composantes de l'économie circulaire (Aurez *et al.*, 2016). Cette dernière s'inspire des cycles et des systèmes biologiques en vue de créer des systèmes non biologiques, tout en facilitant les flux de matériaux, d'énergie, d'information, de produits, etc., comme le propose le biomimétisme. La Figure 4, ci-dessous, démontre la relation entre ces approches où l'écoconception serait l'approche la moins complète puisqu'elle vise la mise en œuvre de solutions à court et à moyen termes, principalement en intégrant les enjeux environnementaux et économiques tout en laissant marginaux les enjeux sociaux qui sont plus complexes à quantifier malgré l'émergence de l'éco-socio-conception (Clergeau et Paulus, 2017; Dreux-Gerphagnon et Boudarel, 2011). Le biomimétisme serait l'approche la plus complète couvrant, de façon plus exhaustive, les différents enjeux du développement durable (Molina et Raskin, 2018 ; Montana-Hoyos, 2010; Fayemi, 2016).

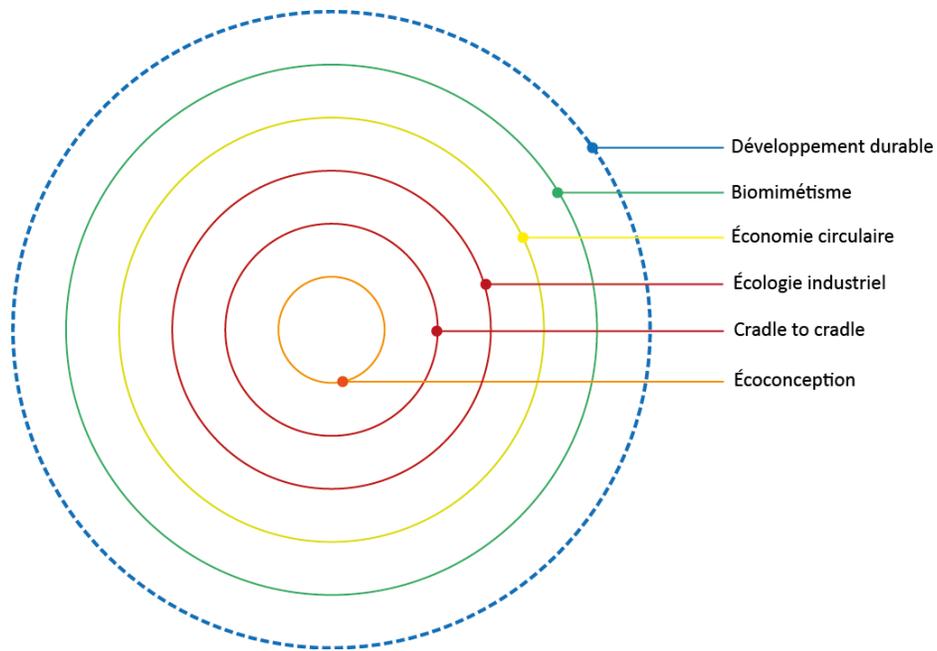


Figure 4 : La relation entre les approches s'inscrivant dans le développement durable

Les sections suivantes présentent succinctement quelques approches de conception de produits enseignées aux designers industriels et de produits, à savoir l'économie circulaire, l'écoconception, le *Cradle to cradle* et l'écologie industrielle. Ces approches seront analysées selon la pensée systémique qui considère un système dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique propre tout en privilégiant la globalité plutôt que la vision fragmentée et rationnelle (Rosnay, 1977). L'angle d'analyse à travers la pensée systémique a été privilégié dans le but d'évaluer le niveau de globalité de ces approches en relation avec le développement durable dans la résolution de problèmes touchant ses trois enjeux, soit économique, environnemental et social.

1.3.1 L'économie circulaire

En tant qu'approche globale qui intervient à tous les niveaux d'organisation d'une société, l'économie circulaire propose une vision économique de la gestion des ressources et la réduction systématique de leur consommation (p. ex. : énergie, eau, matériaux, etc.) sur l'ensemble du cycle de vie des produits et services, tout en préservant les écosystèmes et la biodiversité (Aurez *et al.*, 2016).

L'économie circulaire et les bouclages de flux économiques se présentent comme une expression de la pensée systémique à travers le biomimétisme (Molina et Raskin, 2018). Dans ce contexte, l'économie utilise la notion de système à travers ses flux de matériaux, d'énergie et d'information (Webster, 2013) en vue de résoudre « des

problèmes de pollution à la source ainsi que pour l'usage efficace des ressources » (Belem et Revéret, 2014, p. 11). Ce système devrait être dynamique, adaptatif et en pleine mutation, tout en considérant sa diversité (p. ex. : d'échelle, de culture, de lieu, de temps, etc.), comme les systèmes vivants (*Ibid.*) qui doivent être « autorégénérants, organisationnellement clos à l'intérieur de frontières, mais ouverts à des flux continus d'énergie et de matière » (Capra, 2010, p. 266). Ces principes de base en écologie, tels que la conception systémique ainsi que la notion d'organisation naturelle, pourraient constituer un levier pour la construction des communautés durables (*Ibid.*). Par ailleurs, l'utilisation plus efficace des matériaux à travers la consommation consciente de matières et d'énergies doit être un levier pour la mise en œuvre d'une société soutenable (Åkermark, 2003) et responsable.

Sauvé, Normandin et McDonald (2016) mettent en lumière que l'économie circulaire s'inscrit dans une optique de développement durable, car elle propose une transition vers un modèle de création de valeur positive sur les plans social, économique et environnemental. La fondation Ellen Macarthur²⁰, une organisation fondée en 2010 au Royaume-Uni dans l'objectif d'accélérer la transition vers l'économie circulaire, souligne qu'elle offre une alternative au modèle de développement linéaire actuel, qui consiste à extraire, transformer, distribuer, utiliser, puis jeter (Fig. 5). En fait, l'économie circulaire incarne un fonctionnement à l'opposé de l'économie linéaire qui repose sur la surconsommation de ressources en amont et une grande production de pollution et déchets en aval (Bonciu, 2014). L'institut EDDEC²¹ souligne que l'économie linéaire se fonde sur la maximisation du nombre de produits fabriqués et vendus au plus faible coût possible, générant une empreinte écologique importante. Bonciu (2014) explique que la science et la technologie ont permis de faire croître l'économie linéaire au cours du XX^e siècle en s'appuyant sur l'efficacité de la production industrielle. Malgré tout, les problématiques environnementales persistent, car les gains obtenus grâce à l'amélioration technique et technologique des procédés de production ont été contrebalancés par une augmentation continue de la consommation de produits à l'échelle mondiale (notion de suffisance) (Cooper, 2005).

Historiquement, le développement durable a débuté à travers la notion d'efficacité, comme le proposait la Stratégie mondiale de la conservation (1980) et le Rapport Brundtland (1987). Cette notion d'efficacité visait la réduction des impacts environnementaux et économiques grâce à une utilisation optimale de ressources (matériaux, énergies) afin d'assurer un développement durable (Cooper, 2005). En réalité, le fait de réduire les impacts environnementaux des produits ne garantit pas de relever des défis liés à la mise en œuvre du développement durable en raison notamment de l'augmentation continue de la consommation de biens à

²⁰ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>

²¹ <http://institutedec.org>

l'échelle mondiale. C'est dans ce contexte que la notion de suffisance revêt toute son importance, car elle repose sur la diminution de la consommation tout en augmentant la durée de vie des produits (Cooper, 2000, 2005). Cette notion, opposée à l'obsolescence programmée, vise surtout le même degré de satisfaction des besoins en consommant moins. L'obsolescence programmée consiste à raccourcir la durée de vie d'un produit de façon intentionnelle en vue d'augmenter le taux de remplacement et inciter à la surconsommation²².

Dans ce contexte, comment changer l'organisation sociale et industrielle pour qu'elles soient compatibles avec l'ensemble les trois sphères du développement durable ?

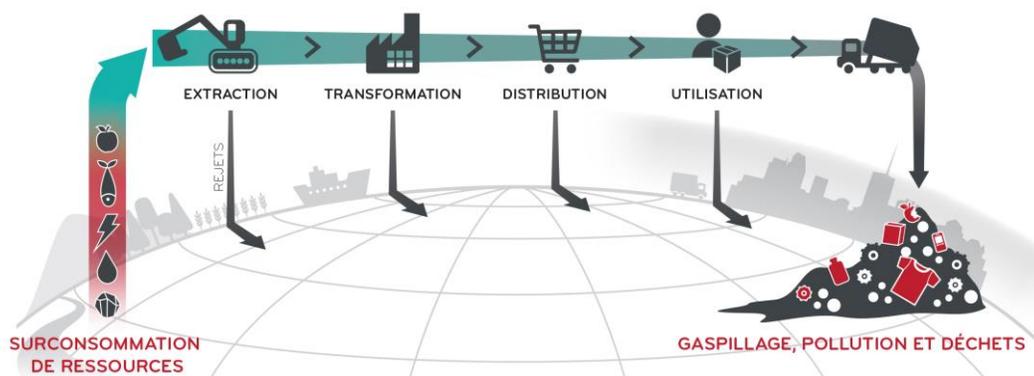


Figure 5 : L'économie linéaire

Source : Institut EDDEC en collaboration avec RECYC-QUÉBEC (2018).

La Figure 6, ci-dessous, représente un schéma général de l'économie circulaire en soulignant deux points principaux : (i) repenser et (ii) optimiser. Tout d'abord, l'économie circulaire vise la réduction de la consommation des ressources (p. ex. : énergie, eau, matériaux, etc.) et la préservation des écosystèmes à travers la réduction de la charge sur l'environnement. Pour ce faire, plusieurs stratégies sont proposées, telles que l'écoconception (changer la façon de concevoir), la consommation responsable (changer la façon de consommer) et l'optimisation des opérations (changer la façon de fabriquer). Ensuite, l'économie circulaire vise à optimiser l'étape finale du cycle de vie, l'élimination soit de matériaux, composants ou sous-produits qui peuvent être réintégrés aux étapes en amont du cycle de vie en tant que ressources (écologie industrielle), soit du produit en fin de vie dont la vie peut être prolongée (recyclage, compostage et valorisation). Quelques stratégies peuvent être mises en place pour prolonger la durée de vie des produits et de ses composants, telles que : (i) l'entretien et la réparation (produits et composants) ; (ii) le don et la revente ; (iii) le reconditionnement et (iv) l'économie de fonctionnalité qui vise à vendre le service rendu par un produit plutôt que la vente du produit. Enfin, la location

²²<https://www.sudrecyclage.fr/blog/ecologie/petite-histoire-obsolescence-programmee/>

ou l'économie du partage ou collaborative (échange de produits et services entre particuliers) peuvent être utilisées pour augmenter la fréquence d'utilisation d'un produit.

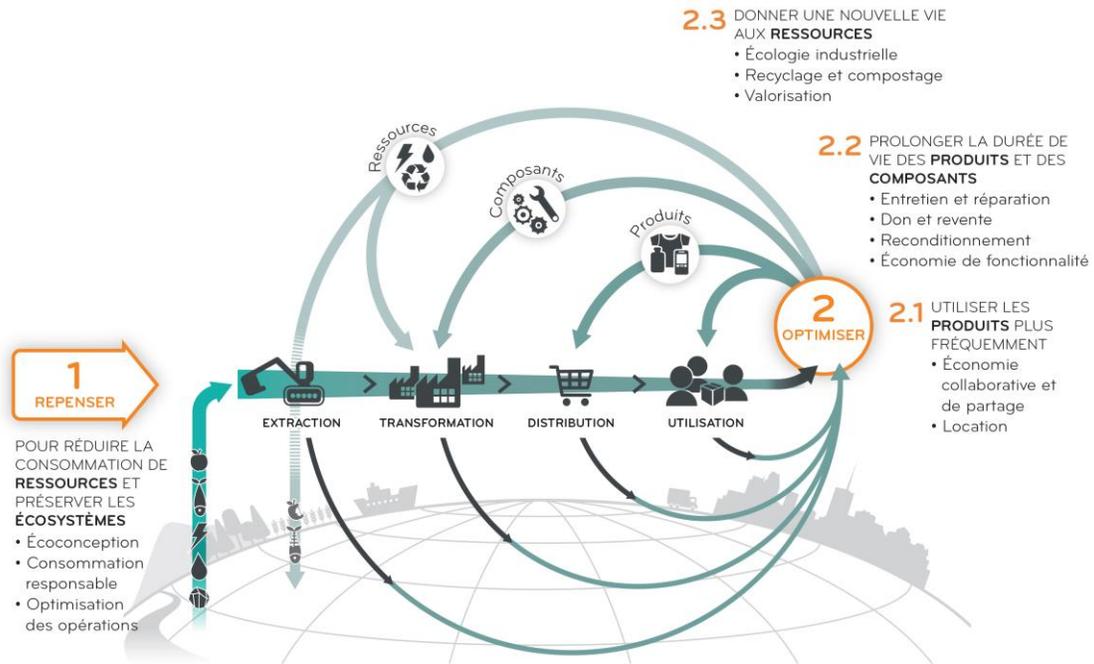


Figure 6 : L'économie circulaire
 Source : Institut EDDEC en collaboration avec RECYC_QUÉBEC (2018)

Les stratégies présentées ci-dessus sont fondamentales à la mise en œuvre d'une économie circulaire. Le design de produits joue un important rôle dans ce contexte, notamment dans la conception des produits qui sont mieux intégrés dans la chaîne de production et la chaîne de valeurs, tout en considérant le cycle de vie dans sa globalité, comme le propose l'écoconception. La chaîne de production comprend l'ensemble des opérations de fabrication nécessaires à la réalisation d'un produit manufacturé, de l'extraction et de la manipulation des matières premières à sa mise sur le marché (Trudel, 2007). La chaîne de valeur englobe toutes les activités stratégiques et économiques de l'entreprise afin de poser un diagnostic pour choisir le positionnement concurrentiel d'un produit par exemple ; elle se superpose au cycle de vie du produit qui s'inscrit dans une vision d'écoconception.

Malgré le potentiel d'utilisation de l'économie circulaire, cette approche présente des limites puisqu'elle demeure encore à un stade très conceptuel (Molina et Raskin, 2018). Korhonen, Honkasalo et Seppälä (2018) soulignent que le concept de l'économie circulaire est hautement idéaliste et l'idée d'un système unique reposant à 100 % sur les énergies renouvelables, tout en recyclant tous les matériaux, bien que souhaitable, n'est pas réaliste.

Actuellement, environ 75 % de la production d'énergie mondiale est issue des sources non renouvelables (p. ex. : le pétrole, le charbon, le gaz naturel, l'énergie nucléaire, etc.) (*Ibid.*). Korhonen, Honkasalo et Seppälä (2018) classifient les limites de l'économie circulaire en six niveaux :

1) Limites thermodynamiques : le recyclage nécessitera toujours de l'énergie et impliquera souvent la production de déchets ultimes ;

2) Limites des systèmes : le système économique mondial est, en grande partie, basé sur la production linéaire en termes de flux physiques de matériaux et d'énergie. Par ailleurs, environ 75 % de la production mondiale est basée sur la consommation des combustions fossiles dont la production et la consommation ne sont pas compatibles avec les cycles naturels ;

3) Limites imposées par l'échelle physique de l'économie : lorsque l'efficacité de la production augmente, les coûts de production diminuent et le prix des produits peut diminuer avec pour conséquence une augmentation possible de la consommation. Cette croissance économique pourrait compenser les gains environnementaux obtenus ;

4) Limites de dépendance : selon le phénomène développé en science politique au cours des années 1990 connu sous les noms de « dépendance au sentier » ou « dépendance au chemin » (*path dependence* en anglais), lorsqu'une innovation économique est lancée sur le marché, un processus déterminant son pouvoir d'influence commence immédiatement. De cette façon, même s'il existe une solution plus efficace (p. ex. : des nouvelles technologies, produits plus performants, processus plus efficaces et sûrs, matériaux plus durables, etc.), elle n'est pas forcément adoptée (Palier, 2010). Ce phénomène pourrait s'expliquer par le coût et la complexité associés au changement, par exemple l'investissement financier lié à l'achat de la nouvelle solution, la mise en œuvre de cette solution dans l'entreprise (restructuration physique et organisationnelle, formation du personnel, etc.) et le temps de changement et d'apprentissage ;

5) Limites de gouvernance et de gestion : les flux physiques de matières et d'énergie extraites de la nature franchissent de nombreux éléments interdépendants composant le système économique de production-consommation avant de devenir des déchets et des émissions dans les écosystèmes (cycle de vie). En effet, une gestion interorganisationnelle est nécessaire afin de garantir la durabilité à l'intérieur du cycle de vie des produits. Les nouveaux modèles commerciaux comprenant la conception de produits à plusieurs cycles de vie nécessitent une coopération interorganisationnelle plus systémique entre le fournisseur et le client (marketing interentreprises) et entre le producteur et le consommateur, par exemple lors de la location d'un produit ;

6) Limites des définitions sociales et culturelles : L'histoire, la culture, la communauté et la société ont toujours défini et conditionné la « valeur économique » des flux de matières. En effet, ces définitions sociales et culturelles décident quels flux sont traités dans la gouvernance, la politique et la gestion stratégique. Par exemple, l'utilisation des déchets dans les domaines du recyclage et de la récupération d'énergie sont des concepts largement utilisés par les pays occidentaux industrialisés. Toutefois, la réutilisation, la refabrication et la remise à neuf de produits sont des concepts en développement et encore difficiles à être appliqués globalement. Par ailleurs, le concept de déchets, en pleine évolution, est lié à la culture, à la société, à la communauté, à l'histoire et influencé par le niveau de développement d'une société. Il est donc difficile de définir le moment exact où un matériau de valeur économique devient un déchet sans valeur, ou de quelle façon un déchet devient un sous-produit.

La présentation de certaines limites de l'économie circulaire met en lumière la grande complexité liée à sa mise en œuvre, notamment à travers son caractère global et systémique caractérisé par l'interrelation de toutes les parties prenantes composant le réseau industriel. Au-delà de la complexité technique dans sa mise en œuvre, cette approche doit également franchir des barrières sociales et culturelles avant que ce concept soit largement adopté.

1.3.2 L'écoconception

C'est au tournant des années 1950 que naît un questionnement sur l'éthique de la profession du design industriel et la responsabilité du designer de produits face aux problématiques environnementales (p. ex. : pollution, surconsommation de matériaux et d'énergie, génération des déchets, etc.). Les années 1950 ont été marquées aussi par la prise en compte des aspects environnementaux et l'évolution du développement durable dans l'industrie. En effet, l'utilisation de mesures curatives par les entreprises a évolué progressivement vers des mesures préventives sur le site de production et, plus récemment, pour le produit de consommation (Caya *et al.*, 2012). C'est dans ce contexte que l'écoconception trouve ses origines.

L'écoconception (aussi connu par le terme « écodesign ») est un néologisme formé par la contraction des mots « conception » et « écologie » et est également connue sous le nom anglais de *Design for the Environment* selon Madge (1997), *Vert design, Ecological design ou Sustainable design*. L'écologie est définie comme étant « un système naturel complexe, chaotique, dynamique, évolutif et qui s'autorégularise » (Côté, 2006, p. 18). L'analyse des impacts environnementaux proposée par l'écoconception intègre plusieurs critères

environnementaux (multicritères) et plusieurs étapes (multi-étapes), tout en considérant les parties prenantes (multiacteurs) (p. ex. : fournisseurs, distributeurs, différents départements de l'entreprise, citoyens, ONG, associations professionnelles, etc.) (Caya *et al.*, 2012). L'écoconception est multi-étapes, car les impacts environnementaux d'un produit sont évalués à chacune des étapes de son cycle de vie (p. ex. : extraction ou production des matières premières et de l'énergie, fabrication, transport, distribution, utilisation et fin de vie des produits) (Brodhag, 2014). Elle est multicritère, car différentes catégories d'impacts sur l'environnement sont considérées (p. ex. : consommation d'énergie et de ressources, pollution de l'air, de l'eau, des sols, production de déchets, les émissions de gaz à effet de serre et les substances s'attaquant à la couche d'ozone, etc.) (ADEME, 2017). Enfin, l'écoconception est une approche multiacteurs, car elle est censée prendre en considération l'ensemble des parties prenantes tout au long du cycle de vie et de la chaîne de valeur des produits (Brodhag, 2014). Selon Haned, Lanoie, Plouffe, et Vernier (2014), « l'écoconception est une solution gagnant-gagnant, car elle engendre des gains environnementaux, bénéfiques pour tous, sans impact négatif sur la rentabilité » (p. 49). Ces auteurs ont réalisé en 2014 une étude intitulée *La rentabilité de l'écoconception : une analyse économique* avec l'objectif d'identifier les déterminants de la rentabilité de l'écoconception. Pour ce faire, 750 entreprises ont été contactées et, finalement, un échantillon de 119 entreprises ont été considérées pour l'étude, soit 44 au Québec, 49 en France et 26 dans l'Union européenne (UE). Ces entreprises ont été divisées en trois secteurs d'activité : industrie manufacturière (62 %), commerce et service (23 %) et autres [firmes dans les secteurs de l'agriculture ou de la construction] (15 %).

Parmi ces entreprises, 80 % étaient constituées de moins de 250 personnes. En termes de résultats, cette étude a révélé des retombées positives, autres que financières, telles que : une amélioration de l'image ou de la notoriété (86 %), une augmentation de la motivation et de la fierté des employés (41 %), une meilleure relation avec les clients (36 %) et une plus grande capacité à développer de nouveaux produits (32 %). En ce qui concerne la rentabilité des entreprises à travers l'écoconception, cette étude démontre que :

Certains indicateurs de l'intensité de la démarche d'écoconception sont associés à une rentabilité supérieure. Ainsi, plus l'entreprise prend en compte un grand nombre d'étapes du cycle de vie du produit dans son approche d'écoconception, plus sa rentabilité est élevée. De même, plus elle est méthodique, entre autres en faisant appel à un outil méthodologique formel, plus la rentabilité de l'écoconception est élevée (Haned *et al.*, 2014, p. 49).

Le Tableau 1, ci-dessous, présente les principales implications de l'écoconception pour les gestionnaires et décideurs publics issus de l'étude de Haned *et al.* (2014). Il est important de souligner que l'écoconception nécessite une démarche méthodologique et systématique bien définie pour augmenter ses chances de succès.

Cette approche exige également l'engagement de la haute direction de l'entreprise qui doit comprendre l'écoconception comme un objectif stratégique visant la rentabilité financière ainsi qu'un avantage concurrentiel. Par ailleurs, le rôle des décideurs publics est très important dans la mise en œuvre de l'écoconception à travers la mise en place de programmes de sensibilisation et de développement des règlements capables de stimuler son utilisation.

Tableau 1 : Les implications de l'écoconception

Implications pour les gestionnaires	Implications pour les décideurs publics
<p>L'écoconception est une approche prometteuse pour améliorer la rentabilité de l'entreprise. Elle peut aussi avoir des retombées positives autres que financières. Bref, l'écoconception peut devenir un avantage concurrentiel.</p>	<p>Il faudrait mettre en place des programmes de sensibilisation et de formation sur l'écoconception ou encore, mieux soutenir les programmes existants. Ainsi, à la lumière des résultats présentés dans cette étude :</p>
<p>Pour démarrer une démarche d'écoconception, il est important que le plus haut dirigeant soit convaincu de sa pertinence et qu'il envoie un signal clair à cet effet au reste de l'organisation.</p>	<p>– Il serait intéressant de cibler les dirigeants des PME.</p> <p>– Afin de répondre aux souhaits exprimés par les entreprises, il serait utile d'axer les formations sur les réglementations présentes et à venir, les analyses environnementales, la mise en marché des produits verts et les certifications environnementales.</p>
<p>Il est utile que la démarche d'écoconception fasse appel à plusieurs unités administratives de l'entreprise, notamment la haute direction, la R et D et la fabrication.</p>	<p>– Il serait intéressant de tenter également une percée de l'écoconception vers les secteurs primaire et tertiaire de l'économie, sachant qu'elle est déjà bien présente dans le secteur manufacturier.</p>
<p>Il faut que la démarche d'écoconception soit faite de façon méthodique, en ayant recours à un outil méthodologique formel.</p>	<p>Il serait possible de renforcer les critères environnementaux utilisés dans l'ACV lorsque le gouvernement doit choisir le fournisseur d'un bien ou service.</p>
<p>La démarche d'écoconception doit être systématique et prendre en considération plusieurs étapes du cycle de vie du produit.</p>	<p>Il serait envisageable de développer davantage les programmes de responsabilité élargie du producteur.</p>
<p>Obtenir un prix ou une certification attestant la qualité de la gestion de l'entreprise, ou de ses produits peut envoyer un bon signal au marché facilitant la pénétration des produits écoconçus.</p>	
<p>Si la démarche d'écoconception permet également d'améliorer les aspects fonctionnels du produit, elle a plus de chances d'être rentable.</p>	

Source : l'auteur selon Haned *et al.* (2014)

L'écoconception est enseignée depuis le début des années 1990 dans la plupart des programmes de design industriel et design de produits²³ ainsi que dans d'autres disciplines, comme l'ingénierie de la conception (*Design Engineering*) et le management (Montana Hoyos, 2010). L'écoconception demeure, à ce jour, l'une des approches les plus largement reconnues et utilisées par les designers de produits dans le but d'inclure la dimension environnementale dans le processus de développement de produits (De Pauw *et al.*, 2014). Divers outils sont disponibles sur le marché pour soutenir une démarche d'écoconception (p. ex. : Éco-indicateur 99²⁴, Méthode Okala²⁵, Lunar²⁶, etc.), ce qui en facilite la compréhension et l'utilisation (Montana-Hoyos, 2010).

La démarche d'écoconception se déroule en plusieurs étapes organisées autour de l'objectif du projet qui peut consister en une amélioration incrémentale d'un produit ou procédé industriel existant ou une [re-] conception d'un produit ou d'un service (Brodhag, 2014) et des visées pour l'entreprise comme élargir sa gamme de produits ou faire des économies. Le Pôle écoconception²⁷, une association française créée en 2008, vise à sensibiliser et faciliter l'accès des petites et moyennes entreprises [PME] et des petites et moyennes industries [PMI] aux démarches d'écoconception et à œuvrer pour sa diffusion dans les entreprises. Cette association propose une démarche d'écoconception organisée en six étapes principales, telles que décrites ci-dessous (Fig. 7) :

- a) Identification des enjeux pour l'entreprise et choix du produit : la première étape consiste à comprendre le contexte dans lequel le projet d'écoconception va être réalisé en vue de documenter les enjeux environnementaux présents dans l'entreprise (p. ex. : se conformer à/anticiper la législation, répondre aux besoins des consommateurs, etc.) et au sein de ses produits ;
- b) Évaluation environnementale d'une situation de référence : cette étape consiste à identifier, à partir de l'utilisation d'un outil d'écoconception (p. ex. : Bilan produit), les principaux impacts environnementaux (p. ex. : pollution, haute consommation d'énergie et de matériaux pour la production industrielle, recyclage, etc.) du produit visé par l'étude. Cette évaluation permet de quantifier, à chaque étape du cycle de vie, les impacts environnementaux du produit étudié qui pourront être visualisés, selon le type d'outil en diagrammes ou en histogrammes, afin de définir la stratégie environnementale qui sera utilisée pour la (re-) conception de l'écoproduit.

²³ Le design industriel et le design de produits sont considérés comme des synonymes, même si historiquement on parle de « design industriel » et qu'actuellement le terme « design de produits » reflète l'évolution qui s'est produite en termes de diversité des pratiques qui va au-delà du domaine manufacturier actuellement avec l'entrepreneuriat.

²⁴ https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf

²⁵ <https://www.eco-conception.fr/static/okala.html>

²⁶ http://www.lunar.com/pdf/the_designers_field_guide_to_sustainability_v1.pdf

²⁷ <https://www.eco-conception.fr>

- c) Recherche de pistes d'écoconception : après avoir identifié les principaux impacts environnementaux du produit, il est nécessaire d'élaborer plusieurs scénarios et stratégies d'écoconception envisageables pour les minimiser via une étape d'idéation. L'écoconception est avant tout un outil d'aide à la décision dans la mesure où il offre un portrait des impacts environnementaux du produit, sans pour autant indiquer où agir. Les idées identifiées à l'étape précédente seront analysées en fonction des critères suivants : le coût, la faisabilité technique, la réduction effective de l'impact sur l'environnement, etc., afin de prioriser les choix de conception.
- d) Évaluation environnementale comparative : cette analyse comparative vise à vérifier si les pistes d'écoconception identifiées n'engendrent pas de transferts d'impacts environnementaux sur les autres étapes du cycle de vie, ce qui consiste à éviter que les impacts environnementaux soient déplacés vers d'autres étapes du cycle de vie du produit ou d'augmenter les impacts environnementaux d'un produit ;
- e) Communication/information : la dernière étape consiste à mettre le produit écoconçu sur le marché en vue de communiquer ses qualités environnementales à travers une approche marketing et commerciale. L'International Organization for Standardization (ISO) propose 3 types de communication environnementale (i) les écolabels officiels (type I – ISO 14024:1999) ; (ii) les auto-déclarations environnementales (type II – ISO 14021:1999) et (iii) les écoprofiles (type III – ISO 14025:2006).

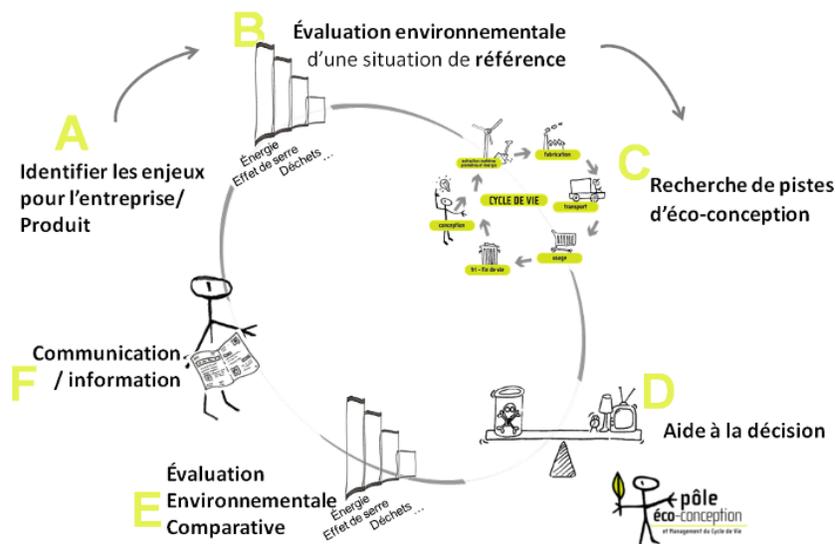


Figure 7 : La démarche d'écoconception

Source : Pôle écoconception — <https://www.eco-conception.fr>

Comme discuté dans l'introduction générale, la principale limite de l'écoconception réside dans le fait qu'elle intègre principalement les critères environnementaux dans le développement d'un produit, tout en laissant marginaux ses aspects sociaux et économiques. En fait, certains outils d'analyse de cycle de vie ne comprennent pas les aspects sociaux et économiques dans un projet de produit (Fugère, 2009). Afin de combler cette lacune, l'éco-socio-conception, approche développée par le Pôle écoconception, vise l'intégration de critères d'impacts environnementaux, économiques et sociaux dans le processus de développement de produits en s'appuyant sur deux approches : (i) l'écoconception qui est multi-étapes et multicritères (p. ex. : matières premières, fabrication, transport, usage et fin de vie) et (ii) l'analyse des besoins des parties prenantes (p. ex. : société, salariés, gouvernance, utilisateur consommateur, communauté, etc.). Cette approche est définie comme suit :

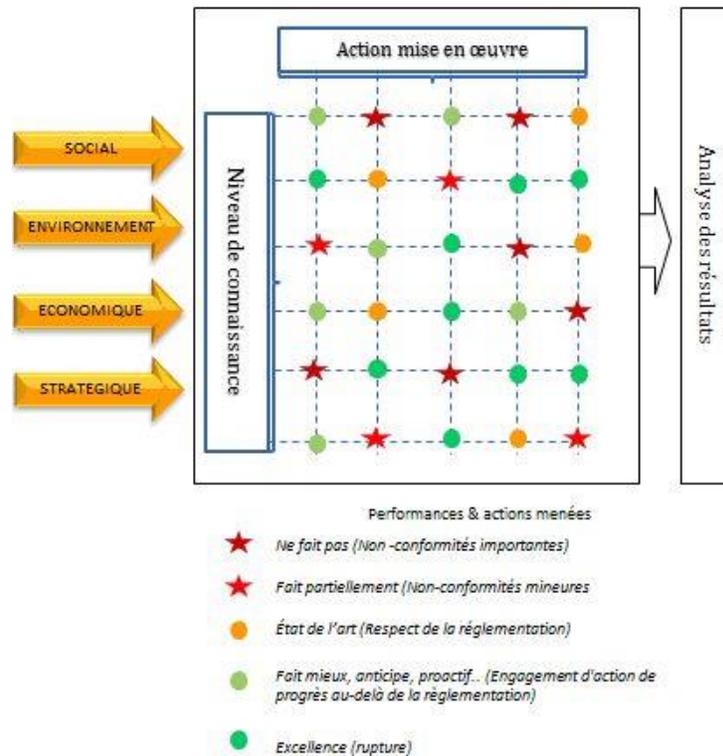
Conception qui vise à fournir des biens et des services satisfaisant les besoins des personnes et contribuant à la qualité de vie tout en réduisant progressivement les nuisances environnementales et les impacts négatifs sociaux tout au long du cycle de vie du produit (conception, développement, extraction des matières premières, fabrication, production et sous-traitance, distribution, consommation, fin de vie, recyclage). (Brodhag *et al.*, 2004, p. 75).

D'un point de vue organisationnel, l'éco-socio-conception met sur le même niveau toutes les parties prenantes dans une perspective de compréhension globale du projet. Cependant, la simple considération des parties prenantes dans une démarche d'écoconception ne garantit pas le bénéfice social d'un produit. Pour combler la sphère sociale, le produit devrait bénéficier du développement social, à travers l'utilisation, par exemple, des matériaux locaux, d'une main-d'œuvre et d'une production locales. Dans ce contexte, l'exemple dans le domaine du transport est souvent cité comme un cas d'application concrète de l'éco-socio-conception :

Dans cette perspective, l'écoconception des objets doit devenir une « éco-socio-conception ». L'exemple du transport en fournit une bonne illustration : L'objectif devrait être de produire des véhicules qui soient conçus non seulement en tant que produits « écologiques » (durée de vie, économie de carburant et de matières premières, réparabilité et recyclabilité...), mais aussi en tant que supports de comportements de mobilité plus vertueux tels que la mutualisation des véhicules, le covoiturage et la multimodalité (utilisation combinée de différents modes de transport). Il n'est pas difficile d'imaginer ce que cela pourrait vouloir dire concrètement en termes de robustesse, de simplicité et de standardisation (pour faciliter l'utilisation par des conducteurs différents), de sécurité, de traçabilité, de commodité d'usage des stationnements publics et d'arbitrage entre les performances et les coûts (Perret, 2018, p.27).

Le Pôle écoconception propose un outil diagnostique en deux étapes afin de prendre en compte les enjeux sociaux dans une démarche d'écoconception de produits. Dans une première étape, il s'agit de faire une évaluation détaillée des enjeux de l'entreprise liés au développement durable tels que les niveaux de connaissance (i) sociale (ii) environnementale (iii) économique et (iv) stratégique et les actions mises en œuvre pour y répondre (Figure 8). Une réflexion sur l'activité de l'entreprise et la relation entre celle-ci et les parties

prenantes est proposée à cette étape. Dans une deuxième étape, il s'agit de définir plus précisément les potentialités d'amélioration de(s) produit(s) dans une optique de conception responsable. Les points forts et faibles sont évalués en considérant le cycle de vie de(s) produit(s) (matière, fabrication, transport, utilisation et fin de vie) et les parties prenantes (gouvernance, communauté locale, consommateur/utilisateur, chaîne de valeur/fin de vie, société, salariés et environnement) (Figure 9). La prise en compte des enjeux sociaux à travers l'éco-socio-conception représente un levier pour que les solutions développées à partir de l'approche d'écoconception soient plus compatibles avec le développement durable.



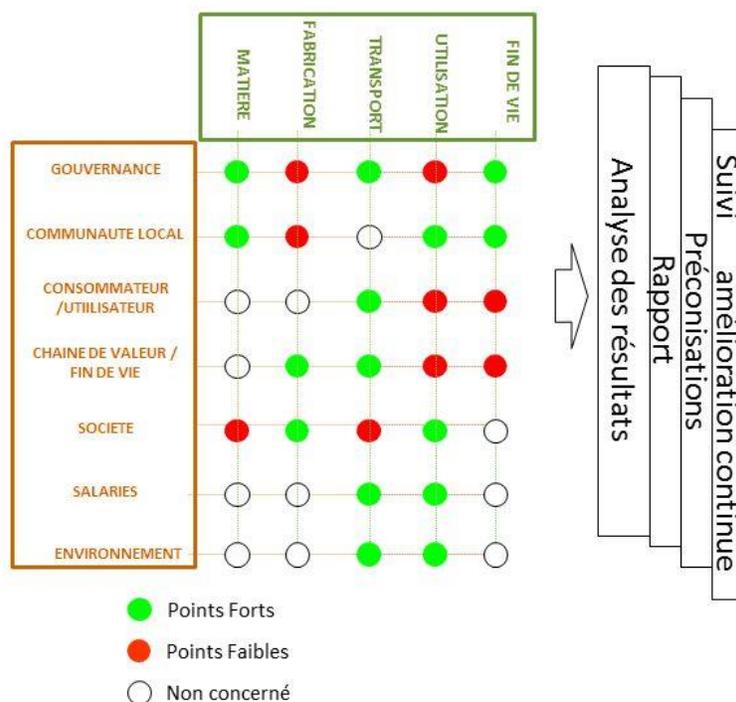


Figure 9 : Processus d'évaluation d'un produit

Source : HAOUES (2012), Pôle Eco-conception — <https://www.eco-conception.fr>

1.3.3 Le Cradle to cradle (C2C)

Le C2C, traduit en français par « du berceau au berceau », est un autre exemple d'approche de conception basée sur la compréhension des systèmes naturels. Mc Donough et Braungart (2011), fondateurs du C2C, soulignent que les systèmes de nutriments et de métabolismes présents dans la nature fonctionnent sans engendrer de gaspillage et que tous les déchets produits deviennent de la nourriture pour un autre organisme ou système. Les cycles naturels sont utilisés afin de préserver les matériaux, l'énergie et les nutriments composant le processus industriel (Korhonen *et al.*, 2018). Selon Mc Donough et Braungart (2011), « les nutriments principaux de la terre — le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote — sont en permanence recyclés. Déchet égal ressource » (p. 125). Conceptuellement parlant, l'approche C2C propose qu'une industrie fonctionne de la même façon qu'un écosystème avec un cycle complètement fermé. Le C2C est une approche bio inspirée visant le développement de nouveaux produits en s'appuyant sur un modèle de production qui restitue à la nature tous les nutriments qu'elle a produits plutôt que de les jeter, les brûler ou les enfouir, comme le font le plus souvent l'industrie et le système linéaire capitaliste (Van Den Abeele, 2011).

Selon Van Den Abeele (2011), le C2C est une « approche écobénéfique qui propose de recycler les produits indéfiniment et de produire des déchets et des émissions qui sont bénéfiques pour l'environnement et les êtres

humains » (p. 2). Dans ce contexte, l'étape finale du traitement d'un produit en fin de vie n'est pas l'élimination, mais le recyclage à l'infini : soit le produit retourne au sol sous la forme d'un nutriment biologique non toxique, soit il est réutilisé par l'industrie en tant que nutriment technique (Mc Donough et Braungart, 2011). Les nutriments biologiques sont bénéfiques pour la biosphère et comprennent les matériaux biodégradables provenant de matériaux naturels ou à base de plantes, mais également de matériaux synthétiques comme les biopolymères (*Ibid.*). Ces derniers sont des polymères issus d'organismes vivants (végétaux, algues, animaux, etc.) ou de polymères synthétisés à partir de ressources renouvelables, comme la cellulose ou l'amidon (Jarroux, 2008). Avec l'essor des matériaux recyclables ou biodégradables, les biopolymères sont de plus en plus valorisés avec des applications dans les domaines médicaux (p. ex. : fil de suture, implant vasculaire, etc.) et de l'emballage (p. ex. : emballage films alimentaires, couverts jetables, etc.), entre autres (*Ibid.*). Néanmoins, le recyclage des biopolymères présente des limites. Les polymères biodégradables peuvent poser un grave problème de contamination lorsqu'ils sont recyclés avec du plastique conventionnel ou compostés avec des déchets verts (Niaounakis, 2019).

Les nutriments biologiques sont des substances sans danger pour les êtres humains et la biosphère et peuvent donc être retournés à la nature en toute sécurité pour alimenter les métabolismes biologiques (Van Den Abeele, 2011). Les nutriments techniques, à leur tour, font partie de la technosphère²⁸ et sont souvent des matériaux d'origine synthétique ou minérale qui peuvent circuler indéfiniment et en toute sécurité dans le métabolisme industriel (Mc Donough et Braungart, 2011). Ils font partie intégrante d'un cycle technique clos au sein duquel les produits sont fabriqués, récupérés et réutilisés en les maintenant, idéalement, à un haut niveau de qualité tout au long du cycle de vie des produits (Van Den Abeele, 2011). Les similitudes entre les cycles de nutriments biologiques et techniques sont observées à la Figure 10. Comme dans les cas de l'économie circulaire et de l'écologie industrielle, le C2C propose un cycle en boucles fermées pour les nutriments techniques, tout en s'inspirant par analogie du cycle des nutriments biologiques. Ces approches ont un lien étroit avec la pensée systémique et la notion de système, car leur finalité est de s'approcher au maximum du fonctionnement des systèmes naturels en vue de concevoir des systèmes humains comme l'agriculture, l'habitat ou l'économie (Molina et Raskin, 2018). La nature a servi de base à l'élaboration de la théorie des systèmes, par exemple, les systèmes vivants comme (i) l'écologie (ii) la biologie et (iii) les systèmes humains (Durand, 2013).

