

BiomimETRIC: développement d'un outil pour la conception biomimétique et application à l'étude de scénarios de mobilité urbaine

Par

Philippe TERRIER

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D

MONTREAL, LE 11 NOVEMBRE 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Philippe Terrier, 2021



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Emmanuel Raufflet, codirecteur
Département de management à l'École des hautes études commerciales de Montréal

M. Patrice Seers, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Levasseur, professeure
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Claudia Déméné, professeure
École de design, Faculté d'aménagement de l'université Laval

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17 SEPTEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible.

Antoine de Saint-Exupéry

Le fait que vous puissiez lire cette thèse est le résultat de millions d'années d'évolution et de sélection naturelle qui ont fait en sorte que notre espèce, *Homo sapiens* vit sur Terre aujourd'hui, et est douée de facultés spécifiques et hors du commun. Facultés qui lui ont, entre autres, permis de développer depuis quelques millénaires - courte période en comparaison des 3.8 milliards d'années depuis l'apparition de la vie - des sciences, des technologies et des concepts philosophiques pour comprendre le monde et dompter la « rudesse et surtout la noblesse » de la nature. La grande diversité des formes du vivant - la biodiversité - a permis à la nature et à la vie de s'adapter à l'environnement et à sa lente transformation permanente. Cette diversité constitue la clé de la résilience, cet équilibre dynamique en constante évolution avec son environnement.

Dépendant de ressources terrestres exploitées jusqu'à leur ultime limite ou encore inexplorées par endroit, la vie humaine sur Terre s'arrêtera probablement d'ici quelques millions d'années ou au plus tard dans deux milliards d'années, lorsque notre étoile, le soleil dans son ultime transformation, aura évaporé toute l'eau et transformé la Terre en un immense désert hostile à la vie (Barthélémy, 2021; Ozaki et al., 2021). La durabilité infinie n'existe donc pas. D'un point de vue anthropocentré, il est tout de même important, voire même indispensable, afin de continuer d'occuper la Terre encore quelques milliers d'années, de faire en sorte que le mode de vie d'*Homo sapiens* soit soutenable sur ces échelles temporelles. Cependant, les 500 derniers millions d'années ont été ponctués par cinq grandes extinctions, et la trajectoire que l'humanité empreinte actuellement pourrait faire en sorte qu'*Homo sapiens* précipite la sixième extinction, dont il sera auteur et victime. (Blanc et al., 2015).

Pour anticiper la suite de l'humanité, cornucopiens (Wikipédia, 2019c) et collapsologues (Wikipédia, 2019b) s'affrontent en ce XXI siècle, sur l'avenir de notre espèce et de son lieu de

vie, la Terre. D'un côté, les cornucopiens ont pour postulat que les innovations technologiques permettront à l'humanité de subvenir éternellement à ses besoins matériels. Ces innovations étant inévitablement sources de progrès et de développement. De l'autre côté, les collapsologues analysent l'effondrement des sociétés par une approche systémique basée sur les nombreuses études eschatologiques détaillant les problèmes climatiques, la raréfaction des ressources, les instabilités géopolitiques et le manque de malthusianisme économique qui conduiront à la disparition de l'humanité. Dans cette transition vers l'effondrement total, Homo sapiens devra accepter un changement profond et radical de son mode de vie, et s'adapter à un environnement qu'il aura perturbé, et qui lui sera plus hostile qu'il ne l'est actuellement (Bendell, 2018).

Entre les deux visions de la « suite des choses », de nombreux penseurs proposent des modèles de sobriété économique, mais également des modèles de société, des utopies ou des visions du possible qui dépassent une simple réforme du modèle économique afin de réduire les impacts sur l'environnement. La décroissance conviviale ou l'économie circulaire sont au nombre de ces nouvelles voies. Les ingénieurs, designers, architectes et tous les acteurs du développement technologique contribuent, eux aussi, à l'élaboration de nouvelles approches plus efficaces (faire la bonne chose) et plus efficientes (bien faire la chose) visant à utiliser moins de ressources et d'énergie pour atteindre une forme de suffisance. La quantification des impacts pour guider la décision, ou encore la conception biomimétique inspirée de la nature s'inscrivent dans cette perspective, et constituent des alternatives à explorer.

REMERCIEMENTS ET DÉDICACES

Je remercie sincèrement et profondément M. Mathias Glaus, directeur de cette thèse pour sa confiance, sa présence, sa disponibilité, sa rigueur, et pour son ouverture d'esprit qui m'a permis d'explorer de nombreux chemins de traverse.

J'adresse mes plus chaleureux remerciements, à M. Emmanuel Raufflet, codirecteur de cette thèse, pour ses apports significatifs aux aspects transversaux de ce projet, pour ses précieux conseils, d'autant plus pertinents qu'ils étaient guidés par le recul que je n'avais pas, et enfin pour sa générosité et la confiance qu'il m'a accordée.

Je mesure la chance et le privilège dont j'ai bénéficié de vous avoir, Mathias et Emmanuel, à mes côtés tout au long de cette belle aventure intellectuelle qui nous aura « occupée » pendant huit ans. Vous m'avez guidé et épaulé, avec beaucoup d'humilité et d'écoute, sans jamais imposer vos idées. Nos discussions et nos échanges, ainsi que vos conseils toujours avisés, m'ont permis de garder le cap vers l'objectif de la thèse.

Je remercie également mes amis et collègues Cédric Alinot, Idriss Ammara, Fernando Avendano, Claude Théoret, Hugues Langlois, David Marche qui m'ont souvent questionné sur l'avancement de mon projet, et avec qui j'ai surmonté bien des épreuves; Merci à tous ceux qui m'ont accompagné et encouragé pendant ces huit années.

Je dédicace cette thèse à :

Paul-Émile et Adélie, mes enfants que j'aime *grand comme l'infini*. Un jour de moi, il ne restera que vous; Vous donnez du sens à ma vie dans un monde qui en manque parfois;

Mélanie S. Mailhot, ma complice d'aventure, mon amour;

Maman, pour son amour et sa tendresse infinie à mon égard;

Mon père, pour les valeurs qu'il m'a transmises;

Papi Raymond qui m'a inspiré par sa grande sagesse;

Mamie Renée pour sa générosité sans limites et son mécénat musical;

VIII

Mon « amie » Nicole, ma belle maman, qui nous a laissé un amour des mots et des livres;
Monique Deviard, « ma mère adoptive », qui m'a encouragé à entreprendre cette aventure;
Ma famille de France et à celle du Saguenay que j'aime toujours retrouver;
Mon ami José Prades, personnage marquant de mon parcours intellectuel;
Mon ami Bernard Voyer pour toutes nos discussions polaires;
Ma collègue Natalia Nuño, codirectrice du Laboratoire d'ingénierie pour le développement durable de l'ÉTS, qui m'a encouragé bien souvent tout au long de ce projet, et qui nous a quitté ce printemps 2021.

BIOMIMETRIC : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL POUR LA CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE ET APPLICATION À L'ÉTUDE DE SCÉNARIOS DE MOBILITÉ URBAINE

Philippe TERRIER

RÉSUMÉ

Le biomimétisme, et plus spécifiquement la conception biomimétique encadrée par la norme ISO 18458, présente un fort potentiel d'innovation dans des domaines comme l'ingénierie, le design ou encore l'architecture. Cependant, ces approches puisant leur inspiration dans l'observation et la compréhension du vivant manquent de quantification. Cette faiblesse, en termes d'évaluation de la réelle performance biomimétique ou environnementale d'une solution, limite la diffusion et l'usage plus systématique de l'approche biomimétique dans les disciplines, comme l'ingénierie, qui mobilisent habituellement de nombreuses approches quantitatives.

L'objectif principal de cette thèse consiste à développer un outil quantitatif d'aide à la conception biomimétique, et à l'appliquer à l'évaluation de scénarios en mobilité urbaine, afin d'évaluer leur performance au regard des principes répondant aux différentes dimensions du biomimétisme. Pour atteindre cet objectif, cette thèse apporte trois principales contributions à l'avancement des connaissances.

La première contribution porte sur l'association des méthodes d'évaluation des impacts issues de l'analyse de cycle de vie (ACV) avec les dix principes de biomimétisme ou principes du vivant. Cette approche permet de réduire la subjectivité de la démarche actuelle d'évaluation biomimétique en proposant une mesure quantitative de la performance biomimétique d'une solution, d'un produit, d'un système ou d'un service.

La seconde contribution se présente sous la forme du développement de BiomiMETRIC, un outil de quantification de la performance biomimétique, qui bonifie la méthodologie de conception biomimétique en rendant la démarche de conception opérationnelle. En effet BiomiMETRIC quantifie les dix principes de biomimétisme grâce aux méthodes utilisées en ACV, en plus de proposer une liste de questions évaluées et pondérées, pour chaque principe de biomimétisme. Il en ressort une comparaison chiffrée permettant aux utilisateurs d'identifier les caractéristiques des options évaluées et d'éclairer le processus de sélection de l'option choisie.

La troisième contribution porte sur l'utilisation de l'approche innovante proposée par BiomiMETRIC, afin de comparer cinq scénarios de mobilité urbaine des personnes à travers une étude de cas associée au contexte des déplacements des usagers à l'heure de pointe sur l'Île de Montréal. Le scénario « Résilience Aléas » issu d'une approche systémique et prospective affiche le meilleur compromis en termes de mise en œuvre, et de performance biomimétique. « Résilience Aléas » qui propose un cocktail de mobilité collective, mobilité active et d'électrification des transports, présente une performance biomimétique plus élevée

et donc des impacts environnementaux systématiquement plus faibles que le scénario Statu Quo initial. L'outil BiomiMETRIC a permis de révéler une réduction au niveau de la consommation de matériaux (-75,7 %), de la demande en énergie (-72,1 %), de la consommation de ressources fossiles (-74,5 %), de la consommation d'eau (-55,0 %), des émissions de GES (-72,5 %), du cumul de substances toxiques (-72,9 %), ainsi que de l'occupation du sol (-68,2 %).

Destiné à tous ceux ayant un intérêt pour la conception biomimétique, tels que les designers, architectes ou ingénieurs, en complément à la norme ISO 18458, BiomiMETRIC apporte une réponse à la question : « *Comment évaluer quantitativement la performance de diverses alternatives afin de sélectionner celle ayant le meilleur potentiel environnemental et biomimétique?* ». L'utilisation de BiomiMETRIC permet de caractériser les options évaluées en regard des principes de biomimétisme, de quantifier la performance biomimétique d'une potentielle innovation, et enfin de faciliter le processus de prise de décision par les parties prenantes.

Mots clés: Biomimétisme, méthodologie de conception biomimétique, outil de conception en ingénierie, analyse de cycle de vie, mobilité urbaine durable.

BIOMIMETRIC: DEVELOPMENT OF A TOOL FOR BIOMIMETIC DESIGN AND APPLICATION TO THE STUDY OF URBAN MOBILITY SCENARIO

Philippe TERRIER

ABSTRACT

Biomimicry, and more specifically biomimetic design framed by the ISO 18458 standard, have strong potential for innovation in engineering, design or architecture. However, these approaches, drawing their inspiration from the observation and understanding of living things, lack quantification. This weakness in terms of evaluating the real biomimetic or environmental performance of a solution limits the dissemination and more systematic use of the biomimetic approach in disciplines that usually mobilize many quantitative approaches such as engineering.

The main objective of this thesis is to develop a quantitative tool to aid in biomimetic design, and to apply it to the evaluation of scenarios in urban mobility, in order to improve their sustainability. To achieve this objective, this thesis brings three main contributions to the construction of knowledge.

The first contribution consists of the association of impact assessment methods derived from life cycle analysis (LCA) with the ten principles of biomimicry or principles of life. This less subjective approach than the current assessment will ensure a quantitative measure of the biomimetic performance of a solution or product.

The second contribution comes in the form of the development of BiomiMETRIC, a tool for quantifying biomimetic performance, which improves the biomimetic design methodology by making the design process more operational. Indeed, BiomiMETRIC quantifies the ten principles of biomimicry thanks to the methods used in LCA, in addition to proposing a list of questions evaluated, for each principle of biomimicry. The result is a numerical comparison allowing the designer to select the best biomimetic options.

The third contribution concerns the use of the innovative approach proposed by BiomiMETRIC, in order to compare five scenarios of urban mobility of people through a case study associated with the context of users' trips during rush hour on the island. from Montreal. The "Resilience Aléas" scenario resulting from a systemic and prospective approach displays the best compromise in terms of implementation and biomimetic performance. "Résilience Aléas", which offers a cocktail of collective mobility, active mobility and transport electrification, has a higher biomimetic performance and therefore systematically lower environmental impacts than the initial Status Quo scenario. BiomiMETRIC revealed a reduction in the consumption of materials (-75.7%), in energy demand (-72.1%), in the consumption of fossil resources (-74.5%), in water consumption (-55.0%), in GHG emissions (-72.5%), in the accumulation of toxic substances (-72.9%), as well as land use (-68.2%).

Intended for all those with an interest in biomimetic design, such as designers, architects or engineers, in addition to the ISO 18458 standard, BiomiMETRIC provides an answer to the question: "How to quantitatively assess the performance of various alternatives in order to select the one with the best environmental and biomimetic potential?". The use of BiomiMETRIC will make it possible to characterize the options evaluated with regard to the principles of biomimicry, to quantify the biomimetic performance of an innovation, and finally to facilitate the decision-making process by the stakeholders.

Keywords: Biomimicry, Biomimetic methodology, engineering design tool, life cycle analysis, Sustainable urban mobility.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
1.1 Biomimétisme et éco-innovation	9
1.1.1 Origine et caractéristique du biomimétisme	10
1.1.2 Biomimétisme et biomimétique	13
1.1.3 Les dix principes de biomimétisme	14
1.1.4 Niveaux d'application du biomimétisme, domaines et exemples	15
1.1.5 Démarche de conception biomimétique: séquence, limites, contraintes ..	17
1.1.6 Discussion sur les principes de biomimétisme	22
1.1.7 Synthèse	25
1.2 Analyse de cycle de vie et quantification des impacts	26
1.2.1 Normes et étapes de l'analyse de cycle de vie	26
1.2.2 Méthodes d'évaluation des impacts utilisées en ACV	27
1.3 Mobilité urbaine et territoire	31
1.3.1 Analyse et compréhension du système de mobilité	31
1.3.2 Impacts systémiques de la mobilité urbaine	34
1.3.3 Les modes de transport: composants structurels de la mobilité	38
1.3.4 Pistes de solutions pour une mobilité plus durable	40
1.3.5 Prospective en termes de mobilité urbaine à Montréal	43
1.3.6 Perspectives au niveau de la mobilité urbaine	45
1.4 Synthèse du chapitre et ouverture	47
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE	49
2.1 Projet de recherche et contribution de la thèse	49
2.2 BiomiMETRIC : conception biomimétique et évaluation des impacts	51
2.2.1 Outils pour la mise en œuvre du projet de recherche	51
2.2.2 Association des méthodes d'impacts avec les principes biomimétiques : prémices et précisions	52
2.3 Analyse systémique et prospective pour la génération de scénarios de mobilité	53
2.3.1 Approche prospective simplifiée pour l'élaboration des scénarios	53
2.3.2 Approche biomimétique appliquée à la mobilité	54
2.4 Généralités sur l'application de la méthode de conception biomimétique	55
2.5 Principales contributions de ce projet de thèse	56
CHAPITRE 3 BIOMIMETRIC ASSISTANCE TOOL: A QUANTITATIVE PERFORMANCE TOOL FOR BIOMIMETIC DESIGN	59
3.1 Introduction	60
3.2 Context and Terminology in Biomimetics	62
3.2.1 Functions and Strategies of Living Organisms	62
3.2.2 The Principles of Living Organisms to Formalize Biomimicry	63
3.2.3 Biomimetic Principles from the Study of Living Organisms and Sustainable Ecosystems	64

3.3	Life-Cycle Assessment Method for Impact Evaluation	65
3.4	Methodological Approach	69
3.4.1	Dimensions of Biomimetic Eco-Innovation	69
3.4.2	Association of Environmental Impact Assessment Methods Used in LCA with the Principles of Living Organisms which Guide the Biomimetic Design	70
3.4.3	Development of BiomiMETRIC: Tool for Biomimetic Design.....	75
3.5	Results.....	77
3.5.1	Procedure for Using BiomiMETRIC	77
3.5.2	Using BiomiMETRIC: An Illustration	80
3.6	Discussion	83
3.7	Conclusion	84
3.8	Synthèse du chapitre	88

CHAPITRE 4 APPLICATION DE L'OUTIL BIOMIMETRIC À L'ÉTUDE DE SCÉNARIOS POUR UNE MOBILITÉ URBAINE BIOINSPIRÉE..... 91

4.1	Présentation détaillée des scénarios prospectifs de mobilité urbaine	92
4.1.1	Caractéristiques des scénarios d'étude de la mobilité.....	94
4.1.2	Unité fonctionnelle : base de comparaison des scénarios	94
4.1.3	Scénario Statu Quo Actuel.....	95
4.1.4	Scénario Transport Collectif.....	96
4.1.5	Scénario Transport Actif et Télétravail.....	96
4.1.6	Scénario Hybride Novateur.....	97
4.1.7	Scénario Résilience aux Aléas	98
4.1.8	Scénario Mobilité Low Tech	99
4.2	Méthodologie pour l'évaluation des scénarios avec BiomiMETRIC	104
4.2.1	Intégration du biomimétisme dans les scénarios: questions qualitatives	104
4.2.2	Procédure d'utilisation de BiomiMETRIC	105
4.3	Résultats de l'étude des scénarios de mobilité avec BiomiMETRIC	107
4.3.1	Performance biomimétique globale des scénarios.....	109
4.3.2	Comparaison des scénarios. Principe 1 : utiliser les matériaux avec parcimonie.....	113
4.3.3	Comparaison des scénarios. Principe 2 : utiliser l'énergie efficacement	114
4.3.4	Comparaison des scénarios. Principe 3 : ne pas épuiser les ressources..	116
4.3.5	Comparaison des scénarios. Principe 4 : s'approvisionner localement...	118
4.3.6	Comparaison des scénarios. Principe 5 : optimiser l'ensemble versus maximiser chaque composant	119
4.3.7	Comparaison des scénarios. Principe 6 : ne pas souiller son nid.....	120
4.3.8	Comparaison des scénarios. Principe 7 : rester en équilibre avec la biosphère	122
4.3.9	Comparaison des scénarios. Principe 8 : utiliser les déchets comme ressources	124
4.3.10	Comparaison des scénarios. Principe 9 : se diversifier et coopérer	125
4.3.11	Comparaison des scénarios. Principe 10 : s'informer et implanter des boucles de rétroaction	125