²⁸ Concept créé par Vladimir Vernadsky qui définit un réseau mondial d'artefacts humains, comprenant des bâtiments, des machines, des routes et des appareils électroniques, etc. (<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1890/090171>)

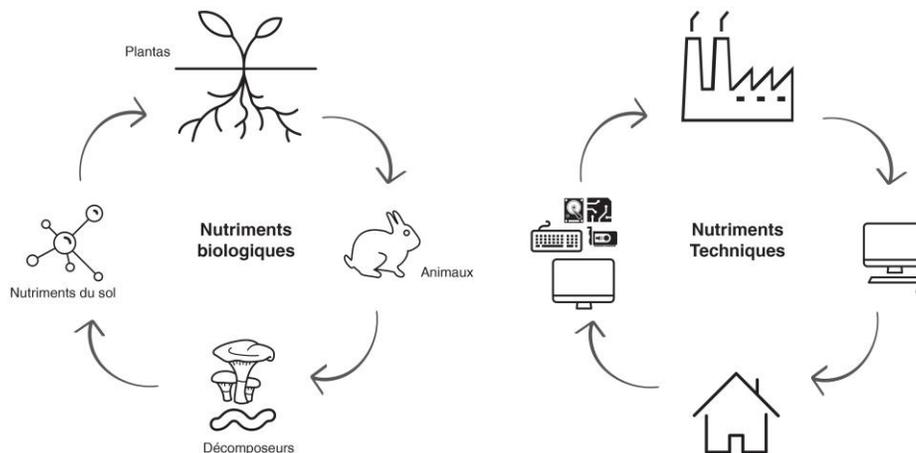


Figure 10 : Cycle de nutriment biologique et technique
 Source : L'auteur selon Mc Donough et Braungart (2011)

Malgré le grand potentiel du concept du *Cradle to cradle*, certaines controverses et limites ont été documentées dans la littérature (Llorach-Massana, Farreny et Oliver-Sola, 2015; Bakker *et al.*, 2010). Premièrement, le C2C peut s'inscrire dans le développement de produits avec une courte durée de vie, sans considérer les limites de la planète en termes d'approvisionnement des matières premières, de capacité de transport des matériaux à recycler ainsi que la quantité d'énergie utilisée et le coût pour réaliser le recyclage des nutriments techniques (Bakker *et al.*, 2010). Deuxièmement, la génération des nutriments biologiques, à travers les procédés industriels, n'est pas toujours bénéfique pour l'environnement. Reijnders (2008) souligne que la nature comporte des limites concernant l'absorption de nutriments biologiques, sans effets secondaires négatifs. En effet, des concentrations élevées de nutriments biologiques au sol peuvent générer un effet négatif sur la santé humaine ou des problèmes environnementaux, tels que l'eutrophisation²⁹ (Bakker *et al.*, 2010).

1.3.4 L'écologie industrielle

Le concept d'écologie industrielle, connu également sous le nom de métabolisme industriel ou symbiose industrielle, a été présenté en 1989 par Robert Frosch et Nicolas Gallopoulos, responsables de la recherche chez General Motors, dans l'article intitulé *Strategies for Manufacturing* parue dans la revue *Scientific American*. Selon ces auteurs, l'écologie industrielle s'inspire par analogie des écosystèmes biologiques (p. ex. : les forêts, les récifs coralliens) en vue de développer des écosystèmes industriels plus fermés et plus durables face aux

²⁹ Accumulation des nutriments organiques dans un milieu ou un habitat (terrestre ou aquatique) provoquant leur pollution par désoxygénation.

problèmes d'épuisement des ressources naturelles, de production de déchets et de pollution. Selon Caya *et al.* (2012), l'écologie industrielle propose une approche visant l'équilibre entre les trois sphères du développement durable :

- a) Sphère environnementale : la réduction du recours aux matières premières issues des ressources naturelles favorise la réduction des émissions polluantes et des déchets. En effet, l'écologie industrielle tente de minimiser l'empreinte écologique causée par le processus industriel ;
- b) Sphère économique : la réduction des coûts liés à l'acquisition de ressources et la réduction des coûts liés à la gestion de matières résiduelles ont un impact économique positif. L'écologie industrielle crée aussi de nouvelles sources de revenus pour l'entreprise à travers la valorisation des sous-produits ;
- c) Sphère sociale : L'écologie industrielle peut faciliter la création d'emplois compte tenu des gains économiques importants dus à la réduction globale des coûts de production. Par ailleurs, elle peut contribuer à l'amélioration de la qualité du milieu de travail grâce à la réduction des émissions polluantes et des déchets dans l'environnement.

Les écosystèmes biologiques sont des systèmes complexes dynamiques utilisant la matière et l'énergie disponibles efficacement en fonctionnant en boucles fermées. Ainsi, la plupart des matières consommées sont recyclées, transformées et réutilisées par d'autres organismes vivants (Diemer et Labrune, 2007). Frosch et Gallopoulos (1989) soulignent qu'un écosystème biologique ne peut jamais être atteint à l'échelle industrielle, compte tenu de la grande complexité associée à la création d'un écosystème industriel qui fonctionnerait de façon analogue au système biologique (p. ex. : les fruits qui tombent des arbres et nourrissent les microorganismes du sol avant de devenir des nouvelles plantes qui nourrissent les herbivores qui, à leur tour, nourrissent les carnivores, etc.). Ses auteurs soulignent que pour atteindre les mêmes niveaux qu'un écosystème biologique, le système industriel devrait optimiser toute la production d'énergie et matériaux, qu'il s'agisse du catalyseur utilisé dans le raffinement du pétrole, des cendres résiduelles de la production d'énergie électrique ou encore des emballages en plastique mis au rebut pour faire en sorte que les déchets deviennent de la matière première pour un autre processus (*Ibid.*). Néanmoins, l'utilisation des concepts naturels ayant pour but de rapprocher le monde industrialisé à l'écosystème biologique peut représenter un levier pour diminuer la pression sur l'environnement.

Au-delà de la préoccupation autour de la pollution et de l'épuisement des ressources, l'écologie industrielle propose une vision à long terme où le système industriel devient partie intégrante de la biosphère (Brodhag *et al.*, 2004). En effet, cette approche vise à minimiser la consommation de matière première, la pollution émise et

la quantité de déchets produits à partir d'une symbiose industrielle entre les entreprises partenaires (Van Den Abeele, 2011). Ces symbioses, qui sont en fait la mise en collaboration de deux ou plusieurs entités, sont organisées à partir de cycles industriels fermés où les déchets de l'une deviennent les ressources de l'autre. Une symbiose industrielle est une stratégie de l'économie circulaire appliquée à un réseau industriel sur un territoire au sein duquel des partenaires tels que des entreprises de service, des industries publiques ou privées échangent des résidus, coproduits et/ou d'énergie (Sauvé *et al.*, 2016).

L'exemple le plus connu et documenté dans la littérature en matière d'écologie industrielle est l'éco parc industriel de Kalundborg³⁰, le premier réseau de symbiose industrielle au monde, situé à Kalundborg, au Danemark. Il s'agit d'un partenariat entre huit entreprises publiques et privées (Equinor redefining Denmark, Ørsted, Kalundborg forsyning, Avista oil, Gyproc Saint Gobain, Argo, Kalundborgm Kommune OG Biopro et Novozymes OG Novo Nordisk) qui fonctionne, depuis 1972, selon une approche circulaire de la production. Cette dynamique a été développée à partir de l'association durable entre les entreprises partenaires, « des organisations publiques, des fermes locales ainsi que la collectivité, incluant ainsi plus d'une vingtaine de synergies industrielles pour le recyclage [...], mais aussi pour le partage de ressources, comme le pipeline nécessaire à l'approvisionnement en eau depuis le lac Tissø » (Sauvé *et al.*, 2016, p. 62) crée de la croissance dans la communauté et soutient la responsabilité sociale des entreprises (RSE) et la conversion verte de l'énergie. La Figure 11 expose, à travers un diagramme, la symbiose industrielle présente dans l'éco parc industriel de Kalundborg, selon un flux d'optimisation de l'utilisation de l'eau, d'économie d'énergie et de réutilisation de déchets. L'écologie industrielle, en tant que composante majeure de l'économie circulaire, est par conséquent un outil du développement durable (Aurez *et al.*, 2016) dont la finalité est la restauration du capital naturel et le développement du bien-être social (Fondation Ellen MacArthur).

³⁰ <http://www.symbiosis.dk/>

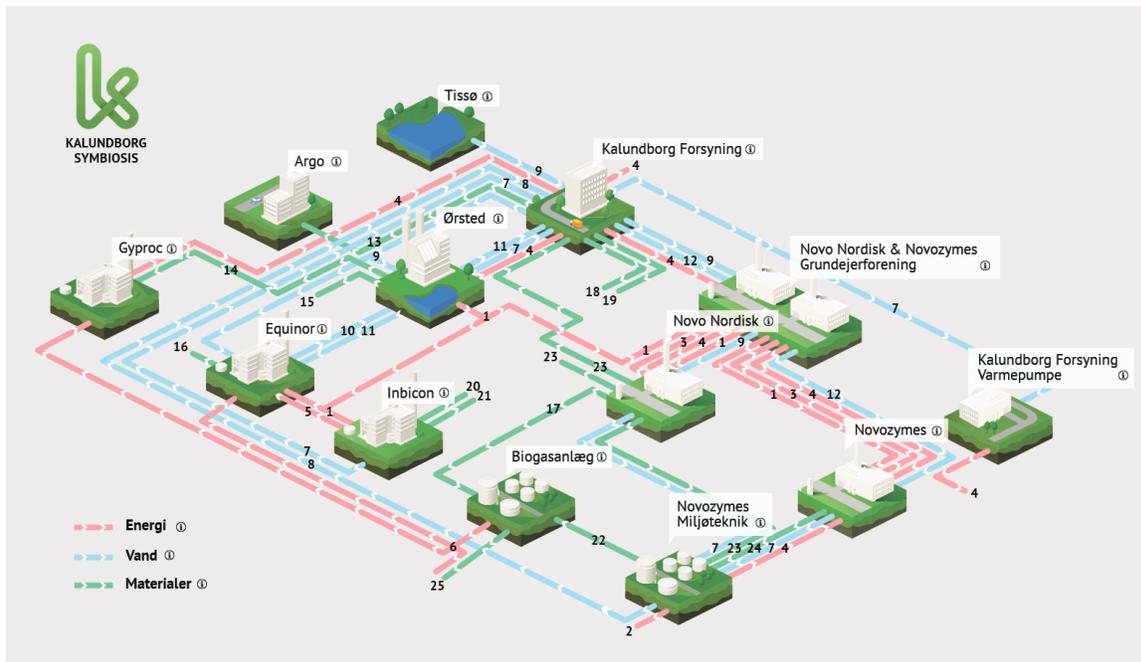


Figure 11 : Le Kalundborg symbiosis

Source : <http://www.symbiosis.dk/>

L'écologie industrielle comporte des limites principalement sur les plans géographique et logistique. Tout d'abord, la Fondation Ellen MacArthur³¹ souligne que, dans l'écologie industrielle, les processus de production et l'organisation des entreprises partenaires doivent être conçus depuis le début en fonction des contraintes écologiques locales et de l'impact global du système industriel, à l'image des systèmes vivants. En effet, les réseaux éco-industriels ont un potentiel physique, spatial et environnemental limité, ce qui va conditionner et circonscrire son application universelle (Marinos-Kouris et Mourtsiadis, 2013). La limite physique se réfère à la même limite déjà présentée dans la section sur l'économie circulaire : la limite thermodynamique. Cette limite concerne l'incapacité d'un recyclage complet des matériaux nécessitant toujours de l'énergie pour être réalisés. À long terme, cette limite physique pourrait conduire à une dégradation progressive de l'environnement (Marinos-Kouris et Mourtsiadis, 2013) en plus de toute l'énergie utilisée dans le transport et le traitement des déchets avant son utilisation. La limite spatiale concerne la distance et la synchronisation des flux (déchets et de ressources) entre les entreprises qui composent le réseau industriel afin de pouvoir facilement les échanger. Ensuite, les rejets et demandes de matériaux doivent être synchronisés dans un parc industriel. Finalement, la fréquence des collectes et distance de transport entre les entreprises seront déterminantes pour le succès économique de la symbiose (économie d'échelle). Par ailleurs, il existe quelques conditions de succès pour l'économie circulaire (voir 1.3.1), parmi lesquelles : i) les coûts de valorisation (stockage, transport) doivent être

³¹ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>

inférieurs aux coûts de traitement (entreprise A) et ii) les coûts de la matière valorisée doivent être inférieurs aux coûts de la matière vierge (entreprise B) (Sauvé *et al.*, 2016).

Comme mentionné plus haut dans le texte, la nature a été déjà utilisée comme source d'inspiration pour le développement de plusieurs innovations, dans des disciplines variées depuis le début de l'humanité, telles que l'ingénierie, l'architecture, l'agriculture, etc. (Benyus, 1997; Terrier *et al.*, 2017). La compréhension des avantages et points faibles de l'utilisation du biomimétisme dans ces solutions pourrait constituer un levier pour faciliter son intégration dans une démarche de design de produit.

1.4 État des lieux de l'utilisation du biomimétisme dans les disciplines de l'aménagement et du génie

1.4.1 Le biomimétisme dans l'ingénierie

Le biomimétisme a déjà inspiré plusieurs solutions, sous la forme de prototypes et/ou de produits ayant été commercialisés, dans le domaine de l'ingénierie. Cette approche « est en train de devenir un paradigme important pour la robotique, la science des matériaux et d'autres avec un potentiel d'impact scientifique, sociétal et économique importants » (Lepora *et al.*, 2013). L'efficacité des matériaux naturels, tels que les os, les ligaments, les muscles, le bois, les coquillages, les ailes, la peau, les poils, etc., démontre le grand potentiel de l'utilisation du biomimétisme dans le domaine de l'ingénierie (p. ex. : science des matériaux, mécanique, etc.) (Pereira *et al.*, 2015). Ces matériaux répondent à des exigences fonctionnelles complexes et multiples dans la nature, tout en utilisant une quantité minimale de matière et d'énergie (*Ibid.*). En fait, le biomimétisme est à la frontière entre la biomécanique et la biophysique, ouvrant ainsi la voie au développement de solutions avec des applications concrètes dans les secteurs aérodynamique, thermodynamique, mécanique et hydrodynamique (biomécanique) ainsi qu'en ingénierie acoustique, de la lumière et de la température (biophysique) (Volstad et Boks, 2012). En effet, Volstad et Boks (2012) ont identifié quatre grandes catégories permettant de mettre le biomimétisme en relation avec les domaines de la conception incluant l'ingénierie, l'architecture, le design et l'art) : (i) matériaux (science des matériaux) ; (ii) mécanique/dynamique (ingénierie générale et locomotion) ; (iii) structure (ingénierie structurelle et architecture) et forme (architecture, design de produits et art).

Il est généralement admis que les matériaux issus de la nature possèdent des propriétés optiques, hydrophobes, anti-biocolonisations et adhésives incroyablement plus efficaces que les matériaux conçus par l'Homme, comme le résumant Pereira *et al.* (2015) :

- a) Propriétés optiques (capacité à gérer la lumière) : le fabricant allemand de verre, Arnold Glas,³² a développé le verre Ornilux en utilisant les propriétés optiques des toiles d'araignée qui reflètent les rayons ultraviolets, évitant ainsi que les oiseaux les endommagent. Le revêtement du verre possède un motif de réflexion similaire à la toile d'araignée réduisant les collisions d'oiseaux sur les fenêtres de bâtiments ;
- b) Propriétés hydrophobe et autonettoyante : ces deux propriétés sont utilisées comme inspiration par l'industrie de la construction pour le développement de peintures autonettoyantes (nano-peintures répulsives à l'eau et aux salissures), telles que StoCoat³³ et Lotusan³⁴;
- c) Propriétés anti-biocolonisation, c'est-à-dire des matériaux qui empêchent la fixation de micro-organismes sur des surfaces : l'entreprise Sharklet Technologies³⁵, spécialisée dans le développement des produits non toxiques à base de la microtopographie, a développé une surface inspirée de la peau du requin, résistant aux organismes salissants dans l'eau, comme les algues et les balanes. La surface de Sharklet est composée de millions de caractéristiques microscopiques disposées dans un motif en forme de losanges distincts, ce qui empêche les bactéries de s'attacher, de coloniser et de former des biofilms ;
- d) Propriétés adhésives : l'entreprise Interface³⁶, un fabricant de tapis, a développé un ruban adhésif sans colle pour la fixation de ces produits grâce à l'inspiration des poils trouvés sous les pieds de gecko.

Les propriétés évoquées plus haut peuvent être utilisées comme source d'inspiration dans divers domaines de l'ingénierie, tels que présentés par Terrier *et al.* (2017) dans le Tableau 2.

³² <http://www.ornilux.com/>

³³ <http://stobrasil.com.br/produtos/tintas/stocoat-lotusan-80217/>

³⁴ <http://www.sto-sea.com/en/company/innovations/sto-lotusan-sto-color-lotusan.html>

³⁵ <https://www.sharklet.com>

³⁶ https://www.interface.com/EU/en-GB/about/modular-system/TacTiles-en_GB

Tableau 2 : Quelques domaines d'application du biomimétisme

Domaines d'application	Exemples
Matériaux bio-inspirés	Matériaux autonettoyants et hydrophobes, comme la feuille de lotus (Bhushan, 2009)
Aérodynamisme appliqué au transport	Le train Shinkansen développé par la West Japan Railway Company possède un « nez » inspiré du martin-pêcheur (Bhushan, 2009). Cette innovation permet la diminution des frottements aérodynamiques, la réduction du bruit lors du passage dans les tunnels et permet une baisse de 15 % de la consommation énergétique pendant le fonctionnement du train.
Énergie éolienne	L'entreprise Whale Power (2015) développe des pales d'éoliennes inspirées des tubercules présentes sur les nageoires de baleines. Cette conception limiterait la traînée aérodynamique et le bruit, tout en augmentant le rendement énergétique (Quinn et Gaughran, 2010).
Photosynthèse artificielle	Inspirées de la photosynthèse de plantes, les cellules photosensibles développées par Sun Catalytix (Ojo et Thomas, 2011) sont munies de catalyseurs électrolysant l'eau en hydrogène et oxygène lors de l'exposition au rayonnement solaire.
Énergie hydrolienne	L'entreprise BioPower Systems (BioPowerSystems, 2015) a développé des hydroliennes imitant l'oscillation de la queue des poissons ou encore inspirées de la forme des algues sous-marines constituant une approche bioinspirée pour capter l'énergie cinétique de l'eau et la transformer en électricité.
Sécurité appliquée au transport	Le véhicule Eporo développé par Nissan automobile est équipé d'un système de déplacement anticollision inspiré des bancs de poissons où des centaines d'individus se déplacent sans heurts (Ramirez, 2012). Cette conception biomimétique permettrait à de petits véhicules automatisés de rouler plus proche et plus rapidement, tout en diminuant les accidents et la congestion.
Agriculture	L'écomimétisme (permaculture) permettra la création d'écosystèmes agricoles plus durables avec la mise en œuvre de pratiques, telles que les cultures associées, la polyculture associée à l'élevage animal, la réduction du labour ou encore la conservation du couvert végétal et des haies vives constituant l'habitat de nombreux insectes protecteurs des cultures (Durand <i>et al.</i> , 2012).
Organisation des processus industriels	L'écologie industrielle (voir section 1.3.4) (Benyus, 2011) est un autre exemple de biomimétisme où le fonctionnement d'un écosystème avec ses interactions et ses cycles « fermés » est appliqué aux relations entre des entreprises géographiquement proches.

Source : Terrier, P., Glaus, M. et Raufflet, E. (2017)

L'un des exemples le plus répandus d'utilisation du biomimétisme dans une démarche de développement durable est celui de la *Bionic Car*³⁷ (Fig. 12). Ce concept de voiture, développé en 2005 par les ingénieurs du centre technique Mercedes-Benz et du centre de recherches Daimler-Chrysler, est inspiré du poisson-coffre vivant dans l'océan Indien et Pacifique (Kapsali et Perry, 2017). Plusieurs avantages découlent de ce concept

³⁷ <http://www.daimler.com/>

inspiré du biomimétisme incluant : i) un aérodynamisme plus efficace, ii) une réduction considérable de la consommation de carburant et des émissions de polluants (Ruszaj, 2015) ; iii) ainsi qu'une diminution du poids de la voiture, sans perte de stabilité et de résistance mécaniques (Zari, 2007). Malgré ces résultats concluants dans les tests, la *Bionic Car* est restée un concept n'ayant jamais été lancé sur le marché. Sans que les raisons soient mentionnées dans la littérature, il est possible de supposer que la complexité de mise en œuvre d'un projet de biomimétisme, tout comme les coûts élevés qui y sont associés, ait pu mener à l'abandon de ce projet.

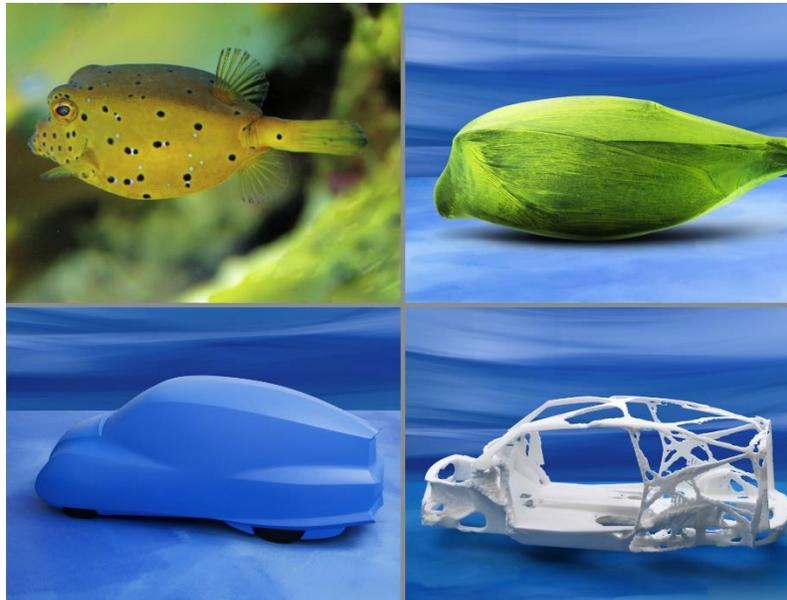


Figure 12 : La *Bionic car*, 2005
Source : <http://carinpicture.com>

Le Train à grande vitesse (TGV), connu sous le nom de Shinkansen au Japon, est un autre exemple illustrant le potentiel d'application du biomimétisme dans une démarche de design de produits. Comme le Japon est un pays montagneux, les lignes ferroviaires sont composées à la fois de tunnels et de voies à ciel ouvert. Le Shinkansen (série 500) est l'un des trains les plus rapides au monde pouvant atteindre des vitesses de 320 km/h, créant ainsi une problématique de déflagration à la sortie du tunnel (Kapsali et Perry, 2017). L'équipe d'ingénieurs, sous la direction du designer allemand, Alexandre Neumeister, a cherché dans la nature des solutions visant à faciliter la transition du TGV entre les zones à basse et à haute vitesse (*Ibid.*). L'un des membres de l'équipe de conception, l'ingénieur en chef de la West Japan Railway, Eiji Nakatsu, qui était également un ornithologue spécialiste du martin-pêcheur, a pensé à cet oiseau comme une inspiration pour résoudre ce problème (Fig. 13) (Fayemi *et al.*, 2013). Ces oiseaux plongent sous l'eau (un environnement offrant plus de résistance que l'air) pour attraper les proies, sans causer d'éclaboussures grâce à leur bec aérodynamique (Lebel, 2017). Comme résultat de l'application du biomimétisme dans le projet du Shinkansen,

il y a eu une réduction de 15 % de sa consommation énergétique (Kapsali et Perry, 2017) et une augmentation de 10 % de sa vitesse, tout en diminuant la nuisance sonore et en respectant les normes acoustiques en vigueur (Fayemi *et al.*, 2013).



Figure 13 : Inspiration biomimétique dans le concept du TGV Shinkansen

Source : Asknature.org

1.4.2 Le biomimétisme dans l'architecture

L'approche du biomimétisme appliquée à l'architecture représente un changement de paradigme dans la manière de concevoir les habitats. Comme l'a souligné Antoni Gaudi, l'un des principaux architectes de la fin du XIX^e et début du XX^e siècle, « l'architecture du futur se construira en imitant la nature parce que c'est la plus rationnelle, durable et économique des méthodes ». En effet, le biomimétisme peut conduire à des innovations afin de concevoir un environnement bâti soutenable à différents niveaux, que ce soit une maison, un bâtiment,

un quartier ou une ville durable (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018). À cet égard, les principes et stratégies rencontrés dans les écosystèmes naturels sont transférés aux projets d'architecture en vue de concevoir des habitats en harmonie avec le fonctionnement de la nature, en ce qui concerne leurs matériaux, leurs formes et leur fonctionnement (Scheffer, 2011). Amer (2019) invite les architectes à explorer la richesse de la nature en vue de changer leur paradigme de conception, non seulement pour améliorer la fonctionnalité et les valeurs esthétiques des projets, mais aussi pour interpréter des stratégies et des méthodologies durables par intégration de la nature. Cependant, cet auteur souligne qu'il faut se méfier d'une interprétation trop directe de la nature nuisant à la compréhension des stratégies et principes naturels. En effet, l'abstraction prend une importance capitale dans la démarche en biomimétisme, car elle facilite la compréhension et le transfert de ces stratégies aux solutions architecturales.

Patricia Ricard (2015) identifie, dans son rapport intitulé *Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement*, trois principes qui guident l'architecture biomimétique : (i) un fonctionnement à travers les énergies renouvelables (p. ex. : énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique, biomasse, énergie géothermique, etc.) et une optimisation des ressources s'inspirant des formes et des structures des organismes vivants ; (ii) un fonctionnement en boucle fermée comme dans le cadre des réseaux intersectoriels (p. ex. : écologie industrielle, ville durable, etc.) où les déchets des uns deviennent les ressources des autres et (iii) l'utilisation des ressources permettant la réduction des flux d'énergie ainsi que des émissions de carbone liées au transport de ces ressources.

Un exemple très connu dans la littérature en architecture biomimétique est l'*Eastgate Building* (Figure 14 ci-dessous) situé à Harare au Zimbabwe, conçu par l'architecte Mick Pearce³⁸ qui s'est inspiré du fonctionnement des termitières. En fait, les termites réussissent à contrôler les flux d'air à travers l'ouverture ou la fermeture de tunnels à l'intérieur de la termitière en réponse à un changement de température. Selon Chekchak et Lapp (2011, p. 162) :

Les termitières comportent des régulateurs de température très efficaces sous la forme de canaux et d'opercules. Les termites contrôlent les flux d'air en créant de nouveaux tunnels et en ouvrant ou fermant les opercules en fonction de la température extérieure. Cela permet à la termitière de rester fraîche sous des températures caniculaires et de restituer la chaleur accumulée la journée pendant la nuit. La température à l'intérieur reste constante, quelle que soit la température extérieure.

³⁸ <http://www.mickpearce.com/>

L'*Eastgate Building* s'inspire du même concept que celui des termitières en faisant appel à une méthode de refroidissement passive utilisant des cheminées situées dans le bâtiment tout en assurant la circulation de l'air (Chekchak et Lapp, 2011). Une étude comparative menée auprès de six autres bâtiments a montré que l'*Eastgate Building* utilise 35 % moins d'énergie qu'un bâtiment conventionnel fonctionnant avec l'air conditionné, soit une économie estimée à environ 3,5 millions de dollars sur cinq ans (Chayaamor-Heil *et al.* 2018; Levillain et Thebaud, 2016 cités dans Chayaamor-Heil *et al.* 2018). Néanmoins, le biomimétisme a été utilisé dans ce projet d'architecture uniquement sur la façade du bâtiment, ce qui limite l'analyse de la performance de l'utilisation du biomimétisme dans des projets complets (El Ahmar et Fioravanti, 2015).

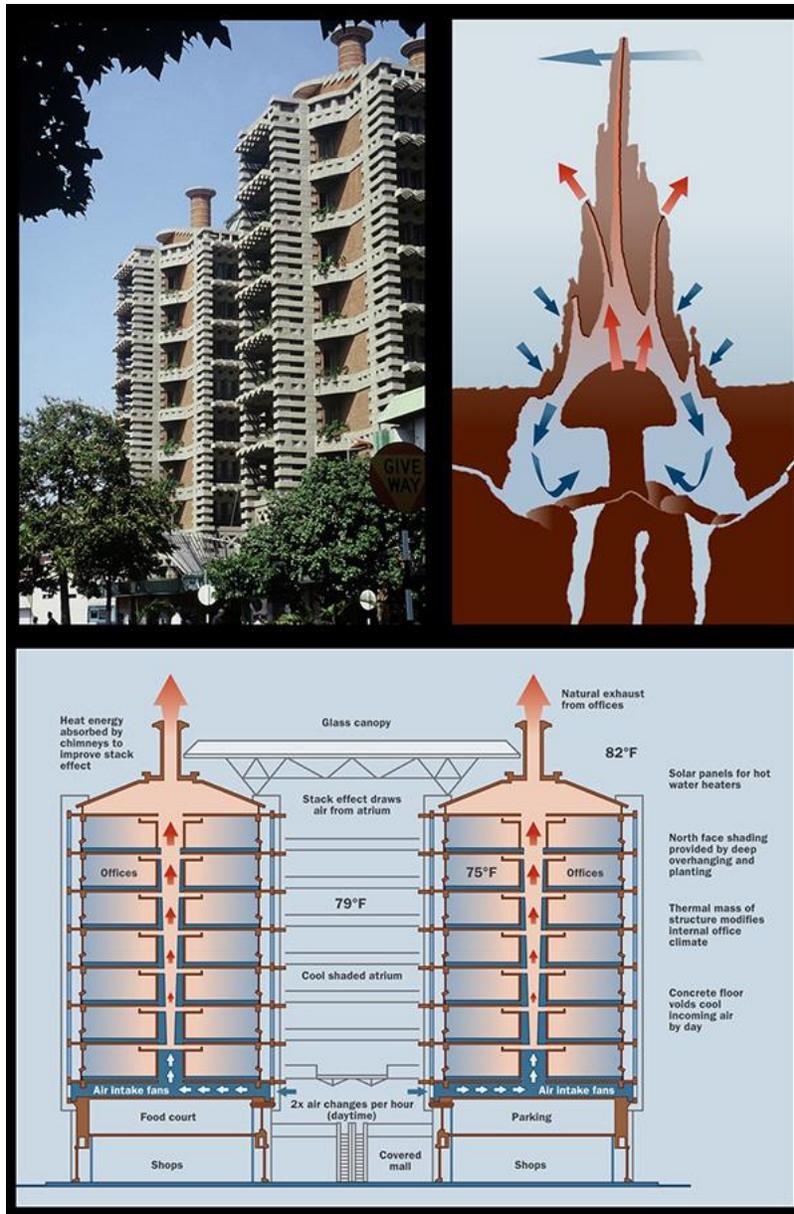


Figure 14 : L'Eastgate Building et le système de ventilation des termitières
 Source : Chayaamor-Heil *et al.* (2018)

Malgré la grande disponibilité d'exemples de systèmes naturels qui pourraient être utilisés pour concevoir des habitats durables, il en résulte une grande complexité liée à la compréhension et l'imitation de ces systèmes. En fait, l'imitation des formes et structures complexes présentées dans la nature ne peut se faire sans l'aide de la technologie. Les outils technologiques ainsi que l'utilisation d'ordinateurs à travers des algorithmes complexes pourraient aider à mieux reproduire le fonctionnement de la nature (Aziz, 2016). Par ailleurs, l'absence d'une méthodologie solide capable de garantir l'efficacité du biomimétisme en architecture demeure une des barrières à l'utilisation de cette approche (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018).

Dans une dimension plus large, l'application du biomimétisme pourrait être aussi envisagée en urbanisme. À cet effet, Patricia Ricard (2015) souligne que le biomimétisme pourrait constituer un levier pour que les sociétés humaines réussissent à concevoir un univers urbain résilient à travers, par exemple, le développement de villes inspirées des écosystèmes naturels. À l'heure actuelle, il n'existe pas encore un exemple de l'utilisation du biomimétisme à l'échelle des villes, cependant, Scheffer (2011) souligne que cette approche pourrait représenter une grande source d'inspiration pour concevoir des solutions durables à l'échelle des villes.

Conclusion

Le designer de produits est un acteur stratégique incontournable dans la mise en œuvre du développement durable, notamment en ce qui a trait aux produits qu'il conçoit et qui seront ensuite mis sur le marché. Pour ce faire, il dispose de plusieurs approches, telles que l'économie circulaire, l'écologie industrielle, le *cradle to cradle* et l'écoconception, qui visent à diminuer principalement les impacts environnementaux des produits tout au long de leur cycle de vie. Ces approches présentent des limites, soit par leur complexité de mise en œuvre, comme dans le cas de l'économie circulaire, soit par l'impossibilité de répondre pleinement aux trois sphères du développement durable en offrant des solutions à long terme, comme dans le cas de l'écoconception, du *cradle to cradle* et de l'écologie industrielle. Ces limites pourraient être atténuées à partir de la combinaison de ces approches à d'autres méthodes (p. ex. : ACV, ACVS, etc.), en dépendant de la complexité et de la nature du projet, avec le but d'augmenter la durabilité des solutions.

L'analyse succincte de ces approches démontre le besoin de développer des outils de conception d'écoproduits s'inscrivant dans une vision à long terme, comme le préconise le développement durable à travers le développement de produits viables pour l'économie et la société, équitables et qui bénéficient à l'économie locale en étant durable (robuste et fiable) pour l'environnement. L'actuelle crise écologique ouvre la voie aux développements de nouvelles approches comme le biomimétisme, peu définies sur le plan méthodologique (Molina et Raskin, 2018), mais pouvant avoir le potentiel de combler plus systématiquement les défis résultant du développement durable. Papanek (1974) affirmait déjà à son époque que le designer doit s'intéresser à l'écologie et à l'éthologie pour trouver des équivalents aux systèmes biologiques, parce qu'il n'est ni possible ni souhaitable de créer un objet, sans tenir compte de son contexte sociologique, psychologique et urbain. De cette façon, le biomimétisme pourrait représenter un véritable changement dans notre économie en transformant nos façons de penser sur la conception, la production, le transport et la distribution de biens et services (Ataide, 2010).

Chapitre 2 : Formulation de la problématique

Ce chapitre a pour objectifs d'analyser le potentiel d'innovation du biomimétisme en design de produits et de comprendre les raisons pour lesquelles les designers de produits ne l'utilisent généralement pas au-delà de l'analyse formelle. Certains exemples de produits conçus à partir du biomimétisme sont présentés en vue d'effectuer une synthèse sur l'état d'avancement méthodologique de cette démarche ainsi que ses limites.

2.1 L'homme et la métaphore de la nature

Depuis le début de l'humanité, la métaphore de la nature a été fréquemment utilisée par l'homme pour soutenir leur compréhension du monde et aussi pour implémenter toutes sortes d'innovations. La nature a été utilisée, depuis des siècles, comme une source d'inspiration et elle a aidé à résoudre de nombreux problèmes (Volstad et Boks, 2008; Ricard, 2015). Le processus d'inspiration par analogie est une façon de penser, à travers laquelle les propriétés et les similitudes d'un objet sont transférées à un autre (Baxter, 2015). Ces propriétés peuvent être aussi utilisées pour créer des solutions complètement nouvelles, et découvrir comment un problème similaire peut être résolu dans un contexte différent, tel que proposé par les approches basées sur les systèmes naturels (p. ex. : économie circulaire, écologie industrielle, *cradle to cradle* et biomimétisme) (*Ibid.*). Le raisonnement analogique est un outil de la systémique qui peut relier des domaines différents à travers le transfert de connaissance (Durand, 2013).

L'acte d'imiter la nature est un phénomène observé dans la plupart des cultures qui ont un contact étroit avec le monde vivant (Morinière, 2009). Ce sont les Inuits qui, dans l'Arctique, imitent l'ours blanc pour chasser les phoques sur la banquise, et Léonard de Vinci, grand peintre et génie de la Renaissance, créa ses « folles » machines volantes en se basant sur l'étude du vol des oiseaux (Chekchak et Lapp, 2011). D'autres exemples, tels que (i) l'invention du velcro par George de Mestral en 1948 inspirée des fleurs de bardane ; (ii) le développement du premier prototype d'avion (Éole) par Clément Ader en 1890 dont les ailes ont été inspirées de celles des chauves-souris (Scheffer, 2011) ; (iii) le matériel optique ; (iv) les équipements de radiolocalisation et (v) les outils de navigation (Podborschi et Vaculenco, 2005) correspondent à des solutions pensées par analogie à la nature.

Léonard de Vinci fut un grand interprète de la nature et il l'a utilisée pour guider le développement de ses inventions. Au-delà de l'observation purement formelle ou fonctionnelle des éléments naturels, Léonard de Vinci pensait, de façon systémique, par l'interrelation des éléments qu'il observait. Par exemple, des remous dans

l'eau l'ont incité à observer des formes similaires dans les turbulences de l'air, puis à approfondir l'étude sur la nature du son, la théorie de la musique et la configuration des instruments musicaux (Capra, 2010). La nouvelle approche empirique de la science développée par Léonard de Vinci exigeait une observation méthodique de la nature, un raisonnement logique et des formules mathématiques (*Ibid.*). La vision de Léonard de Vinci était en grande rupture avec la pensée rationaliste proposée par Aristote. Selon Durand (2013), l'approche systémique pourrait permettre d'adapter nos modes de pensée (rationalisme classique) aux besoins du monde actuel (pensée systémique). De surcroît, l'utilisation des systèmes naturels, comme inspiration pour le développement de produits, pourrait représenter un levier vers une société plus durable.

2.2 Le biomimétisme comme outil de recherche pluridisciplinaire

Au cours de la dernière décennie, le biomimétisme a pris une grande importance comme domaine de recherche grâce aux nouvelles découvertes en biologie et en ingénierie, telles que les technologies de l'information et du calcul, de la robotique, de l'interfaçage cerveau-machine et des nanotechnologies appliquées aux sciences de la vie, etc. (Lepora *et al.*, 2013). Cette croissance se reflète par le nombre croissant d'articles dans les revues scientifiques, le nombre de brevets publiés, le nombre de subventions et la valeur monétaire des subventions (Appio *et al.*, 2017).

Bien que les perspectives dans le domaine scientifique démontrent une bonne évolution des études liées au biomimétisme, les perspectives sur le processus de biomimétisme dans le développement de produits font encore défaut. Comme mentionné précédemment, l'idée de s'inspirer de la nature n'est pas nouvelle, car cette pratique a été adoptée tout au long de l'histoire de l'humanité. Avant l'invention des apports technologiques comme des loupes et de microscopes, l'homme utilisait son imagination, la philosophie naturelle et les systèmes de croyances (p. ex. : la religion et la mythologie) pour comprendre la nature (Kapsali et Perry, 2017). Ainsi, un exemple très connu dans la mythologie grecque est Icare qui est mort après avoir volé trop près du soleil avec des ailes de cire créées par son père (Cursaru, 2012).

Benyus (2009) souligne qu'après 3,8 milliards d'années de développement naturel, ce qui nous entoure est le plus efficace possible. Le biomimétisme est une approche consistant à étudier la nature sous toutes ses formes (animal, plantes, micro-organismes, écosystèmes) afin de concevoir des stratégies, des matériaux ou des procédés novateurs au service de l'humain et compatibles avec le développement durable : moins polluant, moins consommateurs d'énergie, recyclables, plus sécuritaire, de meilleure qualité et à moindre coût (Bœuf, 2014). La Figure 15 représente le temps de la formation de la terre jusqu'à aujourd'hui sur une horloge de douze

heures à partir de minuit (il y a 4.55 milliards d'années³⁹). Elle présente la progression de l'apparition des premières bactéries (2:46:52"), l'augmentation de l'oxygène atmosphérique (5:56:51"), l'apparition des premiers lichens (10:40:59"), des premiers animaux vertébrés (10:59:59") et du premier homme (11:59:57"). Cette horloge, représentant le temps de formation de la terre, indique que l'évolution humaine ne représente que trois secondes sur les douze heures. Bien que cette évolution ait permis de grands avancements sur les plans technologique, social et économique, la nature a vécu un riche processus de transformation, d'évolution et d'adaptation qui ne peut pas être négligé. Selon la perspective du biomimétisme, l'homme pourrait profiter de cet univers fertile et fascinant d'innovations développées par la nature pendant son évolution pour apporter des solutions durables à la société.