4.4	Recommandations d'un scénario de mobilité et discussion	126
4.5	Synthèse du chapitre	128
CHAPITRE 5 DISCUSSION		131
5.1	Synthèse des travaux de recherche	131
5.1.1	Synthèse des articles	131
5.1.2	Synthèse du projet de thèse	132
5.2	Innovation et particularité de l'approche proposée.....	132
5.2.1	Principes généraux	132
5.2.2	Intérêt et retombées potentielles de BiomiMETRIC	133
5.3	Limites de la démarche, bonifications de BiomiMETRIC et recommandations	134
5.3.1	Analyse d'incertitudes	134
5.3.2	Une démarche à bonifier	135
5.3.3	Amélioration de l'outil BiomiMETRIC.....	136
5.3.4	Recommandations.....	138
5.4	Épistémologie : construction du savoir en biomimétisme	138
5.4.1	Le biomiméticien et les bases de sa méthode	139
5.4.2	Intention biomimétique et perspective anthropocentrique.....	140
CONCLUSION.....		141
ANNEXE I DÉPLACEMENTS QUOTIDIENS À MONTRÉAL.....		145
ANNEXE II EXEMPLE DE CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE : ÉQUIPEMENT DE PROTECTION POUR CYCLISTES		147
ANNEXE III RÉSUMÉ DE L'ARTICLE BIOMIMÉTISME : OUTILS POUR UNE DÉMARCHE ÉCOINOVANTE EN INGÉNIERIE		153
APPENDICES		155
LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		161

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 Principales approches en biomimétisme.....	12
Tableau 1-2 Les dix stratégies de la nature, principes du vivant ou de biomimétisme	14
Tableau 1-3 Les niveaux d'application du biomimétisme.....	15
Tableau 1-4 Quelques domaines d'application du biomimétisme.....	16
Tableau 1-5 Principaux outils pour chaque étape de la conception biomimétique.....	18
Tableau 1-6 Présentation de quelques méthodes et catégories d'impacts	30
Tableau 1-7 Catégories de systèmes naturels pouvant inspirer le développement du système de mobilité urbaine.....	35
Tableau 1-8 Les objectifs de la mobilité durable.....	40
Tableau 3-1 Main impact assessment methods used for biomiMETRIC assistance tool and their association with the “Life’s Principles”	74
Tableau 3-2 Results matrix according to the evaluation and weighting of the questions in BiomiMETRIC.....	76
Tableau 3-3 Comparison of materials for a biomimetic architectural project to obtain the same thermal performance R.....	80
Tableau 4-1 Caractéristiques du système où s’encreront les scénarios	94
Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios.....	100
Tableau 4-3 Aléas envisagés et leurs impacts sur les parts modales des transports	103
Tableau 4-4 Matrice de résultats selon l'évaluation et la pondération des questions dans BiomiMETRIC.	105
Tableau 4-5 Questions qualitatives : utiliser les matériaux avec parcimonie.....	113
Tableau 4-6 Résultats quantitatifs: utiliser les matériaux avec parcimonie.....	114
Tableau 4-7 Questions qualitatives : utiliser l'énergie avec efficacité	114
Tableau 4-8 Résultats quantitatifs: utiliser l'énergie avec efficacité	115
Tableau 4-9 Questions qualitatives : ne pas épuiser les ressources	116

XVIII

Tableau 4-10 Résultats quantitatifs: ne pas épuiser les ressources	117
Tableau 4-11 Questions qualitatives : s’approvisionner localement	118
Tableau 4-12 Résultats quantitatifs: s’approvisionner localement	119
Tableau 4-13 Questions qualitatives : optimiser l'ensemble vs maximiser chaque composant.....	119
Tableau 4-14 Questions qualitatives : ne pas souiller son nid	120
Tableau 4-15 Résultats quantitatifs: ne pas souiller son nid.....	121
Tableau 4-16 Questions qualitatives : rester en équilibre avec la biosphère	122
Tableau 4-17 Résultats quantitatifs: rester en équilibre avec la biosphère	123
Tableau 4-18 Questions qualitatives : utiliser les déchets comme ressources.....	124
Tableau 4-19 Résultats quantitatifs: utiliser les déchets comme ressources.....	124
Tableau 4-20 Questions qualitatives : se diversifier et coopérer	125
Tableau 4-21 Questions qualitatives : s’informer et implanter des boucles de rétroaction ..	126
Tableau 4-22 Exemple de résultats pour l’évaluation du principe utiliser les matériaux avec parcimonie. Méthode ReCipe- Mineral resource Scarcity- kg Cu eq .	127

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0-1 Représentation du concept de développement durable avec hiérarchisation des constituantes Nature, Êtres humains, Économie.....	1
Figure 0-2 Schéma de la genèse de la thèse.....	7
Figure 1-1 Séquence pour la conception biomimétique	21
Figure 2-1 Résumé du développement et de l'utilisation de BiomiMETRIC	50
Figure 2-2 Positionnement de la mobilité bioinspirée dans une perspective de mobilité durable.....	55
Figure 2-3 Résumé schématique des contributions de cette thèse.....	57
Figure 3-1 The biomimetic design method.....	61
Figure 3-2 Dimensions proposed for grouping the principles of biomimetic.....	69
Figure 3-3 Algorithm for using BiomiMETRIC.....	79
Figure 3-4 Dashboard of the quantitative results given by BiomiMETRIC for each quantifiable biomimetic principle.	81
Figure 3-5 Average value of the notes to questions for each principle. Dashboard of the qualitative results given by BiomiMETRIC.....	82
Figure 4-1 Biomimétisme et conception biomimétique dans BiomiMETRIC	92
Figure 4-2 Résultats de l'évaluation qualitative des principes de biomimétisme.....	109
Figure 4-3 Performance biomimétique globale des scénarios de mobilité pour chaque principe de biomimétisme quantifiable	111
Figure 4-4 Évaluation des principes de biomimétisme quantifiables pour chaque scénario de mobilité	112
Figure 4-5 Tableau de bord des résultats quantitatifs donnés par l'outil pour chaque principe de biomimétisme pouvant être quantifié.....	128

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie
AMD	Avaibabiliy Minus Demand
AP	Acidification potential
ARTM	Autorité régionale de transport métropolitain
AWaRe	Available Water REmaning
CAB	Computer-Aided Biomimetics
CAD	Computer-Aided design
CED	Cumulative Energy Demand
CExD	Cumulative Exergy Demand
CF	Characterisation factor
CFC-11	Trichlorofluorométhane
CIRAIG	Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services
COV	Composés organiques volatils
CTUh	Comparative Toxic Unit for human
EPA	Environmental Protection Agency
EPD	Environmental Product Declaration
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GWP	Global Warning Potentials
ISO	Organisation Internationale de normalisation
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life-cycle assessment
MJ	Mégajoule
MTQ	Ministère des transports du Québec
NO _x	Oxydes d'azotes
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques

OD	Enquête Origine Destination
ODD	Objectifs de développement durable
PAF	Potentially Affected Fraction
PM2.5	Particulate Matter 2.5 microns
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PRG	Potentiel de réchauffement global
PRT	Personnal Rapid Transit
RTM	Régie des transports métropolitains
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SRB	Service rapide par Bus
TRACI	Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Environmental Impacts
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°C	Degré Celsius
Gt	Giga tonne
h	Heure
J	Joule
MJ	Méga Joule
kg eq CO ₂	Kilogramme de dioxyde de carbone équivalent
kg Cu eq	Kilogramme de cuivre équivalent
kg NO _x eq	Kilogramme d'oxyde d'azote équivalent
kg N eq	Kilogramme d'azote équivalent
kg P eq	Kilogramme de phosphore équivalent
kg SO ₂ eq	Kilogramme de dioxyde de soufre équivalent
kBq ⁶⁰ Co eq	kilogramme de Becquerel Cobalt-60 équivalent
km	Kilomètre
kW	Kilo Watt
kWh	Kilo Wattheure
m ³	Mètre cube
m ² / an	Mètre carré par an
ppm	Partie par million
t	Tonne
t/hab	Tonne par habitant

INTRODUCTION

Le biomimétisme, approche innovante inspirée des stratégies développées par le vivant, vise à élaborer des solutions performantes au plan environnemental. Ainsi, la conception biomimétique peut être appliquée à de nombreux domaines tels que l'ingénierie, l'architecture, de design, les matériaux, les procédés ou encore le transport et à la mobilité afin d'orienter les choix vers la voie de la durabilité.

Le modèle de représentation collective du développement durable, basé sur le diagramme de Venn présenté sur la Figure 0-1 (gauche), laisse supposer une égalité entre l'importance de chacune des trois dimensions du développement durable or, l'économie et la société sont soumises à l'existence de la Nature. Pour démontrer cette hiérarchie des systèmes, une représentation alternative présentée sur la Figure 0.1 (droite) montre que « sans nature, il n'y a pas d'humains, et sans humains, il n'y a pas d'économie » (Mediaterre, 2018). Cette nouvelle perspective positionne la Nature et le Vivant comme incontournables bases pour le développement de la société humaine, en parfaite adéquation avec les principes de biomimétisme (Benyus, 2011).