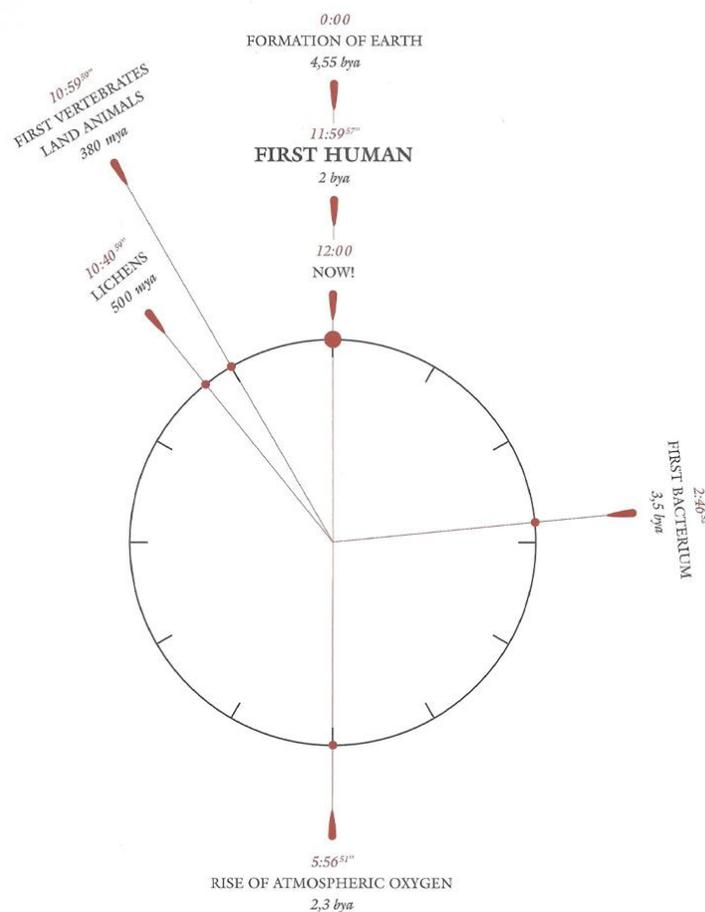


Figure 15 : Temps de la formation de la terre
Source : Ternaux (2012)

³⁹ Le temps de la formation de la terre est une donnée approximative. Certains auteurs, comme Benyus (2009), considèrent que le temps de la formation de la terre aurait été de 3.8 milliards d'années.

Même si s'inspirer de la nature n'est pas une nouvelle démarche en tant que telle, le biomimétisme propose un nouveau rapport à la nature (Ricard, 2015). Le développement de cette démarche suppose l'abandon du modèle traditionnel de pensée et d'organisation au profit d'un réseau interdisciplinaire entre les concepteurs, les ingénieurs, les chercheurs, les industries et les biologistes (*Ibid.*). Cette démarche, pour être utilisée de façon efficace, aurait besoin d'être enseignée pour former des professionnels multidisciplinaires. Bien que, dans la plupart des cas, les designers soient habitués à travailler avec des équipes multidisciplinaires et en collaboration avec des parties concernées, les disciplines sont connexes et normalement liées au processus de développement de produits (ingénierie de matériaux, logistique, marketing, gestion de projet, etc.). Dans le biomimétisme, le type de disciplinarité est différent, car le designer est appelé à collaborer avec lesquelles il est moins habitué à travailler comme la biologie et la chimie.

2.3 Les niveaux d'utilisation du biomimétisme

Benyus (2009) explique que les problèmes rencontrés par l'humanité ont déjà été résolus par la nature de manière optimale dans l'ensemble des systèmes biologiques et biochimiques. L'auteur souligne que, contrairement à la révolution industrielle, la révolution biomimétique inaugure une ère dont les fondements sont basés non pas sur ce que nous pouvons extraire de la nature, mais sur ce que nous pouvons apprendre d'elle. Elle propose l'utilisation de la nature dans l'approche du biomimétisme à trois niveaux différents :

- a) Comme un modèle, à travers l'étude et l'imitation ou l'inspiration ultérieure dans leurs processus afin de résoudre les problèmes humains. Pour Fayemi, Maranzana, Aoussat, et Bersano (2014), le biomimétisme est une philosophie consistant à prendre la nature comme modèle, notamment sur le plan organisationnel afin de répondre aux différents enjeux sociaux, environnementaux et économiques associés au développement durable. En réalité, cette approche permet la préservation de la biodiversité et la création de produits ou services novateurs sans endommager l'environnement, ce qui représente une des ambitions du développement durable (Chevassus-au-Louis, 2012) ;
- b) Comme une mesure, grâce à l'utilisation de leurs normes biologiques pour la correction de nos innovations. En effet, le biomimétisme propose l'utilisation des standards rencontrés dans la nature dans le but de valider nos innovations (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018). Comme le propose Benyus (2009), la nature a appris durant 3,8 d'évolution ce qui fonctionne, ce qui est approprié et ce qui est durable.
- c) Comme un mentor, car le biomimétisme représente une nouvelle façon de voir et d'apprécier la nature. En fait, le biomimétisme propose un nouveau regard dont la base s'appuie sur ce que la nature peut

nous apprendre (Benyus, 2009). Dans ce contexte, la nature devient une grande référence avec une panoplie des solutions capables de guider les solutions de design.

Encore, selon Benyus (2009), le biomimétisme présente trois niveaux différents concernant l'inspiration naturelle ⁴⁰ (Figure 16) :

- a) Les formes : ce premier niveau vise à s'inspirer et copier les formes retrouvées dans la nature en vue de concevoir des produits mieux adaptés aux contraintes du projet. C'est le cas de la conception du « nez aérodynamique » du train grande vitesse japonais le Shinkansen, inspiré de la forme du bec du martin-pêcheur (Terrier *et al.*, 2017), présenté plus haut dans le texte. Ce niveau d'inspiration va aider à résoudre un problème spécifique, mais il n'y a aucune garantie que la solution soit plus respectueuse de l'environnement (Volstad et Boks, 2008) ;
- b) Les procédés et les matériaux : le deuxième niveau dépasse l'inspiration des formes et se concentre à imiter les procédés et les matériaux naturels. Il correspond à une étape plus profonde ou holistique du biomimétisme, car les processus de production dans la nature ne nuisent pas à la nature (Volstad et Boks, 2008). Un autre exemple, présenté plus haut dans le texte, est celui de la climatisation naturelle des termitières qui a inspiré l'architecte Mike Pearce pour concevoir l'*Eastgate* à Harare au Zimbabwe qui utilise le même processus de circulation ascendante naturelle de l'air (Terrier *et al.*, 2017).
- c) Les écosystèmes : le troisième niveau consiste à utiliser les écosystèmes naturels comme modèle pour innover durablement. Ce point de vue consiste à considérer tout le chemin dans lequel la nature parvient à produire sans endommager l'environnement, à travers un tout considéré comme faisant partie d'un système (Volstad et Boks, 2008). Ce niveau intègre une pensée systémique en considérant « l'ensemble d'interrelations d'un écosystème "mature" capable de se maintenir dans des environnements dynamiques » (Fayemi *et al.*, 2013). L'écologie industrielle s'inscrit dans ce troisième niveau puisque cette approche vise à utiliser les systèmes biologiques en vue de concevoir des symbioses industrielles.

⁴⁰ Benyus, « Spreading the Meme: A Biomimicry Primer. » Repéré à http://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf

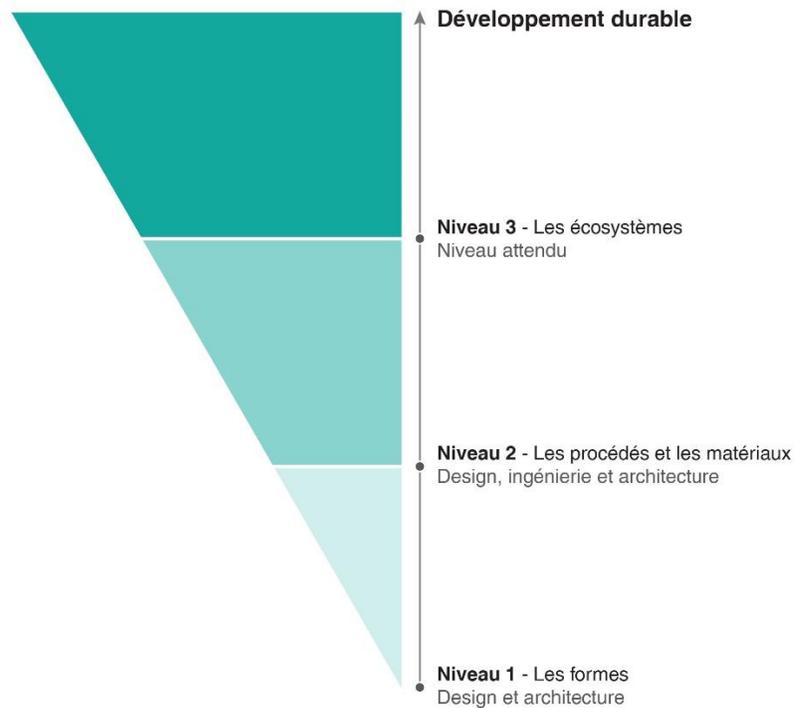


Figure 16 : Les niveaux d'utilisation du biomimétisme
 Source : L'auteur selon Benyus (2009)

2.3.1 Les éléments composant le biomimétisme

Selon l'institut américain Biomimicry 3.8⁴¹ (2014) dans son ouvrage *Biomimicry : ressource handbook*, la base du biomimétisme est formée par l'interconnexion des trois éléments ci-dessous (Figure 17) :

- a) *Ethos* : constitue l'essence de l'éthique, de l'intention et de la philosophie concernant la pratique du biomimétisme ;
- b) (Re) *connect* : renforce la compréhension que l'être humain appartient à la nature et qu'il doit explorer et approfondir cette relation de manière harmonieuse et durable ;
- c) *Emulate* : se rapporte aux principes, aux modèles, aux stratégies et aux fonctions naturelles permettant d'éclairer les solutions de conception de façon durable et résiliente.

⁴¹ <http://biomimicry.net/>

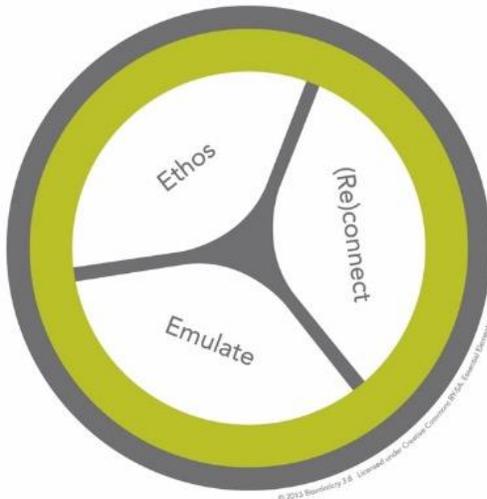


Figure 17 : Éléments essentiels du biomimétisme
 Source : Biomimicry 3.8 (2013)

Ces trois éléments ont une forte correspondance avec la pensée systémique à travers les principes de l'auto-éco-organisation exprimée par Le Moigne (1994) et Morin (1982). Telle qu'exposée par Edgar Morin dans la *Méthode 1*, « l'interdépendance d'un être vivant nécessite sa dépendance à l'égard de son environnement » (p. 204). Fortin (2005) souligne trois types de dépendance : (i) dépendance nourricière, nécessaire au maintien et à la régénération des êtres vivants ; (ii) dépendance géographique nécessaire à son adaptation au milieu et (iii) dépendance informationnelle, car l'être vivant échange des informations avec l'environnement, ce qui est indispensable à sa survie. Encore selon Fortin (2005, p. 56), « la connaissance de la vie concerne l'organisation de nos échanges avec l'environnement (la relation écologique), la problématique de l'organisation vivante (l'autos) et les caractères non élémentaires de l'existence (vivante), qui sont les caractères non élémentaires de l'individualité (l'individu-sujet) ». Or, le biomimétisme propose un retour à notre relation profonde avec la nature, comme au commencement de l'humanité, de façon durable et harmonieuse. L'être humain est considéré dans ce contexte comme une partie intégrante de la nature.

2.4 Le potentiel d'innovation du biomimétisme

Depuis plus d'une décennie, le biomimétisme fait l'objet de nombreuses recherches comme en témoigne le développement, à travers le monde, de plusieurs laboratoires et centres de recherche, notamment en Allemagne (BIOKON⁴²), au Royaume-Uni (BIONIS - *Permaculture Association*), aux États-Unis (Biomimicry Institute⁴³, The

⁴² <http://www.biokon.de/>

⁴³ <https://biomimicry.org/>

Biomimicry Center⁴⁴, Biomimicry Research and Innovation Center – BRIC⁴⁵, et au Japon (KAIST Biomimetics Lab⁴⁶) (Durand *et al.*, 2012).

Cette approche est considérée comme l'une des boîtes à outils de la quatrième révolution industrielle (Laffitte et Saunier, 2007) et pourrait avoir des effets économiques et sociaux positifs grâce au développement de nouvelles activités économiques et à la création d'emplois (Colle, 2018). Cette nouvelle révolution s'est construite sur la troisième, la révolution numérique qui se caractérise pour un grand développement technologique dans les sphères physiques, numériques et biologiques (Schwab, 2016). La numérisation de l'économie, la combinaison de nouvelles technologies, le progrès de la robotisation, internet, le « big data » et l'impression 3D sont en train de transformer en profondeur les organisations de nos sociétés, notre façon de produire, de communiquer et de consommer (Daoudi, 2016). Ce contexte de grande innovation crée un paradoxe puisque le développement technologique peut être, sous certains angles, opposé au concept de développement durable, c'est-à-dire que le développement et la production de nouvelles technologies ont généralement recours à une grande consommation d'énergie, de matériaux naturels, tout en raccourcissant le cycle de vie des produits (obsolescence programmée) et générant une grande quantité de déchets. Cependant, la technologie peut également représenter un important levier pour la mise en œuvre du biomimétisme, une fois qu'elle rend possible la compréhension des structures naturelles (à l'aide des algorithmes, par exemple) qui sont extrêmement complexes (Aziz, 2016).

Le *Natural Edge Project*⁴⁷, un partenariat de collaboration pour la recherche, l'éducation et l'élaboration de politiques en matière d'innovation pour le développement durable, basé en Australie, présente six vagues d'innovations depuis la première révolution industrielle en 1785 (Fig. 18). Parmi les innovations soulignées par le *Natural Edge Project*, le biomimétisme apparaît comme une composante de la sixième vague d'innovation. Les autres composantes de cette vague d'innovation sont le développement durable, la productivité radicale des ressources, la conception complète du système, la chimie verte, l'écologie industrielle, l'énergie renouvelable et la nanotechnologie verte. Le *Natural Edge Project* prévoit que la prochaine vague d'innovations sera basée sur des alternatives de production durable capables d'alléger la charge sur l'environnement.

⁴⁴ <http://biomimicry.asu.edu/>

⁴⁵ <https://blogs.uakron.edu/biomimicry/>

⁴⁶ <http://biomech.kaist.ac.kr/>

⁴⁷ <https://research.qut.edu.au/tnep/>

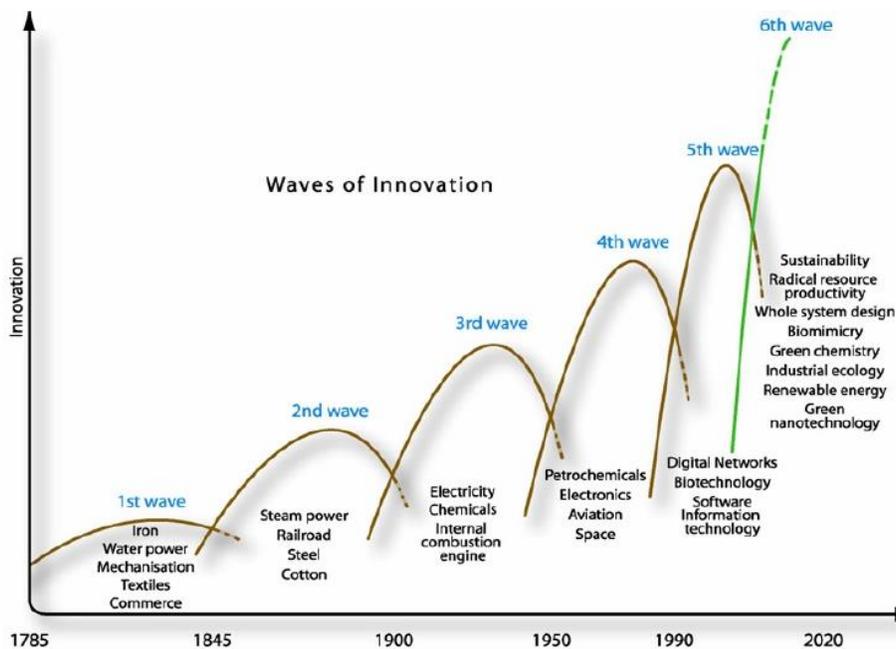


Figure 18 : Les vagues de l'innovation depuis la première révolution industrielle
 Source : *The Natural Edge Project (2005)*

Le biomimétisme pourrait également être un enjeu économique majeur dans les années à venir⁴⁸. Durand *et al.* (2012) mettent en lumière le potentiel d'innovation que le biomimétisme possède dans le contexte de l'économie verte, permettant une utilisation efficace et suffisante de la ressource énergétique et des matières premières non renouvelables. Dans cette perspective, le biomimétisme présente un grand potentiel dans la conception de produits s'inscrivant dans l'optique du développement durable.

2.5 Le biomimétisme en design de produits

La *start-up* américaine, *Biomimicry Design LLC*,⁴⁹ une équipe d'innovation internationale et multidisciplinaire fondée en 2012 par cinq membres spécialistes certifiés en biomimétisme par le *Biomimicry 3.8* dont France Guertin (génie chimique et environnemental), Maria Luisa Gutierrez (conception de l'emballage), Bill Hsiung (bioscience intégrée), John Paulick (design [industriel] de produits) et Karen Rossin (design d'intérieur), propose l'utilisation de modèles naturels à travers le biomimétisme dans le processus de développement de produits à

⁴⁸ The Global Biomimicry Efforts : An Economic Game Changer. Selon la projection de l'Institut économique américain Fermanian Business & Economic Institute en 2025, le biomimétisme pourrait équivaloir à 300 milliards de dollars par an du produit intérieur brut des États-Unis (PIB48) en comblant, entre autres, 1,6 million d'emplois aux États-Unis d'ici cette même année. Globalement, le biomimétisme pourrait représenter environ 1 milliard de dollars du PIB mondial en 2025.

⁴⁹ <http://www.biomimicrydesign.com>

moindres impacts environnementaux. L'entreprise se positionne sur le marché en tant que développeur de solutions durables de produits. L'une des trois études de cas présentées sur leur site Web est celle de *Wine Hiver* (Fig. 19), produit conçu par John Paulick, designer industriel spécialiste en biomimétisme. Le *Wine Hiver* utilise les structures de nids d'abeilles comme inspiration. Ce rack à vin s'inscrit dans l'approche *cradle to cradle* en étant construit uniquement avec de l'aluminium 100 % recyclé. Quand il arrive à la fin de vie utile, le matériel peut retourner dans un processus industriel en tant que ressource technique, comme le propose le *cradle to cradle*. Le *Wine Hiver* s'inscrit également dans une démarche d'écoconception grâce à leur système de verrouillage breveté composé d'un seul élément structurel en aluminium extrudé qui se répète pour former un réseau de structures de nids d'abeille. Cette stratégie favorise l'optimisation de procédés dans la fabrication du produit tout en réduisant les impacts environnementaux tout au long du cycle de son cycle de vie. En plus, *Wine Hiver* s'inscrit dans certaines stratégies d'écoconception, comme le proposent Maxime Thibault et Alexandre Leclerc (2014), à savoir (i) la conception pour la réutilisation et la récupération des matériaux (utilisation des matériaux recyclables) ; (ii) le design pour le désassemblage (optimisation de l'opération de démontage, facilité dans l'accès et le remplacement des pièces) ; (iii) le design en vue de la récupération et de la réutilisation des déchets ; (iv) design pour la conservation de la matière première (utilisation de matériaux recyclés, recyclables et renouvelables).

L'inspiration pour ce projet *Wine Hiver* demeure formelle, même s'il s'inscrit dans le *cradle to cradle*. Ces structures naturelles, très efficaces dans la nature, ont permis une très bonne résistance du système. Dans cet exemple, la forme suit la fonction.



Figure 19 : Winehive
Source : <https://www.kickstarter.com>⁵⁰

⁵⁰ <https://www.kickstarter.com/projects/johnpaulick/winehive>

Un autre exemple de produit conçu dans une l'optique d'approche biomimétique est le concept Bouilloire Nautille⁵¹ (Fig. 20). Ce produit bio-inspiré a été conçu en 2012 par le designer Guillian Graves et le bio-ingénieur Michka Mélo de l'entreprise Enzyme & Co, un collectif de design bio-inspiré basé en France. Ce projet⁵², présenté dans un mémoire de fin d'études réalisé à l'École nationale supérieure de création industrielle (ENSCI–Les Ateliers) à Paris, s'inspire des principes d'isolation thermique et d'optimisation naturels propres au toucan, au nautille, à l'ours polaire et à la termitière : le toucan, parce que son bec est constitué par une structure alvéolaire très performante qui permet une isolation optimale en restant légère et rigide ; le nautille, parce qu'il possède une coquille spiralée enroulée vers l'avant et divisée en cloisons formant des loges étanches qui sont remplies individuellement lui permettant de descendre vers les fonds marins. L'ours polaire, pour sa part, a servi d'inspiration à deux niveaux : (i) sa peau possède une couche de graisse qui permet d'éviter la perte de chaleur par conduction thermique ; (ii) la structure de ses poils transparents est creuse et remplie d'air, permettant d'éviter la perte de chaleur par des courants d'air au contact de la peau. Finalement, la termitière parce qu'elle possède un système de régulation thermique et de distribution de la chaleur très performant permettant une adaptation très rapide face aux changements de température extérieure. La bouilloire possède des canaux permettant de distribuer la chaleur uniformément à l'intérieur du produit.

Ce projet, qui est resté à l'étape de prototype, est un autre exemple de l'application de l'inspiration d'un système naturel à l'échelle d'un produit. La bouilloire, fabriquée par un processus d'impression 3D, compte tenu de la complexité formelle à l'intérieur du produit, ne pourrait probablement pas être produite à l'échelle industrielle en considérant les modes de production traditionnels utilisés actuellement (p. ex. injection en plastique). Ce produit pourrait s'inscrire, probablement, dans un mode de production à la demande pour un marché haut de gamme. Malgré la réussite du projet sur le plan conceptuel en ce qui concerne l'application du biomimétisme, les résultats concernant les impacts environnementaux sont encore très peu connus. En réalité, il serait bénéfique et nécessaire de réaliser une ACV de la bouilloire afin de valider le potentiel réel du biomimétisme dans ce projet. L'ACV se présenterait comme une méthode complémentaire à la démarche du biomimétisme permettant de mesurer les impacts environnementaux de la bouilloire en comparaison avec une bouilloire de contenance similaire. Sans une telle analyse détaillée, il est difficile de conclure si ce projet demeure un concept d'inspiration formelle uniquement ou s'il pourrait devenir un écoproduit.

⁵¹ <http://www.enzymeandco.com/blog/projects/bouilloire-nautille/>

⁵² Guillian Graves (ENSCI) et Michka Mélo (EPFL). Mémoire de fin d'études à l'ENSCI-les Ateliers, volume 2/2. www.guilliangraves.com



Figure 20 : Bouilloire Nautille
Source : <http://www.enzymeandco.com>

Le biomimétisme n'est pas toujours synonyme de soutenabilité. Certaines applications biomimétiques ont permis, par exemple, de réduire la consommation d'énergie ou de ressources naturelles à certaines étapes de fabrication et d'utilisation du produit, mais présentent des transferts d'impacts environnementaux sur d'autres étapes du cycle de vie (Durand *et al.*, 2012). C'est le cas de la *Supernatural chair* du designer Ross Lovegrove (Fig. 21). En s'inspirant de la structure des os, cette chaise est plus légère et utilise moins de matière à l'étape de production. Cependant, elle est fabriquée en polymère plastique en utilisant un processus de moulage par injection. Dans cet exemple, la résultante de l'utilisation du biomimétisme est avant tout esthétique malgré les bénéfices en termes d'économie de matériel sans perte de résistance. En pratique, il existe encore peu d'applications biomimétiques en design de produits dépassant l'analyse formelle et s'inscrivant dans une approche de boucle fermée, telle que présentée par Mc Donough et Braungart (2011) dans leur approche *cradle to cradle*.



Figure 21 : Supernatural chair, 2005 – 2008

Source : <http://www.rosslovegrove.com>

Il existe un nombre restreint d'exemples de produits conçus à partir de la démarche du biomimétisme dans la littérature. Les produits présentés dans cette section confirment le potentiel d'inspiration et d'utilisation (même à l'échelle du concept ou du prototype) du biomimétisme en design de produits, principalement comme source d'inspiration formelle et outil créatif. L'inspiration de solutions naturelles et de systèmes biologiques pourrait ouvrir la voie à la conception de produits à moindre impact environnemental, mais aussi sociaux et éthiques. Néanmoins, une analyse du cycle de vie de ces produits n'a pas été réalisée afin de s'assurer de la minimisation des impacts environnementaux et sociaux tout au long du cycle de vie. De plus, la méthodologie utilisée mise en œuvre pour la conception de ces produits n'est rarement, si ce n'est jamais, présentée en ayant pour conséquence une difficulté à bien comprendre le processus de développement de produits ayant mené à la proposition de telles solutions, ni même la possibilité d'analyser leur durabilité. En outre, ces produits ne pourraient pas s'inscrire dans une optique de développement durable, car les sphères sociale et économique ne semblent pas être considérées dans ces projets ou, si elles le sont, elles ne sont clairement pas présentées. En réalité, ces produits semblent combler, principalement, la sphère environnementale du développement durable. Ils peuvent être considérés comme des éco-produits, mais il manque encore une vision plus globale visant la durabilité pour surmonter cette barrière dont les systèmes naturels se présenteraient comme un levier.

2.6 Le designer utilise habituellement le biomimétisme comme inspiration formelle

L'exemple de la *Bone chair* (Fig. 22) du *Joris Laarman Lab*⁵³, un studio de design situé à Amsterdam, illustre l'utilisation formelle du biomimétisme. Le design de la *Bone chair* a débuté en 1998, lorsque *Adam Opel GmbH*, la filiale allemande de General Motors, a développé un nouveau logiciel d'imagerie et de simulation numérique dont la finalité était de créer un moteur plus efficace en ce qui concerne la consommation de carburant et la légèreté lors de son utilisation. Une partie du processus de développement s'est fait grâce à la création d'un modèle virtuel en trois dimensions avec la simulation de l'application d'une contrainte de force à des points spécifiques sur le modèle. Tous les éléments qui n'étaient pas nécessaires ont été enlevés de façon à alléger la structure, sans l'affaiblir. Ce processus s'inspire du principe d'évolution des organismes vivants. Les os sont très efficaces durant la croissance humaine des structures internes pour parvenir à un rapport optimal poids-force (Pereira *et al.*, 2015). Ils ajoutent et enlèvent de la matière progressivement en réponse aux contraintes de leur environnement. Le logiciel répète le même processus en ajoutant le matériau où la force est nécessaire et en amincissant où il y a peu de contraintes. Ainsi, le design créé permet d'atteindre une résistance maximale avec un minimum de matériau. Le résultat final est un produit au design « conceptuel » avec un attrait principalement esthétique. Dans un processus de développement de produits utilisant le biomimétisme, la structure des os peut apporter des solutions, comme le châssis de la *Bionic Car* présenté plus haut dans le texte. La forme, dans ce cas-ci, suit la fonction comme dans la nature qui vise à avoir une structure plus légère en utilisant le minimum de matériau nécessaire. C'est également le cas du projet de Ross Lovegrove, la *Supernatural chair*, mais avec un matériau qui offre une possibilité d'amélioration pour ce qui est de l'approvisionnement des ressources en faisant appel à de l'aluminium.

⁵³ <http://www.jorislaarman.com/>



Figure 22 : Bone Chair, 1998
Source : www.jorislarmann.com

Les projets présentés dans cette section démontrent que l'inspiration purement formelle de la nature ne garantit pas la durabilité des solutions. En fait, ces solutions pourraient être même plus dommageables sur l'environnement, sans permettre une contribution effective sur le cycle de vie du produit. Volstad et Boks (2012) soulignent que la nature possède une grande richesse de formes qui peuvent être utilisées comme une inspiration pour le développement des solutions offrant des avantages fonctionnels, telles que la réduction de la résistance à l'air, par exemple. Cependant, l'attrait esthétique des formes naturelles peut nuire à la vision du designer de produits sur ce qui est réellement utile dans le projet (*Ibid.*). Ainsi, l'aspect environnemental des alternatives peut être traité de manière marginale dans le projet.

Une étude réalisée en France en 2012, intitulée *Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France*, dressait un état des lieux de la recherche et de l'innovation française en matière de biomimétisme, ainsi qu'une évaluation de son potentiel de développement et d'innovation dans la perspective d'une économie verte et résiliente en France. À partir de recherches bibliographiques et de rencontres avec de nombreux acteurs, l'étude brosse un portrait du biomimétisme en France et dans le monde (Durand *et al.*, 2012).

Cette étude a permis d'identifier 80 départements de recherche publique qui investissent dans le champ de la bio-inspiration, directement ou indirectement, et aucun d'entre eux n'est rattaché au domaine du design (Fayemi *et al.*, 2013). Ces auteurs expliquent que ce constat illustre un probable manque de maturité de l'aspect méthodologique lié à la conception bio-inspirée.

Comprendre les raisons pour lesquelles les designers de produits n'utilisent pas le biomimétisme au-delà de l'analyse formelle représente un défi important pour faire avancer les connaissances et réorienter la pratique de la conception de produits vers les besoins et enjeux du développement durable. Le manque d'outils méthodologiques adaptés au processus de développement des produits peut expliquer cette situation. Le biomimétisme peut être une alternative pour répondre aux enjeux de mise en œuvre d'une société plus durable en proposant des méthodes et outils possédant un réel potentiel d'innovation. Comme l'a souligné Albert Einstein, « on ne peut pas résoudre un problème avec les modes de pensée qui l'ont engendré ». En fait, la crise écologique actuelle démontre, à juste titre, l'inefficacité des tentatives actuelles de résoudre les problématiques environnementales par des moyens technologiques et sociaux (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014b).

Conclusion

Bien qu'il existe plusieurs exemples d'application du biomimétisme en conception et développement de produits, les études faisant la démonstration de leur véritable soutenabilité (cf. développement durable) sont encore peu présentes dans la littérature (Fayemi, 2016; De Pauw *et al.*, 2014; Montana-Hoyos, 2010). L'une des raisons pouvant notamment expliquer cette situation est l'absence d'une méthodologie systématique solide (comme c'est le cas en écoconception) capable de faciliter le transfert entre les systèmes biologiques et non biologiques (p. ex. : l'économie, l'industrie, etc.) (Badamah et Kadri, 2015). En effet, le manque de maturité de l'aspect méthodologique peut être un possible frein lié à l'utilisation du biomimétisme (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018 et Fayemi *et al.*, 2013). Ce contexte pourrait même expliquer la raison pour laquelle les designers de produits s'intéressent surtout à l'aspect formel de la nature comme source d'inspiration. Pour dépasser l'inspiration formelle du biomimétisme par le designer de produits, les principes naturels (tels qu'interdépendance, cycle fermé, efficacité énergétique, etc.) devraient être intégrés à la pensée et à la méthode de conception de produits.

C'est sur la base d'une analyse exhaustive de la littérature qu'il a été possible de constater que i) l'utilisation du biomimétisme est souvent formelle dans la plupart des disciplines (ingénierie, architecture, etc.), surtout en design de produits et ii) les méthodologies soutenant l'utilisation du biomimétisme sont inachevées ou, lorsqu'elles sont achevées, demeurent complexes à mettre en œuvre.

Chapitre 3 : Cadre théorique

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie BIOTRIZ afin de comprendre comment le transfert de connaissances entre la biologie et la technologie s'effectue en vue d'apporter des contributions au domaine du design de produits. BIOTRIZ est considérée dans cette recherche comme une méthodologie complémentaire au biomimétisme. Il s'agit en fait d'une base de données présentant l'analyse de plusieurs phénomènes biologiques couvrant plus de 270 fonctions naturelles. Ainsi, BIOTRIZ représente un levier pour faciliter la compréhension des principes et stratégies naturels ainsi que l'intégration du biomimétisme dans le processus de développement de produits.

3.1 La biologie et la technologie

Rendre nos systèmes techniques aussi performants que les écosystèmes naturels est la voie probable vers la durabilité (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014; Benyus, 1997 ; Fayemi, 2016). Un écosystème naturel est un système complexe d'interactions multiples et dynamiques entre des organismes vivants (p. ex. : les plantes et animaux) et ses constituants non vivants (p. ex. : le milieu naturel dans lequel ils vivent) (Rosnay, 1977; Bogatyrev et Bogatyreva, 2014). Ces intégrations entre les composants présents dans un système naturel (les cycles fermés et ouverts, des boucles de rétroaction, des redondances, de l'adaptabilité et de la variabilité) définissent les performances des écosystèmes et génèrent la production de biomasse, l'efficacité énergétique et la résilience (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014). En revanche, nos systèmes de production actuels sont composés de processus industriels linéaires visant la maximisation des performances avec une grande consommation d'énergie et des matériaux, et une génération de déchets (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014; Bonciu, 2014; Van Den Abeele, 2011).

Vincent, Bogatyreva, Bogatyrev, Bowyer, et Pahl (2006) présentent dans leur étude intitulée *Biomimetics : its practice and theory*, une analyse comparative autour des différences fondamentales entre technologie et biologie concernant la résolution de problèmes (Fig. 23). Cette étude est basée sur une analyse d'environ 500 phénomènes biologiques couvrant plus de 270 fonctions, appartenant à différents niveaux de la hiérarchie biologique (du niveau de la molécule et de la cellule au niveau de l'écosystème) (Terrier *et al.*, 2017). Au total, environ 2500 conflits ont été analysés ainsi que leurs résolutions en biologie, classés par niveaux de complexité. Ensuite, les auteurs ont défini six champs opérationnels (i) énergie ; (ii) information ; (iii) espace ; (iv) temps ; (v) substance et (vi) structure afin de comparer les types de solutions obtenus en technologie via la méthodologie TRIZ classique et la biologie (Figure 24 ci-dessous). Sur la base de leurs analyses, Vincent *et al.* (2006)

confirment que la nature est plus performante dans la résolution de problèmes en relation avec les solutions d'ingénierie. Face à un problème, la tendance en ingénierie est de modifier la quantité ou le type de matériau utilisé, ce qui augmente généralement le besoin d'énergie. En biologie, les variables les plus importantes dans la résolution de problème sont l'information et l'espace, tout en maintenant une faible consommation d'énergie. Les différences entre les polymères, les protéines et les polysaccharides biologiques et synthétiques illustrent bien ce constat. Malgré l'existence de plus de 300 polymères synthétiques développés par nos technologies, aucun parmi eux n'est aussi polyvalent que les polymères biologiques (Vincent *et al.*, 2006).

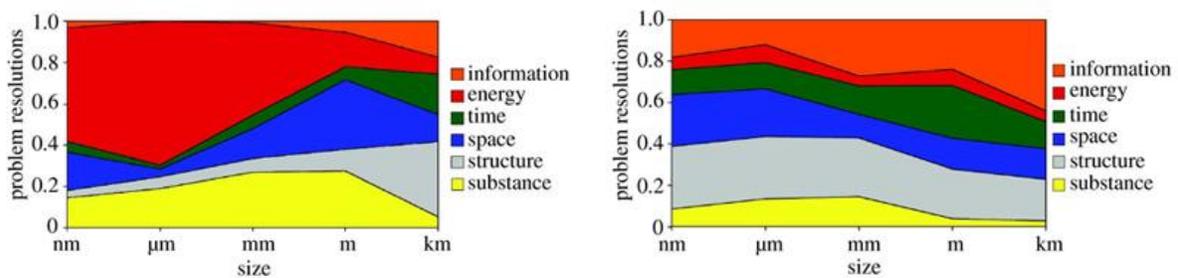


Figure 23 : Analyse comparative des différences fondamentales entre la technologie et la biologie dans la résolution de problèmes
Source : Vincent et al. (2006)

L'analyse plus en profondeur des deux graphiques ci-dessus montre qu'il existe des différences majeures entre la façon dont la technologie (gauche) et la biologie (droite) résolvent des problèmes en ordonnée (axe y) compte tenu de l'échelle de complexité minimale (nanomètre) et maximale (kilomètre) en abscisse (axe x). Comme observé sur le graphique de gauche, la technologie a tendance à résoudre ses problèmes en ayant recours à l'utilisation d'une grande quantité d'énergie à l'échelle microscopique, alors qu'elle utilise plus de substances (matière) aux échelles millimétrique et métrique et d'espace à l'échelle métrique. À l'inverse, sur le diagramme de droite, la biologie est beaucoup plus homogène et équilibrée, et ce, quelle que soit l'échelle. En effet, la biologie utilise l'information, l'espace et la structure comme ressources dans la résolution de problème, tout en maintenant une utilisation efficace d'énergie et de matière. Ce dernier diagramme souligne les lacunes de notre mode de conception et production actuelles, notamment en mettant en évidence une prise de conscience liée aux contraintes écologiques autour des limites de matière, d'énergie et d'espace, ainsi que la pertinence de l'utilisation de la bio-inspiration pour aboutir à une conception plus en accord avec les défis à relever en matière de développement durable (Fayemi, 2016).

Ce constat met en exergue, en grande partie, la contradiction présente entre ces deux extrêmes de complexité, autant en technologie qu'en biologie, et qu'ils sont donc les plus sensibles à tout déséquilibre causé par l'activité

humaine. En effet, l'éco-innovation est plus sensible à l'échelle maximale où les problèmes globaux peuvent générer des catastrophes à tous les niveaux de notre société (pollution de l'environnement, problèmes liés à la santé des personnes, conflits politiques, troubles sociaux, etc.) (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014b).

L'étude de Vincent *et al.* (2006) souligne, à juste titre, l'intérêt de s'inspirer de la nature pour résoudre des problèmes humains. Comme souligné par plusieurs auteurs (Terrier *et al.*, 2017; Benyus, 1997; MDonough et Braungart, 2011; Montana-Hoyos, 2010), les processus naturels sont généralement plus durables, résilients, utilisent des matériaux naturels et renouvelables, réalisés à faible pression et température.

3.2 La méthodologie Biotriz

BioTRIZ⁵⁴ est une approche méthodologique formée par la fusion des mots « Biomimétisme » avec et la méthode d'innovation « TRIZ », acronyme russe de la théorie de la résolution de problèmes innovants : *Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadac.* Il s'agit d'une méthodologie capable de travailler avec les exigences incompatibles et contradictoires que représentent l'économie et l'écologie (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014b). Cette approche a été créée en 2008 à l'Université de Bath, au Royaume-Uni par Olga Bogatyrev, docteure en sciences de la complexité et en biologie, experte dans le domaine de la résolution inventive de problèmes et de la conception bio-inspirée avec une expérience en psychologie du comportement et sociale et en théorie des systèmes complexes, Nikolay Bogatyrev, docteur en biologie et scientifique travaillant dans les domaines de la biomimétique [ingénierie bio-inspirée], de la biologie et de la théorie de la résolution de problèmes inventifs [TRIZ], en collaboration avec Julian Vincent, professeur de biomimétique à l'Université de Bath au Royaume-Uni. Le principal objectif de cette méthodologie est de « créer un parallèle entre systèmes techniques et systèmes biologiques par l'intermédiaire d'outils issus de TRIZ » (Fayemi, 2016). En fait, la matrice de contradictions techniques de TRIZ proposée par Guenrich Altshuller est construite à partir des résultats d'analyses de plusieurs centaines de milliers de brevets et de l'agrégation de nombreuses données et connaissances dans le domaine de l'ingénierie, la chimie, la physique et les mathématiques (Glier *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2018). Au total, 39 paramètres de conception et 40 principes reconnus comme communs aux principales innovations ont été identifiés et intégrés dans la matrice de résolution des contradictions techniques de TRIZ (Terrier *et al.*, 2017).

La méthodologie TRIZ présente des limites. En fait, l'utilisation de TRIZ ne considère pas la durabilité des solutions techniques (Terrier *et al.*, 2017). Ainsi, l'analyse des 39 paramètres de conception et 40 principes

⁵⁴ <https://biotriz.com>

communs aux principales innovations sont extrêmement techniques et ne considèrent pas l'impact de ces solutions sur l'environnement ou sur la société. Par ailleurs, la méthodologie TRIZ est lourde et complexe à mettre en œuvre, ce qui devient une barrière à son utilisation dans le processus de développement de produits (Terrier *et al.*, 2017). La méthodologie Biotriz propose l'intégration du biomimétisme à la méthodologie TRIZ tout en simplifiant son utilisation. Cette méthodologie vise à résoudre les exigences contradictoires entre la biologie et la technologie (économie) à partir d'une méthode efficace capable de fonctionner avec des systèmes vivants et non vivants et des éléments naturels et artificiels (p. ex. : agriculture, construction, médecine, etc.) (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014b). En effet, cette méthodologie permettrait aux concepteurs « d'exploiter les informations de conception biologique sans avoir besoin d'une source d'inspiration biologique, car le phénomène en question est théoriquement déjà intégré dans Biotriz » (Glier *et al.*, 2011).

Biotriz est basée sur l'analyse de 500 phénomènes biologiques et 270 fonctions rencontrées dans les systèmes naturels et structurées sur une matrice de contradiction, de façon similaire à TRIZ, à partir de six grands principes (i) *substance* (ii) *structure* (iii) *espace* (iii) *temps* (iv) *énergie* et (v) *information*. En tant que méthode d'éco-innovation bio-inspirée, Biotriz se présente comme un levier pour la mise en des concepts biomimétiques dans la conception de produits (Glier *et al.*, 2011).

3.3 L'opérationnalisation du biomimétisme dans le design de produits à partir de Biotriz

Le transfert de connaissances et stratégies biologiques vers le champ technologique est un processus complexe exigeant un échange multidisciplinaire entre divers domaines, tels que la biologie, sciences de matériaux, etc. (Fayemi *et al.*, 2013). Biotriz peut faciliter l'opérationnalisation du biomimétisme en design de produits, car plusieurs phénomènes biologiques et fonctions rencontrées dans les systèmes ont été déjà analysés par cette approche. Cette riche base d'informations et d'exemples issue du vivant peut faciliter le transfert de connaissances et les stratégies biologiques et diminuer le temps consacré à la recherche. En considérant un processus biomimétique standard en quatre étapes principales, tel que rencontré dans la plupart des méthodologies biomimétiques et présentées par Fayemi *et al.* (2013), il est possible d'analyser la contribution de l'approche Biotriz comme cadre théorique de ce mémoire de recherche, notamment en :

1. Définissant clairement les besoins humains et/ou le challenge d'un point de vue fonctionnel
2. Interprétant et traduisant le challenge biologique
3. Identifiant le(s) meilleur(s) modèle(s) biologique(s)
4. Rendant abstraites les stratégies biologiques via une analyse
5. Émuler les stratégies biologiques en technologie ou système humain

Biotriz peut contribuer, principalement aux étapes 2 et 4, comme une base de données biomimétiques offrant des stratégies biologiques et connaissances naturelles déjà analysées, ce qui faciliterait le début du projet. L'étape 2 consiste à explorer et identifier des stratégies biologiques à la suite de la définition du défi de design. Le but est de comprendre comment les modèles naturels pourront être transposés aux solutions de design à travers un processus analogique. Les 500 phénomènes biologiques et 270 fonctions naturelles connus faciliteraient cette partie de la démarche biomimétique. En réalité, le temps de recherche, d'analyse et de compréhension des stratégies et modèles biologiques pourrait être réduit. L'étape 4, à son tour, consiste à comprendre le fonctionnement des stratégies biologiques et réaliser le transfert de ces concepts à travers l'abstraction et la métaphore. Encore une fois, la base de données offerte par Biotriz pourrait faciliter la compréhension de ces stratégies.

Conclusion

La méthodologie BIOTRIZ se présente comme un levier pour l'intégration du biomimétisme dans le processus de développement de produits. Cependant, l'exploitation des informations de conception biologique à travers une matrice de contradiction sans nécessairement avoir besoin d'une source d'inspiration biologique peut nuire à la vision du designer de produits par rapport aux principes naturels. En fait, le biomimétisme ne considère pas la nature comme une source d'inspiration à copier. La nature se présente comme une référence dont les solutions sont utilisées dans l'objectif de développer une relation plus harmonieuse et durable entre l'être humain et l'environnement (Benyus (2009).

La méthodologie BIOTRIZ pourrait être une façon de « rationaliser » les systèmes naturels en vue de faciliter leur compréhension et l'utilisation des principes et fonctions naturelles. Ainsi, BIOTRIZ s'inscrit davantage dans une optique rationaliste plutôt que systémique. En fait, la simplification des procédés et systèmes naturels à partir d'une liste de fonctions rencontrées dans la nature pourrait limiter le potentiel durable des solutions. Malgré certaines limites, BIOTRIZ pourrait être un bon point de départ pour le développement de nouvelles méthodes capables d'intégrer le biomimétisme dans le processus de développement de produits (Terrier et al., 2017). Par ailleurs, une analyse environnementale et sociale du cycle de vie (ASCV) pourrait être intégrée à ces méthodes en vue de créer des solutions à long terme, s'inscrivant dans une perspective de développement durable.

Chapitre 4 : Approche méthodologique

Ce chapitre vise à présenter la stratégie de recherche mise en œuvre pour répondre à la problématique de recherche présentée dans le précédent chapitre. Les objectifs principaux de l'étude, les outils de collecte et d'analyse des données utilisés, les limites du point de vue méthodologique et opérationnel ainsi que les considérations éthiques devant être prises auprès des participants sont présentés. À titre de rappel, cette étude qualitative de nature exploratoire a pour finalité de formuler des pistes de recommandations aux designers de produits afin de les aider à mieux intégrer le biomimétisme dans leur processus de développement. Comme il s'agit d'une démarche qualitative, quelques constats (ou des propositions) ont été formulés, plutôt que des hypothèses qui établissent des relations causales bien ancrées dans la littérature et qui appartiennent généralement à une démarche de recherche quantitative.

4.1 Question de recherche et objectifs

La formulation de la question de recherche découle de la problématique de recherche exposée au chapitre 2. Pour mieux contextualiser la question de recherche, voici une synthèse des principaux enjeux entourant le design de produits et le biomimétisme dans le contexte du développement durable abordés au cours des deux précédents chapitres :

- 1) Le biomimétisme peut se présenter comme un levier pour le développement durable. Plusieurs auteurs soulignent que les solutions soutenables, dans la plupart des cas, pourraient être utilisées comme une référence en design de produits (Benyus, 1997; Mc Donough et Braungart, 2011; Ricard, 2015; Fayemi, 2016; Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016; Terrier *et al.*, 2017; Durand *et al.*, 2012; Chekchak et Lapp, 2011; Mathieu et Moana, 2015). Considérée comme une bibliothèque infinie de solutions conçues et testées pendant plus de 3,8 milliards d'années, la nature opère selon un système en boucle fermée en limitant la production de déchets dans la plupart des cas et ces déchets sont souvent des ressources pour d'autres écosystèmes. Les matériaux naturels et les procédés ne sont généralement pas toxiques et respectent la capacité de charge des écosystèmes ;
- 2) Le biomimétisme, utilisé dans plusieurs disciplines (génie, architecture, etc.), possède un grand potentiel en design de produits pouvant aller bien au-delà de l'inspiration formelle. En fait, la compréhension des systèmes naturels pourrait constituer un levier pour la conception de produits soutenables. Ces systèmes fonctionnent à partir d'énergie et de matières renouvelables où tous les éléments sont interconnectés vis-à-vis de l'optimisation globale ;
- 3) L'absence d'une méthodologie en biomimétisme adaptée aux enjeux de la conception de produits

peut expliquer une utilisation principalement formelle du biomimétisme par les designers de produits (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014; Fayemi *et al.*, 2013). Une méthodologie capable de faciliter la compréhension et l'identification des stratégies, mécanismes et systèmes naturels pertinents pourrait faciliter l'utilisation du biomimétisme par les designers de produits dans un contexte industriel (Badarnah et Kadri, 2015) ;

4) L'écoconception, l'approche la plus largement utilisée par les designers et généralement enseignée aux designers de produits, comporte des limites (Van Den Abeele, 2011; Cucuzzella, 2011; Montana-Hoyos, 2010; De Pauw *et al.*, 2014). L'écoconception propose des solutions à court et moyen termes et considère principalement les impacts environnementaux dans le cycle de vie des produits, alors que les enjeux sociaux, éthiques et économiques sont pris en compte, mais de façon plus marginale.

À partir de ces 4 différents enjeux résumés ci-dessus, l'hypothèse de recherche serait que le biomimétisme pourrait être davantage utilisé par les designers de produits, au-delà de l'inspiration formelle, s'il existait une méthodologie adaptée aux besoins de la conception de produits, notamment des outils et des étapes les guidant clairement dans la marche à suivre. En considérant cette hypothèse, la question de recherche est la suivante : **comment soutenir l'utilisation du biomimétisme par les designers de produits dans le processus de développement d'un produit ?** En d'autres mots, le principal objectif de cette recherche est d'analyser le potentiel d'intégration du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit afin de répondre de façon plus systémique aux différents enjeux du développement durable. À l'égard de ce principal objectif, cette étude se décline en deux sous-objectifs :

- 1) Comprendre, à travers l'expérience de trois experts en biomimétisme œuvrant en design de produits, l'utilisation qu'ils en font et les limites qu'ils perçoivent ;
- 2) Sur la base des données issues du premier sous-objectif, proposer des pistes de réflexion pour une définition plus complète du biomimétisme et les étapes exploratoires menant à une nouvelle approche méthodologique.

Pour le premier sous-objectif, trois entrevues semi-dirigées ont été réalisées. Avant d'entreprendre le processus de recrutement des participants pour les entrevues et la collecte des données, une demande d'exemption de l'obligation d'obtenir une approbation éthique (formulaire VR-133) auprès des Comités d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université Laval (CÉRUL) a été réalisée (voir Annexe I). Cette recherche a pu recevoir l'exemption du certificat éthique puisque les répondants exprimaient leur point de vue à travers leurs expertises professionnelles. Ensuite, les trois professionnels ont été choisis pour les entrevues semi-dirigées.

Selon Létourneau (2006), « l'entrevue semi-dirigée est la méthode utilisée pour discerner l'expertise d'un informateur dans un domaine spécifique de sa vie quotidienne » (p. 166). Cet auteur précise que « dans le cas d'une entrevue semi-dirigée, l'enquêteur joue un rôle déterminant puisqu'il doit saisir au passage les pistes que l'informateur lui donne tout respectant les thèmes imposés par le questionnaire » (p. 166). Les données récoltées étaient de type suscité ou d'interaction, c'est-à-dire que ces données ont été obtenues dans une situation d'interaction entre le chercheur et le sujet, comme c'est le cas des données issues d'entrevues semi-dirigées (Van der Maren, 1995).

Pour répondre au deuxième sous-objectif, une analyse critique des principaux termes utilisés dans la littérature pour qualifier une démarche d'inspiration de la nature, à savoir le biomimétisme, la biomimétique, la bionique et la conception bio-inspirée, a été réalisée. Sur la base des résultats issus des entrevues ainsi que des différences et des liens qui connectent ces quatre termes, des pistes de recommandations menant à une nouvelle définition du biomimétisme sont proposées. Dans un deuxième temps, à partir des données issues des entrevues, une brève analyse des principales méthodes en biomimétisme dans la conception de produits a été réalisée en vue de trouver des pistes menant à l'identification d'étapes exploratoires pour une nouvelle démarche méthodologique conceptuelle baptisée Bio-ADN.

Sur la base des informations recueillies dans la littérature et auprès des experts en biomimétisme, la finalité de cette recherche est de formuler des pistes de recommandations à destination des designers de produits, en vue de soutenir l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits.

4.2 Stratégie de recherche

La recherche descriptive qualitative a été le devis de recherche utilisé dans cette étude pour apporter des éléments de réponse à la question de recherche. Ce type de recherche vise à décrire un phénomène peu connu tout en facilitant sa compréhension, sans faire nécessairement appel à une méthodologie qualitative particulière (Fortin et Gagnon, 2015). Selon ces auteurs, la recherche qualitative consiste à comprendre et à décrire un phénomène ou l'objet de l'étude tout en réalisant une analyse en profondeur. Dans ce contexte, les thèmes et les catégories permettant au chercheur d'analyser et de décrire l'objet de l'étude sont découverts progressivement à partir d'un processus non systématique et avec une certaine flexibilité (*Ibid.*). Le choix de ce type de démarche de recherche semble le plus adapté au sujet d'étude, car le biomimétisme est, à ce jour, très peu documenté dans la littérature, notamment en ce qui concerne son utilisation dans le domaine du design de produits. Malgré l'existence de certains outils biomimétiques (voir section 6.1.2), principalement dans le domaine de l'ingénierie, de véritables exemples de produits conçus selon l'optique du biomimétisme et ayant dépassé le

stade de prototype sont restreints. Une analyse de la littérature, dont une attention particulière a été portée aux produits conçus selon la perspective du biomimétisme, a été réalisée en vue de mieux comprendre son potentiel d'utilisation par le designer de produits.

4.3 Outils de collecte, analyse et interprétation des données

4.3.1 Les entretiens semi-dirigés

Les entretiens semi-dirigés ont été l'outil de collecte de données privilégié pour répondre au sous-objectif de l'étude. L'entretien permet une interaction directe entre le chercheur et les participants en vue de comprendre le contexte étudié (Fortin et Gagnon, 2015) et de recueillir des informations selon les objectifs de l'étude (Dépelteau, 2010). Dans le cas de l'entretien semi-dirigé, la formulation des questions est réalisée sur la base d'une liste de sujets à aborder préétablie par le chercheur (Fortin et Gagnon, 2015). Un échantillonnage non probabiliste par choix raisonné a été mis en œuvre pour le recrutement des participants. Dans ce type de méthode d'échantillonnage, le choix des sujets repose sur des caractéristiques précises nommées « critères d'inclusion » selon le but de l'étude. Ainsi, deux critères d'inclusion, davantage détaillés dans la section 3.3.3, ont été retenus pour cette étude :

- 1) formation universitaire en lien avec le biomimétisme et/ou le design de produits ;
- 2) expérience professionnelle supérieure à 5 ans en design de produits et/ou biomimétisme.

Dans un premier temps, les trois professionnels experts en biomimétisme choisis au préalable ont été sollicités par courriel, via LinkedIn et/ou Facebook. Lors de cette première prise de contact, les potentiels répondants ont reçu un court résumé de l'étude avec son contexte et ses objectifs et une invitation à y participer. À la suite d'une réponse positive des trois professionnels visés par l'étude, un deuxième courriel visant à convenir d'une date pour l'entretien qui pouvait se tenir sur place ou à distance via Skype a été envoyé. Ainsi, les entretiens se sont déroulés entre mai et septembre 2017. Les entretiens avec Chloé Lequette (France) et Fred Gelli (Brésil) ont été réalisés par Skype et l'entretien avec Moana Lebel (Montréal) a été réalisé par téléphone puisqu'elle était en voyage à l'extérieur du Canada avec accès restreint à Internet. L'entretien avec Fred Gelli a été réalisé en portugais et ses propos ont été traduits en français. Les entretiens, d'une durée approximative d'une heure, étaient audio-enregistrés sur approbation des participants afin de faciliter le travail d'analyse des données. Le guide d'entretien (Annexe 1) contenait « une série de questions guides, relativement ouvertes, à propos desquelles il est impératif que le chercheur reçoive une information de la part de l'interviewé » (Quivy et

Campenhoudt, 1995, p.195). Le guide d'entretien était organisé en 5 catégories principales, présentées au Tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : Principaux thèmes discutés avec les professionnels en biomimétisme pendant les entretiens

Thèmes abordés lors de l'entrevue
1. Potentiel du biomimétisme dans le processus de développement de produits
2. Mise en œuvre du biomimétisme dans le processus de développement de produits
3. Limites de l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits
4. Limites pour la mise en œuvre du biomimétisme dans un contexte industriel
5. L'avenir du biomimétisme

4.3.2 Profil des experts

La méthodologie de recherche a pris la forme d'un recrutement auprès de trois répondants exerçant à la fois en design et en biomimétisme, dans différents pays. De plus, tous les interviewés ont une implication active dans l'utilisation et dans la promotion du biomimétisme dans le processus de développement de produits. Afin de mieux comprendre et de comparer les différences méthodologiques d'utilisation du biomimétisme dans différentes cultures, les experts ont été choisis dans trois pays différents : Canada, France et Brésil. Le Canada a été choisi, car il est le contexte professionnel actuel du chercheur. En fait, il y en a encore très peu d'initiatives visant l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits. À cet effet, Moana Lebel a été choisie pour représenter le Canada, car elle joue un rôle très important dans la mise en œuvre du biomimétisme au Québec, à travers l'institut de biomimétisme francophone qu'elle dirige. Deuxièmement, la France a été choisie parce qu'elle est l'un des principaux joueurs en matière de recherche en biomimétisme. Ainsi, Chloé Lequette a été sélectionnée pour son engagement auprès du *Biomimicry Europa*, principal centre de référence mondiale en biomimétisme et pour sa performance professionnelle au sein du collectif de *design Enzyme & Co.* qui développe des projets bio-inspirés, tels que le projet Bouilloire Nautilaire qui a été présenté dans la problématique (voir chapitre 2). Enfin, le Brésil a été sélectionné parce qu'il y a un intérêt mondial autour de sa biodiversité, principalement celle de la forêt amazonienne. Des entreprises comme Natura⁵⁵, une entreprise brésilienne dans le domaine cosmétique, utilisent la biodiversité amazonienne comme source de

⁵⁵ <https://www.natura.com.br/>

développement des produits et emballages avec un faible impact environnemental. Ainsi, Fred Gelli, l'un des principaux designers brésiliens, qui développe des produits pour Natura à travers son entreprise Tátil design, a été choisi par son engagement professionnel et académique autour du biomimétisme. Voici une synthèse/biographie des experts qui ont été interviewés :

- a) Moana Lebel : directrice et fondatrice de l'institut de biomimétisme francophone⁵⁶ à Montréal (Québec), Canada. L'institut de biomimétisme francophone a pour objectif la sensibilisation et formation des professionnels, le grand public et les jeunes à la discipline du biomimétisme au Québec, à travers les conférences, formations et expertise-conseil. Biologiste de formation, Moana a suivi plusieurs formations en biomimétisme et design. Elle est diplômée du *Biomimicry 3.8/Biomimicry Institute* aux États-Unis, possède une maîtrise en management et gestion du développement durable en double diplôme de l'Université de Sherbrooke et de l'École supérieure de commerce et de management de Tours-Poitiers en France. Moana est également coauteure du livre *L'art d'imiter la nature, le biomimétisme*.



Source : www.biomimetisme.ca

⁵⁶ <http://www.biomimetisme.ca>

- b) Chloé Lequette : designer de produits et illustratrice, elle est cofondatrice du collectif de design Enzyme & Co⁵⁷ spécialisé en design bio-inspiré et chargée de mission Ville biomimétique chez CEEBIOS — Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis. Chloé Lequette est aussi coordinatrice pour le programme humanitaire « Arbres Sauveurs »⁵⁸ de *Biomimicry Europa*. Ce programme combine la reforestation et la permaculture en Haïti. Chloé possède un Master en design de l'objet de l'École supérieure d'Art et de design (ÉSAD) d'Orléans, comprenant une année de recherche sur les liens entre biomimétisme et design, et les notions d'engagement et de responsabilité du designer de produits.



Source : <http://www.enzymeandco.com>

- c) Fred Gelli : Co-fondateur et directeur artistique de Tátil Design de Ideias, il possède un baccalauréat en design de produits et design graphique à la *Pontificia Universidade Católica* du Rio de Janeiro (PUC-RJ⁵⁹), avec une expertise de 28 ans. Son intérêt par le biomimétisme a commencé lors d'un stage à l'Université de Viçosa où il est allé étudier les « emballages naturels » créés par la nature. En 2014, il a été reconnu par *Fast Company*⁶⁰ comme l'un des 100 professionnels les plus créatifs au monde. Depuis 15 ans, il est

⁵⁷ <http://www.enzymeandco.com>

⁵⁸ <http://www.biomimicry.eu/nos-actions/le-projet-arbres-sauveurs/>

⁵⁹ Université pontificale catholique de Rio de Janeiro.

⁶⁰ <https://www.fastcompany.com/person/fred-gelli>

professeur d'éco-innovation et de biomimétisme au département de design de l'Université PUC-RJ. Depuis 30 ans, Fred Gelli utilise le biomimétisme dans sa pratique professionnelle.



Source : epoca.globo.com⁶¹

Le profil des trois experts présentés ci-dessus témoigne d'une grande diversité en ce qui a trait à leurs formations universitaires, leurs expertises et pratiques professionnelles en lien avec le biomimétisme et le design de produits. Cette diversité de connaissances et de visions sur la nature et sur le design de produits a été très enrichissante pour alimenter les résultats de la présente étude. La contribution de la vision de Moana Lebel sur la nature et son travail auprès des entreprises et professionnels québécois ont été très importants. Tout d'abord, ils ont permis de comprendre l'état d'avancement du biomimétisme au Québec, et ensuite de connaître les possibles barrières à l'utilisation du biomimétisme dans le contexte industriel. Moana ne possède pas une formation académique en design, mais elle participe activement au processus de développement de produits auprès des entreprises québécoises. Chloé Lequette a beaucoup contribué à la présente étude avec sa vision philosophique autour de la nature. Sa performance professionnelle en tant que designer et coordinatrice pour le programme de reforestation en Haïti « Arbres sauveurs » ouvre la voie à une utilisation plus systémique de la

⁶¹ <https://epoca.globo.com/ideias/noticia/2014/07/fred-gelli-b-o-mundo-quer-o-tipo-de-criatividade-que-temos-b.html>. Fred Gelli tient sur ses mains le logo des Jeux Olympiques Rio 2016 qui a été développé par son entreprise Tátil Design de Ideias. Fred a été aussi l'un des directeurs artistiques des Jeux paralympiques d'été de 2016 à Rio de Janeiro, au Brésil.

nature à travers la permaculture. Finalement, Fred Gelli, avec la vision d'un designer praticien, montre le réel potentiel d'utilisation du biomimétisme dans une démarche de design de produits. Fred est l'un des designers les plus respectés au Brésil, en tant directeur artistique de *Tátil Design de Ideias*, l'une des principales agences de design au Brésil. *Tátil* applique des principes et des stratégies naturelles à la création de produits et d'emballages plus intelligents depuis 30 ans.

4.4 Les limites de l'approche méthodologique

Cette section a pour objectif de présenter les limites méthodologiques et les difficultés opérationnelles rencontrées lors de la réalisation de cette recherche. Les freins liés à la stratégie de recherche choisie seront exposés, dans un premier temps, puis ceux associés au thème étudié (le biomimétisme) et aux outils de collectes des données (les entrevues) seront présentés dans un deuxième temps.

4.4.1 Limites en lien avec la stratégie de recherche choisie

Toute recherche, malgré un choix judicieux concernant l'approche méthodologique et les outils de collecte et d'analyse des données, présente certaines limites. Il est important de souligner que cette étude a fait appel à un échantillonnage restreint de 3 experts. La faible représentativité, compte tenu du nombre limité d'entrevues réalisées, et, par conséquent, l'impossibilité de généralisation des résultats sont les principales limites liées à la stratégie de recherche. En revanche, les résultats de l'analyse issue des entrevues ont permis d'apporter des éléments de réponses aux objectifs de l'étude. Une recherche de terrain plus approfondie avec un nombre plus élevé de designers ainsi que d'architectes, d'ingénieurs et d'autres concepteurs enrichirait la collecte et l'analyse des données et, par conséquent, les résultats de l'étude. L'utilisation du biomimétisme en tant qu'approche méthodologique pourrait être testée en milieu universitaire auprès des étudiants (baccalauréat et maîtrise) à partir des projets proposant des problématiques liées au développement durable (p. ex. développement d'emballages biodégradables à partir de l'inspiration naturelle).

Malgré tout, cette recherche a donné des résultats suffisamment concluants pour permettre de formuler des pistes de recommandations pertinentes aux designers de produits sur l'intégration du biomimétisme dans leurs boîtes à outils.

4.4.2 Limite en lien avec le thème étudié (biomimétisme)

Le biomimétisme est un domaine de recherche relativement récent avec un nombre restreint d'exemples qui dépassent le niveau d'inspiration formelle en design de produits. En réalité, les solutions qui proposent l'inspiration des systèmes naturels à l'échelle d'un produit demeurent très conceptuelles. Par ailleurs, il y a très peu d'études de cas de produits développés et commercialisés dans une optique du biomimétisme. En effet, le manque d'informations concernant la démarche méthodologique utilisée dans la conception de ces produits rend difficile l'analyse des bénéfices environnementaux obtenus par les solutions biomimétiques. Une autre limite observée concerne à l'analyse et sélection d'articles. Comme le biomimétisme est un domaine de recherche en ascension, le nombre d'articles qui sont publiés est conséquent, ce qui rend difficile une analyse exhaustive de la littérature récente. Pour cette raison, la revue de littérature a été actualisée tout au long de cette recherche.

4.4.3 Limites avec le guide d'entretien (Annexe 1)

Comme le guide d'entretien a été construit à partir de la première revue de littérature exploratoire sur la thématique, quelques questions ou thématiques semblent floues ou très générales. En effet, d'autres questions ou thématiques auraient être ajoutées en vue d'améliorer la qualité des entretiens. Par exemple, des questions concernant la méthodologie du biomimétisme dans le processus de développement de produits auraient pu être abordées de façon plus spécifique et pointue. De plus, le guide d'entretien aurait pu être également ajusté après chaque entretien, c'est-à-dire que de nouvelles questions non abordées lors d'une entrevue pourraient être ajoutées pour la prochaine en vue d'enrichir le document. Finalement, le guide d'entrevue aurait pu être testé avec deux ou trois designers, puis corrigé et enrichi, avant d'être utilisé dans les trois entretiens finales.

Conclusion

Ce chapitre présentait l'approche méthodologique mise en œuvre pour répondre à l'objectif de cette recherche qui vise à analyser le potentiel d'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit afin de répondre, de façon plus systémique, aux différents enjeux du développement durable. Pour y apporter des éléments de réponses, trois entretiens semi-dirigés ont été réalisés auprès de Chloé Lequette (France), Fred Gelli (Brésil) et Moana Lebel (Montréal). La richesse des données issues des entretiens, compte tenu des différences culturelles et professionnelles entre les interviewés, a permis d'offrir un regard complexe et nuancé sur l'utilisation du biomimétisme par les designers de produits. Plusieurs constats sont ressortis de l'analyse des données de ces entretiens et l'ensemble de ces résultats est présenté dans le prochain chapitre (5).

Chapitre 5 : Présentation des résultats

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats issus de trois entrevues semi-dirigées menées auprès de : 1) Moana Lebel, directrice et fondatrice de l'Institut de biomimétisme (Montréal, Canada) ; 2) Chloé Lequette cofondatrice du collectif de design Enzyme & Co et chargée de mission du projet Ville biomimétique chez CEEBIOS (région d'Orléans, France) ; 3) Fred Gelli, co-fondateur et directeur artistique de *Tátil Design de Idéias (Rio de Janeiro, Brésil)*. Ces résultats, de nature qualitative et exploratoire, sont enrichis à l'aide d'une revue exhaustive de la littérature sur le biomimétisme issue d'ouvrages représentant autant les disciplines du design et du génie, mais aussi de l'architecture, de l'économie et des sciences sociales en considérant la transversalité de cette démarche.

Dans l'optique d'identifier des leviers à destination des designers de produits afin de leur permettre d'intégrer, de façon plus harmonieuse, le biomimétisme dans le processus de développement d'un produit (objectif principal), les résultats sont présentés en cinq principales thématiques. La première partie des résultats permet de définir, au travers du regard des répondants, le biomimétisme et sa finalité, au-delà de sa définition traditionnelle d'outil de conception à moindre impact sur l'environnement, en mettant de l'avant l'outil de réflexion systémique qu'il est. La deuxième section des résultats met en lumière la façon dont le biomimétisme peut accompagner une forme d'introspection dans le processus de développement de produits. La troisième partie des résultats met en perspective les ressemblances et les différences en ce qui concerne les outils et méthodes employées en biomimétisme, en l'écoconception et pour le *cradle to cradle* en vue de faciliter l'intégration du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit. La quatrième partie offre des pistes de recommandations d'ordre méthodologique permettant au designer de produits de mieux utiliser le biomimétisme (au-delà de l'imitation formelle) en l'intégrant de façon plus simple et naturelle au processus de développement d'un produit. Finalement, dans une dernière section, certaines limites concernant la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel sont présentées.

5.1 Une redéfinition du biomimétisme : au-delà de l'outil de conception formelle de la nature

5.1.1 Un découplage avec la croissance économique

Le biomimétisme est une approche ayant un potentiel d'innovation important pour la discipline du design de produits (Benyus, 1997; Mc Donough et Braungart, 2011; Ricard, 2015; Fayemi, 2016; Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016 ; Terrier *et al.*, 2017; Durand *et al.*, 2012; Chekchak et Lapp, 2011; Mathieu et Lebel, 2015; Trudel, 2015). Cette approche, visant à s'inspirer des stratégies naturelles, demeure incontournable pour les designers de produits souhaitant développer des produits, services et/ou systèmes de produit-service plus

soutenables s'appuyant sur une vision équilibrée à long terme tout en permettant le développement d'une société économiquement viable, écologiquement durable et socialement équitable (Agenda 21 Rio, 1992; Thibault et Leclerc, 2014). Les conséquences à court, moyen et long termes de nos modes de production et de consommation devraient actuellement être prioritaires dans la planification de l'ensemble de stratégies visant à soutenir le développement durable (Gendron et Revéret, 2010).

Dans ce contexte, les stratégies, matériaux et principes naturels du biomimétisme pourraient guider la conception de produits s'inscrivant dans une soutenabilité. Moana Lebel précise, à juste titre, le caractère innovateur du biomimétisme dans le développement de nouveaux produits, en soulignant entre autres, son potentiel de découplage avec la croissance économique par la réduction et réutilisation de matériaux et d'énergie par exemple :

Moana : « [...] Le biomimétisme a un potentiel d'innovation importante ? Oui. Catégorique-là ! Selon moi, c'est la façon de créer de l'innovation [...] Pour moi... je sais que le terme développement durable a été "garodé" beaucoup de fois. On l'utilise à beaucoup de choses pour faire du *greenwashing* également, mais pour moi le développement durable, c'est plutôt de bien faire les choses pour utiliser le moins de matériau et d'énergie possible. Pour bien faire les choses [...] Je pense qu'un développement de produits va de plus en plus utiliser le biomimétisme. Il y a 5 ans, dans les recherches sur l'application des connaissances du vivant, il n'y avait pratiquement aucune recherche là-dessus. Maintenant, c'est super populaire. Donc, je pense qu'oui, ça va aller juste en augmentant, parce que les gens réalisent quel est le potentiel d'avenir de ça [le biomimétisme] au niveau technologique, mais qui rassemble l'aspect innovation et développement durable ».

Le biomimétisme propose plus qu'une adaptation de notre façon de concevoir en vue de diminuer l'impact environnemental de nos produits et systèmes de production. Cette approche vise également une rupture avec le développement économique et commercial dominant dans les pays occidentaux dominés par le capitalisme à outrance. En effet, le biomimétisme offre bien plus qu'une nouvelle façon de fabriquer nos produits. Dans un sens plus large, le biomimétisme propose une (re)adaptation de notre façon de vivre dans la planète. Cette approche s'inscrirait dans une décroissance économique (Chekchak et Lapp, 2011; Molina et Raskin, 2018), alors que le développement durable maintiendrait une croissance économique absolue (Vial et Proulx, 2019). Ce constat mettant en lumière une certaine opposition ou incompatibilité entre le biomimétisme et le développement durable est d'ailleurs mentionné par Moana Lebel et Choé Lequette :

Moana lebel : « [...] Pour moi, c'est ça le développement durable. C'est de bien faire les choses, mais ce n'est pas nécessairement de développer... un développement durable pour moi n'est pas nécessairement un développement économique ou commercial dans le sens où on va utiliser des ressources. Ça peut être utilisé... pour réduire le chemin de l'impact sur l'environnement, puis d'aller vers la décroissance d'utilisation des matériaux. Mais bien, t'sais. Que chaque chose qu'on développe, qu'on crée, on la fait bien. Pour moi, c'est ça le développement durable. Et, pour moi, c'est ça. Le biomimétisme est un outil... selon moi, le meilleur outil pour faire du développement durable. Pour bien faire les choses » [...] »

Chloé Lequette : « [...] le développement durable pour moi c'est un peu comme croissance verte. C'est comme si on ne voulait pas changer notre manière de faire, de produire. C'est tout le temps basé sur le développement absolu, mais on sait bien que ça ne marche pas, mais on n'a pas non plus envie de repenser un modèle. Je ne sais pas vraiment si le biomimétisme dans ma tête est compatible avec cette vision-là, parce que je pense que la vision du développement durable n'est pas compatible avec la biosphère. Le biomimétisme, il amène à repenser notre manière de vivre comme le vivant, finalement, il n'est pas basé sur une croissance infinie, mais plutôt sur des systèmes de cycles, de quelque chose sans doute de plus équilibré, qui ne cherche pas que quelque chose croît de manière très rapide. Pour moi, le biomimétisme se verrait justement à arrêter avec le développement durable... c'est incompatible. Le biomimétisme serait une nouvelle façon de fabriquer ou vivre tout simplement, en fait. Qu'est-ce que ça veut dire ? Qu'est-ce qu'on doit produire, en fait ? Est-ce qu'on doit être toujours dans une idée de production ? Pas forcément. Je crois qu'un designer n'est pas juste un producteur d'objets. C'est quelqu'un qui d'abord résout des problèmes à mon sens. Après que la réponse soit un objet, c'est une chose, mais la réponse pourrait être totalement différente. Ça pourrait être une formation, ça pourrait être réutiliser quelque chose déjà là, ça pourrait être faire de la coordination... voilà. Je n'aime pas ça, en tout cas... Moi, personnellement, ça me ferme un peu trop. Même si j'aime beaucoup mes objets et que c'est ma formation première, aujourd'hui je considère qu'une grande partie des problèmes ne nécessite pas de créer des nouveaux objets. On est rentré vers d'autres choses [...] ce n'est pas suffisant. Mais il y a un peu de ça aussi [le biomimétisme comme une boîte à outils]. La question, c'est aussi... on n'a pas une grande marge de manœuvre. Les architectes ont un peu plus de marge de manœuvre que les designers ».

Cette dernière phrase de l'extrait de Chloé Lequette souligne l'une des différences entre l'utilisation du biomimétisme en design de produits et en architecture. En réalité, le processus industriel et la production de masse créent une plus grande barrière à la mise en œuvre du biomimétisme. Il s'agit principalement d'une question d'échelle. Il semble plus logique et facile de réaliser le transfert des structures naturelles et des connaissances sur les écosystèmes en architecture et en urbanisme (Ricard, 2015) qu'en design de produits. À titre d'exemple, l'utilisation de la matière organique (p. ex. : la terre, la pelouse, l'intégration de plantes et arbres, etc.) dans les projets d'urbanisme ou architecture (maisons, villes, bâtiments, etc.) peut se faire de façon plus

aisée en comparaison avec la conception de produits ayant recours à des processus industriels traditionnels. Il semble que le transfert du caractère systémique de la nature soit plus logique en architecture biomimétique, car « l'objectif de l'architecture biomimétique ne consiste plus uniquement à donner forme et mesure à l'espace, mais aussi à développer des relations synergiques entre le construit et son environnement » (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018, p. 3). Ainsi, « les bâtiments et structures artificiels, éléments de l'écosystème ville, doivent être conçus comme des organismes vivants intégrés, adaptés à leur milieu et capables de fournir des services écosystémiques comme accueillir la biodiversité, assurer une bonne qualité d'air, purifier et stocker les eaux de pluie ou convertir la lumière du soleil en énergie utilisable » (Centre d'études et d'expertises en Biomimétisme (CEEBIOS), 2018, p. 4). Par ailleurs, le fait que l'architecture, en tant que champ interdisciplinaire influencé par de nombreux aspects des sciences naturelles et sociales, utilise davantage le biomimétisme peut être aussi lié à l'éducation où cette approche est mieux implantée et enseignée comme un véritable outil pour l'architecte et le design de produits (Chayaamor-Heil *et al.*, 2018).

L'utilisation du biomimétisme au niveau des systèmes dans le design de produits exige une plus grande abstraction, ce qui rendrait plus difficile le transfert des connaissances biologiques au design de produits dans un contexte industriel compte tenu des contraintes techniques et économiques. Ce constat pourrait expliquer la difficulté à dépasser l'utilisation formelle du biomimétisme en design de produits. Par ailleurs, le biomimétisme s'intégrerait mieux aux enjeux économiques d'un projet d'architecture ou d'urbanisme, car ces disciplines subissent moins d'influence du marché et des contraintes issues d'un processus industriel en masse.

5.1.2 Un outil systémique : la nature, l'homme et le produit

Le potentiel d'innovation du biomimétisme, notamment son aspect créatif qui permet l'exploration de solutions et stratégies naturelles, est souligné par les trois répondants de l'étude. Selon Fred Gelli, le biomimétisme est la meilleure source de référence pour un designer de produits souhaitant développer des produits compatibles avec la biosphère :

Fred : « [...] la solution naturelle pour un problème, c'est la solution la plus adéquate, la solution précise [...] C'est séducteur... c'est sexy [...] je pense que toute solution qui vient de la nature, elle vient "éco sexy", elle n'est pas "éco plate". L'avantage de regarder la nature quand tu veux développer des solutions qui soient des solutions pour le futur, parce que toute solution du futur doit être éco dans le sens d'être amicale avec la vie, c'est le fait que la nature représente un méga raccourci, parce qu'elle vient "éco sexy", elle vient complète, elle vient en considérant toutes les variables qu'une bonne solution de design doit considérer pour être une solution compatible avec le futur [...] ».

À cet effet, Fred Gelli souligne le caractère systémique de la nature en le mettant en opposition avec le fonctionnement de l'Homme. En effet, la compréhension des cycles naturels ainsi que de l'interrelation entre des organismes pourrait constituer un levier pour le développement non seulement de produits à moindre impact environnemental, mais aussi pour le développement et la réorganisation des sociétés plus soutenables :

Fred : « [...] à l'opposé de la nature [...] nous sommes "maximums" et non "optimums". Nous fragmentons tout au lieu de comprendre la logique de l'intégration. Nous ne pensons pas de manière cyclique [...]. Parfois, l'inspiration qui vient du regard holistique de la compréhension du système fait que tu dessines la forme d'une autre façon. La forme doit être au service du système et non le contraire, c'est-à-dire que le système c'est qui est intéressant. Le système, c'est l'interrelation entre des organismes et, si je sous-estime le système, je vais créer des formes qui vont être incompatibles avec d'autres formes qui cohabitent dans ce système. Donc, d'une manière générale, je préfère commencer par le système ».

Le biomimétisme permet de se questionner, dans une optique plus large, à une (re)adaptation de l'être humain avec la nature. Selon Moana Lebel, le biomimétisme serait un levier pour augmenter la résilience du vivant sur la planète. De cette façon, cette démarche ne vise pas simplement l'inspiration naturelle dans le but de développer des nouvelles technologies et produits. Certaines problématiques auxquelles les individus sont confrontés n'ont pas nécessairement besoin de nouveaux produits ou technologies :

Moana Lebel : « [...] dans une société en santé, où on a des connexions humaines qui sont positives, où tout le monde peut être logé, nourri et habillé, etc. on n'a pas besoin d'autre chose que ça. La reconnaissance sociale, oui, mais pas nécessairement par les matériels. Le biomimétisme, ce n'est pas juste imiter la nature pour faire de nouvelles technologies (qui seraient plus polluantes, qui utilisent plus de matériel pour aller plus vite, polluer plus, etc.), c'est vraiment dans un aspect de réduire l'impact de l'humain sur l'environnement et que l'humain retrouve son pouvoir dans l'écosystème terrestre [...] Tous les principes que la nature utilise pour se développer sont les meilleurs exemples de développement durable. Il ne pourrait pas y avoir autre chose ».

La vision de Fred Gelli concernant la compréhension des systèmes présente un lien très étroit avec la pensée design (*design thinking*). Le *design thinking* est une approche d'innovation basée sur l'utilisation d'outils et de méthodes propres aux designers de produits pour la résolution de problèmes (Cross, 2011) et sur « les processus cognitifs de l'acte de design » (Vial, 2015, p. 99). En fait, le processus de développement d'un produit considère dans son approche le système, c'est-à-dire le contexte d'intervention incluant les usagers, les objets et l'environnement, dans lequel le produit va se développer. De cette manière, le designer conçoit des produits

à partir de la documentation et de l'observation de ce contexte d'intervention lui permettant de bien cerner et ancrer la problématique à laquelle il souhaite répondre par la proposition d'un produit qui transformera une situation non désirable en situation désirable (Findeli *et al.*, 2010; Vial, 2015). Le produit final conçu devrait être au service du système tout autant que de la nature. Par exemple, une voiture est un produit qui doit cohabiter avec tous les éléments composant un réseau de transport.

Fred : [...] « Cela (la compréhension des systèmes) a à voir avec le *design thinking*, la méthodologie qu'on utilise pour faire du design de manière générale, qui est de comprendre les systèmes, de comprendre les environnements [physiques]. Ce que je vais faire dans un environnement, l'intervention que je vais proposer, c'est une intervention qui va être au service du système et ça va être développé avec les gens qui occupent cet espace et qui cohabitent dans ce système. Ce sont ces personnes qui comprennent en profondeur cet environnement et le rôle du designer est d'être un catalyseur dans cet environnement qui est déjà créatif. Croire que les espaces sont tous créatifs et ce que nous (designers) faisons, c'est de catalyser et faire en sorte que les connections se produisent. D'après moi, c'est ça le travail du designer, surtout [...] La nature fait des prototypes en tout temps, elle expérimente tout le temps... la nature considère ce dont on a déjà parlé, le système, tout le temps. N'importe quelle solution [...] telle que le sujet qui évolue dans le processus d'évolution de la nature est le plus apte, mais le plus apte signifie le plus intégré aux conditions de l'environnement qui est un principe basique du *design thinking*, c'est-à-dire que tu dois comprendre la dynamique de l'environnement et ta solution va potentialiser la dynamique de cet environnement ».