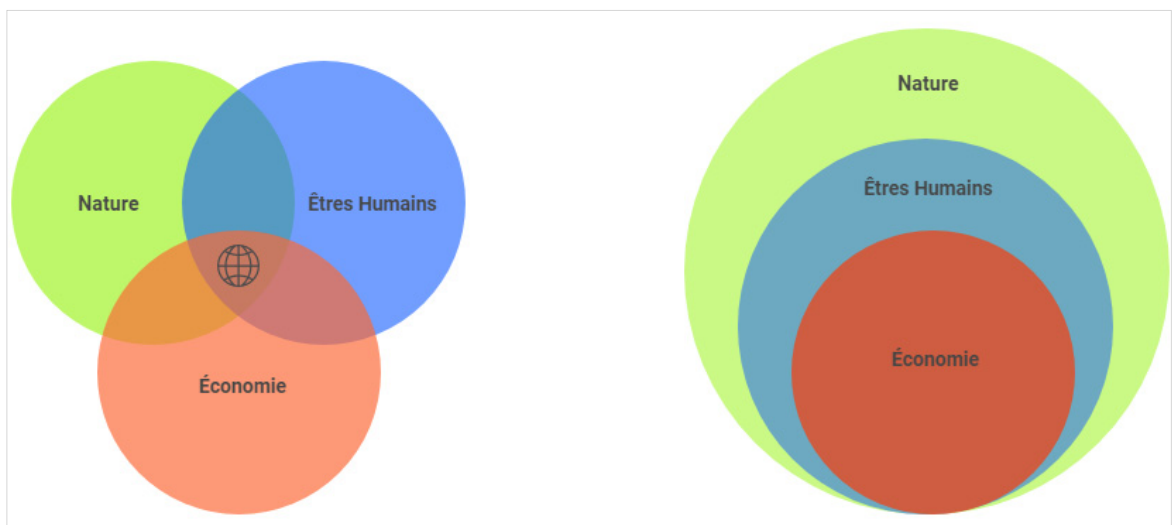


Figure 0-1 Représentations du concept de développement durable avec hiérarchisation des constituantes Nature, Êtres humains, Économie

La production de biens nécessite la transformation de ressources et génère des émissions dans l'air, l'eau et le sol. L'ingénieur doit donc essayer de réduire les impacts des technologies qu'il conçoit ou exploite, afin que les rejets ne dépassent pas la capacité d'absorption du milieu, et que les ressources ne soient pas consommées de manière non soutenable. Dans bien des projets, le développement économique est trop souvent réalisé au détriment de l'environnement, et tout le défi des nouveaux modèles économiques, comme l'économie circulaire, sera de réussir à découpler la croissance économique des impacts environnementaux (Arnsperger et al., 2016). Plusieurs outils visant à améliorer la performance en durabilité des projets sont disponibles, et l'écoconception, l'analyse de cycle de vie, ou l'écologie industrielle en sont quelques exemples. Dans cette panoplie de possibilités, le biomimétisme se positionne comme un nouvel outil (Ricard, 2015) qui, en s'inspirant de la nature et du vivant, permet de découvrir de nouvelles solutions pour la production de matériaux, d'énergie, la conception de produits ou de systèmes qui respectent les principes au cœur de la durabilité et de la résilience des écosystèmes. Les possibilités d'application sont multiples (Terrier, Glaus, et al., 2017).

0.1 Des enjeux environnementaux majeurs

Force est de constater que l'environnement naturel est fortement dégradé (PNUE, 2019), que les ressources naturelles deviennent plus rares et plus coûteuses à exploiter, que la biodiversité est en péril et que les événements climatiques extrêmes sont plus fréquents. L'Humanité est passée par des phases d'ignorance, de déni, de négociation, de réflexion, puis d'acceptation dans les dossiers liés au développement durable, mais plus particulièrement dans ceux touchant les enjeux environnementaux.

Ainsi, le rapport Rockström (Rockström et al., 2009b) présente les principales limites biogéochimiques de la planète, et le seuil à ne pas dépasser pour chacune. La situation est critique au niveau de la perte de biodiversité trop souvent victime des activités humaines. Il en va de même au niveau des changements climatiques, où la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère s'approche, année après année, du seuil de 450 ppm qu'il ne faudrait pas dépasser pour éviter des modifications majeures et irréversibles du climat (GIEC, 2014). Les

émissions de GES découlent de la combustion des carburants fossiles, de l'activité industrielle, du transport, de la production d'énergie et de l'agriculture. Rockström présente également des enjeux importants au niveau des perturbations du cycle de l'azote et du phosphore, présents en trop grande quantité dans l'environnement aquatique. Ces contaminants qui proviennent principalement des engrais utilisés en agriculture provoquent une eutrophisation des milieux aquatiques. Bien d'autres enjeux environnementaux découlent des activités humaines, comme la déforestation (Miyamoto, 2020), la présence de microparticules de plastiques dans les océans (McLachlan, 2019), la raréfaction des ressources à la base des nombreux métaux critiques et stratégiques, indispensables au développement des technologies numériques (Bihouix, 2014; De Guillebon et al., 2012) et tous constituent des défis majeurs pour le système social, économique et environnemental. Relever ces défis est un objectif prioritaire, et plusieurs outils et approches ont été mis en place, à divers niveaux dans de nombreux domaines ou secteurs d'activités, mais hélas les résultats positifs et encourageants se font toujours attendre.

Au cours de ce XXI^e siècle, les sociétés humaines devront faire face à plusieurs problèmes et défis fondamentaux dont voici quelques exemples. S'adapter à un climat changeant et à ses conséquences sur la production alimentaire, les infrastructures, la propagation de parasites; Nourrir neuf milliards de personnes sans recourir à l'usage massif d'engrais, de pesticides et d'eau, et sans contribuer à l'érosion des sols ou à la déforestation; Satisfaire l'augmentation de la consommation de ressources, due à l'augmentation de la population, sans épuiser les réserves et sans porter atteinte à l'environnement; Gérer l'eau douce (qualité, accès) et réduire la pollution des océans; Limiter l'érosion de la biodiversité et la désertification; Répartir les richesses plus équitablement et lutter contre la pauvreté; Faciliter l'accès à l'éducation pour tous et toutes; Garantir la santé et la salubrité du milieu de vie qu'une pandémie peut profondément perturber; Gérer les déchets, surtout les matières dangereuses, les déchets électroniques et nucléaires.

Les origines de ces défis sont nombreuses et trouvent racines dans des enjeux de gouvernance, de corruption des élites qui ont perdu de vue leur rôle de gardien du bien commun (ressources et capacités pour développer une approche éthique du vivre ensemble), dans des problèmes de

démographie, de surproduction/surconsommation matérielle, de dérives technologiques ou encore de valeurs collectives à redéfinir. Tous ces défis entraînent des pressions environnementales et des problématiques sociales majeures. Pour y répondre, un cadre d'action est proposé par l'Organisation des Nations Unies sous la forme de 17 objectifs de développement durable (ONU, 2015).

0.2 Le développement social comme objectif central

Pas de développement durable sans l'atteinte d'un bien être individuel et collectif, souvent résumé par l'expression insaisissable de développement social. Chacun recherche à s'épanouir, décider de son avenir, avoir les mêmes chances sans discrimination, vivre en santé dans une société équitable, juste et éduquée, protéger sa culture, sa langue, occuper un emploi qui donne un sens à son existence et qui permette de s'extirper de la pauvreté.

Les grands principes de développement durable proclamés à Rio en 1992 (ONU, 1992) ou encore les objectifs de développement durable (ODD) introduit par l'Organisation des Nations Unies en 2015 (Hugon, 2016) visent pleinement à concrétiser un développement social qui améliorera la qualité de vie du plus grand nombre. Même si à certains égards, des progrès notables ont été enregistrés, une trop grande partie de l'humanité ne satisfait toujours pas ses besoins fondamentaux. « La faim est en augmentation dans le monde et au moins la moitié de la population mondiale est privée de services de santé essentiels » (ONU, 2019b, p2).

0.3 Un modèle économique et ses dérives

Le système économique est constitué d'un ensemble de règles issues d'une construction sociale, et qui aujourd'hui est érigé en dogme supplantant même les lois de la nature et du vivant. Dans ce système, un des principes de base repose sur le concept d'utilité économique qui exprime la notion d'utilitarisme marchand, souvent associé au système capitaliste (Aubin, 2015). L'utilité consiste, pour l'agent économique, à maximiser son bien-être ou son bonheur dans la limite de ses contraintes budgétaires. Dans le modèle économique dominant, cela se traduit fréquemment par une consommation importante de biens, produits, ressources et de

services qui tous génèrent des impacts multiples, poussant notamment la capacité de support de l'environnement à sa limite. Ces impacts sont souvent externalisés, c'est-à-dire que les conséquences sociales et environnementales qui devraient normalement être intégrées dans le prix d'un bien sur le marché ne le sont pas (Varian, 2015). Cette approche économique d'externalisation n'incite pas à réduire les rejets et les impacts étant donné que ces derniers n'ont que peu de conséquences sur le prix des produits. L'économie capitaliste demeure donc linéaire, car il n'y a pour l'instant que peu d'intérêt, pour ce mode d'organisation, à tendre vers plus de circularité, à réduire l'extraction des ressources ou l'enfouissement des matières. Mais, des modèles économiques émergents ou réactualisés tels que l'économie circulaire, l'économie de la fonctionnalité ou encore la décroissance se présentent comme de réelles alternatives au système économique consumériste dominant, qui selon ses détracteurs, conduit inévitablement l'humanité dans une impasse environnementale (Abraham, 2019).