Les résultats présentés dans cette section soulignent que la finalité du biomimétisme dans le processus de développement de produits est de créer de l'innovation compatible avec les enjeux du développement durable grâce à l'inspiration de stratégies et structures naturelles. Alors que le biomimétisme est souvent perçu comme une approche permettant au designer de produits de concevoir des produits soutenables, il s'agit également, d'après nos trois experts, d'un outil plus complexe (allant au-delà de la conception) accompagnant une façon de penser, de vivre et d'être en relation harmonieuse avec la nature. Ainsi, le biomimétisme est un outil systémique connectant la nature, l'homme et le produit.

5.1.3 Un outil de réflexion et d'introspection

Comme ont déjà pu le révéler les résultats présentés plus haut (section 5.1.1), au-delà d'une approche de conception technique visant le développement de produits et de matériaux plus compatibles avec l'environnement, le biomimétisme requiert un aspect philosophique personnel très significatif pour la personne qui l'emploie. Pour nos trois experts en biomimétisme, il se présente comme un outil introspectif accompagnant

la façon de « faire du design » et surtout comme une façon de penser, de vivre et d'être. Le biomimétisme serait donc plus qu'un outil créatif d'innovation appliqué à un contexte de développement de produits. Les trois répondants ont affirmé avoir un lien très fort avec la nature, ce qui guide leur pratique et leur façon de vivre et de travailler de manière générale :

Chloé Lequette : [...] Derrière cette définition-là [du biomimétisme], je dirais qu'il faut y entendre, donc, de la conception d'objets, des services, etc., mais aussi sans doute, la planète, ou les manières de notre vie, en fait. Être compatible avec la biosphère c'est aussi se sentir terrien. Le biomimétisme a un aspect technique, industriel, etc., mais il y a aussi un aspect philosophique ou personnel. J'aime bien dire que c'est une démarche, pas juste une boîte à outils ou une méthodologie [...]. Le biomimétisme comme une boîte à outils, c'est déjà bien, mais c'est peut-être aussi que moi, j'ai eu la chance d'évoluer dans des structures qui s'y intéressaient et d'apprendre beaucoup auprès de gens, des experts du domaine [...] et je me rends bien compte que ce que la démarche a beaucoup à apporter, c'est un nouveau regard sur le monde ou sur moi-même, presque plus qu'une boîte à outils technique [...]. Du coup, l'aspect juste technique dans un travail très spécifique sera le design de produits, bon... ça paraît un parfum un peu sur le plan de notre propos. Mais ce n'est pas compatible, c'est ça [...].

Fred Gelli : « [...] La nature est une source infinie d'inspiration pour notre compréhension du monde. Et, pour que nous puissions interagir avec, spécialement face aux grands défis que nous avons de réinventer toutes les choses [...]. La cupidité a déséquilibré notre relation avec les systèmes et nous sommes beaucoup plus compétitifs que coopératifs. D'après moi, nous sommes dans cette situation actuellement à cause de ce déséquilibre. Plus que jamais, nous devons regarder la nature pour trouver les chemins et les sorties de ce grand défi évolutif que nous rencontrons aujourd'hui ; un défi évolutif pour notre espèce. [...] J'espère que le futur ne soit pas vert, parce qu'un futur vert est un futur monochromatique et la monochromie c'est une chose que n'intéresse pas à la nature. La nature adore polychromie. La nature adore la diversité. La diversité est synonyme de renforcement de la vie et non le contraire. Les marques ne doivent pas devenir des marques vertes. Les marques doivent rencontrer chacune leur propre couleur pour qu'ensemble, elles contribuent avec leurs compétences essentielles à construire des systèmes plus intelligents et plus favorables à la vie... La vie comme un ensemble et non seulement à la vie humaine ».

Moana Lebel : « [...] quand on a un défi humain de design particulièrement, mais autre, ça peut être de gestion, pour moi, le design, ça s'applique aussi au design d'entreprise... t'sais... ça peut être... le design c'est la conception de quelque chose, c'est plus large que le design de produits ou d'espace, etc. C'est comme la conception, en général, mais quand on a un défi de conception, c'est d'aller voir, de reconnaître que la nature a fait un travail de recherche et développement, de raffinement, de précision, d'utilisation de matériaux, de l'énergie, etc. Et donc, de s'inspirer de ce qu'a déjà été fait par la nature, comment la nature

a déjà résolu ce défi-là, bien comprendre comment ça fonctionne et de l'intégrer dans les solutions. Pour moi, le biomimétisme c'est de bien faire les choses [...] Dans un contexte plus large, le biomimétisme c'est [...] de retrouver l'harmonie sur la planète, c'est de retrouver du sens à comment l'humain fait les choses [...]. On n'a pas besoin de combler des besoins humains par les matériels normalement ».

En tant que designer de produits, Fred Gelli n'utilise pas uniquement le biomimétisme comme un outil créatif, mais également quand il a un défi conceptuel, philosophique ou technique. Il se demande toujours comment la nature pourrait l'aider à résoudre ce problème. De cette manière, la nature demeure sa principale source d'inspiration. Chloé Lequette présente une vision philosophique très personnelle envers le biomimétisme. Pour elle, cette démarche va au-delà de la conception d'objets, des services, etc. Dans un sens plus large, le biomimétisme change nos manières de vivre en vue d'augmenter notre compatibilité avec la biosphère. Finalement, Moana Lebel, qui possède une formation académique en lien étroit avec la nature grâce à son baccalauréat en biologie, après avoir découvert le biomimétisme lors de sa maîtrise en développement durable à l'université de Sherbrooke en 2008, a dédié sa vie professionnelle à démontrer l'efficacité de la nature aux entreprises et professionnels québécois à travers l'Institut de biomimétisme qu'elle a fondé et qu'elle dirige.

5.1.4 De l'intelligence naturelle à l'intelligence artificielle

Fred Gelli croit que la biologie et la technologie s'uniront de plus en plus, car il n'existe pas une référence plus prometteuse que la nature en termes d'algorithmes et de traitement d'informations. Il appuie son argumentation à travers le parallèle entre l'intelligence artificielle et l'intelligence naturelle, basé sur l'interrelation et l'interdépendance. Selon les propos de Fred Gelli, la compréhension de l'intelligence naturelle ouvre la voie à de nouvelles façons d'utiliser les connaissances naturelles au service du développement technologique.

Fred Gelli : « [...] nous sommes exactement dans un moment où la technologie et la connaissance humaine sont plus proches de la connaissance naturelle. En fait, quand on parle d'intelligence artificielle... l'intelligence artificielle, c'est la biomimétique pure. Quand on entend qu'aujourd'hui la frontière de la technologie est basée sur des algorithmes et la capacité de traiter des informations de garantir l'apprentissage et les résultats... cela est la base du vivant. Nous sommes un grand ensemble d'algorithmes... en réalité. On traite des informations tout le temps et on redonne au monde des attitudes, et... donc, technologie et biologie vont se mélanger de plus en plus. Alors, plus que jamais, je pense que le biomimétisme devienne protagoniste dans ce scénario parce qu'il n'existe aucune source plus puissante pour qu'on puisse continuer à évoluer en tant qu'animal pensant et innovateur que nous sommes, dans ces frontières qu'on ouvre de créer la propre vie, inclusivement, et la propre nature.

Fred continue son argumentation en soulignant l'importance de comprendre l'intelligence naturelle en vue de développer l'intelligence artificielle. Cette dernière, qui se présente comme une voie prometteuse, peut également être à l'origine de quelques menaces comme la question éthique de l'utilisation de certaines technologies, la substitution du travail humain par les machines dans certains domaines augmentant le niveau du chômage, entre autres.

Mais, mon hypothèse c'est qu'il ne suffit pas de regarder la nature et comprendre comment [la nature] crée un virus... parce qu'un virus informatique a beaucoup d'un vrai virus [un virus biologique]. Il se reproduit, il mute pour essayer de se défendre des systèmes de défense. Alors, on ne peut pas regarder la nature seulement avec la vision de dessiner ce qui est agressif. On a besoin de comprendre comment la nature traite l'agressivité du vivant... le vivant a beaucoup d'agressivité. La nature opère toujours avec deux dimensions très fortes qui sont la compétition et la coopération. Ces deux choses sont équilibrées d'une manière très subtile [...] l'intelligence artificielle, c'est une voie sans retour. Un chemin avec un grand potentiel, mais un chemin avec beaucoup de menaces... et je fais des parallèles avec l'intelligence naturelle. L'intelligence naturelle d'une certaine manière existe depuis milliards d'années et c'est le fluide qui garantit la connexion de tout ce qui est vivant et l'interrelation et interdépendance... cette grande toile qu'on dit... quand tu tires un point toute la planète bouge... il existe une intelligence qui gère, qui connecte, qui branche les divers organismes dans cette grande toile qui est très similaire à nos intentions en relation à l'intelligence artificielle. L'intelligence artificielle est basiquement la capacité de cumuler et gérer une quantité d'informations à chaque fois plus grande et garantir l'apprentissage à partir de l'intersection de ces informations... c'est une chose que la nature fait depuis milliards d'années. Alors, mon hypothèse c'est que si on regarde la manière dont la nature utilise cette intelligence naturelle, nous pouvons éventuellement découvrir des antidotes et on pourrait éventuellement neutraliser certaines des principales menaces qu'on a aujourd'hui en regardant l'intelligence artificielle ».

La vision du biomimétisme de Fred Gelli est plus pragmatique comparativement à celle de Chloé Lequette qui possède une vision plus philosophique et celle de Moana Lebel qui a une vision à la fois théorique et philosophique. La vision pragmatique de Fred peut s'expliquer par le fait que son processus de développement de produits vise à répondre à un mandat venant de ses clients dont le produit devra être mis sur le marché et répondre à ses contraintes en matière de fabrication, de matériaux, de performance et de compétitivité pour ne citer que celles-ci. Il possède une grande capacité d'abstraction et il fait très bien la part des choses entre ce qu'exige le marché et la possibilité et le potentiel d'explorer de nouvelles opportunités offertes par la nature comme il le mentionne :

« [...] J'utilise le biomimétisme en tout temps comme un outil créatif. Quand j'ai un défi conceptuel, un doute stratégique, philosophique ou technique, je pense toujours à comment la nature résoudrait ce problème. [...] Ma principale source d'inspiration c'est la nature ».

La vision philosophique de Chloé Lequette se traduit par sa relation personnelle avec le biomimétisme et la sensibilité qui l'habite aussi bien en tant que designer de produits que personne ayant des valeurs environnementales très ancrées :

« [...] je me suis vue grandir en tant qu'individu à travers cette démarche-là et, du coup, j'ai du mal à déconnecter ça quand j'en parle, en fait [...] ça apporte énormément de choses du point de vue personnel et c'est un grand cadeau ».

La vision théorique et philosophique de Moana Lebel est reflétée par sa formation ancrée en sciences pures de par son parcours en biologie, puis dans le biomimétisme où elle a su, à travers l'institut qu'elle dirige, faire le pont entre la réalité plus concrète des entreprises et celle plus abstraite qu'implique le biomimétisme :

« [...] Ben, moi, je suis biologiste de formation, j'ai un certificat en administration de l'UQUAM, puis j'ai travaillé dans le domaine de la biologie pendant plusieurs années. Puis, j'ai fait une maîtrise en développement durable à l'université de Sherbrooke, et c'est là que j'ai entendu parler de biomimétisme en 2008. Et puis, étant donné que j'avais un background scientifique en biologie j'ai décidé... j'ai eu la révélation que, mais oui ! C'est ça qu'il faut faire. Il faut s'inspirer de l'efficacité de la nature pour avoir du développement durable ».

Ces visions très riches et diversifiées offrent un portrait complet des enjeux entourant une redéfinition plus complexe de ce qu'est le biomimétisme. Cette diversité de visions peut, entre autres, s'expliquer par la formation académique et l'expérience professionnelle des experts interrogés en biomimétisme qui ont, chacun, œuvré dans des milieux culturels et pratiques variés.

5.2 Vers une méthodologie du biomimétisme

Le chapitre 1 offrait un tour d'horizon des approches les plus communément utilisées par les designers de produits, à savoir l'écoconception et le *cradle to cradle*, dans une optique de minimisation des impacts environnementaux de leur processus de développement de produits. Cette partie des résultats vise à mettre en perspective le biomimétisme avec ces deux autres approches (écoconception et *cradle to cradle*) afin d'apporter

des éléments de réponses aux questions suivantes : quels sont les avantages et les inconvénients de l'utilisation du biomimétisme par rapport à l'écoconception et au *cradle to cradle* ? Peut-on parler de convergence (de similitudes, de ressemblances) ou de divergence (d'opposition, de conflits, de différences) entre l'écoconception, le *cradle to cradle* et le biomimétisme ?

Tout d'abord, l'une des principales différences observées entre ces trois approches concerne leur globalité par rapport au développement durable. Le biomimétisme et le *cradle to cradle* ouvrent une voie fertile à la mise en œuvre de solutions sur les plans fonctionnel ou systémique. Néanmoins, ces deux approches « n'offrent actuellement pas d'outils de conception quantitative (comme le fait l'écoconception) pour évaluer l'impact environnemental des solutions tout au long du cycle de vie du produit » (De Pauw *et al.*, 2014, p. 182). Pour les trois professionnels interviewés, le biomimétisme se présente comme une approche plus globale en comparaison avec l'écoconception et le *cradle to cradle*. La nature ne peut pas être imitée à 100 % dans la conception de produits, car le designer de produits est souvent limité par le répertoire de matériaux qu'il a à sa disposition, ainsi que les procédés de fabrication existants et disponibles, donc elle pourrait pousser l'augmentation de la globalité des solutions.

Moana Lebel : « [...] la différence du biomimétisme, par rapport à d'autres approches en conception utilisées aujourd'hui, est le fait qu'il soit plus global [...] Dans le fond, on utilise toutes les façons, tous les moyens, toutes les façons de faire de la nature qui sont plus efficaces au niveau du développement durable, selon moi et ma conception des choses. Et, je dirais que, par exemple, l'approche de l'écoconception ou *cradle to cradle*, ce sont des approches qui peuvent être intégrées dans une démarche de biomimétisme. Dans le biomimétisme qui est une approche, mettons globale, on peut dire que si on l'utilise, si on imite complètement la nature on est à 100 %... On imite la nature, on est complètement durable [...] Mais, par exemple, l'approche du *cradle to cradle*, c'est une partie du biomimétisme. Donc, pour moi, on utilise le potentiel de la nature ou de comment fait la nature à 15 pour cent, ou 50 pour cent, je ne sais pas là. Mais, même chose pour l'écoconception. Les principes de l'écoconception s'inscrivent dans une démarche de biomimétisme, c'est ça. Mais, pas le contraire. L'écoconception n'est pas si globale pour avoir les mêmes bénéfices que le biomimétisme. [...] L'écoconception, le *cradle to cradle*, ce sont des approches qui peuvent être intégrées dans une démarche de biomimétisme. L'approche *cradle to cradle* est incluse dans le biomimétisme [...] ».

Chloé Lequette : [La différence entre le biomimétisme et les autres approches en design de produits, l'écoconception et le *cradle to cradle* c'est que] « [...] le biomimétisme ouvre encore un peu plus le champ de connaissances. Ça amène le designer à aller regarder du côté de la biologie qui est déjà un vaste

domaine ». Je pense que c'est ça la vraie différence. [Le biomimétisme] c'est la première chose qu'on doit faire si on veut penser dans une démarche écologiste ».

Les entretiens ont permis de révéler que le biomimétisme pourrait constituer une approche complémentaire au processus de développement d'un produit, comme l'est justement l'écoconception qui ne vise pas à dédoubler la démarche (Caya *et al.*, 2012), mais bien à intégrer des aspects environnementaux dans la conception de produits.

Chloé Lequette : « [...] La démarche en biomimétisme serait complémentaire à la méthode classique en design qui est déjà une démarche pluridisciplinaire et globale. Les deux méthodologies se rassemblent beaucoup [...] les étapes [du biomimétisme], elles sont celles en fait du design d'objet classique, je dirais... [...] Donc, c'est juste qu'à mon sens on élargit un peu plus notre regard [...] Je crois que c'est complémentaire et, en fait, ça se ressemble. Moi, c'est ce que j'avais vu lorsque je fais mon post-diplôme, c'est qu'il y avait une grosse similitude entre la démarche du biomimétisme et la démarche du design. La démarche du design est déjà une démarche qui se veut pluridisciplinaire. Le biomimétisme dit la même chose, il dit qu'il faut regarder tous les aboutissants d'un problème... il faut faire la recherche avant et il faut combiner différentes compétences ensemble. Donc, le design a déjà ces fondements-là très fort. C'est juste que le design, de par son histoire, parce qu'il est attaché à l'industrie, il n'est pas forcément systématique vers la biologie. C'est tout, en fait. Donc, les deux démarches, les deux méthodologies, se rassemblent beaucoup [...] En fait, pour moi, ce n'est pas vraiment comme si tu pouvais le mettre en parallèle, à mon sens. Le biomimétisme peut nourrir le design comme il peut nourrir l'architecture. Le biomimétisme peut nourrir le management, ou nourrir, je ne sais pas, même la fabrication de chapeaux, ou l'agriculture, ou n'importe quel autre métier ».

Moana lebel : « [...] le biomimétisme, c'est complémentaire à une démarche de design [...] Mais c'est une méthodologie de développement de produits en tant que telle ». [Les principales étapes comprenant cette méthodologie sont :] [...] (i) cadre du projet, (2) évaluer le défi de design qu'on va résoudre (3) Aller voir dans la nature comment elle a résolu ce défis-là et (iv) intégrer les solutions de la nature dans le design de produits, d'architecture, de gestions, des systèmes, etc. »

Fred Gelli : « [...] Certainement, le biomimétisme est plus une source d'inspiration. Elle n'est pas unique. Dépendamment de la nature du projet, la dose d'inspiration qui vient de la nature est plus ou moins grande, mais toujours conjuguée avec d'autres sources d'inspirations. Par exemple, ce soulier que j'ai commenté avec toi qu'on dessine à ce moment, il a une source importante d'inspiration de la nature... nous avons développé une semelle à partir de l'inspiration des os des oiseaux... nous avons dessiné un motif inspiré des plumes des oiseaux... c'est un soulier qui est complètement compatible avec les technologies de

fabrication de souliers qui a toute une intelligence de forme qui n'a rien avoir avec le biomimétisme. La forme du soulier a à voir avec une intelligence cumulée en design de soulier. Donc, quand on dessine un emballage, je peux faire une valve, comme nous avons déjà fait, qui est inspirée d'une valve d'une broméliacée... une solution mécanique d'une broméliacée, mais je la considère dans le processus de production que cela doit être injecté, alors je dois tout savoir sur l'injection. J'ai besoin de connaître les processus (de fabrication) et je croise ces informations. Alors, le biomimétisme ne fonctionne jamais comme une source indépendante d'inspiration. Il contribue, il complète en différentes doses selon la stratégie du projet. Cependant, cela ne signifie pas que notre propre stratégie de projet, nos propres méthodologies n'incorporent pas des principes philosophiques et conceptuels qui viennent de la nature, c'est-à-dire que la méthodologie qu'on utilise [en design], et je pense même que le design *thinking* dans un certain sens, a à voir avec une abstraction comparable au processus créatif de la nature. [...] Donc, je dis que la biomimétique est une méthodologie et est une source d'inspiration complémentaire, mais la propre méthodologie de design [...] la bonne méthodologie de design que j'ai appris avec Ana Branco beaucoup avant existait avant le design thinking de manière informelle, mais il était déjà design thinking parce que design thinking n'est rien de plus que la façon dont le design pense et nous avons toujours pensé comme ça... Alors, je pense que nous avons raffiné notre méthodologie chez *Tátil* d'une manière générale... la méthodologie basique chez *Tátil*... elle a beaucoup de ce que j'ai appris pendant tout ce temps en regardant la nature ».

En somme, le biomimétisme ne fonctionne pas comme une approche indépendante, en ce qui concerne le développement de produits, elle s'intègre facilement à l'aspect méthodologique qui est souligné par certains auteurs comme étant une barrière majeure à la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel (Caya *et al.*, 2012; Terrier *et al.*, 2017).

Terrier *et al.* (2017) soulignent que le biomimétisme « est encore en attente d'une méthodologie plus clairement structurée pour en faciliter la diffusion en ingénierie et en design de produits. Cependant, si l'approche biomimétique est combinée à d'autres méthodes de conception innovante, cette lacune peut être atténuée ». C'est le cas de la méthodologie Biotriz (présentée au chapitre 3) qui vise à faciliter la recherche de solutions naturelles pour améliorer les fonctions techniques des produits à travers un ensemble d'outils ainsi que diverses règles et techniques pour résoudre des problèmes technologiques ou de gestion. Comme la complexité d'imiter la nature et les coûts associés à la mise en œuvre du biomimétisme sont de possibles barrières à sa mise en œuvre dans le contexte industriel, cette méthodologie pourrait faciliter la démarche du biomimétisme. Selon

Nikolay Bogatyrev, Olga Bogatyreva et Mikhail Bogatyrev (2010)⁶², l'utilisation en amont de BIOTRIZ dans la démarche du biomimétisme en design de produits pourrait :

- a) Faciliter le recyclage : la nature n'utilise que deux polymères pour offrir les propriétés pour lesquelles la technologie a besoin de plus de 300 polymères ;
- b) Réduire la consommation d'énergie et les coûts de production : la nature est au moins quatre fois plus efficace que la technologie actuelle ;
- c) Améliorer la tolérance aux pannes et augmenter la durabilité : la nature résout les problèmes avant qu'ils ne surviennent.

La méthodologie BIOTRIZ sera comparée avec d'autres méthodologies existantes en biomimétisme au chapitre 6 (section 6.1.2). L'enjeu est de renforcer le cadre théorique afin de rendre possible une proposition exploratoire d'une approche méthodologique en biomimétisme pour les designers de produits.

Bogatyrev et Bogatyreva (2015) soulignent qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas de méthodologie solide capable de garantir le succès de l'application de mécanismes biologiques dans le cadre des réalités non biologiques, telles que l'ingénierie, l'économie, le design de produits, etc. Par ailleurs, ces auteurs affirment qu'il existe de nombreuses stratégies dans les systèmes biologiques qui ne peuvent pas être transférées dans les systèmes humains pour des raisons culturelles, morales, économiques et autres. Malgré tous les avantages relatifs à l'utilisation du biomimétisme, la prochaine section présente des limites associées à sa mise en œuvre dans le contexte industriel.

5.3 Les limites pour la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel

5.3.1 La complexité d'imiter la nature

Plusieurs barrières limitent la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel. La littérature a permis de mettre en lumière que le biomimétisme est souvent utilisé en R&D en dépassant rarement l'étape de prototype (voir section 2.1.6, chapitre 2), et moins dans un contexte traditionnel de développement de produits qui seront commercialisés. Dans un premier temps, la propre complexité des structures, systèmes, matériaux

⁶² <https://biotriz.com/our-methods>

et stratégies naturels est l'une des principales barrières au transfert des connaissances des systèmes naturels au contexte industriel :

Fred : « [...] Il existe des limites complexes en relation aux matériaux. La nature a un portfolio de matériaux absolument génial. Le vivant est une chose qui est encore loin d'être dominée et comprise. Alors, il me semble que l'une des principales limitations, c'est que plusieurs solutions naturelles dépendent de matériaux que nous ne pouvons pas développer. Suivre en regardant ces matériaux, ces solutions... solutions toujours avec une chimie, avec des conditions environnementales de pressions et température... une chimie complètement amicale à la vie, telle que citée par Janine Benyus, ça c'est génial ! Nous dépendons encore d'une série de substances absolument agressives. Je pense que porter un regard sur la nature selon une perspective des matériaux est fondamental. Matériaux intelligents... tous les matériaux naturels sont intelligents... certains possèdent l'autonomie. Alors, je pense que ça c'est une limite. [...] C'est curieux parce que les gens ont un sentiment un peu contradictoire par rapport au biomimétisme. Dans un premier temps c'est un "wow" ! Incroyable ! C'est un point de vue sur l'avenir ! Dans un deuxième temps, les gens se demandent comment cela fait-il du sens ? ».

Par ailleurs, une autre source de complexité réside dans le fait que les systèmes vivants ont évolué dans des conditions dynamiques de température, pression et de temps peu connus, pouvant expliquer leur développement structural et organisationnel (Fayemi, 2016). En effet, l'inspiration d'une solution biologique et donc optimisée selon des conditions et des exigences inconnues pourrait induire à des solutions moins performantes que celles rencontrées dans la nature (Fratzl, 2007). De plus, il n'est pas garanti que, « sans adaptation appropriée, l'utilisation des connaissances issues de la biologie apportera le résultat souhaité, car l'économie n'est pas à proprement parler un système vivant, car elle inclut également la technologie : les lois applicables aux écosystèmes peuvent ne pas y fonctionner » (Bogatyrev et Bogatyreva, 2014a, p. 3). Ces auteurs soulignent que l'économie est un système complexe avec une composante sociale et une composante technologique. La composante sociale est compatible avec les sociétés naturelles. Cependant, la composante technologique est très différente de la biologie, ce qui peut représenter une certaine opposition entre la technologie et la biologie.

5.3.2 La problématique de l'organisation industrielle

Dans un deuxième temps, la mise en œuvre d'une telle approche implique un grand changement de l'organisation industrielle, comme l'explique Moana Lebel qui a l'habitude d'accompagner des entreprises dans une démarche de biomimétisme :

Moana Label : « [...] La plus grande barrière, c'est l'aspect gestion du changement. C'est la gestion de changer nos manières de faire qui pose un obstacle. Je ne pense pas que ça soit la méthodologie en général. Après, si on dit... t'sais, il y a le phénomène d'éco-crédation maintenant-là qui sont de plus en plus présents au Québec et ailleurs. Donc, ça ouvre la porte à ne pas savoir à l'avance quel serait le résultat de la recherche, mais c'est la même chose dans tous les processus d'idéation. On ne sait pas avant d'aller dans la recherche d'idées ou dans le brainstorming qu'est-ce qui va apparaître. Je pense que c'est plus un obstacle humain que méthodologique. [...] Les designers ne sont pas habitués à travailler avec de connaissances en biologie. Donc, les gens travaillent en silo... ne travaillent pas ensemble. Parce que, t'sais, un designer est formé d'une certaine façon, apprend ici d'une certaine façon et à réfléchir d'une certaine façon. Un biologiste ou un scientifique est formé (incompréhensible) par son travail, par son cheminement, par son expérience à penser d'une autre façon. Puis, de fois c'est difficile de travailler ensemble. Il faut juste avoir l'ouverture de travailler ensemble, de chercher des solutions ».

La mise en œuvre de l'écoconception pourrait être bénéfique en vue de préparer les entreprises à utiliser le biomimétisme, car l'écoconception possède une méthodologie et des outils bien plus précis qui pourraient être complémentaires au biomimétisme. En effet, l'écoconception serait une façon de préparer le terrain et outiller les entreprises de façon claire et objective afin qu'elles adoptent des pratiques en lien avec le développement durable.

5.3.3 Les contraintes financières

Dans un troisième temps, les coûts liés à la mise en œuvre du biomimétisme se présentent comme une autre barrière à la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel :

Moana Label : « [...] En fait, il y a l'aspect budget. À la place d'engager un designer qui va faire la recherche, ça (le biomimétisme) prendrait un modèle d'affaires qui est un peu différent, qui peut être un petit plus coûteux à la création, mais ça crée des innovations qui rapportent économiquement sur le plus long terme (p.ex. : *PureBond technology*⁶³, une entreprise fabricante de colle à bois sans formaldéhyde inspirée des adhésifs naturels de la moule bleue et l'entreprise *Interface*⁶⁴, une entreprise fabricante de tapis modulaires installés sans colle inspirée de cycles organiques du sol forestier).

Chloé Lequette : « [...] Je trouve que pour faire bien les choses il faudrait plus de temps et... c'est n'est pas forcément une limite parce que c'est un projet personnel, parce que c'est un choix personnel d'accorder le temps

⁶³ <https://asknature.org/idea/purebond-technology/>

⁶⁴ <http://www.interface.com/CA/fr-CA/about/modular-carpet-tile/Biomimetisme>

qu'on veut... mais dans un cadre professionnel les clients n'ont pas de budget infini. Donc, il y a une réalité économique présente qui gêne peut-être une recherche qui se voudrait plus sur le long terme... qui aurait une vision plus dans le futur. Il y a le temps, voilà. Parce que ce sont des bases de données plus importantes qu'on va aller chercher, voilà, en biologie, etc. ».

À l'heure actuelle, il n'existe pas une méthode garantissant le transfert de connaissance issue de la biologie vers l'industrie. Malgré le grand intérêt des entreprises pour ce type d'approche, ils n'ont pas de confiance à l'utiliser, car le manque de méthode garantissant son succès rend son utilisation risquée et coûteuse (Bogatyrev et Bogatyreva, 2015).

5.3.4 Un contexte culturel à apprivoiser

Dans un quatrième temps, il existe un frein culturel dans la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel. En fait, le but principal de l'industrie est de produire des objets pour répondre aux besoins des utilisateurs dans le but de générer des profits toujours plus importants pour les compagnies en s'appuyant sur un modèle capitaliste. Cependant, comme souligné plus haut dans le texte par Moana Lebel et précisé par l'extrait de l'entrevue de Chloé Lequette présenté ci-dessous, il n'est pas nécessaire de combler les besoins humains par des matériaux et objets. Parfois, la solution pourrait être, par exemple, la réutilisation d'un produit existant ou le recyclage ou même éliminer l'utilisation du produit. La mise en œuvre du biomimétisme demanderait un changement culturel et exigerait des entreprises une adaptation à de nouvelles façons de générer des profits. Par exemple, des entreprises pourraient passer de l'offre des services à la place de la vente de produits comme le prescrit l'économie de fonctionnalité.

Chloé Lequette : « [...] Il y a clairement un frein culturel très fort parce que déjà je pense en design... je pense qu'on peut être amené à dire, ben, finalement, venez nous voir (en tant que client) avec l'envie, le désir de fabriquer un nouvel objet pour répondre à un problème, mais on voit dans la recherche que pour répondre à leur problème, ce n'est pas cet objet-là qui doit être fabriqué, peut-être même que ce n'est pas un objet, ça peut-être une autre chose. Déjà, ça c'est compliqué... ça arrive en design [...] et du coup. C'est difficile pour le client lorsqu'ils ont une idée en tête [...] de leur faire voir que, peut-être, il devrait aller vers autre chose.

Conclusion

Ce chapitre présentant les principaux résultats issus de cette étude a mis en lumière le caractère introspectif et philosophique du biomimétisme en soulevant certains points menant à la proposition, dans le prochain chapitre, d'une définition plus complète à l'image du potentiel offert par cette approche. Étant autant un outil de réflexion

et d'introspection qu'un outil systémique connectant la nature, l'homme et le produit, le biomimétisme prône un découplage avec la croissance économique absolue. En tant qu'approche globale et interdisciplinaire, le biomimétisme vise l'inspiration des connaissances et stratégies naturelles afin de soutenir notre évolution en tant que société durable.

Certains défis sur le plan du développement méthodologique du biomimétisme ont été identifiés dans les résultats. Dans un premier temps, le manque d'une méthodologie du biomimétisme en design de produit constitue une barrière majeure à la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel. Cette lacune pourrait être atténuée à travers la combinaison du biomimétisme avec des approches comme l'écoconception, par exemple. Cette approche pourrait contribuer avec des outils et méthodes bien définis et déjà testés dans le contexte industriel, tels que l'AVC ou LACVS. Dans un deuxième temps, même avec une méthodologie plus solide du biomimétisme, de nombreuses stratégies rencontrées dans les systèmes biologiques ne peuvent pas, à ce jour, être transférées dans les systèmes humains pour des raisons d'échelle et de complexité, entre autres.

D'autres résultats issus des entrevues ont permis d'identifier certains freins concernant l'utilisation du biomimétisme dans la conception de produits. Dans un premier temps, la complexité présentée dans les structures et solutions naturelles rend difficile leur compréhension. De plus, le processus industriel traditionnel comporte des limites liées à la fabrication de structures complexes. Dans un deuxième temps, l'organisation industrielle actuelle pose certains défis concernant la mise en œuvre du biomimétisme étant donné le changement que cette approche implique au sein des organisations. Dans un troisième temps, les contraintes financières sont un facteur démotivant pour les entreprises qui souhaitent se lancer dans l'utilisation du biomimétisme. Le manque de méthodes garantissant le succès dans le transfert des connaissances biologiques aux projets ainsi que le temps, parfois long, consacré à la mise en œuvre d'une telle approche pourraient contribuer à cette contrainte financière.

Chapitre 6 : Discussion générale

La discussion générale tentera d'apporter des éléments de réponses à la question de recherche suivante : **comment soutenir l'utilisation du biomimétisme par les designers de produits dans le processus de développement de produits ?** Dans ce contexte, la première partie de la discussion expose les principales implications des résultats pour la communauté scientifique ainsi que pour les designers praticiens et les entreprises en design. La deuxième partie propose des pistes de recommandations destinées aux designers de produits afin de soutenir l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits. La troisième partie identifie à la lumière des résultats les principales limites des résultats de l'étude et propose des façons de les contourner. Finalement, des avenues prometteuses pour l'avancement des recherches concernant le design de produits et le biomimétisme sont présentées.

6.1 Implication des résultats pour la communauté scientifique

6.1.1 Vers une définition plus complète et complexe du biomimétisme

Dans la littérature, les termes biomimétisme, biomimétique, bionique et conception bio-inspirée sont souvent utilisés comme des synonymes, malgré des différences importantes (Appio *et al.*, 2017; Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016). Ainsi, il est nécessaire de bien les définir en mettant l'accent sur ces principales différences ainsi que le fil conducteur qui les connecte avant de proposer une définition plus complète et complexe pour le biomimétisme dans le cadre de cette recherche.

Bionique (bionic)

Le terme bionique (*bionic* en anglais) est une construction basée sur la racine grecque « bios » qui signifie « vie » et le suffixe « ique » provenant d'électronique. L'invention du terme est attribuée à *Jack Steele* de l'*US Air Force* en 1960 lors d'une réunion à la *Wright-Patterson Air Force Base* à Dayton, Ohio (Vincent *et al.*, 2006). Il l'a défini comme la science de conception de systèmes mécaniques à partir de l'imitation de la nature, des processus et systèmes naturels et des organismes vivants (Papanek, 1974). Selon le dictionnaire de l'Académie française⁶⁵, le terme bionique est une « science qui étudie les processus biologiques d'un point de vue technique, en vue d'y découvrir des principes pouvant s'appliquer au domaine militaire ou industriel ». Autrement dit, la bionique examine les propriétés mécaniques du vivant afin de les transposer dans le domaine de l'ingénierie, notamment la robotique et la biomécanique permettant par exemple le développement de

⁶⁵ <https://www.dictionnaire-academie.fr/>

capteurs bio-inspirés (Ricard, 2015). Par ailleurs, la bionique est une discipline technique qui cherche à reproduire, améliorer ou remplacer des fonctions biologiques par leurs équivalents électroniques et/ou mécaniques—(ISO 18458 : 2015), « essentiellement destinée à la robotique à partir des années 1960 » (Chekchak et Lapp, 2011, p. 161).

P. Ricard (2015) souligne que la bionique est traitée comme synonyme de biomimétisme en Allemagne où elle est enseignée depuis longtemps comme une discipline technique scientifique dans dix-huit établissements d'enseignement supérieur, selon Biokon international⁶⁶. Ce dernier agit au sein d'une association d'experts et d'institutions aux compétences avérées dans le domaine de la bionique, qui contribuent activement au développement de cette discipline scientifique et de ses applications dans la recherche, l'éducation, le commerce et l'industrie, la politique et la culture.

Conception bio-inspirée (bio-inspiration)

La conception bio-inspirée est un terme générique qui désigne le fait de s'inspirer du monde vivant sous toutes ses formes, telles que les animaux, plantes, micro-organismes, matériaux, procédés ainsi que les écosystèmes afin de résoudre des problèmes humains (Bœuf, 2014; Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016; Ricard, 2015). Le but est de **s'inspirer de la nature** est de développer des alternatives novatrices au service de l'humanité qui soient moins polluantes, moins consommatrices d'eau et d'énergie, recyclables, plus sûres et à moindre coût (Bœuf, 2014). La bio-inspiration est souvent utilisée dans la science des matériaux, l'ingénierie, le design et l'architecture, de même que pour tout autre domaine qui relève de l'inspiration esthétique (Ricard, 2015).

Comme mentionné dans le chapitre 2 (voir 2.1.1), l'inspiration dans la nature n'est pas une nouvelle approche. Les premières études de Léonard de Vinci sur la série Fibonacci et le nombre d'or⁶⁷, ainsi que les mouvements de design tels que l'*arts and crafts*, le modernisme et l'art nouveau du début du XX^e siècle sont des exemples de la conception bio-inspirée (Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016).

Biomimétique

La première définition pour le terme biomimétique (*biomimetic* en anglais) a été présentée par le biophysicien américain Otto Herbert Schmitt en 1963 qui développait alors un appareil imitant explicitement l'action électrique

⁶⁶ <https://www.biokon.de/netzwerk/international/>

⁶⁷ Le nombre d'or, aussi connu comme divine proportion, est un ratio qui se décline et se transpose par des formes géométriques telles que le rectangle, le pentagone et le triangle retrouvées partout autour de nous dans la nature (Savard, 2017). Il « est une proportion sur laquelle s'appuient différents artistes pour la création de leurs œuvres que ce soit sous forme d'art, de peinture, de photographie, de musique et d'architecture, disciplines dans lesquelles on retrouve la botanique, l'arithmétique et la géométrie » (*Ibid.*).

d'un nerf pour sa recherche doctorale (Harkness, 2002). Le terme biomimétique a fait sa première apparition dans le Webster Dictionnaire en 1974 (Appio *et al.*, 2017), avec la définition suivante :

« L'étude de la formation, structure ou fonction de substances et matériaux produits biologiquement (sous forme d'enzymes ou de soie) ainsi que mécanismes et processus biologiques (sous forme de synthèse de protéines ou photosynthèse), dans le but de synthétiser des produits similaires par de processus artificiels qui imitent les mécanismes naturels » (Harkness, 2002, p. 481).

Plus récemment, la norme ISO 18458 : 2015 « Biomimétique — terminologie, concepts et méthodologie »⁶⁸, publiée en mai 2015 proposait un cadre pour la terminologie concernant la biomimétique à des fins scientifiques, industrielles et éducatives. Cette norme définit la biomimétique comme la « **coopération interdisciplinaire** de la biologie et de la technologie ou d'autres domaines de l'innovation dans le but de résoudre des problèmes pratiques par le biais de l'analyse fonctionnelle des systèmes biologiques, leur abstraction en modèles, et le transfert et l'application de ces modèles à la solution ».

Biomimétisme

Le terme « biomimétisme », traduction du terme anglais *biomimicry* (Benyus, 1997), provient du grec « bios » qui signifie « vie » et « mimesis » qui signifie « imitation ». La terminologie du biomimétisme s'est développée dans les années 1950 à partir des mythes et légendes ainsi qu'avec les journaux personnels de Léonard de Vinci (Kapsali et Perry, 2017). Chekchak et Lapp (2011) soulignent que le biomimétisme a initialement intéressé l'industrie de l'armement, mais la démarche a évolué entre 1960 et 1980 à partir de : l'urbanisme (Wolman, 1965), de l'architecture des paysages (McHarg et History, 1969) et de l'écologie industrielle (Frosch et Gallopoulos, 1989). La première mention du terme « biomimétisme » est attribuée à Lange-Merrill (1982) dans sa thèse s'inscrivant le domaine de la biochimie intitulée : « *Biomimicry of the Dioxygen Active Site in the Copper Proteins Hemocyanin and Cytochrome Oxidase* » (Fayemi, 2016).

Le biomimétisme s'est répandu, par la suite, grâce à l'ouvrage de Janine Benyus intitulé *Biomimicry : innovation inspired by nature* en 1997, traduit en français sous le titre *Biomimétisme : quand la nature inspire des innovations durables*. Selon cette auteure, le biomimétisme est une **démarche d'innovation** qui fait appel au transfert et à l'adaptation des principes et stratégies élaborés par les organismes vivants et les écosystèmes afin de produire des biens et des services de manière durable et rendre les sociétés humaines compatibles avec la biosphère. La norme ISO 18458 : 2015 définit le biomimétisme comme une « philosophie et approche

⁶⁸ <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:fr>

conceptuelle interdisciplinaire prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (social, environnemental et économique) ».

Le fil conducteur

Le principal fil conducteur entre les termes biomimétisme, biomimétique, bionique et conception bio-inspirée réside dans l'apprentissage de la nature avec un accent innovant et technologique sur les solutions proposées (Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016). La grande différence entre le biomimétisme et les trois autres approches décrites plus haut dans cette section est le fait qu'il intègre la durabilité comme une dimension fondamentale à travers la conservation de la vie et de la nature (Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016; Ricard, 2015). Par exemple, la bionique n'établit pas forcément un lien avec la durabilité et se concentre principalement dans la reconstruction artificielle de fonctions naturelles (*Ibid.*). La conception bio-inspirée, à son tour, est basée sur l'utilisation du monde vivant comme une grande source d'inspiration afin de créer des objets ou des procédés, sans nécessairement avoir un compromis avec la durabilité (Bœuf, 2014; Montana-Hoyos et Fiorentino, 2016; Ricard, 2015). Même si la biomimétique met l'accent sur la coopération interdisciplinaire entre la biologie et de la technologie, la durabilité n'est pas non plus une dimension fondamentale explicite.

Proposition d'une nouvelle définition pour le biomimétisme

Cette nouvelle définition pour le biomimétisme représente une ouverture d'esprit liée aux définitions précédentes, car elle restaure l'essence philosophique du biomimétisme qui est de reconnecter l'homme à la nature, tout en permettant l'évolution soutenable de la société. La nature représente bien plus qu'une bibliothèque de solutions à la disposition de l'innovation technologique, car elle peut conduire au développement d'un réseau plus synergique entre l'homme et son environnement. Mathews (2019) souligne que la clé de la durabilité réside dans l'état d'esprit de la nature, ce qui signifie permettre à la nature de « redessiner » non seulement nos produits, matériaux et technologies, mais aussi nos propres désirs. Ces derniers ne sont pas individuels, mais plutôt compatibles avec le bien-être social et collectif.

Le biomimétisme est traditionnellement défini comme un outil de conception, d'innovation et d'imitation de la Nature. Dans un sens plus large, cette approche se présente comme :

- a) Un changement de paradigme prônant un découplage avec la croissance économique : bien que les systèmes socio-économiques actuels nous aient conduits à une prospérité toujours croissante, ils ont aussi créé plusieurs problèmes environnementaux comme la pollution des

ressources naturelles telles que le sol, l'eau et l'air, la destruction des écosystèmes naturels, la réduction des espèces ou l'extinction des espèces, l'augmentation de la température mondiale, entre autres (Wever et Vogtländer, 2014). Alors que nous nous inscrivons dans une discipline où nos problèmes trouvent des solutions dans la conception de (nouveaux) produits, le biomimétisme, tout comme d'autres outils comme l'écoconception, invite le designer de produits à considérer d'autres alternatives comme le recyclage, l'entretien et réparation, le reconditionnement, l'économie collaborative et de partage, la location, etc. Certaines de ces alternatives se présentent comme un levier pour la décroissance économique par la voie de production de nouveaux biens. La décroissance économique est définie par Fournier (2018) comme « la rupture avec le modèle de la croissance économique et le passage à une société alternative » (p. vii). Selon Löwy (2019), la décroissance se présente comme « un ensemble de politiques de l'Anthropocène⁶⁹ visant à maintenir la possibilité de vivre ensemble dans des sociétés qui ne connaîtront plus l'abondance actuelle » (p. 61). La décroissance est une nécessité morale et écologique qui doit s'appliquer aux pays riches pour des raisons d'équité (*Ibid.*).

- b) Un outil systémique connectant la nature à l'homme : cette approche propose un retour à nos racines les plus primitives où l'homme vivait en harmonie avec la nature. Dans ce contexte, les produits étaient fabriqués en considérant les besoins primaires de gens et les ressources étaient extraites de la nature de façon plus durable. En réalité, la révolution industrielle a coupé d'une certaine manière le lien entre l'homme et la nature, notamment avec l'augmentation de la croissance des grandes villes à partir du processus d'urbanisation (Chaouad et Verzeroli, 2018).
- c) Un outil philosophique de réflexion et d'introspection : au-delà d'un simple outil de conception, le biomimétisme est avant tout une philosophie de vie et de travail, une façon de penser et d'être en relation avec la nature. Le biomimétisme propose un retour à un regard holistique sur la nature où la compréhension des structures et principes naturels deviennent la base de notre évolution en tant que société. En réalité, l'assimilation de ces principes naturels se montre essentielle pour qu'ils puissent être intégrés dans le processus de développement de manière globale.

⁶⁹ Formé à partir du grec *anthropos*, qui signifie « homme », l'Anthropocène est une nouvelle ère géologique marquée par l'homme comme principale force de changement sur Terre, surpassant les forces géophysiques (Gemenne et Denis, 2019)

- d) Une approche transdisciplinaire qui explore les relations complexes entre les sciences techniques, du vivant et les sciences naturelles, dans une perspective systémique, globale et intégrée (Darbellay, 2015). Les problèmes environnementaux ainsi que la compréhension et le transfert des connaissances et stratégies naturelles présentent une grande complexité, ce qui exigerait un travail transdisciplinaire principalement entre la biologie et les disciplines de conception (design de produits ou industriels, ingénierie, architecture, etc.) (Terrier *et al.*, 2017), mais également les sciences pures comme l'informatique, les mathématiques, entre autres. La transdisciplinarité se présente comme « une nouvelle approche scientifique, culturelle, spirituelle et sociale » (Nicolescu, 1996, p. 98) visant « la compréhension du monde présent, dont un des impératifs est l'unité de la connaissance » (*Ibid.*).

Bien qu'il existe plusieurs définitions dans la littérature pour le biomimétisme, les résultats de cette recherche ont permis d'aboutir à une définition plus complète de la vision du biomimétisme et plus complexe de ses enjeux méthodologiques actuels :

Le biomimétisme est une approche globale visant l'**inspiration des solutions et stratégies naturelles** comme une référence pour notre évolution en tant que société soutenable (ou répondant de façon systémique aux enjeux du développement durable). Cette évolution ne vise pas un développement économique absolue avec une production et une consommation massive de biens et services. Cette approche requiert une **coopération interdisciplinaire** entre différents domaines tels que la technologie, la biologie, la chimie, le design, l'architecture, l'ingénierie, etc.), selon la nature du projet, avec le but de proposer **des alternatives novatrices pour des problèmes humains**.

Cette section a fourni tous les éléments nécessaires pour la proposition exploratoire d'une approche méthodologique en biomimétisme visant l'intégration systémique des principes naturels au processus de développement de produits.

6.1.2 Proposition exploratoire d'une approche méthodologique en biomimétisme

Approches pour la conception bio-inspirée

Selon Fayemi (2016), il existe deux approches principales pour la conception bio-inspirée :

- a) L'approche *solution-based*, aussi identifiée dans la littérature par *biology to design* (Baumeister, 2014) ou *bottom-up process* (Speck *et al.*, 2008), entre autres : la conception technologie est réalisée à partir

de la connaissance relative à un système, un mécanisme ou une fonction biologique d'intérêt. L'approche *solution-based* est une démarche de transfert de technologie une fois que le fonctionnement des systèmes biologiques est analysé en vue d'utiliser ces connaissances dans le domaine technologique.

- b) L'approche *problem-driven*, aussi identifiée dans la littérature par *top-down process* (Speck *et al.*, 2008) : vise à résoudre un problème d'ordre pratique, rencontré dans le domaine technologique à partir de l'identification d'un système biologique compatible. Les systèmes biologiques réalisant une certaine fonction ou un mécanisme sont analysés en vue de réaliser le transfert des principes biologiques à travers l'abstraction.

Badarnah et Kadri (2015) dans l'article intitulé *A methodology for the generation of biomimetic design concepts* ont analysé cinq différents groupes de recherche actifs en biomimétisme qui ont présenté des stratégies pour la conception de solutions inspirées de la nature. Sur la base de cette analyse, les auteurs ont généré quatre tableaux qui présentent un aperçu intéressant sur le type d'approche pour la conception bio-inspirée utilisée, ainsi que ses principales étapes. Tout d'abord, le Tableau 4 indique le type d'approche pour la conception bio-inspirée utilisée par les cinq groupes de recherche analysés, soit *problem-based* ou *solution based*. Tous les cinq groupes utilisent l'approche *problem-based*, mais seulement les groupes G1, G4 et G5 considèrent également la perspective de l'approche *solution based*. Ce constat indiquerait que la demande pour une méthodologie basée sur l'approche *problem-based* serait plus importante que pour une méthodologie basée sur l'approche *solution based*. Dans ce contexte, les connaissances et principes biologiques seraient utilisés en vue de résoudre un problème dans le domaine technologique.

Tableau 4 : Groupes sélectionnés appliquant une stratégie biomimétique

Groups	Strategies by	Problem-based	Solution-based
G1	<i>Biomimicry 3.8</i> (AskNature 2008; Benyus 2002; Biomimicry 3.8 2010)	•	•
G2	<i>BioTriz</i> (Bogatyreva, Pahl, and Vincent 2002; Bogatyreva et al. 2003; Craig et al. 2008; Lerner 1991; TRIZ 2011; Vincent 2009; Vincent et al. 2006)	•	
G3	<i>Biomimetics for Innovation and Design Laboratory</i> led by L.H. Shu (Chiu and Shu 2007; Mak and Shu 2004; Shu 2010, 2011; Vakili and Shu 2001)	•	
G4	<i>Design & Intelligence Laboratory</i> led by Goel (DANE 2011; Goel 2011; Goel, Rugaber, and Vattam 2009; Helms, Vattam, and Goel 2009; Vattam et al. 2010)	•	•
G5	<i>Plants Biomechanics Group</i> led by Thomas Speck (Masselter et al. 2010; Milwich et al. 2006; PBG 2011)	•	•

Source : Badarnah et Kadri (2015, p. 121)

Ensuite, le Tableau 5 présente les principales étapes de l'approche *problem-based*. Les auteurs ont catégorisé le processus en trois phases générales (i) définition du problème, (ii) exploration et investigation et (iii) développement de la solution. Puis, le Tableau 6 présente les principales étapes de l'approche *solution based*, catégorisées par les domaines biologiques et technologiques, et la phase de transfert entre les domaines.

Tableau 5 : Problem-based (challenge to biology).

	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5
Problem definition	Identify function Define context Integrate Life's principles into brief design	Define problem Analyse & understand problem	Problem definition	Problem definition Reframe problem	Formulate the technical problem
Exploration & Investigation	Discover natural models Abstract biological strategies into design principles	Find functional analogy in biology Compare solution from biology and from TRIZ	Search for biological analogies Assessing biological analogies	Biological solution search Define the biological solution Principle extraction	Seek for analogies in biology Identify corresponding principles Abstract from the biological model
Solution development	Brainstorm bio-inspired ideas Emulate design principles Measure using Life's principles	List principles from both biological and technical domains Develop idea	Applying biological analogies	Principle application	Implement technology through prototyping and testing

Source : Badarnah et Kadri (2015, p. 122)

Tableau 6 : Solution-based (biology to design)

	Group1	Group4	Group5
Biological domain	Discover natural models	Biological solution identification Define the biological solution Principle extraction	Identify a biological system Analyse biomechanics, functional morphology, and anatomy Understand the principles
Transfer phase	Abstract biological strategies into design principles Identify function and define context Brainstorm bio-inspired ideas	Reframe the solution	Abstract from the biological model
Technological domain	Integrate Life's principles Emulate design principles Measure using Life's principles	Problem search Problem definition Principle application	Implement technology through prototyping and testing

Source : Badarnah et Kadri (2015, p. 122)

Finalement, le Tableau 7 présente un processus biomimétique général et les stratégies appliquées par les différents groupes utilisant l'approche *problem-based*. Ce processus a été organisé en quatre domaines généraux (i) domaine du problème; (ii) domaine naturel et (iii) domaine de la solution; cinq phases générales (i) défi; (ii) fonction; (iii) analogie; (iv) abstraction et (v) émulation, ainsi que huit sous-phases (i) définition; (ii) abstraction; (iii) exploitation et investigation; (iv) classification; (v) identification de principes; (vi) conception; (vii) émulation de principes naturels et (viii) évaluation.

Tableau 7 : La présentation générale d'un processus biomimétique et les stratégies appliquées par les différents groupes utilisant l'approche *problem-based*

General domains	General phases	Sub-phases
Problem domain	Challenge	Definition Define problem: G2, G3, G4, G4 Identify Function and Define Context: G1
		Abstraction Identify verbs: G3 Biologize function: G1 Conflicts: G2
Nature domain	Function	Exploration & Investigation Search biological key-word set: G3 AskNature (online platform) and Biological Lenses: G1 Database: G2 Dane: G4 BTF: Gamage & Hyde (2012)
	Analogy	Classification Categories of similarities: Gruber (2011) SBF schema : G4 Taxonomy: G1 Scientific classification (e.g. behavioural patterns within an ecosystem): Gamage & Hyde (2012)
	Abstraction	Principle identification Principle extraction: G1, G2, Gamage & Hyde (2012) Graphical analysis: Mazzoleni (2013)
Solution domain	Emulation	Design concept Brainstorm: G1, G4 Model structural principles: G5
		Emulate principles G1, G3 Evaluation Life's principles: G1 Prototype test: G5

Source : Badarnah et Kadri (2015, p. 123)

Comme observé dans l'analyse de Badarnah et Kadri (2015), les approches *solution-based* et *problem-driven* définissent la perspective du projet et offrent des étapes générales guidant les concepteurs (designers,

ingénieurs, architectes, etc.) dans la démarche du biomimétisme. Dans cette perspective, le Tableau 8 de Fayemi, Maranzana, Aoussat, et Bersano (2013) présente les principaux outils et méthodes pouvant alimenter la démarche du biomimétisme.

Tableau 8 : État de l'art méthodologique

Les bases de données	Plus considérées comme des outils que des méthodes, les bases de données constituent une agrégation d'informations liées à des modèles biologiques. L'utilisateur est alors libre de chercher son modèle biologique d'inspiration en procédant par recherche par mots clés.	Ask Nature, Bionics System Database, Bio-mimicry Database, BioPS, BioMAPS, Data_Bionik
Les méthodes sémantiques	Ce sont les méthodes qui reposent sur des outils sémantiques ne générant pas de bases de données. L'interdisciplinarité inhérente à la biomimétique entraîne la coopération inévitable d'experts issus de champs disciplinaires distincts (biologistes, chimistes, médecins ou encore ingénieurs). En permettant une traduction des termes du domaine technologique au domaine biologique et inversement, ces outils visent à lever certains problèmes sémantiques liés à cette forte transdisciplinarité de la biomimétique.	(Modélisation cognitive [Helms, 2009; Vattam, 2007], Méthodes de templates [Shu, 2011])
Outils de promotion	Ce sont les outils qui mettent en avant l'aspect philosophique du biomimétisme. En permettant une vulgarisation de la démarche, ils constituent de bons vecteurs pour un essor médiatique de la bioinspiration.	<i>Design Spiral Methodology</i> [Baumeister, 2012]
Outils de créativité biomimétique	Ce sont des méthodes visant à stimuler la créativité par le biais d'outils basés sur la biologie.	Idéation par analogies biologiques [Wilson, 2011], Créativité biomimétique [Bila-Deroussy, 2012]
Méthodologies TRIZ	Ce sont des méthodologies biomimétiques s'appuyant sur la théorie de résolution des problèmes inventifs. Le pouvoir d'abstraction de TRIZ permet une facilitation des étapes 2 et 4 du processus biomimétique : interpréter et traduire le challenge en termes de challenge biologique et rendre abstraites les stratégies biologiques via une analyse.	[BioTRIZ [Bogatyrev, 2012], IDEA-INSPIRE [Chakrabarti, 2005], Connect Engineering Design Problems to Biological Solutions [Weaver, 2012], FAST [Chen, 2012]
Méthodologie de modélisation	Méthodologie basée sur la théorie CK qui vise à modéliser la démarche de conception biomimétique. Cette méthodologie permet donc une meilleure compréhension de l'apport de chaque discipline à chacune des étapes du processus de conception, avec à terme de possibles recommandations en vue d'optimiser la démarche de conception bio-inspirée.	[Freitas-Salgueiredo, 2013] :

Source : L'auteur selon Fayemi *et al.* (2013)

Les approches *solution-based* et *problem-driven* constituent la base théorique pour le développement des démarches de biomimétisme. Certaines de ces démarches seront présentées dans la section suivante.

Quelques démarches existantes

Cette section présente quelques exemples de démarches de biomimétisme proposées par le *biomimicry institute*⁷⁰, ISO/TC266 (2015), Badarnah et Kadri (2015) et le cabinet de conseil américain *Biomimicry 3.8*.

Premièrement, le *biomimicry institute*, un incontournable dans le domaine, propose le *biomimicry design spiral* basé sur des étapes itératives comme un outil visuel qui guide les concepteurs dans l'intégration du biomimétisme dans le processus de développement de produits (Fig. 24). Malgré cette tentative d'organiser le processus biomimétique et de le définir en plusieurs étapes, celles-ci demeurent trop générales. Cette démarche pourrait être efficace en tant qu'outil d'inspiration et de créativité. Cependant, elle est limitée, si l'intention est le développement de produits basé sur des systèmes naturels. En fait, ce processus ne présente pas des outils spécifiques et détaillés qui pourraient faciliter le transfert des stratégies naturelles aux solutions de design. Le manque d'outils d'analyse sociale et environnementale du cycle de vie limite l'évaluation de la durabilité des solutions également.

Ce guide décrit le processus pour la conception de solutions biomimétiques face à un problème de conception, tel que décrit ci-dessous :

- a) Définir : la première étape du processus de conception proposé par le *biomimicry institute* consiste à définir le contexte du problème de design ou l'opportunité de projet qui sera privilégiée ainsi que les fonctions essentielles auxquelles la solution de design doit répondre. C'est une étape d'exploration, de questionnement, de définition des contraintes, critères et objectifs du projet. L'enjeu principal est de comprendre le contexte dans lequel le projet sera mené, pour qui et dans quel contexte, plutôt que de décider prématurément de la nature du produit qui sera développé.
- b) *Biologiser* : à la suite de la définition du défi de design, cette deuxième étape vise à recadrer les enjeux identifiés à la précédente étape dans un contexte biologique. Le but principal est d'aboutir à une ou plusieurs questions issues de la formulation suivante : « Comment la nature... ? ». Par exemple, pour résoudre la problématique de design suivante : « comment rendre les cyclistes urbains plus visibles pour les conducteurs de voiture la nuit », la question pourrait être « comment la nature améliore-t-elle la visibilité dans des conditions de faible luminosité ? »

⁷⁰ <https://biomimicry.org/>

- c) *Découvrir* : cette troisième étape est axée sur la recherche et la collecte d'informations sur les modèles naturels (organismes et écosystèmes) q. À cet effet, les modèles naturels doivent traiter des mêmes fonctions et du même contexte que la solution de design proposé.
- d) *Abstraire* : cette étape vise la compréhension du fonctionnement des stratégies biologiques et le transfert de ces concepts à travers l'abstraction et la métaphore. Il s'agit d'une étape exploratoire où les stratégies naturelles seront analysées dans le but de trouver des concepts préliminaires qui seront utilisés dans la conception d'un produit.
- e) *Émuler* : cette avant-dernière étape vise l'utilisation des compétences professionnelles des concepteurs afin de créer des solutions basées sur l'émulation des stratégies naturelles découvertes et abstraites. L'émulation vise à simuler le fonctionnement de ces stratégies dans un contexte technologique, par exemple. Le biomimétisme se présente dans ce contexte comme une approche complémentaire, un levier à l'innovation durable.
- f) *Évaluer* : Finalement, les solutions proposées seront évaluées compte tenu de différents principes de la vie comme évoluer pour survivre, s'adapter aux changements de conditions, être localement conscient et sensible, intégrer le développement avec la croissance, être efficace en ressources matériaux et énergétiques, utilisation d'une chimie qui soutient le processus de la vie.

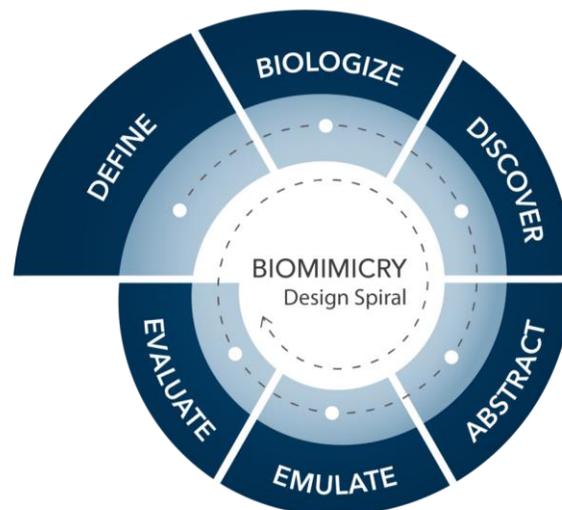


Figure 24 : Biomimicry design spiral
Source : Biomimicry Institute⁷¹

⁷¹ <https://toolbox.biomimicry.org/methods/biomimicry-design-processes/>

Le *biomimicry institute* propose également l'intégration des concepts et outils du biomimétisme dans la méthode de design thinking. La nature est considérée dans ce contexte comme une partie prenante dans le processus de développement d'un produit qui devrait être considérée avec empathie. À cet égard, le biomimétisme serait intégré aux étapes (ii) définition (iii) idéation et (v) test (Fig. 25). Tout d'abord, le contexte du problème serait utilisé pour formuler des questions pour la recherche biologique au cours de l'étape de « définition », afin de comprendre comment la nature résout les problèmes similaires dans le monde biologique. Ensuite, l'intégration du biomimétisme dans l'étape d'« idéation » comprendrait la recherche d'inspiration dans la biologie à travers les stratégies, matériaux et modèles naturels. Finalement, l'étape de « test » consisterait à évaluer la solution finale compte tenu des principes naturels afin de valider si elle est respectueuse de la vie.

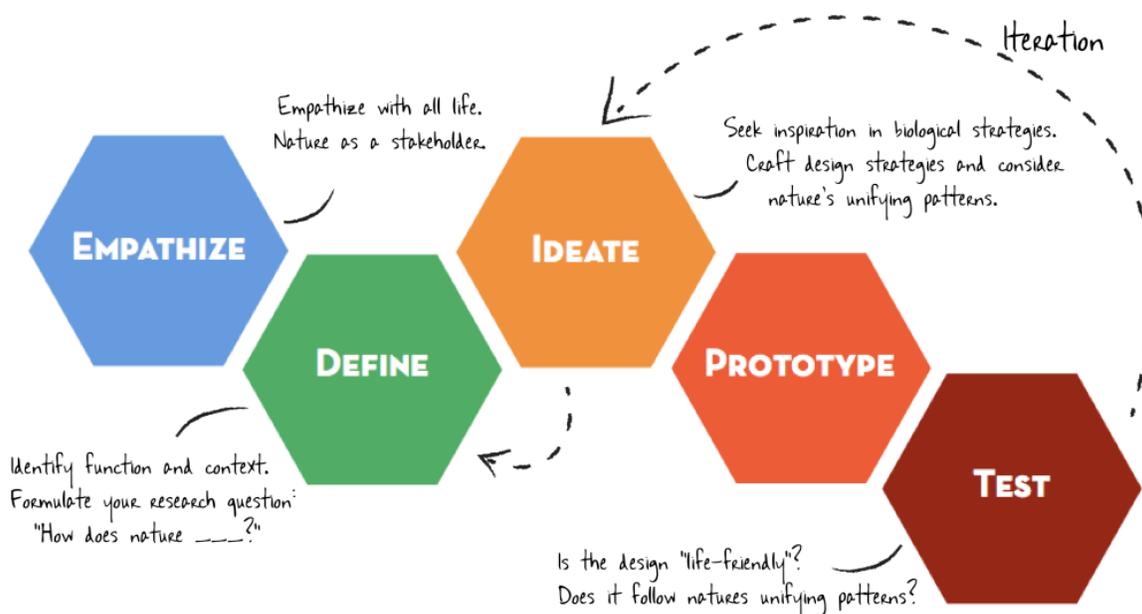


Figure 25 : Intégration du biomimétisme avec le design thinking

Source : Biomimicry Institute

Deuxièmement, la norme ISO/TC266 (2015b) propose un modèle de processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique (Fig. 26), à partir de la réflexion issue des travaux de Speck et Speck (2008) et de Müller *et al.* (2013) (Fayemi, 2016). Ce modèle linéaire composé de 7 étapes séquentielles basées sur l'approche *problem-driven* représente de façon claire le transfert entre les connaissances issues de la biologie vers la technologie. Fayemi (2016) souligne que « la structure simpliste du modèle représente un cas d'application idéale, intégrée à la chaîne de valeur, dont l'implémentation concrète engendrera généralement une complexification par la récursivité et la mise en parallèle des étapes présentées » (p.129).

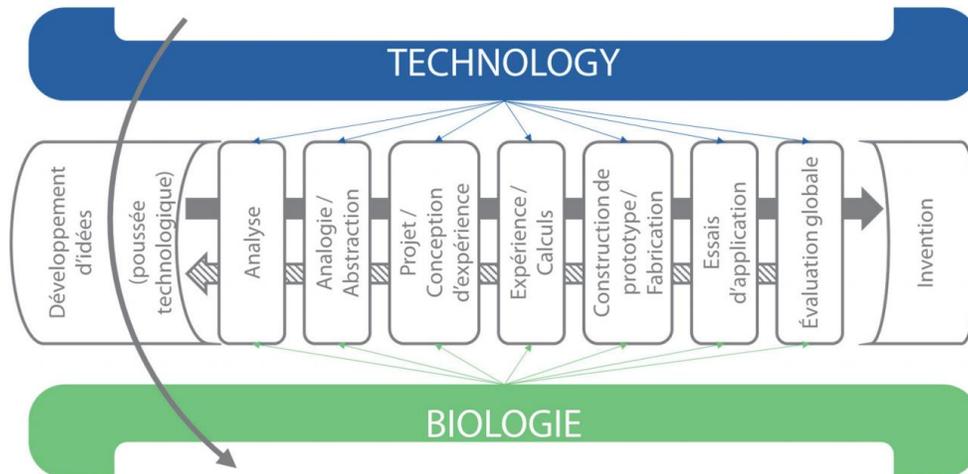


Figure 26 : Le processus type de développement biomimétique pour un attrait technologique [ISO/TC266, 2015b]
 Source : Fayemi (2016)

Troisièmement, Badarnah et Kadri (2015) proposent la méthodologie BioGen (Fig. 27) composée de dix étapes (i) identifier les défis requis, (ii) explorer les organismes et les systèmes naturels, (iii) extraire ceux qui remplissent les fonctions requises, (iv) élaborer et (v) analyser les stratégies et principes naturels, (vi) classer et résumer ces stratégies et principes, (vii) abstraire un certain nombre de stratégies choisies et (viii) rechercher la convergence pour générer un concept préliminaire, (ix) transformer et émuler les stratégies naturelles, (x) évaluer et valider la solution et trois phases distinctes (i) phase d'investigation biophysique générale (modèle d'exploration), (ii) phase d'investigation des organismes ou systèmes naturels (l'analyse du « *pinnacle* »), et (iii) phase d'abstraction (matrice d'analyse du « *pinnacle* » et de la matrice de démarche de conception). Badarnah et Kadri (2015) définissent « *pinnacle* » comme un organisme ou système naturel représentatif possédant une stratégie d'adaptation particulière (y compris les animaux, les plantes, les nids et les écosystèmes). La méthodologie BioGen a été développée à partir de l'analyse des stratégies issues de cinq groupes de recherche (i) Biomimicry 3.8, (ii) BioTriz, (iii) Biomimetics for Innovation and Design Laboratory led by L.H. Shu, (iv) Design & Intelligence Laboratory led by Goel et (v) Plants Biomechanics Group led by Thomas Speck, tel que mentionné plus haut dans le texte (voir Tableau 4, p. 101).

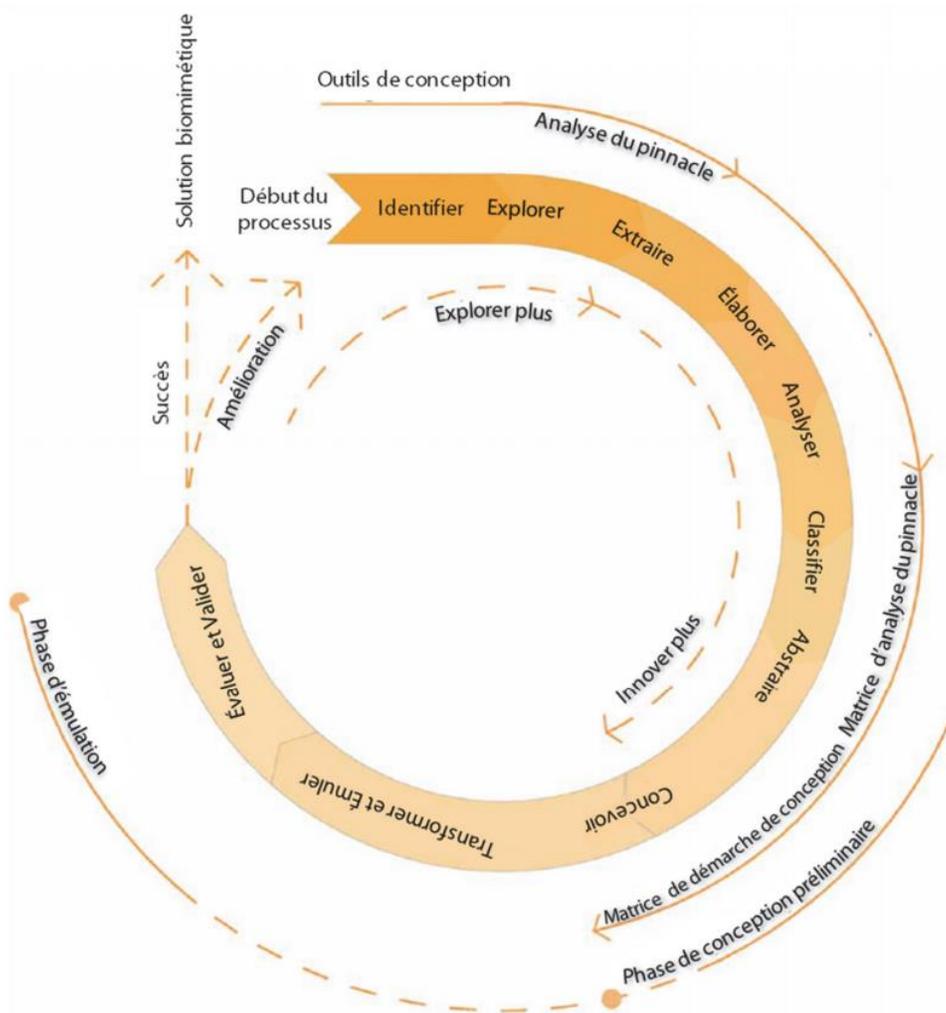


Figure 27 : BioGen

Source : Fayemi (2016) (adapté de Badarnah et Kadri (2015))

Finalement, le Biomimicry 3.8 propose une pensée biomimétique appliquée à la pratique du design de produits (Fig. 28). La méthodologie comprend quatre étapes principales :

- a) Délimitation (cadrage) : L'étape de délimitation comprend la définition du contexte du projet ainsi que la problématique de projet à résoudre. Puis, les fonctions naturelles qui seront utilisées sont identifiées tout en intégrant les principes de la vie. Selon (Benyus, 1997), neuf principes peuvent être identifiés comme des conceptions sous-jacentes de la nature. La nature, soutient-elle, (i) fonctionne au soleil, (ii) utilise uniquement l'énergie dont elle a besoin, (iii) adapte la forme au fonctionnement, (iv) recycle tout, (v) récompense la coopération, (vi) mise sur la diversité, (vii) exige une expertise locale, (viii) freine les excès de l'intérieur et (ix) exploite le pouvoir des limites.

- b) Découverte : La deuxième étape vise à explorer les modèles naturels et à identifier les stratégies biologiques, c'est-à-dire les modèles naturels qui seront transposés aux solutions de design à travers un processus analogique ;
- c) Création : L'étape de création consiste à explorer plusieurs possibilités d'idées bio-inspirées s'inspirant des principes et stratégies naturelles ;
- d) Évaluation : La dernière étape vise à évaluer les solutions compte tenu des principes de la vie (déjà cités plus haut dans le texte).

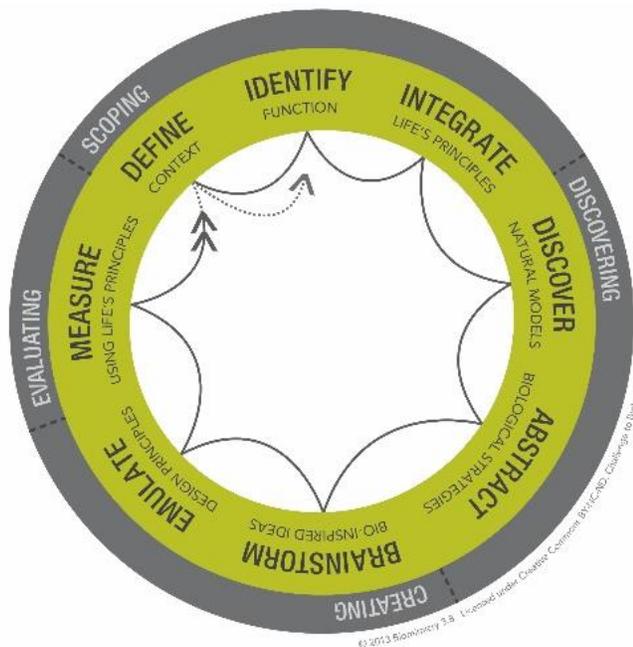


Figure 28 : La pensée biomimétique
 Source : Biomimicry 3.8 (2013)

Ce processus biomimétique, proposé par l'Institut Biomimicry 3.8, est similaire au processus classique de design de produits, comme le montre la Figure 29 ci-dessous. La grande différence se situe dans la précision méthodologique concernant les étapes. Dans un processus de développement de produits classique, il existe plusieurs outils et techniques spécifiques à chacune des étapes. Dans le cas du processus biomimétique proposé, les outils et techniques ne sont pas identifiés, ce qui apporterait beaucoup plus de précision aux étapes.

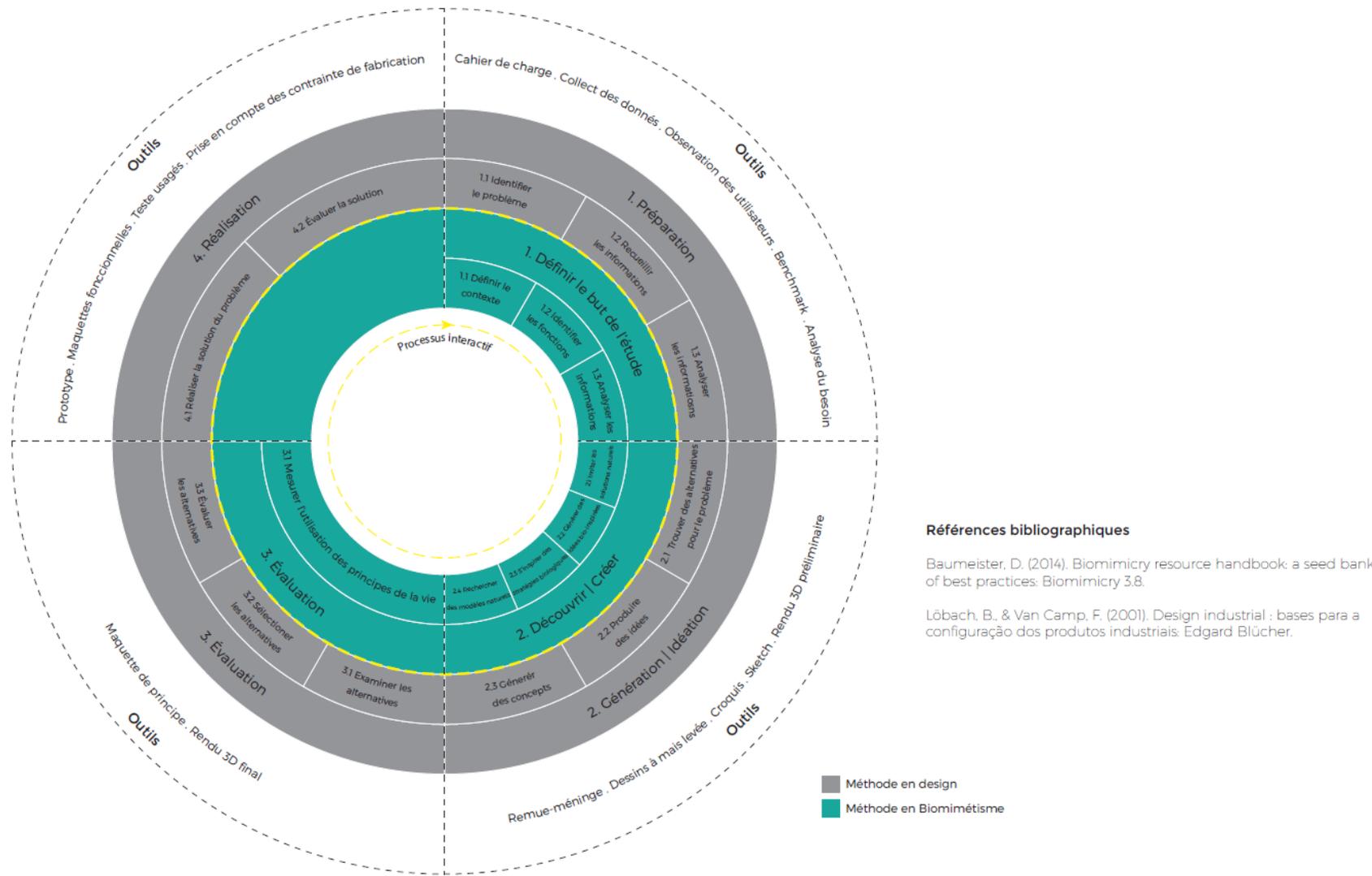


Figure 29 : Comparaison entre la méthode en design de produit et biomimétisme

Source : L'auteur selon Baumeister (2014) et Lobach (2001)

Les démarches présentées dans cette section proposent des étapes visant la résolution de problèmes à travers l'utilisation des principes et stratégies naturelles. Bien que ces démarches présentent des étapes bien définies et structurés au niveau du biomimétisme, il en résulte quelques questionnements quand cette démarche est intégrée à la méthode de design de produit : comment **évaluer les solutions finales à travers les principes de la vie** ? Quels outils seraient utilisés pour **maintenir la durabilité des solutions tout au long du processus de développement de produits** ? Comment mettre en œuvre une telle démarche dans le contexte industriel ? Comment faciliter la réplique de cette méthodologie en vue de diminuer le délai du projet ? Ces questionnements limitent la mise en œuvre du biomimétisme, principalement dans un contexte industriel, car le manque de clarté sur l'intégration du biomimétisme avec le design de produits peut générer de longs délais, ce qui pourrait augmenter les coûts de projet. C'est dans ce contexte qu'une nouvelle approche méthodologique exploratoire en biomimétisme est proposée.

Proposition exploratoire d'une approche méthodologique en biomimétisme

Pour mieux contextualiser la méthode proposée, voici une synthèse basée sur une analyse de la littérature qui présente les principales limites et barrières à l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits :

- 1) Pour dépasser l'utilisation formelle du biomimétisme par le designer de produits, les principes naturels pourraient être intégrés dans toutes les étapes du processus de développement d'un produit, et ce, de façon dynamique et systémique, c'est-à-dire que le biomimétisme fonctionnerait de façon intégrée au processus de développement de produits et non comme une approche secondaire fonctionnant en parallèle et menant souvent à un double processus de développement. Cette relation de rétroaction entre les deux approches pourrait être un levier pour maintenir les principes naturels dans toutes les étapes du projet ;
- 2) Comme dans d'autres approches d'écoinnovation, telles que l'écoconception et le *cradle to cradle*, le biomimétisme couvre principalement la sphère dite « environnementale » du développement durable. En réalité, « la nature a souvent peu d'égards pour certaines considérations parfois importantes dans les décisions humaines » (Terrier *et al.*, 2017, p. 13) telles que (i) les systèmes humains (économie, politique, culture, production industrielle, etc.) et (ii) les caractéristiques humaines (individualisme, avidité, etc.) ;

3) Comme mentionné à plusieurs reprises dans ce mémoire, les designers de produits utilisent généralement le biomimétisme de façon formelle. Une possible explication serait le fait que les designers sont habitués à utiliser la vue « réductrice » du biomimétisme. Selon Volstad et Boks (2012), il existe deux façons de mettre en œuvre le biomimétisme dans le processus de développement de produits (Fig. 30). La première, considérée comme une vue « réductrice » où le biomimétisme est utilisé de façon superficielle, consiste à réaliser le transfert des technologies biologiques (p. ex. : matériaux biologiques, procédés naturels, etc.) vers l'ingénierie, l'architecture et/ou le design de produits. La deuxième, considérée comme une vue « holistique » (ou biomimétisme profond ; Benyus (1997)) où le biomimétisme est mis en œuvre de façon plus profonde, vise à utiliser la nature comme mesure, dans un sens systémique plus large, permettant le développement de produits et technologies durables, c'est-à-dire que ces produits et technologies feront partie d'un système industriel à l'image de la nature qui ne nuit pas à l'environnement. Il s'agit d'une des voies les plus prometteuses du biomimétisme pour une société plus soutenable (Benyus, 1997; Bogatyrev et Bogatyreva, 2014; Fayemi, 2016). Le principal problème de la vue « réductrice » du biomimétisme, c'est qu'il est utilisé comme une base de données de façon superficielle et simplifiée à travers les solutions de conception naturelles. Ainsi, l'évolution du biomimétisme demanderait une redirection vers sa vue plus « holistique », telle que présentée par Benyus (1997), tout en utilisant les systèmes biologiques et la nature comme modèle pour bâtir un avenir durable. Cependant, la vue holistique est plus abstraite et donc plus difficile à comprendre et mettre en œuvre ;

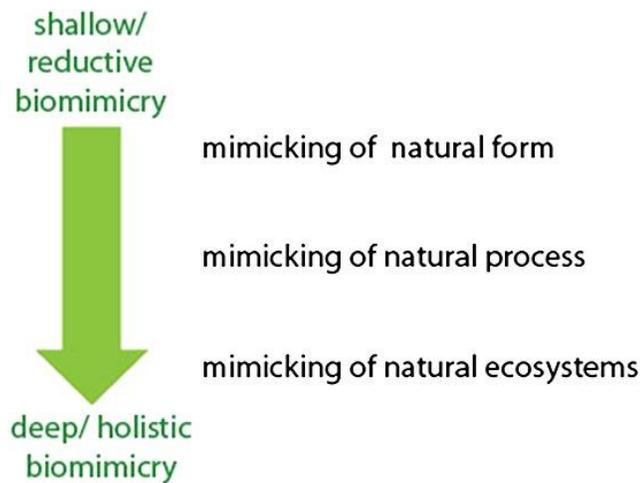


Figure 30 : Les vues réductrice et holistique du biomimétisme
 Source : Volstad et Boks (2008)

- 4) L'intérêt pour la nature et pour la biologie par les designers de produits deviendrait un enjeu majeur pour que le biomimétisme soit largement utilisé dans le processus de développement de produits. L'intégration des principes naturels à la pensée design ainsi que l'assimilation philosophique du biomimétisme, telle que présentée dans la définition plus haut, pourraient constituer un levier capable de faciliter l'utilisation de cette approche au-delà de l'inspiration formelle. Dans cette perspective, l'approche BioTRIZ (présentée au chapitre 4) se présente comme un outil complémentaire facilitant la compréhension de stratégies et systèmes naturels, car elle met à la disposition des designers de produits une base de données incluant 500 phénomènes biologiques et 270 fonctions naturelles.