Dans le cadre d'une proposition de modélisation, Ehrlich et Holdren (Ehrlich, 1971) représentent par trois facteurs, la pression qu'exerce une société sur son environnement. On y trouve la démographie (*Population* = P), le niveau de consommation par habitant (A), l'état des technologies utilisées (*Technology* = T). L'impact environnemental (*Impact* = I) décrit par l'équation d'Ehrlich et Holdren est alors évalué par le produit des trois variables présentées précédemment. Toute tentative de réduction de l'impact environnemental passe inévitablement par une action sur l'un ou plusieurs des facteurs. La diminution de la taille de la population (P) est généralement taboue et la plupart des scénarios prévoient une population mondiale de neuf milliards d'individus en 2050. Les tenants de la durabilité faible rejettent l'hypothèse d'une réduction du niveau de consommation des plus riches, moteur de croissance économique. Pour eux, la clé repose sur l'amélioration de la technologie (T). Au contraire, les tenants de la durabilité forte, critiques de la réponse qu'apporte la technologie pour résoudre les problèmes, vont prioriser la diminution de la consommation des biens, services (A) et de l'énergie dans une logique de décroissance soutenable. Dans tous les cas, il faudra agir aussi vite que possible, mais aussi lentement que nécessaire afin de ne pas emprunter le raccourci des fausses bonnes solutions.

0.4 Objectif général et portée de la thèse

Le biomimétisme est une nouvelle approche pour l'éco-innovation dans plusieurs domaines, et la méthodologie de conception biomimétique poursuit son développement notamment en ingénierie, en architecture ou en conception de produits ou de projets (Terrier, Glaus, et al., 2017). Même si la conception biomimétique est maintenant balisée par la norme ISO18458 (ISO, 2015a), qui a contribué à renforcer sa crédibilité, la démarche demeure souvent très qualitative (Michel, 2015), et manque donc de quantification au niveau de l'évaluation de la performance biomimétique des solutions, rendant très difficiles leurs comparaisons. Ceci limite l'utilisation de la méthode dans certains secteurs des sciences appliquées tels que l'ingénierie.

L'hypothèse mise de l'avant dans cette thèse pose qu'en conjuguant l'approche de conception biomimétique avec les méthodes quantitatives utilisées lors de l'évaluation des impacts en ACV, il est possible de bonifier le processus de conception biomimétique. Cette bonification se matérialise sous la forme du développement d'un outil d'assistance à la conception, BiomiMETRIC, qui pour chacun des dix principes de base en biomimétisme – souvent qualifiés de « principes des écosystèmes durables » ou « principes du vivant » - associe une ou plusieurs méthodes d'évaluation des impacts issue de l'analyse de cycle de vie (Léonard et al., 2020). Cette démarche de conception biomimétique bonifiée permet de quantifier si possible chaque principe biomimétique pour mieux en évaluer la mise en œuvre. BiomiMETRIC rend plus opérationnelle la méthodologie de conception biomimétique présentée notamment dans la norme ISO18458. Ceci permet aux utilisateurs intéressés tels que les ingénieurs, architectes ou designers d'utiliser plus efficacement l'approche de conception biomimétique, et de générer des innovations plus performantes au plan environnemental. Un exemple simplifié de mise en œuvre de la démarche globale de conception biomimétique d'un équipement de protection pour cyclistes est également présenté en annexe II.

Afin d'illustrer l'utilisation de l'outil développé, une étude de cas portant sur l'analyse biomimétique de la mobilité urbaine a été réalisée à travers l'étude de scénarios élaborés avec

une approche systémique. Le transport et la mobilité urbaine - déplacements de personnes dans le cadre d'activités quotidiennes liées au travail, achats, études, loisirs, dans un périmètre urbain - génèrent des impacts environnementaux comme la pollution de l'air ou l'émission de gaz à effet de serre. À ces enjeux d'ordre environnemental, s'ajoutent les problématiques de sécurité et d'accessibilité universelle qui devraient être au cœur d'une mobilité urbaine durable dans des villes qui hébergeront 70 % de la population mondiale en 2050. L'analyse des résultats de l'étude conduite dans cette thèse permet d'évaluer et de comparer la performance biomimétique de scénarios de mobilité urbaine pour tendre vers une solution plus cohérente avec la dimension environnementale du développement durable. Pour être qualifiés de durables, ces scénarios de mobilité urbaine doivent également être évalués à l'aide d'indicateurs de performances pour les sphères sociales, économiques, culturelles, éthiques ou encore de gouvernance, mais toutes ces autres dimensions fondamentales du développement durable dépassent le champ d'études de cette thèse qui se concentre sur la dimension environnementale propre au biomimétisme. La figure 0-2 présente un schéma de la genèse de la thèse.

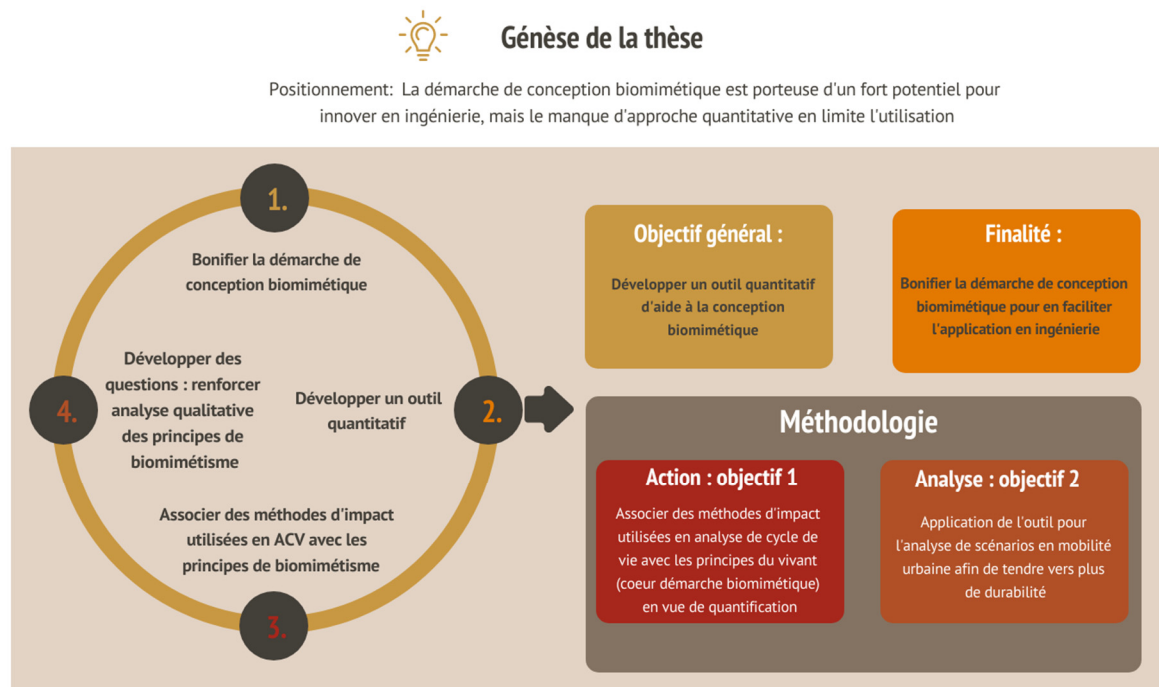


Figure 0-2 Schéma de la genèse de la thèse

0.5 Structure de la thèse et plan de travail

Le premier chapitre de cette thèse présente la revue de littérature dans le domaine du biomimétisme, de la conception biomimétique, de l'analyse de cycle de vie et de la mobilité urbaine. Un état de l'art portant, plus spécifiquement, sur l'application du biomimétisme en ingénierie est également présenté (Terrier, Glaus, et al., 2017).

Un second chapitre expose le projet de recherche, le positionnement de la thèse et ses objectifs.

Le troisième chapitre présente l'article publié dans la revue *Biomimetics*, qui traite du développement de BiomiMETRIC, outil d'assistance à la conception biomimétique. Cet outil, son développement et son application constituent le cœur du projet de thèse.

Le quatrième chapitre traite des résultats de l'utilisation de BiomiMETRIC pour l'analyse des scénarios en mobilité urbaine afin de sélectionner ceux présentant la meilleure performance environnementale.

Un chapitre est consacré à la discussion, aux limites et recommandations d'amélioration pour l'outil BiomiMETRIC. Ce chapitre analyse également les retombées et applications potentielles de l'outil développé.

Une dernière section consacrée à la conclusion et aux recommandations globales terminera ce document.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce premier chapitre présente une revue de littérature principalement dans le domaine du biomimétisme et de la conception biomimétique. Compte tenu des liens du projet avec le domaine de l'analyse de cycle de vie et de la mobilité urbaine, une revue de la littérature plus sommaire couvrira également ces sujets.

Le vivant relève des défis d'adaptation continue depuis 3.8 milliards d'années, et un nouveau rapport à la nature qui se pose en modèle plutôt qu'en unique fournisseur de ressources pourrait être porteur d'innovations. Dans une période de transition environnementale, le biomimétisme invite les chercheurs ainsi que les différents professionnels comme les ingénieurs, designers, urbanistes, architectes à s'inspirer de la nature et du vivant, formidable bibliothèque d'innovations basées sur des principes de sobriété, de circularité, d'efficacité et de minimisation des impacts. Le vivant constitue donc un exemple reconnu de soutenabilité que l'approche biomimétique invite à imiter (Kamili, 2019). Cependant, le biomimétisme peut être vu sous l'angle d'une posture utilitariste et anthropocentrée (Johnson, 2011), qui met l'accent sur la valeur d'usage du vivant et de la biodiversité au service du système consumériste dominant. Pour d'autres au contraire, le biomimétisme est un modèle pour une intégrité écologique planétaire qui pave la voie à une éthique environnementale bio-inclusive, compatible avec le système techno-industriel moderne (Mathews, 2011).