À l'image des résultats de cette recherche, alimentés par la réflexion autour des limites et barrières principaux enjeux entourant l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits présenté ci-dessus, la méthode conceptuelle Bio-ADN est proposée. C'est une « méthode conceptuelle » car il s'agit d'une première contribution qui demeure très exploratoire et qui mériterait d'être davantage développée sur la base de recherches futures. Par exemple, des ateliers de conception avec des étudiants en design, en biologie et en ingénierie pourraient être envisagés afin de tester, affiner et développer la méthode proposée.

Bio-ADN vise l'intégration du biomimétisme dans le processus de développement de produits et est inspirée de la molécule d'acide désoxyribonucléique, plus connue sous l'acronyme ADN. Selon Génome Québec⁷², l'ADN est « une molécule présente chez tous les êtres vivants et qui porte l'information génétique nécessaire au développement et au fonctionnement de l'organisme ». Elle a la fonction de contrôler toutes les activités de l'organisme et la capacité de se dupliquer, tout en conservant l'information génétique qui perdure dans le temps, et de génération en génération, transmise par un parent à son enfant (transmission transgénérationnelle) (Lambert, 2014). En utilisant le raisonnement analogique avec la molécule d'ADN, la méthode conceptuelle Bio-ADN vise l'intégration des principes naturels dès les premières étapes du processus tout en les transmettant aux prochaines étapes de façon à ce que la durabilité perdure durant le processus de développement de produits.

⁷² <http://www.genomequebec-education-formations.com/education-concepts-adn>

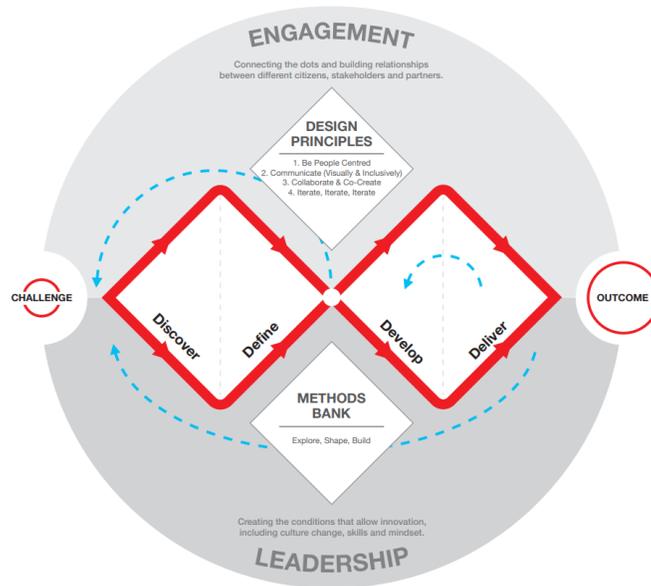


Figure 31 : Le double diamant
Source : Volstad et Boks (2008)

Cette méthode basée sur l'approche *problem-driven* est composée de quatre étapes principales inspirées de la méthodologie de conception « Le Double Diamant » conçue par le *Design Council* (Fig. 31), une organisation de bienfaisance indépendante et conseillère du gouvernement du Royaume-Uni en matière de design⁷³, et la méthodologie du biomimétisme le *Biomimicry Institute* (voir section 2.2.2), comme décrit ci-dessous :

1) Découvrir

Perspective du design : la première étape consiste à construire/identifier la problématique qui représente le fil conducteur du projet à travers une démarche transdisciplinaire. Cette étape implique (i) la compréhension du problème de conception (ii) la définition du contexte du projet (iii) la collecte et l'analyse d'informations nécessaires au développement du projet et (iv) la définition d'un plan d'action intégrant les approches et connaissances complémentaires qui pourront être intégrées à l'approche du biomimétisme ou du design de produits. L'étape de découverte implique également l'observation du problème, idéalement sur le terrain, en vue de comprendre la complexité de la problématique et d'échanger avec les personnes concernées (empathie).

⁷³ <https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/what-framework-innovation-design-councils-evolved-double-diamond>

Outils de design : Cahier de charge, collecte de données, observation des utilisateurs (recherche sur le terrain), *benchmark*, remue-méninges, analyse du besoin, etc.

Perspective du biomimétisme : l'étape « découvrir » concerne la recherche et la collecte d'informations sur les modèles naturels (organismes et écosystèmes) ainsi que l'identification des fonctions, stratégies, procédés, matériaux et principes naturels qui pourraient être transposés aux alternatives de design à travers le raisonnement analogique. Dans le but de baliser les résultats de la démarche, cette recherche et collecte d'informations autour de la nature devrait se concentrer sur les mêmes fonctions et le même contexte définis par le problème de projet. Dans cette perspective, l'approche Bio-TRIZ (voir chapitre 4) pourrait être utilisée en vue de fournir aux designers une riche base de données comprenant, comme cité précédemment, une analyse de 500 phénomènes biologiques et 270 fonctions offertes par la nature. D'autres démarches pourraient être aussi réalisées à cette étape, telles que (i) l'observation dans la nature (animaux, plantes, etc.) ; (ii) la recension des écrits autour des études portant sur l'analyse de fonctions naturelles spécifiques et (iii) l'inspiration des projets biomimétiques déjà réalisés comme référence.

Outils biomimétiques (existants) : **Bio-TRIZ**, *remue-méninges* (utilisé aussi en design de produits), Les bases de données (Ask Nature, Bionics System Database, Bio-mimicry Data-base, BioPS, BioMAPS, Data_Bionik), Taxonomie du biomimétisme (voir en annexe), notamment disponibles.

2) Définir (génération/idéation)

Perspective du design : Les données qualitatives récoltées lors de l'étape précédente serviront de base pour la définition des défis de projet. L'étape « définir » consiste à délimiter la stratégie comprenant les approches qui seront utilisées pour la résolution du problème de design ainsi que les contraintes, critères et objectifs du projet. C'est à cette étape que sont générées les premières idées d'alternatives pour le problème de projet.

Outils de design : remue-méninges, dessin à main levée, croquis, sketch, rendu 3D préliminaire, etc.

Perspective du biomimétisme : à la suite de la définition du défi de projet, cette deuxième étape vise à recadrer les enjeux identifiés dans la problématique dans un contexte biologique. C'est à cette étape que le raisonnement analogique prend place à travers la compréhension du fonctionnement des stratégies biologiques et le transfert de ces concepts aux solutions de design. En effet, les concepts préliminaires sont exploités en vue de valider les stratégies naturelles analysées. L'objectif principal de cette étape est de répondre à la question, telle que proposée par le *Biomimicry institute* : « Comment la nature... ? » résout-elle les problèmes similaires dans le monde biologique ?

Outils biomimétiques : Les méthodes sémantiques et les outils de créativité biomimétique (voir Tableau 8, p. 104), ainsi que les mêmes outils utilisés en design de produits (remue-méninges, dessin à main levée, croquis, sketch, rendu 3D préliminaire, etc.), entre autres.

3) Développer (implémentation)

Perspective du design : l'étape « développer » vise la proposition de différentes réponses à la problématique du projet. C'est une étape d'évaluation, de sélection et d'examen des alternatives retenues dans l'étape précédente. Dans ce contexte, le prototypage est un outil, car il permet de matérialiser les idées retenues (à petite échelle ou en taille réelle) et d'exploiter des solutions diverses tout en permettant les modifications sur le modèle avant sa production industrielle. Des tests avec des usagers pourraient être aussi utilisés afin d'affiner davantage l'alternative ou les alternatives retenues, d'identifier de nouveaux problèmes capables de remettre en question les solutions, de tester des dispositifs spécifiques sur le produit, etc.

Outils de design : Maquettes de principe, tests d'usage préliminaire, rendu 3D final, etc.

Perspective du biomimétisme : cette avant-dernière étape vise l'émulation des stratégies naturelles découvertes et abstraites. Cette émulation consiste à simuler et à transposer les stratégies et connaissances naturelles étudiées à la résolution du problème de design. L'abstraction est une partie fondamentale de cette étape, car elle facilite l'analyse et le transfert des stratégies naturelles qui seront utilisés dans le contexte technique.

Outils biomimétiques : les mêmes outils utilisés en design de produits (Maquettes de principe, tests d'usage préliminaire, rendu 3D final, etc.), entre autres. D'autres outils biomimétiques pourraient être développés.

4) Réaliser et évaluer (livraison)

Perspective du design : La dernière étape concerne le développement industriel de la solution retenue. Pendant le processus industriel sont réalisées les dernières évaluations sur le modèle afin de corriger des problèmes techniques, si nécessaire.

Outils de design : Prototypage, impression 3D, maquettes fonctionnelles, tests usagers, prise en compte des contraintes de fabrication, etc.

Perspective du biomimétisme : Cette étape comprend l'évaluation des solutions de design compte tenu des principes naturels (l'interdépendance, le cycle fermé, l'efficacité énergétique, etc.). C'est extrêmement important d'évaluer la solution retenue après chaque étape du processus industriel afin de s'assurer que les principes

naturels soient maintenus tout au long du processus. Si nécessaire, les solutions peuvent être raffinées et renvoyées aux étapes précédentes afin de produire une solution viable autant au niveau technique que commercial.

Outils biomimétiques : les mêmes outils utilisés en design de produits (prototypage, impression 3D, maquettes fonctionnelles, tests usagers, prise en compte des contraintes de fabrication, etc.). D'autres outils biomimétiques pourraient être développés.

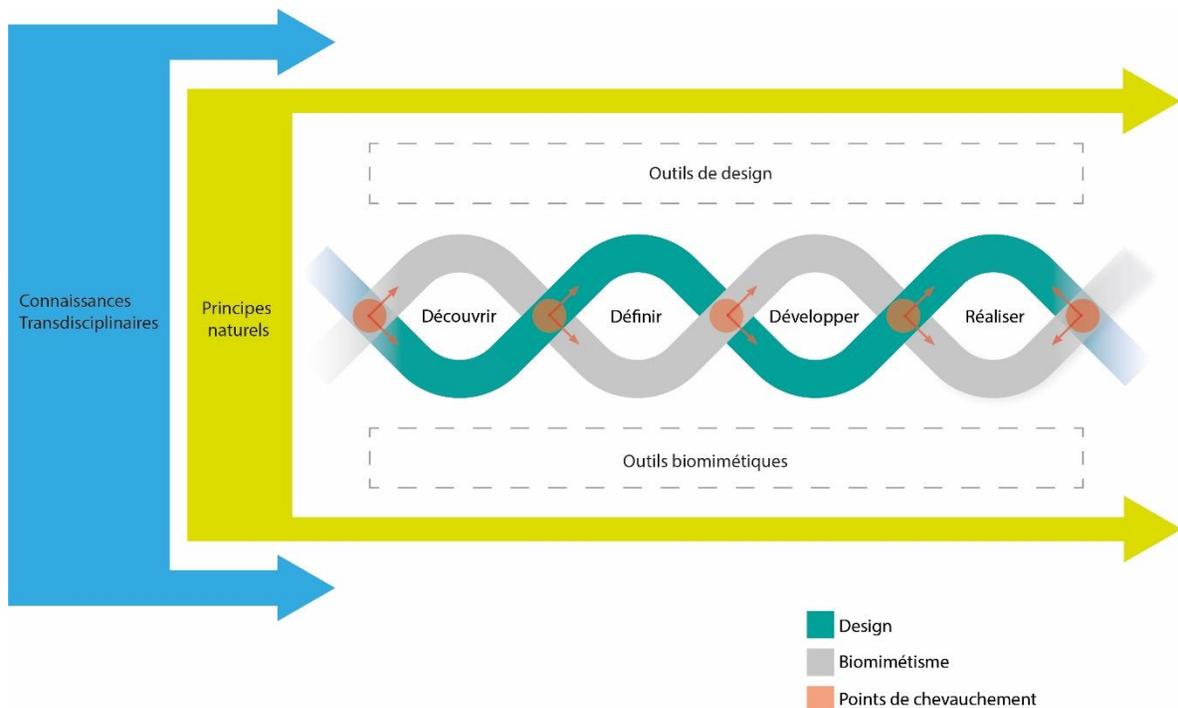


Figure 32 : Méthode conceptuelle Bio-ADN

La Figure 32 illustre la méthode conceptuelle Bio-ADN. En premier lieu, les principes naturels alimentent le processus de développement de produits en amont et sont maintenus tout au long du projet. En deuxième lieu, le processus de développement de produits est représenté par la spirale grise, tandis que le processus de conception en biomimétisme est représenté par la couleur verte. Les deux processus interagissent entre eux à travers les points de rétroaction avant et après chacune des étapes. Cette rétroaction permet l'échange des connaissances issues du design de produits et du biomimétisme et l'emprunt des outils et concepts. En troisième lieu, les outils de design et ceux disponibles pour la pratique du biomimétisme complètent la méthode tout en fournissant les moyens nécessaires au développement de cette méthode intégrée. Finalement, les connaissances transdisciplinaires issues d'autres disciplines telles qu'ingénierie, biologie, chimie, etc., peuvent aussi alimenter la méthode, selon la nature du projet. La transdisciplinarité propose une nouvelle compréhension

de la relation entre science et société, au-delà des combinaisons multidisciplinaires de disciplines académiques (Thompson Klein, 2004). Sa contribution à la résolution des problèmes sociétaux complexes est directement proportionnelle à flexibilité, adaptabilité et ouverture de la pratique (Russell et al, 2008). Elles sont basées sur l'articulation entre différentes formes de connaissances en vue de créer des solutions innovantes (McGregor, 2013) et peuvent aussi représenter un levier pour la recherche des solutions durables (Jahn et Keil, 2015). La transdisciplinarité sera présentée de façon plus détaillée dans la prochaine session.

6.1.3 Des pistes de recommandation pour soutenir le développement d'une approche méthodologique en biomimétisme

L'assimilation des principes naturels

À la lumière des résultats présentés dans cette étude, il est possible de déduire que l'un des principaux leviers pour la mise en œuvre du biomimétisme dans une démarche de développement de produits serait l'enseignement des principes et connaissances naturelles aux designers de produits. En réalité, les designers ne sont pas formés à travailler avec les connaissances en biologie ou avec des analyses d'ingénierie concernant la constitution chimique des matériaux et structures naturelles. L'enseignement des principes naturels représente l'une des principales bases pour la pratique du biomimétisme dans l'objectif d'aider à la compréhension de questions technologiques analogues (Amer, 2019). Benyus (1997) présente neuf lois, stratégies et principes naturels, selon lesquels la nature :

1. Fonctionne à l'énergie solaire : la photosynthèse, processus par lequel les plantes vertes, certaines algues et bactéries transforment le dioxyde de carbone, l'eau et la lumière du soleil en oxygène et en sucres riches en énergie, c'est probablement le principal exemple naturel de l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie ;
2. N'utilise que l'énergie dont elle a besoin : la nature utilise uniquement l'énergie et les ressources dont elle a besoin de manière optimale (McGregor, 2013) ;
3. Adapte la forme à la fonction : les formes naturelles sont définies par des contraintes spécifiques et s'adaptent pour fonctionner efficacement. De plus, les créations naturelles sont organiques et dimensionnées sur mesure compte tenu de leur rôle au sein de l'écosystème de manière optimisée plutôt que maximisée (McGregor, 2013) ;

4. Recycle (presque) tout : dans les écosystèmes, les déchets produits par un organisme sont recyclés et servent de ressources à un autre organisme dans un système en boucle fermée ;
5. Récompense la coopération : la symbiose et les interactions durables entre les micro-organismes et des plantes ou des animaux sont bénéfiques, voire indispensables à leur survie ;
6. Parie sur la diversité : la nature dépend de la diversité (plantes, animaux, etc.) et du hasard pour trouver les meilleures solutions (plutôt qu'une approche unique et homogène) (McGregor, 2013) ;
7. Valorise l'expertise locale : le terme zoopharmacognosie (du grec, zoo « animal », pharma « médicament » et gnosie « connaissance ») définit la pratique par laquelle les animaux sauvages (chimpanzés, perroquets, moutons, etc.) sont capables de trouver leurs médicaments dans leur environnement, et les consommer quand ils en ont besoin, dans un but de santé et de bien-être. Par ailleurs, les primates et d'autres animaux sauvages sont capables de distinguer les feuilles nutritives des mauvaises feuilles principalement par leur goût et leur odeur à travers un processus connu comme alimentation intelligente ;
8. Limite les excès de l'intérieur : les êtres vivants produisent de la matière organique compte tenu de ses limites, sans avoir recours à de hautes pressions et sans générer des déchets ;
9. Transforme les limites en opportunités : la nature produit des matériaux avec une grande complexité et fonctionnalité dans des conditions favorables à la vie : à la température ambiante, avec un bas niveau de pression, tout en utilisant l'énergie solaire comme source d'énergie.

Ces principes naturels guident la pratique du biomimétisme et fournissent un univers extrêmement riche de référence favorisant le développement d'alternatives soutenables. Plus que de copier la nature, le biomimétisme requiert la compréhension des principes et connaissances naturelles (Amer, 2019). Une fois ces principes et connaissances assimilés et intégrés à la pensée des designers, les projets de design seront probablement développés en considérant les trois principes basiques rencontrés dans la nature, tels que soulignés par Fred Gelli lors des entrevues :

- a) L'optimisation : ce principe est présenté dans l'approche cradle to cradle avec l'idée que la notion de déchet n'existerait pas dans la nature (Mc Donough et Braungart, 2011). Les principes-naturels sont bien plus optimisés que nos procédés industriels, tout en étant performants avec une utilisation minimale de matériaux et d'énergie.

- b) Le cycle fermé : la nature est régie par des cycles, tels que le cycle de l'eau, des marées, de la lune, du carbone, de l'oxygène de l'azote, entre autres.

- c) L'interdépendance : Tous les éléments dans la nature sont interconnectés et interdépendants. En effet, toutes les actions sur la nature génèrent des conséquences qui, à leur tour, génèrent des causes pour d'autres conséquences à partir d'une chaîne d'action et de réaction.

Ainsi, susciter l'intérêt des designers de produits par la nature s'avérerait fondamental à la mise en œuvre du biomimétisme. Bien qu'extrêmement importants (comme dans l'utilisation des approches telles que le cradle to cradle et l'écoconception), les outils et méthodes utilisés comme un complément créatif dans les premières étapes dans le processus de développement d'un produit limitent la compréhension générale de la nature. Par exemple, le moteur de recherche *asknature.org* qui invite les utilisateurs à répondre à la question « comment la nature... ? » stimule une compréhension simplifiée de la nature dépourvue de toute complexité inhérente aux structures, hiérarchies ou systèmes naturels (Mathews, 2011).

Le travail interdisciplinaire et transdisciplinaire

L'intérêt croissant pour l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité reflète une prise de conscience croissante de la complexité multidimensionnelle des contextes et des objets de recherche très complexes et non réductibles à un seul point de vue disciplinaire (Darbellay, 2015). Ainsi, les problèmes de société (comme la mise en œuvre du développement durable) sont de plus en plus complexes et interdépendants, nécessitant alors une plus grande synergie entre différents acteurs (différentes organisations, intérêts et sphères d'activité) et compétences disciplinaires (économie, société, politique, environnement, santé, urbanisme, etc.) (Polk, 2015; Schmidt, 2008; Thompson Klein, 2004). Ce contexte démontre les limites de la pensée classique pour la résolution de problèmes complexes, car elle priorise l'analyse par le réductionnisme plutôt que comprendre les contextes dans leur complexité (Nicolescu, 1996). La pensée classique « met en opposition les parties et les tout, l'ordre et le chaos, les individus et les environnements, la logique et la créativité » et divise la connaissance en compartiments disciplinaires (Brown, 2015, p. 215). L'intégration disciplinaire n'a pas pour objectif de s'opposer à la spécialisation disciplinaire initiée au XIX^e siècle, mais de compléter les instruments scientifiques existants afin de rendre intelligible cette complexité (Missemer, 2015). De cette façon, l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité représenteraient un levier important pour la résolution commune des problèmes entre la science, la technologie et la société, puisque l'approche disciplinaire n'est généralement pas suffisante dans ce cas (Schmidt, 2008).

L'interdisciplinarité, terme générique inventé par Erich Jantsch au début des années 1970, représente plus qu'une simple juxtaposition de différents points de vue disciplinaires et implique une approche collaborative et intégrative de connaissances disciplinaires d'un objet commun dans la production conjointe de connaissances (Darbellay, 2015). Son objectif fondamental est de retrouver une unité présumée à partir de la pluralité de disciplines et d'une mosaïque d'objets, de connaissances et de méthodes apparus durant l'évolution de la science (Schmidt, 2008). Missemmer (2015) souligne que « l'interdisciplinarité doit donc être comprise comme un croisement de l'ensemble des disciplines scientifiques, et pas uniquement des disciplines connexes comme la sociologie et l'anthropologie par exemple » (p. 5). Ce croisement disciplinaire à partir de la collaboration et de l'intégration des compétences et connaissances peut se produire à différents niveaux comme (i) le transfert ou l'emprunt des concepts ou des méthodes d'un autre domaine scientifique (ii) l'hybridation ou le croisement de mécanismes entre disciplines (iii) la création de nouveaux champs de recherche à partir de la combinaison de deux disciplines ou plus (Darbellay, 2015). Schmidt (2008) présente quatre différentes dimensions de l'interdisciplinarité :

1. Objets interdisciplinaires (dimension « ontologique ») : les nano-objets construits entre la physique, la chimie, la biologie et les sciences de l'ingénierie sont des objets technoscientifiques, les objets en neurosciences construits entre les sciences naturelles, les sciences sociales sont des exemples d'objets interdisciplinaires ;
2. Connaissances, théories et concepts interdisciplinaires (dimension « épistémologique ») : la théorie des systèmes complexes est un exemple important qui illustre les connaissances, théories et concepts interdisciplinaires ;
3. Méthodes et pratiques interdisciplinaires (dimension « méthodologique ») : la bionique ou le biomimétisme pourrait être considéré comme un exemple de méthode interdisciplinaire, car elles sont basées sur l'échange entre deux disciplines : la biologie et les disciplines de conception (ingénierie, architecture, design de produit/industriel, etc.) ;
4. Problèmes et solutions interdisciplinaires (dimension du problème) : la recherche sur la durabilité pourrait servir d'exemple d'interdisciplinarité. À la base, le développement durable a été défini comme un objet interdisciplinaire, systémique et englobant, dans une logique de dépassement des savoirs individuels fondé sur des considérations éthiques autour de la préservation des équilibres naturels et le droit des générations présentes et futures au progrès économique et social (Missemmer, 2015).

Missemer (2015) souligne que « l'interdisciplinarité prend alors un visage transdisciplinaire, c'est-à-dire à la fois transversal (croisement des disciplines), et transcendantal (dépassement des disciplines) » afin de « favoriser l'innovation en élargissant le regard du chercheur, et aboutir sur des résultats que les disciplines prises isolément n'auraient pu obtenir » (p. 7).

La transdisciplinarité — en tant que type spécifique d'interdisciplinarité — fait son apparition à la fin des années 1960 dans les travaux de chercheurs comme Jean Piaget et Edgar Morin, entre autres, pour traduire le besoin d'une transgression des frontières entre les disciplines (Nicolescu, 1996; Schmidt, 2008). Elle est un processus de savoir qui transcende les frontières disciplinaires, ce qui implique une reconfiguration majeure des disciplines et sous-disciplines dans une perspective systémique, globale et intégrée (Darbellay, 2015). Nicolescu (1996) souligne que la transdisciplinarité « concerne ce qui est à la fois entre les disciplines, à travers les différentes disciplines et au-delà de toute discipline » (p. 27) afin de comprendre le monde présent à partir l'unité de la connaissance. Encore selon Nicolescu (1996), en tant qu'approche scientifique, culturelle, spirituelle et sociale, la transdisciplinarité « est complémentaire de l'approche disciplinaire ; elle fait émerger de la confrontation des disciplines de nouvelles données qui les articulent entre elles ; et nous offre une nouvelle vision de la Nature et de la Réalité » (p. 94).

La fusion entre la complexité et de la transdisciplinarité présenterait un grand potentiel pour construire un avenir durable (Cilliers et Nicolescu, 2012; McGregor, 2013) dont le biomimétisme pourrait se présente comme l'un des leviers. Selon McGregor (2013), la résolution de problèmes transdisciplinaires à partir d'une perspective de biomimétisme signifie (i) reconnaître les modèles organiques et les connexions naturelles (ii) comprendre les causes et effets des composants naturels, que ce soit concurrents ou interdépendants, puis (iii) proposer des solutions compatibles avec les principes naturels.

Un contexte philosophique à apprivoiser

Bien que le biomimétisme soit présenté comme un concept révolutionnaire avec un grand potentiel dans le contexte du développement durable selon plusieurs auteurs (Benyus, 1997; Fayemi, 2016; Hoyos, 2010; Mathieu et Moana, 2015), il est encore relativement peu développé philosophiquement parlant (Mathews, 2019). Ainsi, le biomimétisme reste descriptif dans son approche, fragmentaire dans ses résultats et vulnérable à la mentalité anthropocentrique de notre système industriel qui considère l'humain comme centre de l'univers (*Ibid.*).

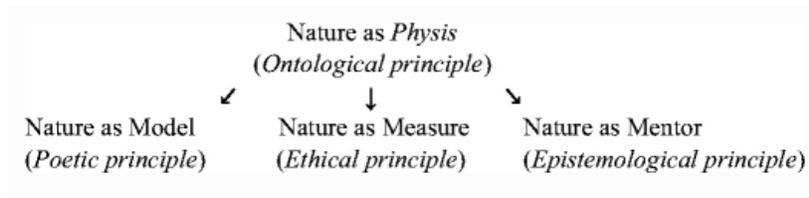


Figure 33 : La philosophie du biomimétisme

Source : Dicks (2016), p. 227

Au cours des entrevues menées auprès des spécialistes en biomimétisme (voir chapitre 5), il a été observé que le biomimétisme requiert un aspect philosophique important et très fondamental à la démarche. Dans ce contexte, la nature devient bien plus qu'un outil d'inspiration et peut guider notre façon de penser et de vivre. Dicks (2016) présente quatre principaux domaines de recherche composant la philosophie du biomimétisme (Figure 33) :

- a) La nature comme *physis* se présente comme le principe ontologique du biomimétisme et concerne l'essence de la nature. Mathews (2011) propose deux principes plus profonds et fondamentaux dans la nature : le « principe de conation » et le « principe de moindre résistance ». Le premier principe suggère que les « êtres vivants et les systèmes vivants agissent conformément à une volonté ou à une impulsion pour maintenir et accroître leur propre existence » (Mathews, 2011, p. 368). Le deuxième principe émet l'hypothèse qu'à « chaque fois que les organismes rencontrent une résistance, ils sont enclins, si les circonstances le permettent, à se détourner, cherchant à éviter les obstacles plutôt que de les rencontrer de front » (*Ibid.*). Bien qu'il existe des circonstances particulières où le principe de conation de certains individus est de se battre dans des situations spécifiques comme dans le cas d'un rival sexuel ou territorial, en règle générale, les organismes suivent le principe de moindre résistance.
- b) La nature comme modèle est le principe poétique du biomimétisme, car « le biomimétisme est une nouvelle science qui étudie les modèles de la nature puis imite ou s'inspire de ces conceptions et processus pour résoudre les problèmes humains, par exemple une cellule solaire inspirée par une feuille » (Benyus, 1997, p. 8). Le « principe poétique » de la nature comme modèle « implique une imitation de la manière dont la nature fait avancer les choses, plutôt qu'une représentation esthétique de la forme extérieure de la nature » (Dicks, 2016, p. 234).
- c) La nature comme mesure est le principe éthique du biomimétisme, car elle est comprise comme les normes écologiques qui sont utilisées pour corriger les innovations humaines. Benyus (1997) affirme que « le biomimétisme utilise une norme écologique pour juger de la "justesse" de notre innovation. Après 3,8 milliards d'années d'évolution, la nature a appris ce qui fonctionne. Ce qui est approprié. Ce qui dure » (p. 8).

- d) La nature comme mentor se présente comme le principe épistémologique du biomimétisme, car la nature devient une source infinie de connaissances pouvant guider les innovations humaines. Benyus (1997) propose que « le biomimétisme soit une nouvelle façon de voir et d'évaluer la nature. Il introduit une ère basée non pas sur ce que nous pouvons extraire du monde naturel, mais sur ce que nous pouvons en tirer » (p. 8).

Ainsi, le développement philosophique du biomimétisme se montre nécessaire pour son évolution. En ce sens, la vue « holistique » du biomimétisme, basée sur les systèmes naturels, se présente comme un levier pour une société durable. Mathews (2019) explique que la réduction de la consommation et de la population, ainsi que la réduction des impacts sur environnement ne sont pas suffisantes pour un futur durable. Il propose l'intégration des processus socio-économiques aux processus écologiques. Cette nouvelle perspective ne mettrait pas la nature en opposition à l'homme ou la biologie en opposition à la technologie, mais elle fait valoir le besoin de modéliser notre production (artéfacts, l'environnement bâti, etc.) et l'organisation de tous nos systèmes (agriculture, exploitation minière, fabrication industrielle, architecture et urbanisme, transport, etc.) sur la nature (*Ibid.*).

6.2 Implication des résultats pour la communauté du design (praticiens)

6.2.1 Une approche méthodologique à développer et à enseigner

Bien que certains outils de l'approche biomimétisme soient actuellement disponibles pour guider les designers de produits (voir 2.2.2), la proposition d'un concept simple et fonctionnel reste difficile. En réalité, un nombre restreint d'études visent à étudier l'utilisation pratique et l'efficacité du biomimétisme dans le processus de développement de produits (Appio et al., 2017; De Pauw et al., 2014; Fayemi, 2016; Fu et al., 2014; Montana Hoyos, 2010).

Comme discuté précédemment, un défi majeur pour la mise en œuvre du biomimétisme serait l'absence d'une méthodologie de conception systématique capable d'identifier les systèmes biologiques pertinents (y compris les organismes, les animaux, les plantes et les écosystèmes) puis d'abstraire leurs stratégies et mécanismes (Badarnah et Kadri, 2015). Ce processus de conception requiert une bonne connaissance des principes naturels et comme le designer de produits (ou industriel) n'a généralement pas une formation dans les sciences de la nature, telles que la biologie, la chimie, la physique, etc., ce défi devient plus complexe (*Ibid.*). Biokon international souligne que les divisions traditionnelles de la science comme la biologie, la chimie et la physique ne peuvent plus être strictement séparées dans un monde de plus en plus complexe. En réalité, une compréhension générale et approfondie de la science se montre nécessaire afin de combler les lacunes

imposées par la transdisciplinarité des problématiques auxquelles le design fait face et soutenir la mise en œuvre du biomimétisme. Ainsi, le biomimétisme est dans l'attente d'une méthodologie capable de faciliter le transfert des stratégies et solutions naturelles aux solutions de design de produits (Fayemi, 2016; Terrier *et al.*, 2017). Une telle méthodologie aurait un fort impact académique et professionnel sur la mise en œuvre du biomimétisme et pourrait faciliter son enseignement aux futurs designers de produits. Plus qu'enrichir sa boîte à outils, les connaissances autour des principes naturels pourraient alimenter la réflexion et la pensée du designer de produits.

Bachelier et Raskin (2017), dans le rapport intitulé Formation au biomimétisme : un enjeu pour la France, soulignent que la formation en biomimétisme, y compris les écoles techniques et les universités, représente « un enjeu majeur pour systématiser le recours au biomimétisme comme démarche d'innovation responsable » (p. 6). Ces auteurs soulignent quatre points démontrant la résistance au changement et une incompréhension du sujet pour la grande majorité du personnel d'enseignement (i) des enseignants parfois mal formés aux concepts de ce domaine ; (ii) une administration mal sensibilisée aux enjeux de ce virage dans l'enseignement (iii) ; difficulté pour les enseignants impliqués de faire valoir auprès de l'administration la nécessité de restructurer les formations et (iv) des lacunes dans la structuration de la méthodologie de travail et du format des cours. C'est pourquoi la disponibilité de formations en biomimétisme est encore limitée. À l'exception de l'Université d'Arizona⁷⁴ aux États-Unis et de l'Université d'Utrecht aux Pays-Bas qui offrent un master en biomimétisme, les autres formations disponibles constituent des cours s'inscrivant dans des programmes plus génériques (p. ex. : la robotique, le design durable, ingénierie des matériaux, etc.) (Fayemi, 2016). Ricard (2015) présente quatre facteurs indispensables à l'ancrage du biomimétisme dans le contexte de l'enseignement qui pourraient combler les lacunes existantes :

- a) Développer l'observation de la nature dans l'enseignement scolaire : l'éducation à la nature dès la maternelle permet une sensibilisation des enfants aux enjeux de la biodiversité. Le développement des capacités d'observation et de compréhension du fonctionnement du vivant stimule le regard des plus jeunes sur les questions environnementales et à se saisir avec curiosité de questions complexes. La construction d'une base solide des connaissances naturelles en amont dans le système d'enseignement représenterait un levier à l'utilisation du biomimétisme dans le contexte professionnel ;
- b) Ouvrir les formations de l'enseignement supérieur : le développement d'un réseau d'éducation se montre nécessaire pour former les professionnels sur le biomimétisme. L'offre de formations interdisciplinaires et transdisciplinaires permettant aux étudiants de développer une démarche

⁷⁴ <https://asuonline.asu.edu/online-degree-programs/graduate/master-science-biomimicry/>

biomimétique en lien avec divers domaines (p. ex. l'architecture, l'agriculture, la bionique, les biomatériaux, la biologie, la physique, etc.) pourrait également représenter un levier pour faire avancer les formations de l'enseignement supérieur. Dans ce contexte, l'éducation numérique constitue une opportunité pour le biomimétisme, car elle pourrait contribuer à la coopération entre institutions d'enseignement supérieur et de recherche.

- c) Développer les analyses du cycle de vie : l'écoconception est un élément important de l'économie circulaire qui converge avec le biomimétisme vers l'objectif de durabilité, en s'inspirant du bouclage des flux des écosystèmes naturels. La démarche biomimétique gagnerait à faire usage plus souvent des analyses du cycle de vie de manière systématique, globale, multicritères à travers l'approche en boucle fermée. Les analyses portant sur le choix des matières, les caractéristiques des matériaux, l'efficacité des processus de fabrication, etc., pourraient augmenter la durabilité des innovations biomimétiques.
- d) Renforcer les liens entre biomimétisme et biodiversité : la relation entre le biomimétisme et la biodiversité est bénéfique aux deux parties et conduit à la protection de la biodiversité, car le biomimétisme est aussi basé sur le respect à la nature.

Les facteurs présentés ci-dessus indiquent une bonne direction pour l'ancrage du biomimétisme dans l'enseignement. Bien que l'objectif premier de cette étude soit le développement méthodologique du biomimétisme dans l'enseignement supérieur, il est aussi important de considérer, dans un sens plus global, la sensibilisation des enfants aux enjeux de la biodiversité dès la maternelle. L'éducation à la nature dès la maternelle permet aux jeunes enfants de développer leur sens critique en matière de développement durable et aussi de renforcer leur lien avec la nature. En effet, ces enfants deviendront des adultes plus conscients et ouverts à des démarches comme le biomimétisme.

6.2.2 Des pistes de recommandation pour lever certaines barrières à l'utilisation du biomimétisme

La complexité d'imiter la nature

Comme discuté dans le chapitre précédent, la compréhension des structures et matériaux naturels impose une grande complexité à la démarche du biomimétisme. En réalité, les sciences de la nature, telles que la biologie, la chimie, la physique, etc., sont des champs de connaissances complexes, subdivisés en de nombreux sous-champs très spécialisés, tels que la microbiologie, la botanique, la biochimie, etc. (Fayemi, 2016). Les défis à la mise en œuvre du biomimétisme comprennent souvent : (1) la recherche et la sélection de stratégies appropriées à partir de la grande base de données trouvées dans la nature ; (2) difficultés de mise à l'échelle — les stratégies qui fonctionnent à une échelle (par exemple nano) peuvent ne pas fonctionner à une autre

(e. g. micro) ; et (3) les conflits entre la solution principale et les composants intégrés (p. ex. : des parties fabriquées par d'autres entreprises qui ne possèdent pas un processus industriel dans une perspective de durabilité) (Badamah et Kadri, 2015).

La complexité des matériaux biologiques avec leurs structures hiérarchiques impose une grande complexité à la fabrication de ces matériaux, ce qui exige la collaboration inter et transdisciplinaire de différents domaines, tels que la chimie, la physico-chimie, la physique, la théorie des systèmes complexes, etc. (Bensaude-Vincent *et al.*, 2002). Une partie de cette complexité réside dans l'interface entre deux domaines de connaissances éloignés : la technologie et la biologie (Vincent *et al.*, 2006). En effet, deux problèmes principaux créés par cette opposition sont soulignés par Appio *et al.* (2017) : (i) le manque de connaissances des concepteurs (ingénieurs, designers, architectes, etc.) sur les principes naturels et des phénomènes biologiques ; et (ii) la remise en question du transfert des phénomènes naturels dans le domaine technique. Ce contexte crée aussi une barrière à l'utilisation du biomimétisme par les industries qui ont tendance à l'utiliser dans les premières étapes du projet (recherche et développement) afin de créer des innovations de rupture (Fayemi, 2016).

Le biomimétisme pourrait être combiné à d'autres approches pour la durabilité qui sont divisées par Wever et Vogtländer (2014) en trois groupes (i) les approches holistiques telles que le *cradle to cradle*, l'économie circulaire, le biomimétisme et d'autres approches connexes), (ii) les approches *check-list (environmental benchmarking)* et outils d'écoconception tels que le *design for the environment, design for Sustainability, the LiDS Wheel*, et à un niveau plus détaillé comme la conception pour le recyclage et la conception pour le démontage et (iii) les approches quantitatives de l'analyse du cycle de vie (ACV), l'analyse du cycle de vie simplifié (ACVS) et celle basée sur le modèle du rapport *ecocosts/valeur (EVR)*. Ces auteurs soulignent que les approches classifiées dans les trois groupes ci-dessus sont complémentaires et peuvent être combinées au biomimétisme selon la nature du projet. Bien que cette complémentarité semble être logique et présente un grand potentiel, il faut encore comprendre comment la mettre en œuvre dans le processus de développement de produits.

L'une des principales raisons pour l'essor actuel du biomimétisme peut être la disponibilité d'outils et capacités nécessaires pour analyser la nature, ainsi que l'existence de différentes communautés et réseaux scientifiques de divers domaines permettant la coopération nécessaire (Volstad et Boks, 2008). À cet égard, l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité se présentent comme un levier pour la réduction de la complexité de la démarche du biomimétisme (Fayemi, 2016), car elles proposent l'utilisation des connaissances issues d'autres disciplines pour résoudre des problèmes complexes et non réductibles (Darbellay, 2015). De plus,

Patricia Ricard (2015) souligne que le développement des algorithmes à partir des logiciels d'analyse numérique (p. ex. l'analyse par éléments finis – FEA) et des logiciels de modélisation 3D complexe (p. ex. Grasshopper⁷⁵) ainsi que le développement rapide des technologies d'impression 3D représenteraient un levier pour relever les défis multiples et extrêmement complexes liés au fait d'imiter les structures naturelles.

Le partage et transfert de connaissances entre les praticiens et les entreprises, même si les projets ne dépassent pas le prototypage, serait bénéfique pour créer une base de données solide. Le Conseil économique, social et environnemental (CESE)⁷⁶, une assemblée constitutionnelle consultative française, « recommande aux acteurs du biomimétisme, en particulier les entreprises, de procéder à des analyses de cycle de vie des produits et technologies biomimétiques, dès le stade de la conception, et d'en diffuser chaque fois que possible les résultats, dans un souci de transparence et d'objectivité » (Ricard, 2015, p. 24).