1.1 Biomimétisme et éco-innovation

La démarche de conception biomimétique propose d'imaginer des solutions à des problèmes en s'inspirant de la nature et du vivant. Cette section présente ainsi les origines du biomimétisme, les fondements théoriques de cette approche ainsi que la méthodologie de conception biomimétique.

Le biomimétisme permet de générer des éco-innovations ou des innovations dites de rupture lors du processus de conception d'un produit (Commissariat général au Développement durable, 2012; Terrier, Glaus, et al., 2017). L'entreprise qui innove se démarque, s'approprie habituellement des parts de marché, se développe et croît. L'innovation, processus d'amélioration continue, de génération d'idées nouvelles et originales, constitue d'ailleurs un des principes fondamentaux en ingénierie durable. Dans ce contexte la démarche de conception biomimétique se pose en alternative aux approches classiques de conception de produits, peu écologiques, faisant largement appel à des ressources non renouvelables.

Dans cette perspective, le biomimétisme constitue un retour à un paradigme délaissé, basé sur l'observation de la nature, laboratoire de recherche et développement établi depuis 3.8 milliards d'années, et qui vise à inspirer les innovations humaines (Bar-Cohen, 2006). En effet, l'Homme s'est très souvent inspiré de la nature pour son développement technologique. Cependant, depuis la révolution industrielle, la nature était seulement considérée comme un fournisseur de ressources, de matériaux et d'énergie. La compréhension du génie de la nature n'est seulement possible que depuis quelques siècles, grâce à la science qui permet de comprendre les principes qui gouvernent le vivant en termes de structures, de processus, de stratégies, de fonctions. Le biomimétisme invite dès lors à considérer la nature comme un modèle et un mentor inspirant pour innover (Terrier, Glaus, et al., 2017). Comme le dit Idriss Aberkane « La nature est une bibliothèque, lisons-la au lieu de la brûler. » (LePoint, 2017).

1.1.1 Origine et caractéristique du biomimétisme

Le terme biomimétisme provient du grec « bios » qui signifie « vie » et « mimesis » voulant dire imitation. Ce terme a été élaboré par Otto Herbert Arnold Schmitt en 1969 (J. F. V. Vincent et al., 2006) et visait à décrire un mode d'exploration du vivant afin d'y trouver des solutions aux nombreux problèmes auxquels notre civilisation fait face. Initialement appliqué au domaine biomédical, le biomimétisme permet de générer des solutions innovantes dans bien des secteurs comme en ingénierie, que ce soit dans le domaine des matériaux, des équipements de transport ou encore de l'intelligence artificielle (Bar-Cohen, 2005).

Les conditions nécessaires à la vie résultent d'une série d'échanges entre les organismes et leur milieu. Le vivant répond à certaines caractéristiques spécifiques, telles que la respiration ou l'échange de gaz, la nutrition, l'excrétion, la reproduction, la réaction aux stimulations extérieures, la croissance, éventuellement la locomotion, mais surtout le vivant possède une capacité de mutation qui permet l'adaptation et donc l'évolution. C'est là, sa caractéristique fondamentale (Bely et al., 2008). Pour évoluer et s'adapter à leur environnement local, les écosystèmes misent sur la biodiversité qui est une des clés de leur résilience. Plus la diversité est élevée, les interactions nombreuses, la coopération importante, et plus le système est efficace pour assurer sa fonction malgré les changements imprévisibles de l'environnement extérieur. Stimulés par les contraintes locales (climatiques, géographiques, géologiques...), les systèmes naturels développent des stratégies de coopérations, voire de relations symbiotiques. Les organismes s'attribuent des niches non concurrentes. Lorsqu'une niche est partagée, l'allocation des ressources s'opère sans affrontements énergivores, de sorte que les richesses d'un habitat sont réparties de façons optimales. Enfin, les écosystèmes vivant en relation les uns avec les autres forment une boucle fermée sur leur cycle de vie global. Les éléments d'un écosystème sont donc interconnectés et dépendants les uns des autres. En adaptant la forme à la fonction de l'organisme, le vivant construit sur mesure avec le strict minimum de ressources (Benyus, 2011). De plus, les espèces vivant à la surface de la Terre transforment les matériaux dont elles ont besoin à faible pression et faible température (Durand et al., 2012).

Dans le cadre d'un projet, ou du développement d'un produit, une approche biomimétique invite les concepteurs à s'informer sur l'utilisation des ressources et de leurs impacts au plan environnemental, afin de ne pas surconsommer ou de générer des impacts non soutenables (Terrier, Glaus, et al., 2017). Si des substances toxiques existent dans le vivant, toutes les molécules toxiques sont dégradables assez rapidement. En outre, les organismes vivants ne les produisent qu'en cas de besoin, afin de ne pas endommager l'environnement et de respecter sa capacité d'absorption et de support. Le vivant utilise les déchets comme ressources. Dans le cadre d'une approche biomimétique en entreprise, utiliser les rejets comme intrant pour la fabrication d'un produit, coopérer entre entreprises mettre en place des démarches d'écologie industrielle pour améliorer la circularité, sont autant de pistes à explorer. L'économie circulaire

préconise également un bouclage des flux d'énergie et de matière comme cela est généralement réalisé au sein des écosystèmes (Ricard, 2015). Les principales approches lors de la mise en œuvre d'une démarche biomimétique sont scindées en catégories nommées la bio-assistance, la bio-inspiration et l'éco mimétisme ou la bionique (Durand et al., 2012). La dénomination utilisée a souvent suscité des discussions et, dans le but de définir une base commune et une cohérence de la terminologie biomimétique, la norme ISO 18458 « *Biomimétique - terminologie, concepts et méthodologie* » (ISO, 2015) précise plusieurs concepts dont les principaux sont décrits dans le tableau 1-1.

Tableau 1-1 Principales approches en biomimétisme

Tiré et adapté de ISO 18458 : 2015

Nom de l'approche	Mode de mise en œuvre	Définition selon ISO 18458	Objectif	Champs d'application
Bio-inspiration	S'inspirer du monde du vivant	Approche créative basée sur l'observation des systèmes biologiques	Créer de nouveaux objets ou procédés	Design, architecture et matériaux
Bio-assistance ou biotechnologie	Utiliser des organismes vivants ou des molécules d'origine biologique	Biotechnologie : Application de principes scientifiques et techniques pour convertir des substances à l'aide d'agents biologiques	Fournir des biens et des services	Agroécologie, enzymes catalytiques, industrie chimique
Éco-mimétisme	Étudier le fonctionnement des écosystèmes	Terme non défini spécifiquement	Reproduire les conditions et avantages des écosystèmes	Urbanisme, ingénierie
Bionique	S'inspirer du monde du vivant	Discipline technique visant à reproduire ou remplacer des fonctions biologiques par des équivalents électroniques et/ou mécaniques	Développer des systèmes non biologiques technologiquement applicables en ingénierie	Robotique, biomécanique, capteurs bio-inspirés

1.1.2 Biomimétisme et biomimétique

Deux principaux cadres opérationnels ont été élaborés pour la conception biomimétique. D'une part, deux normes internationales ont été publiées :

- 1) ISO 18458 (ISO, 2015a), Biomimetics - Terminology, Concepts and Terminologies, qui fournit un cadre pour la terminologie biomimétique et une méthodologie;
- 2) ISO 18459 (ISO, 2015b), Biomimétisme - Optimisation biomimétique, qui spécifie les fonctions et les domaines d'application des méthodes d'optimisation biomimétique pour prolonger la durée de vie et réduire la masse des composants.

D'autre part, le Biomimicry Institute a proposé une séquence de conception biomimétique (Biomimicry Institut, 2016) recommandant de consulter la base de données Ask Nature (Biomimicry institut, 2015a) durant le processus de conception. Cette base de données est accessible gratuitement via un site internet éponyme qui permet de découvrir les organismes vivants et leur mise en application des fonctions et stratégies du vivant. Ask Nature constitue une source d'inspiration pour la conception biomimétique. Cependant, la difficulté pour les néophytes dans le domaine du biomimétisme est souvent de savoir quoi et comment chercher dans la base de données Ask Nature. La norme ISO 18458 (ISO, 2015a) présente une définition des concepts de biomimétisme et de biomimétique qu'il est judicieux de différencier. En premier lieu, le biomimétisme est une philosophie et une approche conceptuelle interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable, avec une emphase portée sur la dimension environnementale du concept. La biomimétique, pour sa part, est une démarche de coopération interdisciplinaire entre la biologie, 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, du transfert et de l'application de ces modèles à la solution. La biomimétique ou conception biomimétique, initialement proposée par le Biomimicry Institut est donc une méthode opérationnelle aux étapes structurées (Biomimicry Institut, 2016) et encadrées par la norme ISO 18458 (ISO, 2015a).

1.1.3 Les dix principes de biomimétisme

Le Biomimicry Institut présente dix stratégies ou principes de la nature (Biomimicry Institut, 2015b) qui assurent la survie des écosystèmes. La majorité de ces principes sont similaires à ceux énoncés par Janine Benyus (2011) dans son ouvrage consacré au biomimétisme. Ces stratégies ou principes sont présentés dans le tableau 1-2.

Tableau 1-2 Les dix stratégies de la nature, principes du vivant ou de biomimétisme

Stratégies ou principes du vivant	Description
Utiliser les déchets comme ressources	Principe mis en œuvre en écologie industrielle. Les extrants d'une entreprise deviennent les intrants d'une autre. Fonctionnement en circuit presque fermé.
Se diversifier et coopérer	Permet d'augmenter la résilience ou l'efficacité d'une entreprise. Exemple : collaboration entre entreprises pour assurer le recyclage en fin de vie de leurs produits, coopération plutôt que de compétition.
Capter et utiliser l'énergie avec efficacité	Prix de l'énergie et impacts environnementaux liés à son utilisation incitent au développement de produits ou services plus écoénergétiques.
Optimiser l'ensemble plutôt que maximiser chaque composant	Principe qui incite à privilégier la qualité des produits plutôt que la quantité. Les impacts environnementaux sur cycle de vie seront réduits.
Utiliser les matériaux avec parcimonie	Principe d'écoconception. Réduction de l'impact environnemental.
Ne pas souiller son nid	En industrie, cela se traduit par la mise en place d'un plan de prévention de la pollution ainsi qu'en évitant d'utiliser des produits chimiques générant des polluants persistants dans l'environnement.
Ne pas épuiser les ressources	Exploiter principalement des ressources renouvelables ou prélever les ressources non renouvelables à un taux inférieur à celui du développement de solutions de substitution.
Maintenir un équilibre dynamique avec la biosphère	Principe au cœur de la persistance des écosystèmes au sein desquels les espèces vivantes ne prélèvent et ne rejettent que dans la limite du maintien des conditions de vie. Il est impératif de respecter la capacité de support de l'environnement en n'émettant pas plus que ce qui peut être absorbé.
S'informer et partager l'information.	Connaître l'impact environnemental des produits et services ou la performance environnementale de l'entreprise afin d'agir de façon appropriée pour réduire les dommages. Écoconception ou gestion quotidienne par la mise en place d'un système de gestion environnementale de type ISO 14001.
S'approvisionner localement	En industrie, cette stratégie permet bien évidemment de limiter les impacts du transport, mais également de soutenir l'économie locale.

Ces dix principes tirés de l’observation du processus de sélection naturelle et adoptés par tous les écosystèmes naturels matures sont passés à travers l’épreuve du temps, et ont donc fait leur preuve au cours de l’évolution du vivant depuis 3.8 milliards d’années. Ces principes de biomimétisme peuvent être appliqués dans de multiples domaines notamment en ingénierie, en design, en architecture ou en industrie d’une manière générale.

1.1.4 Niveaux d’application du biomimétisme, domaines et exemples

Dubé et Etcheverry (2012) explicitent les trois principaux niveaux auxquels s’opère l’approche biomimétique, soit la forme, le processus et le système (R. Dubé et al., 2012). Le niveau correspondant à l’imitation des systèmes ou des écosystèmes est le plus avancé et le plus complet, mais également le plus exigeant et complexe à implanter. Le tableau 1-3 dresse une présentation sommaire des niveaux d’application du biomimétisme.

Tableau 1-3 Les niveaux d’application du biomimétisme

Niveaux de biomimétisme	Description	Exemple
Forme ou surface	S’inspirer et imiter les formes retrouvées dans la nature	Conception du « nez aérodynamique » du train haute vitesse japonais Shinkansen inspiré de la forme du bec du martin-pêcheur.
Processus ou fonction	Observer comment la nature fait pour « réaliser une fonction » afin de l’imiter	La climatisation naturelle des termitières a inspiré l’architecte Mike Pearce concepteur de l’immeuble à bureaux Eastgate à Harare au Zimbabwe qui utilise le même processus de circulation ascendante naturelle de l’air.
Écosystémique	Imiter les systèmes de la nature, leurs interrelations et la coopération entre eux	Création de parcs industriels visant la « symbiose ou l’écologie industrielle ». La Ville de Kalundborg au Danemark et son parc industriel bâti au début des années 1990, sans être le premier exemple de symbiose industrielle, en est tout de même une parfaite illustration. La coopération, le recyclage et l’échange de flux de matière ou d’énergie ont permis aux entreprises basées sur le parc industriel de minimiser leur impact environnemental en améliorant leur productivité.

Dans le but d'exposer une partie de ce vaste champ de possibilités, le tableau 1-4 présente, de manière non exhaustive, quelques domaines d'application du biomimétisme.

Tableau 1-4 Quelques domaines d'application du biomimétisme

Domaines d'application	Exemples et illustration
Matériaux bio-inspirés	Matériaux aux propriétés hydrodynamiques similaires à la peau de requin. Matériaux auto nettoyants hydrophobes inspirés du lotus (Bhushan, 2009)
Aérodynamisme appliqué au transport	Train Shinkansen développé par West Japan Railway Company inspiré du bec du martin-pêcheur (Bhushan, 2009) permettant une diminution des forces et bruits aérodynamiques, et de 15 % la consommation énergétique.
Énergie éolienne	L'entreprise Whale Power (Whalepower, 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 (Quinn et al., 2010).
Photosynthèse artificielle	Inspirée de la photosynthèse de plantes, les cellules photosensibles développées par Sun Catalytix (Ojo et al., 2011) sont munies de catalyseurs électrolysant l'eau en hydrogène et oxygène lors de l'exposition au rayonnement solaire.
Énergie hydrolienne	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.
Sécurité appliquée au transport	Le véhicule Eporo développé par Nissan 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 vise une diminution des accidents et la congestion routière.
Agriculture	L'éco-mimétisme vise la création d'écosystèmes agricoles durables avec la mise en œuvre de pratiques telles que la polyculture associée à l'élevage ou la conservation des habitats (Durand et al., 2012).
Organisation de processus industriels	L'écologie industrielle ou l'économie circulaire (Benyus, 2011) sont des exemples de biomimétisme où le fonctionnement d'un écosystème avec ses interactions et ses cycles « fermés » est appliqué aux relations entre entreprises

Pour tous les niveaux de mise en œuvre du biomimétisme, il existe des stratégies ou principes fréquemment observés dans la nature, et qui sont à la base de la persistance des écosystèmes. Ces stratégies sont à considérer lors de l'application de la démarche biomimétique dans le

processus de conception, et elles ont été présentées dans la section précédente afin d'inspirer les designers, ingénieurs et autres professionnels.

Les travaux de Durand et al (2012), ont mis en évidence de nombreuses pistes d'application du biomimétisme dans la transition vers une économie verte. De plus, le livre de Benyus (2011) expose plusieurs exemples d'application du biomimétisme ainsi que les domaines où le développement de solutions biomimétiques est le plus actif. Plusieurs applications du biomimétisme pour le développement de réseaux de transport ont déjà été proposées (Bibard, 2012; Maiorano, 2013). Ainsi les myxomycètes, organismes unicellulaires ressemblant à des champignons sans en être, se déplacent de manière efficace en quête de nourriture. L'efficacité de leur déplacement a été modélisée pour définir des voies de communication optimales tant à Tokyo, qu'aux États-Unis ou au centre-ville de Montréal. Malgré quelques exemples porte-étendard en conception biomimétique, le processus demeure hautement complexe et s'inscrit pour l'instant comme une exception plutôt qu'une norme.

1.1.5 Démarche de conception biomimétique: séquence, limites, contraintes

Deux approches sont possibles pour implanter une démarche de conception biomimétique (ISO, 2015a). Tout d'abord, l'approche « attrait technologique » qui est menée par le problème d'ingénierie et qui va explorer le monde de la biologie pour y trouver des solutions. L'approche « poussée biologique », menée par les découvertes dans le domaine biologique, tente pour sa part d'y associer les défis rencontrés en ingénierie (Salgueiredo, 2013). Les deux approches demeurent, cependant, conceptuelles et peu de détails sont disponibles quant à leurs mises en œuvre.

Plus de 40 outils sont disponibles (Kruiper et al., 2018; J. F. Vincent, 2016; Wanieck et al., 2017) pour faciliter la conception biomimétique, centrée principalement sur les étapes d'identification et de transposition des modèles biologiques aux applications technologiques. Le tableau 1-5 présente quelques outils pour chaque étape de la conception biomimétique, qui elle sera détaillée dans la suite de cette section. Plusieurs outils permettent d'explorer et de

découvrir des solutions mises en œuvre dans la nature pour relever des défis d'adaptation. Certains sont basés sur les « Computer-Aided Biomimetics (CAB) » logiciels développés pour l'intégration des connaissances de la biologie en ingénierie afin de faciliter la recherche de solutions (Chakrabarti et al., 2017; Chayaamor-Heil et al., 2018; Wanieck et al., 2017).