La problématique de l'organisation industrielle

Wever et Vogtländer (2014) considèrent que le défi majeur de notre génération serait le développement d'un meilleur système de production et de consommation pour que la société progresse sans la dégradation de l'environnement et l'utilisation de ressources non renouvelables. Les entreprises jouent un rôle important dans cette transition, car elles sont généralement confrontées à deux problématiques, telles que soulignées par (Appio *et al.*, 2017) : i) les pressions économiques et politiques pour concevoir des produits et services innovants et respectueux de l'environnement et pour répondre à cette préoccupation dès les premiers stades du processus de développement de nouveaux produits et ii) les pressions technologiques et du marché obligeant les entreprises à réadapter rapidement leurs routines organisationnelles à mesure que les besoins des consommateurs deviennent de plus en plus hétérogènes. Un tel changement requiert des décisions politiques de haut niveau et des changements dans les réglementations gouvernementales (à l'échelle nationale et mondiale) et une adaptation des concepteurs (designers, ingénieurs, architectes, etc.) qui doivent élaborer de nouveaux systèmes de produits et services afin de soutenir la transition requise (Wever et Vogtländer, 2014).

Une autre problématique dans l'organisation industrielle serait la complexité inhérente au travail collaboratif et interdisciplinaire entre professionnels de différents domaines tels que les disciplines de conception (ingénierie, architecture, design, etc.) et les disciplines comme la biologie, la chimie, les mathématiques, etc. (Fayemi, 2016).

⁷⁵ <https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper>

⁷⁶ <https://www.lecese.fr/>

Bien que l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité apportent des éléments de réponse à cette situation, il est encore complexe de mettre en œuvre un travail avec ce niveau de collaboration et d'intégration.

Selon Fayemi (2016), il est possible de considérer que la transposition du biomimétisme au domaine industriel « est primordiale pour qu'elle puisse être perçue comme pertinente » (p. 46). Cependant aucune étude sur l'adoption et l'utilisation d'outils de biomimétisme par les entreprises n'existe à ce jour (Appio *et al.*, 2017). La mise en œuvre du biomimétisme demande aussi une adaptation de l'infrastructure et des processus par lesquels les produits sont fabriqués (Mathews, 2019). En réalité, il n'est pas suffisant de concevoir de produits à partir de la nature et de les fabriquer dans un système industriel qui est incompatible avec les principes naturels (*Ibid.*).

6.3 Limites des résultats de l'étude

Bien que les résultats de cette étude ne soient pas généralisables, ils ont permis de formuler des recommandations et des pistes d'avenues de recherche fécondes ouvrant la voie à de futurs travaux de recherche sur le biomimétisme dans le contexte du design de produits. Le nombre d'entrevues réalisées est faible, néanmoins les propos des spécialistes interviewés ont été suffisamment riches pour apporter des éléments de réponses très éclairants pour soutenir l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits. En réalité, il y a peu d'experts en design de produits et biomimétisme.

D'autres limites sont induites par les outils de collecte et d'analyse de données. Lors de l'interprétation des données, plusieurs freins se manifestent, à savoir :

- la fiabilité vise à s'assurer de la concordance des résultats, de leur non-contradiction et de leur complémentarité (Fortin et Gagnon, 2015). L'objectif n'est pas d'émettre des relations causales, mais plutôt de mettre les différents éléments en relation. Pour ce faire, la triangulation et la saturation théorique peuvent être utilisées pour augmenter la fiabilité des résultats. Malgré le faible nombre d'entrevues auprès d'experts en biomimétisme, il a été possible de mettre en perspective les propos recueillis au regard de la recension des écrits.

- la validité interne correspond à la justesse du lien établi entre les observations empiriques et leurs interprétations. La principale difficulté pour le chercheur qualitatif est d'interpréter les concepts issus du terrain pour leur donner une forme qui, elle-même, s'inscrit dans la tradition scientifique (Deslauriers et Kérisit, 1997). En effet, ce défi est d'autant plus grand que les données recueillies lors des entrevues sont des expériences, des représentations et des opinions (Deslauriers et Kérisit, 1997).

Généralement, la validité interne des résultats est évaluée par le lecteur grâce aux extraits de verbatim soutenus par des explications permettant de mieux comprendre la démarche du chercheur sur le plan de l'interprétation. C'est cette stratégie qui a été utilisée pour présenter les résultats de cette étude ;

– la validité externe peut se résumer par la capacité à produire des conclusions qui vont au-delà de la recherche. La plupart des études qualitatives ne visent pas à la représentativité statistique. En effet, les chercheurs qualitatifs étudient habituellement un seul environnement ou un nombre restreint d'individus ou de sites recourant à l'échantillonnage théorique plutôt qu'à l'échantillonnage probabiliste (Maxwell et Soulet, 2000). Par conséquent, la validité externe n'est pas une question cruciale dans les études qualitatives (Maxwell et Soulet, 2000). Dans le cadre de cette recherche, l'enjeu était d'avoir le point de vue d'experts en biomimétisme œuvrant dans des réalités professionnelles et culturelles différentes. Ainsi, l'intention était de rassembler des données détaillées et circonstanciées sur leur vision respective du biomimétisme et la démarche qu'ils emploient chacun afin de dégager des tendances communes et des perspectives complémentaires.

6.4 Avenues de recherche

Dans un premier temps, il a été souligné dans la section des résultats du besoin de développement méthodologique du biomimétisme. Des outils et méthodes facilitant l'intégration des stratégies naturelles dans le processus de développement de produits pourraient enrichir la boîte à outils du designer de produits, tout en facilitant le transfert de ces stratégies vers les projets de design. Les futurs travaux pourraient se concentrer sur la définition des étapes générales de la démarche, tout en présentant les outils qui pourraient être utilisés dans chaque étape.

Dans un deuxième temps, plus important que le développement méthodologique du biomimétisme, il est nécessaire de susciter l'intérêt des designers de produits pour la nature. La compréhension des principes naturels et le regard sensible et critique aux enjeux du développement durable faciliteraient la mise en œuvre du biomimétisme. Une voie fertile pour de futures recherches serait le renfort du lien entre les designers de produits et la nature à travers la restructuration des cours de design de produit (ou design industriel) au niveau technique et baccalauréat. Actuellement, l'offre des formations sur ce sujet est encore limitée.

Conclusion

Certaines des pistes d'action, explorées dans la discussion générale, impliquent de soutenir l'utilisation du biomimétisme par les designers de produits dans le processus de développement de produits, grâce au développement méthodologique du biomimétisme. Des pistes d'action, relatives à l'assimilation des principes naturels, le travail interdisciplinaire et transdisciplinaire et l'appropriation philosophique du biomimétisme, ont également été étudiées. Elles représentent une base structurante pour le développement méthodologique du biomimétisme.

D'autres résultats, résumés dans la contribution à l'avancement des connaissances, assurent l'ancrage théorique de la problématique, tout en répondant aux différents objectifs de la recherche. Les constats issus de cette étude ont contribué à apporter un nouveau regard sur le biomimétisme et sa relation potentielle avec le design de produits. Les résultats issus des entretiens ainsi que de l'analyse des différences et le fil conducteur entre les principaux termes rencontrés dans la littérature définissant le processus d'inspiration naturelle (i) biomimétisme, (ii) biomimétique, (iii) bionique et (iii) conception bio-inspirée, ont permis de proposer une définition plus complète et complexe pour le biomimétisme. Enfin, les résultats issus des entretiens et d'une brève analyse des principales méthodes en biomimétisme dans la conception de produits ont permis de proposer des pistes menant à l'identification d'étapes exploratoires pour une nouvelle démarche méthodologique conceptuelle baptisée Bio-ADN.

En considérant le caractère exploratoire de cette étude, un approfondissement lors de recherches ultérieures serait nécessaire pour mieux valider les résultats, surtout la nouvelle définition et l'approche méthodologique exploratoire pour le biomimétisme. Les limites des résultats se rapportent principalement aux critères de fiabilité et de validité externe. D'autres limites, associées au nombre restreint d'entretiens réalisés, rendent difficilement généralisables les résultats de cette recherche. Néanmoins, ils ont permis de formuler des recommandations et pistes d'action prometteuses pour mener de futurs travaux.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour objectif d'analyser le potentiel d'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit afin de répondre, de façon plus systémique, aux différents enjeux du développement durable. Sur la base d'entrevues semi-dirigées et d'une analyse exhaustive de la littérature sur le biomimétisme, il a été possible de formuler des pistes de recommandation permettant aux designers de produits de mettre sur le marché des produits à moindre impact environnemental, social et éthique. Les résultats ont mis en lumière l'importance du développement méthodologique du biomimétisme afin de rendre possible sa mise en œuvre par les designers de produits dans le contexte industriel. Plus spécifiquement, le travail interdisciplinaire lors du processus de conception, notamment avec la biologie et les sciences pures (p. ex. : l'informatique et les mathématiques entre autres), serait nécessaire pour maximiser le potentiel de durabilité des solutions, compte tenu de la complexité des écosystèmes et structures naturelles. D'ailleurs, le développement d'algorithmes pourrait constituer un levier capable de faciliter le transfert et la compréhension des connaissances, structures et stratégies naturelles vers les projets de conception. Ce lien entre l'intelligence artificielle et l'intelligence naturelle pourrait représenter un important levier facilitant la mise en œuvre du biomimétisme dans le contexte industriel. En effet, les informations nécessaires à la bonne utilisation du biomimétisme et la compréhension des stratégies naturelles par l'industrie pourraient être analysées et comprises de manière plus efficace à l'aide de l'intelligence artificielle.

Cette recherche, ainsi que d'autres études (Terrier *et al.*, 2017; Benyus, 1997; MC Donough et Braungart, 2011; Montana-Hoyos, 2010; Vincent *et al.*, 2006), ont démontré que la nature, dans la plupart des cas, est plus performante que les technologies actuelles utilisées par l'industrie qui n'ont pas recours à des processus durables et résilients. Ainsi, les trois professionnels du biomimétisme interviewés, Moana Lebel, Fred Gelli et Chloé Lequette, ont souligné le grand potentiel d'innovation dans l'utilisation des principes et stratégies naturelles comme référence pour la conception de produits soutenables, compatibles avec l'environnement. Les impacts sociétaux et économiques qui devraient émerger de ces avancées auront des avantages futurs pour la santé humaine et la qualité de vie des individus (Lepora *et al.*, 2013).

Bien que le développement méthodologique soit important pour l'évolution du biomimétisme dans le processus de développement d'un produit, la décomposition du problème (rationalisme) et la simplification des connaissances issues des systèmes biologiques complexes pourraient limiter la durabilité des solutions biomimétiques. Ce constat souligne une certaine incompatibilité entre le développement méthodologique du biomimétisme et le transfert des connaissances systémiques présentes dans les solutions naturelles. En effet, la formalisation apportée au biomimétisme devrait viser à encadrer cette démarche sans nécessairement vouloir

la rationaliser complètement (Terrier *et al.*, 2017). Dans ce contexte, la pensée systémique sera à privilégier par rapport à la pensée rationnelle, tout en considérant les problématiques de projet dans sa globalité, sa complexité ainsi que les interactions et les rétroactions entre les parties prenantes comprenant ces problématiques.

En considérant le caractère exploratoire de cette étude, les constats qui ont émergé devront faire l'objet d'études plus approfondies pour être davantage plausibles. Les principales contributions de cette étude, à savoir (i) des pistes de recommandations pour tendre vers une nouvelle définition plus complète du biomimétisme et (ii) une proposition exploratoire d'une approche méthodologique en biomimétisme, représentent des orientations qui doivent être validées et complétées par d'autres recherches sur le sujet. Il est entre autres primordial que des travaux soient réalisés sur des échantillons plus grands et représentatifs de designers de produits. Bien qu'exploratoire, cette étude a permis d'identifier des pistes de recherche suffisamment riches et fécondes pour apporter des éléments de réponse à la problématique de recherche.

Bibliographie

- Agence de la Transition Écologique (ADEME). (2017). *Écoconcevoir les produits*.
<https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/organiser-demarche-environnementale/dossier/ecoconcevoir-produits/sengager-demarche>
- Agenda 21 (1992). Agenda21, Programme of Action for Sustainable Development. United Nations Publications, New York.
- Ahmad, S., Wong, K. Y., Tseng, M. L. et Wong, W. P. (2018a). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects. *Resources, Conservation & Recycling*, 132, 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020>
- Ahmad, S., Wong, K. Y., Tseng, M. L. et Wong, W. P. (2018b). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 49-61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020>
- Åkermark, A.-M. (2003). *The crucial role of the designer in EcoDesign*. Maskinkonstruktion.
- Amer, N. (2019). Biomimetic Approach in Architectural Education: Case study of 'Biomimicry in Architecture' Course. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(3), 499-506.
doi :<https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.11.005>
- Appio, F. P., Achiche, S., Martini, A. et 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. <https://doi.org/10.1080/09537325.2016.1236190>
- Ataide, R. (2010). Global biomimicry efforts-An ecoomic game changer. *The Fermanian*.
- Aurez, V., Georgeault, L., Stahel, W. et Bourg, D. (2016). *Économie circulaire : système économique et finitude des ressources*. Louvain-La-Neuve : De Boeck Supérieur.
- Aziz, M. S. (2016). Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 707-714.
- Bachelier, H. et Raskin, K. (2017). *Formation au Biomimétisme : Un enjeu pour la France*.
https://drive.google.com/file/d/1EFeAUg3P1_Yl6is81rxhSMiRE11_XViZ/view
- Badarnah, L. et Kadri, U. (2015). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), 120-133. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.922458>
- Bakker, C. A., Wever, R., Teoh, C. et De Clercq, S. (2010). Designing cradle-to-cradle products: a reality check. *International Journal of Sustainable Engineering*, 3(1), 2-8.
<https://doi.org/10.1080/19397030903395166>
- Baumeister, D. (2014). *Biomimicry resource hetbook: a seed bank of best practices*: Biomimicry 3.8.
- Baxter, M. (2015). *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos*: Edgard Blucher.
- Belem, G. et Revéret, J.-P. (2014). *L'analyse du cycle de vie comme outil de développement durable*.

- Bensaude-Vincent, B., Arribart, H., Bouligand, Y. et Sanchez, C. M. (2002). Chemists and the school of nature. *New Journal of Chemistry*, 26(1), 1-5. <https://doi.org/10.1039/b108504m>
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry : innovation inspired by nature*. New York : Morrow.
- Benyus, J. M. (2009). *Biomimética: inovação inspirada pela natureza*: Editora Cultrix.
- Biomimicry 3.8 (2013). *Designlens: Biomimicry Thinking*. <https://biomimicry.net/the-buzz/resources/designlens-biomimicry-thinking/>
- Bœuf, G. (2014). Biomimétisme et bio-inspiration. *Vraiment durable 2014/1 (n° 5/ 6)*, 43-55. <https://doi.org/10.3917/vdur.005.0043>
- Bogatyrev, N. et Bogatyreva, O. (2014). BioTRIZ: a win-win methodology for eco-innovation *Eco-innovation and the Development of Business Models* (pp. 297-314): Springer.
- Bogatyrev, N. et Bogatyreva, O. (2015). TRIZ-based algorithm for biomimetic design. *Procedia engineering*, 131, 377-387.
- Bogatyrev, N., Bogatyreva, O. et Bogatyrev, M. (2010). *BioTRIZ is a methodology for inventors*. <https://biotriz.com/our-methods>
- Bonciu, F. (2014). The European Economy: From a Linear to a Circular Economy (Vol. 14).
- Braungart, M. (2016). Cradle to cradle: transitioning from waste incineration to beneficial materials.
- Brodhag, C. (2014). L'écoconception, un outil au coeur de l'économie circulaire. *Annales des Mines- Responsabilité et environnement*.
- Brodhag, C., Breuil, F., Gondran, N. et Ossama, F. (2004). *Dictionnaire du développement durable* : Afnor Paris.
- Brown, V. A. (2015). Utopian thinking and the collective mind: Beyond transdisciplinarity. *Futures*, 65, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.11.004>
- Brundtland, G. H. (1987). Rapport Brundtlet. Ministère des Affaires étrangères et du Développement international. L'Odyssée du développement durable. http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odysee-developpementdurable/files/5/rapport_brundtlet.pdf
- Capra, F. (2010). Léonard de Vinci, homme de sciences. [Arles, France] : Actes sud.
- Caya, O., Chamberland-Tremblay, D., Côté, L., Derome, B., Guillemette, M. et Joyce, A. (2012). Quelques défis inévitables pour l'avenir. In *Fides (Ed.), Manuel de gestion du développement durable en entreprise : une approche progressive* (pp. 594-652).
- Centre d'études et d'expertises en biomimétisme (CEEBIOS). (2018). Habitat Bio-Inspiré - Rapport de synthèse. <https://drive.google.com/file/d/1q2YJSoY-99RZhdRbdfQ4DKGyPS5ZVvDp/view>
- Chaouad, R. et Verzeroli, M. (2018). Réalités et enjeux de l'urbanisation du monde. [The urbanization of the world: Facts and challenges]. *Revue internationale et stratégique*, 112(4), 47-65. <https://doi.org/10.3917/ris.112.0047>

- Chayaamor-Heil, N., Guéna, F. et Hannachi-Belkadi, N. (2018). Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*(1).
- Chekchak, T. et Lapp, K. (2011). Biomimétisme, la nécessaire resynchronisation de l'économie avec le vivant. *Ecologie & politique*, 43(3), 159-166.
- Chevassus-au-Louis, B. (2012). Biodiversité et développement durable : Les enjeux de la «recapitalisation écologique». *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*.
- Cilliers, P. et Nicolescu, B. (2012). Complexity and transdisciplinarity – Discontinuity, levels of Reality and the Hidden Third. *Futures*, 44(8), 711-718. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.04.001>
- Clergeau, C. et Paulus, K. (2017). Déploiement de la RSE dans les projets événementiels, une analyse à partir de la théorie de l'acteur-réseau. *Management & Avenir*, 91(1), 121-140. <https://doi.org/10.3917/mav.091.0121>
- CMED, R. B. (1987). Notre avenir a tous. Montréal, Fleuve, 51.
- Colle, A. (2018). S'inspirer du vivant pour développer notre économie régionale. <https://www.sudouest.fr/2018/04/27/s-inspirer-du-vivant-pour-developper-notre-economie-regionale-5012538-10275.php>
- Collectif. (2019). Les grandes écoles doivent former à la “redirection écologique”. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/idees/article/2019/10/04/les-grandes-ecoles-doivent-former-a-la-redirection-ecologique_6014262_3232.html
- Cooper, T. (2000). Product development implications of sustainable consumption. *The design Journal*, 3(2), 46-57.
- Cooper, T. (2005). Slower consumption reflections on product life spans and the “throwaway society”. *Journal of Industrial Ecology*, 9(1-2), 51-67.
- Côté, C. (2006). Analyse comparative de deux méthodes d'analyse de cycle de vie simplifiée (ACVS) utilisables pour la conception de produits [mémoire de maîtrise, Université de Montréal]. Papyrus. https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/17149/Cote_Colin_2005_memoire.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cross, N. (2011). Design thinking : understating how designers think et work. Oxford : Berg.
- Cucuzzella, C. (2011). Design thinking and the precautionary principle: development of a theoretical model complementing preventive judgment for design for sustainability enriched through a study of architectural competitions adopting LEED [thèse de doctorat, Université de Montréal]. Papyrus. https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/5174/Cucuzzella_Carmela_2011_these.pdf?sequence=7&isAllowed=y
- Cursaru, G. (2012). Le mythe de Dédale et d'Icare et le thème du vol des mortels en corps vivant. *Phoenix*, 66(3/4), 298-334.
- Daoudi, M. (2016). La «quatrième révolution industrielle» en marche à Davos? <http://www.rfi.fr/economie/20160120-suisse-davos-forum-economique-mondial-revolution-industrielle>

- Darbellay, F. (2015). Rethinking inter- and transdisciplinarity: Undisciplined knowledge and the emergence of a new thought style. *Futures*, 65, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.10.009>
- De Blois, M. (2007). Le projet organisant et la dynamique des acteurs dans le projet d'aménagement pour une pensée du projet "par" le design. Université de Montréal Montréal.
- De Pauw, I. C., Karana, E., Ketachar, P. et Poppelaars, F. (2014). Comparing Biomimicry et Cradle to Cradle with Ecodesign: a case study of student design projects. *Journal of cleaner production*, 78, 174-183.
- [The] declaration of Cocoyoc. (1975). *World Development*, 3(2), 141-148. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(75\)90044-3](https://doi.org/10.1016/0305-750X(75)90044-3)
- Dépelteau, F. (2010). La démarche d'une recherche en sciences humaines : de la question de départ à la communication des résultats. Bruxelles : De Boeck Université.
- Deslauriers, J. P. et Kérisit, M. (1997). Le devis de recherche qualitative. In. JP Poupart, JP Deslauriers, LH Groulx A. Laperrière, R. Mayer, AP Pires. *La recherche qualitative : enjeux épistémologiques et méthodologiques*.
- Dicks, H. (2016). The Philosophy of Biomimicry. *Philosophy & Technology*, 29(3), 223-243. <https://doi.org/10.1007/s13347-015-0210-2>
- Diemer, A. et Labrune, S. (2007). L'écologie industrielle : quand l'écosystème industriel devient un vecteur du développement durable. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*.
- Dreux-Gerphagnon, B. et Boudarel, M. R. (2011). L'éco-socio-conception : une approche partenariale de la valeur au niveau des PME. In *PME : en marche vers le développement durable* (pp. 404-406).
- Durand, D. (2013). *La systémique*. 12E éd. mise à jour ed. Paris: Presses universitaires de France.
- Durand, H., Larrieu, C. et Hubert, C. (2012). Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France : état des lieux, potentiel, leviers. *Études et documents*(72).
- El Ahmar, S. et Fioravanti, A. (2015). Biomimetic-Computational Design for Double Facades in Hot Climates. *Proceedings of eCAADe 2015*.
- 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. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- Fayemi, P.E., Maranzana, N., Aoussat, A. z. et Bersano, G. (2013). Contextualisation des outils biomimétiques afin de développer une nouvelle méthodologie. Conference 2013 Biarritz. https://www.researchgate.net/publication/279866494_contextualisation_des_outils_biomimetiques_afin_de_developper_une_nouvelle_methodologie
- Fayemi, P.-E., Maranzana, N., Aoussat, A. et Bersano, G. (2014). Bio-inspired design characterisation and its links with problem solving tools. In *DS 77 : Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference*.
- Figuière, C., Boidin, B. et Diemer, A. (2018). *Économie politique du développement durable* : De Boeck Supérieur.

- Findeli, A. (2010). Searching for design research questions: some conceptual clarifications. *Questions, Hypotheses & Conjectures : discussions on projects by early stage and senior design researchers*, 286-303.
- Findeli, A., Russell, K., Chow, R., Jonas, W. et Joost, G. (2010). *Questions, Hypotheses & Conjectures : Discussions on Projects by Early Stage et Senior Design Researchers* : iUniverse.
- Fortin, F. et Gagnon, J. (2015). *Fondements et étapes du processus de recherche : méthodes quantitatives et qualitatives (3e édition ed.)*. Montréal : Chenelière éducation.
- Fortin, R. (2005). *Comprendre la complexité : introduction à La Méthode d'Edgar Morin (2 éd. ed.)*. Québec : Presses de l'Université Laval.
- Fournier, F. (2018). La décroissance : examen philosophique d'un mouvement pour une économie alternative.
- Fratzl, P. (2007). Biomimetic materials research: what can we really learn from nature's structural materials? *Journal of the Royal Society, Interface*, 4(15), 637-642. <https://doi.org/10.1098/rsif.2007.0218>
- Frosch, R. A. et Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for Manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144-152. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
- Fu, K., Moreno, D., Yang, M. et Wood, K. L. (2014). Bio-Inspired Design: An Overview Investigating Open Questions From the Broader Field of Design-by-Analogy. *Journal of Mechanical Design*, 136(11). <https://doi.org/10.1115/1.4028289>
- Fugère, M. (2009). Intégration des critères de conception et de l'analyse de cycle de vie simplifiée pour l'écoconception de produits à usage unique. (Maîtrise), Polytechnique Montréal. <https://publications.polymtl.ca/195/>
- Gemenne, F. et Denis, M. (2019). Qu'est-ce que l'Anthropocène ? <https://www.vie-publique.fr/parole-dexpert/271086-terre-climat-quest-ce-que-lanthropocene-ere-geologique>
- Gendron, C. et Revéret, J.-P. (2010). Développement durable et innovation : par où commencer?: démarches d'éco-conception : Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, ESG UQAM.
- Glier, M. W., McAdams, D. A. et Linsey, J. S. (2011). Concepts in biomimetic design: methods and tools to incorporate into a biomimetic design course. ASME Paper No. DETC2011-48571.
- Haned, N., Lanoie, P., Plouffe, S. et Vernier, M. (2014). La rentabilité de l'écoconception : une analyse économique. *Pôle éco-conception*.
- Haoues, N (2012). L'outil diagnostic éco-socio-conception. *Pôle Eco-conception*. <https://www.eco-conception.fr/static/loutil-dignostic-eco-socio-conception.html>
- Harkness, J. M. (2002). In Appreciation A Lifetime of Connections: Otto Herbert Schmitt, 1913 - 1998. *Physics in Perspective*, 4(4), 456-490. <https://doi.org/10.1007/s000160200005>
- Hervé, B. et Paul, M. (2013). La biomasse, énergie d'avenir? : Editions Quae.

- Industrial Designers Society of America (IDSA) (2019). Industrial Design Defined.
<https://www.idsa.org/news/dblog/what-id>
- Jahn, T. et Keil, F. (2015). An actor-specific guideline for quality assurance in transdisciplinary research. *Futures*, 65, 195-208. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.10.015>
- Jarroux, N. (2008). Les biopolymères : différentes familles, propriétés et applications : Ed. Techniques Ingénieur.
- Kakangu, M. M. (2007). Vocabulaire de la complexité : post-scriptum à La méthode d'Edgar Morin : Editions L'Harmattan.
- Kapsali, V. et Perry, J. (2017). Le grand livre du biomimétisme : s'inspirer de la nature pour inventer demain. Malakoff : Dunod.
- Korhonen, J., Honkasalo, A. et Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46.
- Laffitte, P. et 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. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
- Lambert, N. (2014). Génétique et transmission transgénérationnelle. *Cahiers de psychologie clinique*, 43(2), 11-28. <https://doi.org/10.3917/cpc.043.0011>
- Lange-Merrill, C. (1982). Biomimicry of the Dooxygen Active Site in the Cooper Proteins Hemocyanin and Cytochrome Oxidase. Doctoral Thesis.
- Le Déaut, J., Courteau, R. et Sido, B. (2016). De la biomasse à la bioéconomie : une stratégie pour la France. rapport du Sénat(380).
- Le Moigne, J.-L. (1994). *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. FeniXX
- Lebel, M. (2017). Biomimétisme : L'art d'imiter la nature au service de l'économie verte. *Vecteur Environnement*, 50(1), 12.
- Lepora, N. F., Verschure, P. et Prescott, T. J. (2013). The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration & biomimetics*, 8(1), 013001.
- Létourneau, J. (2006). Le coffre à outils du chercheur débutant : guide d'initiation au travail intellectuel (Nouv. éd. rev., augm. et mise à jour ed.). Montréal : Boréal.
- Lim, C., Yun, D., Park, I. et Yoon, B. (2018). A systematic approach for new technology development by using a biomimicry-based TRIZ contradiction matrix. *Creativity and Innovation Management*, 27(4), 414-430.
- Llorach-Massana, P., Farreny, R. et Oliver-Sola, J. (2015). Are Cradle to Cradle certified products environmentally preferable? Analysis from an LCA approach. *Journal of cleaner production*, 93, 243-250.
- Lobach, B. (2001). *Design industrial: Bases para a configuração*. São Paulo : Edgard.

- Löwy, M. (2019). Décroissance, écosocialisme : comment répondre à la question écologique ? *Ballast*, 7(1), 54-69.
- Madge, P. (1997). Ecological design : a new critique. *Design issues*, 13(2), 44-54.
- Manzini, E. (1994). Design, Environment and Social Quality: From " Existenzminimum" to " Quality Maximum". *Design issues*, 10(1), 37-43.
- Marinos-Kouris, D. et Mourtsiadis, A. (2013). Environmental limits of industrial symbiosis: The case of aluminium eco-industrial network (Vol. 22).
- Massey, J. (2012). Buckminster Fuller's Reflexive Modernism. *Design and Culture*, 4(3), 325-344.
- Mathews, F. (2011). Towards a deeper philosophy of biomimicry. *Organization & Environment*, 24(4), 364-387.
- Mathews, F. (2019). Biomimicry and the Problem of Praxis. *Environmental Values*, 28, 1-28.
<https://doi.org/10.3197/096327119X15579936382400>
- Mathieu, A. et Lebel, M. (2015). L'art d'imiter la nature : le biomimétisme : Éditions MultiMondes.
- Maxwell, J. A. et Soulet, M. H. (2000). La validité; Comment pourriez-vous avoir tort. La modélisation de la recherche qualitative, 157-177.
- Mc Donough, W. et Braungart, M. (2011). *Cradle to Cradle: Créer et recycler à l'infini*. Paris : Alternatives éditions.
- Mc Donough, W. et Braungart, M. (2013). *The upcycle: Beyond sustainability--designing for abundance*: Macmillan.
- McAloone, T. C. et Bey, N. (2009). Environmental improvement through product development. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency.
- McGregor, S. L. (2013). Transdisciplinarity and biomimicry. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, 4.
- McHarg, I. L. et History, A. M. O. N. (1969). *Design with nature* : American Museum of Natural History New York.
- Missemer, A. (2015). Le développement durable, entre interdisciplinarité et interculturalité. In A. Diemer & C. Marquat (Eds.), *Regards croisés Nord-Sud sur le développement durable* (pp. 95-111). Bruxelles : De Boeck.
- Molina, A. et Raskin, K. (2018). Biomimétisme : le vivant, source d'innovation. [Biomimetics: Nature as a source of innovation]. *Le journal de l'école de Paris du management*, 129(1), 15-22.
<https://doi.org/10.3917/jepam.129.0015>
- Montana-Hoyos, C. et Fiorentino, C. (2016). Bio-Utilization, Bio-Inspiration, et Bio-Affiliation in Design for Sustainability : Biotechnology, Biomimicry, et Biophilic Design
- Montana-Hoyos, C. A. (2010). *Bio-ID4S : biomimicry in industrial design for sustainability : an integrated teaching-et-learning method*. Saarbrücken, Germany: VDM Verlag Dr. Muller.

- Morin, E. (1982). *Science avec conscience*.
- Morinière, A. (2009). Le biomimétisme pour un design durable. Mémoire de recherche au sein de l'ENSAD.
- Natural Capitalism Solutions, The Natural Edge Project (2005) *Prospering in a Carbon Constrained World: Profitable Opportunities for Greenhouse Gas Emissions Reduction* (CCX/EUX Opportunities Report).
- Niaounakis, M. (2019). Recycling of biopolymers – The patent perspective. *European Polymer Journal*, 114, 464-475. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027>
- Nicolescu, B. (1996). La transdisciplinarité. Manifeste. Editions du Rocher.
- Paixão-Barradas, S. et Melles, G. (2019). Développement durable : enjeux actuels. [Sustainable development: Current issues]. *Sciences du Design*, 9(1), 17-23. <https://doi.org/10.3917/sdd.009.0017>
- Palier, B. (2010). Path dependence (Dépendance au chemin emprunté). *Dictionnaire des politiques publiques* (pp. 411-419). Paris : Presses de Sciences Po.
- Pantaleão, L. F. (2017). Stuart Walker: a função estética sustentável: mediações entre arte, design e espiritualidade. (Doctorat), Universidade Estadual Paulista. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152140>
- Papanek, V. J. (1974). Design pour un monde réel : écologie humaine et changement social. Paris : Mercure de France.
- Pereira, P., Monteiro, G. et Prazeres, D. (2015). General aspects of biomimetic materials *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering* (pp. 57-79): Springer.
- Perret, B. (2018). Réflexions sur les conditions sociales de la transition écologique. *Cités*, 76(4), 19-30. <https://doi-org.acces.bibl.ulaval.ca/10.3917/cite.076.0019>
- Petit, V. (2015). L'éco-design : design de l'environnement ou design du milieu ? *Sciences du Design*, 2(2), 31-39.
- Podborschi, V. et Vaculenco, M. (2005). Natural Shapes — A Source of Inspiration for Eco-Design. In D. Talabă & T. Roche (Eds.), *Product Engineering: Eco-Design, Technologies and Green Energy* (pp. 111-120). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Polk, M. (2015). Transdisciplinary co-production: Designing and testing a transdisciplinary research framework for societal problem solving. *Futures*, 65, 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.11.001>
- Quivy, R. et Campenhoudt, L. v. (1995). Manuel de recherche en sciences sociales (Nouvelle édition ed.). Paris : Dunod.
- Recyc-Québec (2018). *L'économie circulaire, une priorité*. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/economie-circulaire>
- Reijnders, L. (2008). Are emissions or wastes consisting of biological nutrients good or healthy? *Journal of Cleaner Production*, 16(10), 1138-1141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.02.003>

- Ricard, P. (2015). Le biomimétisme : s'inspirer de la nature pour innover durablement. *Les projet d'avis du Conseil économique, social et environnemental (CESE), Paris.*
- Rosnay, J. d. (1977). *Le Macroscopie : vers une vision globale.* Paris : Ed. Seuil.
- Russell, A. W., Wickson, F. et Carew, A. L. (2008). Transdisciplinarity: Context, contradictions and capacity. *Futures*, 40(5), 460-472. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2007.10.005>
- Ruszaj, A. (2015). Bionic impact on industrial production development. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 39(4), 5--22.
- Sachs, I. (1997). *L'écodéveloppement : stratégies pour le XXIe siècle (Nouv. éd ed.).* Paris : Syros.
- Sauvé, S., Normandin, D. et McDonald, M. (2016). *L'économie circulaire : une transition incontournable.* [Montréal, Québec] : Les Presses de l'Université de Montréal.
- Savard, S. (2017). Le nombre d'or en architecture. <https://idinterdesign.ca/le-nombre-dor-en-architecture/>
- Scheffer, O. (2011). *L'architecture biomimétique, quand l'architecture s'inspire de la nature.* Paris : Editions Symbiopolis.
- Schiesser, P. (2011). *Éco-conception : Indicateurs. Méthodes. Réglementation :* Dunod.
- Schmidt, J. C. (2008). Towards a philosophy of interdisciplinarity. *Poiesis & Praxis*, 5(1), 53-69. <https://doi.org/10.1007/s10202-007-0037-8>
- Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution. Paper presented at the World Economic Forum.
- Speck, T., Speck, O., Beheshti, N. et McIntosh, A. (2008). Process sequences in biomimetic research. *Design and nature IV*, 114, 3-11.
- Taylor Aiken, G. (2017). Permaculture and the social design of nature. *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 99(2), 172-191.
- Ternaux, E. (2012). *Industry of nature : another approach to ecology.* Amsterdam : Frame Publishers.
- Terrier, P., Glaus, M. et Raufflet, E. (2017). Biomimétisme : outils pour une démarche écoinnovante en ingénierie. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement.*
- Thibault, M. et Leclerc, A. (2014). *Traité d'écoconception : École de design industriel,* Université de Montréal.
- Thompson Klein, J. (2004). Prospects for transdisciplinarity. *Futures*, 36(4), 515-526. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2003.10.007>
- Toxopeus, M. E., De Koeijer, B. et Meij, A. (2015). Cradle to cradle: effective vision vs. Efficient practice? *Procedia CIRP*, 29, 384-389.
- Trudel, J.-S. (2007). *Arrêtons de pisser dans de l'eau embouteillée :* Jean-Sébastien Trudel.
- Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources, U. (1980). *Stratégie mondiale de la conservation : la conservation des ressources vivantes au service du développement durable.* La

conservation des ressources vivantes au service du développement durable. Suisse : UICN, PNNE, WWF.

- Van Den Abeele, P. (2011). Cradle to cradle : Une approche d'écoconception des produits (Master en Sciences et Gestion de l'Environnement), Université Libre de Bruxelles. http://mem-envi.ulb.ac.be/Memoires_en_pdf/MFE_10_11/MFE_Van_Den_Abeele_10_11.pdf
- Van der Maren, J.-M. (1995). Méthodes de recherche pour l'éducation. Montréal : Presses de l'Université de Montréal.
- Vial, S. (2015). *Le design*. Paris : Presses Universitaires de France
- Vial, S. et Proulx, S. (2019). Éditorial. [Editorial]. *Sciences du Design*, 9(1), 7-9. <https://doi.org/10.3917/sdd.009.0007>
- Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A. et Pahl, A.-K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- Volstad, N. L. et Boks, C. (2008). Biomimicry—a useful tool for the industrial designer? Paper presented at the DS 50: Proceedings of NordDesign 2008 Conference, Tallinn, Estonia, 21.-23.08. 2008.
- Volstad, N. L. et Boks, C. (2012). On the use of Biomimicry as a Useful Tool for the Industrial Designer. *Sustainable Development*, 20(3), 189-199.
- Walker, S. (2011). *The spirit of design: objects, environment and meaning*: Earthscan publications.
- Waridel, L. (2017). Réfléchir autrement. In E. JFD (Ed.), *La transdisciplinarité et l'opérationnalisation des connaissances scientifiques*.
- Webster, K. (2013). What Might We Say about a Circular Economy? Some Temptations to Avoid if Possible. *World Futures*, 69(7-8), 542-554. <https://doi.org/10.1080/02604027.2013.835977>
- Wever, R. et Vogtländer, J. (2014). Design for the Value of Sustainability. In J. van den Hoven, P. E. Vermaas, & I. van de Poel (Eds.), *Handbook of Ethics, Values, and Technological Design: Sources, Theory, Values and Application Domains* (pp. 1-31). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213(3), 178-193.
- Zari, M. P. (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. *The SB07 NZ Sustainable Building Conference*.

Annexe 1 : Guide d'entretien

Avant de débiter l'entretien

- Faire un rappel de l'objectif de la recherche.
- Rappeler la durée approximative de l'entretien (45 min à 1h) et lui fournir une copie du guide d'entretien.
- Avant de démarrer l'enregistrement, expliquer qu'il est utilisé pour faciliter le travail d'analyse et qu'il sera anonyme. Demander au répondant de parler distinctement durant l'entretien.

Pendant l'entretien

Thèmes	Questions
Le biomimétisme	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pourriez-vous me raconter depuis quand vous vous intéressez au biomimétisme ? 2. Il y a eu une grande émergence du biomimétisme dans le contexte du développement durable au cours des dernières années. Quelle serait votre façon de définir le biomimétisme ? 3. D'après vous, comment l'inspiration de la nature peut-être une référence dans la recherche d'alternatives compatibles avec les principes du développement durable ? 4. Si vous avez à citer les 3 meilleurs exemples de produits conçus dans une optique du biomimétisme, quels seraient-ils et pourquoi ?
Le potentiel du biomimétisme dans une démarche de design de produits	<ol style="list-style-type: none"> 5. Selon vous, quels sont les avantages à avoir recours au biomimétisme en comparaison à d'autres approches en design de produits (ex. écoconception, cradle to cradle, etc) pour le développement des nouveaux produits ?
Mise en œuvre du biomimétisme dans le processus de développement de produits	<ol style="list-style-type: none"> 6. Décrivez-moi la façon dont vous avez mené votre dernier projet en lien avec le biomimétisme. 7. De façon générale, comment décririez-vous un projet de biomimétisme mené par un designer de produits ? Quelles seraient les principales étapes ? 8. Identifiez-vous des différences (et ressemblances) méthodologiques entre l'approche en biomimétisme et celle en design de produits ? Avez-vous, à l'occasion, eu recours à des ouvrages sur le biomimétisme pour guider/informer votre approche ? 9. La figure (en annexe) représente les principales étapes utilisées dans une démarche de design et de biomimétisme. Suite à une analyse exhaustive de la littérature, j'ai observé qu'il y avait un manque d'informations par rapport à l'étape « Réalisation » en ce qui concerne le processus de biomimétisme. Dans votre pratique, observez-vous ce vide ? Si oui, pensez-vous qu'il puisse s'agir d'un obstacle [pour les designers de produits ?] pour la mise en œuvre d'une démarche de biomimétisme dans l'industrie ? En tant que professionnel comment appréhendez-vous cette étape dans une démarche de biomimétisme ? Avez-vous développé votre propre « recette » ou votre façon de faire lorsque vous réalisez un projet

pour combler ce vide ? Si oui, comment procédez-vous ? Auriez-vous des commentaires ou des suggestions pour compléter la figure et le tableau comparatif ?

Limites de l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits

11. À travers votre expérience, avez-vous identifié des limites (freins) à l'utilisation du biomimétisme dans le processus de développement de produits ?
12. Quels sont les avantages ?

Barrières pour la mise en œuvre du biomimétisme dans un contexte industriel

13. En considérant le contexte industriel manufacturier, quelles sont les barrières à la mise en œuvre du biomimétisme ?
14. Connaissez-vous des exemples d'entreprises qui utilisent le biomimétisme pour développer leurs produits ?

L'avenir du biomimétisme

15. Selon vous, le biomimétisme présente-t-il un potentiel d'être plus largement utilisé en design de produits dans les prochaines années ? A-t-il un potentiel d'innovation important ?
16. En faisant appel à votre imaginaire, comment voyez-vous évoluer le biomimétisme dans un proche avenir ? Quelle serait son utilisation idéale ? Par qui ? Comment ? Dans quel contexte ?

Fin de l'entrevue

- Demander aux répondants s'il a des réponses sur lesquelles il souhaite revenir en vue d'apporter des précisions ou s'il a des questions avant de clôturer l'entrevue.
- Remercier le répondant pour sa participation.
- Demander s'il y a des commentaires qui pourraient améliorer la situation d'entrevue, les compétences de l'interviewer et les questions posées pendant l'entretien.

Annexe 2 : Taxonomie du biomimétisme



Creative Commons BY-NC
© 2013 Biomimicry 3.8 Institute
Version 6.0