Tableau 1-5 Principaux outils pour chaque étape de la conception biomimétique

Étape de conception biomimétique	Outils utilisables	Force- Faiblesse
1- Analyse du contexte et identification claire du problème	Le bon sens	Spécifique à l'équipe de conception
2- Définition de la fonction du produit ou du service à concevoir	Le bon sens	Spécifique à l'équipe de conception
3-Découverte des fonctions et stratégies mises en œuvre par les organismes vivants pour atteindre une fonction similaire	Base de données Ask Nature (asknature.org) Taxonomie.	Accès libre. Nécessite quelques connaissances de base en biologie
4- Compréhension et résumé des principes naturels pour en faciliter la transposition	Le bon sens	Spécifique à l'équipe de conception
5- Abstraction ou généralisation des fonctions découvertes afin de « sortir le vivant du portrait » pour implanter les principes dans le processus de design	Modélisation fonctionnelle utilisée en biologie (Shu et al., 2007)	Requiert de très bonnes connaissances en biologie. Difficulté de transfert des concepts
6- Application ou émulation et prototypage des principes naturels sélectionnés	Outils CAD (Fusion 360, Solidworks...)	Requiert des connaissances logiciels
7- Évaluation de la performance biomimétique du prototype en le confrontant aux principes de biomimétisme	Principes qualitatifs de biomimétisme	Manque de quantification – Prise de décisions arbitraire
8- Test et validation finale de la solution (Performance globale en termes de DD. Étape non prescrite par ISO 18458, mais bonifie la démarche)	Outils ACV, outils socio-économiques	Expertise de pointe - Accessibilité

Lors de la conception biomimétique, il est nécessaire de considérer la fonction du produit afin de découvrir, dans la base de données, ce que la nature fait pour réaliser cette fonction, et quelle stratégie le vivant a mis en place pour y parvenir. Ask Nature permet, par exemple, de poser la question « *comment la nature fait pour déplacer l'air, pour refroidir ?* », mais n'apporte pas de réponses à la question « *comment la nature fabrique un ventilateur ?* » La base de données Ask Nature vise à fournir des sources d'inspiration aux concepteurs plutôt que d'apporter une réponse opérationnelle sur la conception d'une solution.

La séquence de conception biomimétique, décrite dans la norme ISO 18458 (ISO, 2015a), et par le Biomimicry Institut (Benyus, 2011), est scindée en huit étapes présentées ci-dessous :

- 1) Analyse du contexte et identification claire du problème. Le concepteur devra aborder le problème à résoudre sous des angles différents, sans privilégier inconsciemment une solution à priori.
- 2) Définition de la fonction du produit ou du service à concevoir. Cette fonction devra être précisée et clarifiée avec plusieurs mots clés, car cela facilitera la transposition au domaine naturel et la recherche dans la base de données.
- 3) Découverte des fonctions et stratégies mises en œuvre par les organismes vivants pour atteindre une fonction similaire à celle qu'il faut recréer. En biomimétique, une fonction (Biomimicry Institut, 2017) d'un système naturel est une adaptation qui aide le système à survivre et à prospérer. Une stratégie biologique est une caractéristique, un mécanisme ou un processus qui exécute une fonction pour un organisme vivant. La fonction à atteindre est au cœur du processus de conception biomimétique. Pour découvrir de potentiels modèles naturels, le concepteur observera les fonctions dans le vivant et la nature, et cela grâce à la base de données Ask Nature (Biomimicry Institut, 2012) ou avec le concours d'un biologiste.
- 4) Compréhension et résumé des principes naturels découverts pour en faciliter la transposition ou l'imitation. Sélection des « organismes candidats » potentiels et optimaux repérés dans la base de données.

- 5) Abstraction ou généralisation des fonctions découvertes afin de « sortir le vivant du portrait » pour rendre les principes applicables dans le processus de design ou dans la solution à développer. Une activité remue-méninges relative aux applications des principes naturels observés dans la base Ask Nature est réalisée. Par exemple, si la carapace de la tortue s'avérait intéressante pour l'absorption de l'énergie d'un impact, elle ne serait pas directement utilisée pour réaliser cette fonction, mais il s'agira de comprendre pourquoi cette carapace est appropriée à la réalisation de la fonction (surface, matériaux...).
- 6) Application ou émulation et prototypage des principes naturels sélectionnés. Une fois les principes naturels repérés, compris et sélectionnés, il faut maintenant les mettre en application, puis simuler ou tester les stratégies de la nature sur un prototype.
- 7) Évaluation de la performance biomimétique du prototype en le confrontant aux principes de biomimétisme régissant les écosystèmes durables. Au cours de cette étape, il est préconisé d'analyser la conformité de la solution développée, de confronter le prototype conçu et testé par rapport aux « principes du vivant » (Principle-Biomimicry-Institut, 2012) qui exposent les stratégies utilisées par les espèces pour vivre, se développer, et qui régissent les écosystèmes durables. Ainsi, les espèces vivantes qui évoluent pour survivre, sont adaptées et agissent localement avec responsabilité, sont efficaces au plan énergétique, assurent une gestion durable des ressources et des déchets, utilisent une chimie à base d'eau, sont résilientes et adaptées aux conditions évolutives.
- 8) Test et validation finale. Si la solution est conforme aux principes du vivant elle pourrait être retenue pour la conception finale. À l'issue de cette étape, le problème initial devrait donc être au moins partiellement résolu par l'approche biomimétique suivie. Une analyse de cycle de vie pourrait quantifier les impacts environnementaux de la solution. Cependant, les impacts socio-économiques mériteraient également d'être analysés afin de s'assurer de la pertinence de la solution et de sa conformité avec les trois principaux axes du développement durable.

La figure 1-1 présente la séquence à suivre pour une approche de conception biomimétique.

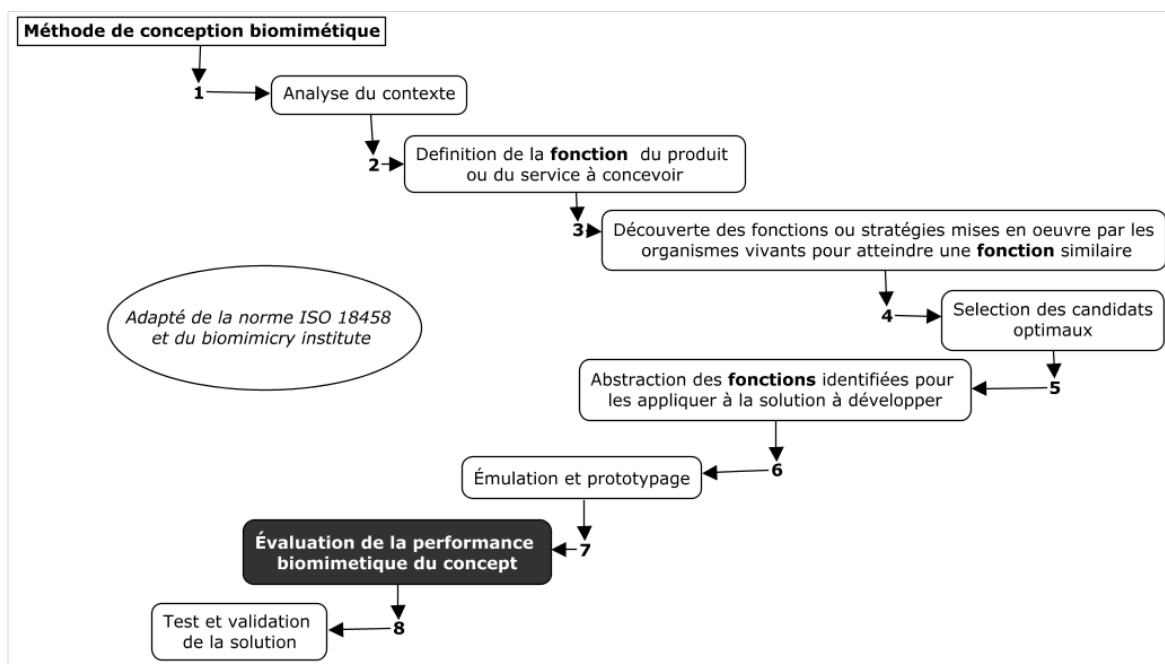


Figure 1-1 Séquence pour la conception biomimétique

- Limites et contraintes de la conception biomimétique

Malgré la disponibilité de normes, telles qu'ISO 18458 (ISO, 2015a), et les informations exhaustives proposées par le Biomimicry Institute (Benyus, 2011), la méthode de conception biomimétique demeure en cours d'élaboration et l'utilisation de ces normes est assez difficile dans des domaines tels que l'ingénierie, le design ou l'architecture. En effet, cette approche présente des faiblesses et des limites (Terrier, Glaus, et al., 2017), principalement à la septième étape de la démarche de conception qui porte sur l'évaluation des performances biomimétiques, car aucune des approches ne fournit d'outil quantitatif pour mesurer la performance biomimétique des solutions développées. L'approche est souvent qualitative, et la majorité des publications se concentrent sur la bio inspiration et les solutions technologiques qui en découlent. Très peu d'articles traitent d'une démarche biomimétique utilisée en ingénierie mettant l'accent sur la quantification des performances biomimétiques. De plus, aucun outil n'est encore disponible pour évaluer le degré d'intégration du biomimétisme dans les solutions développées (Wanieck et al., 2017).

1.1.6 Discussion sur les principes de biomimétisme

Les trois premiers principes de biomimétisme invitent à réfléchir sur la consommation de ressources que ce soit sous forme de matériaux ou d'énergie. L'espèce humaine occupe une place particulière au niveau de la transformation des ressources disponibles de la planète (Shields, 2018). C'est la seule espèce qui surexploite les ressources et détient la capacité de modifier profondément son environnement. Les impacts environnementaux causés par l'Homme sont tellement importants que l'humanité pourrait avoir quitté l'holocène pour une nouvelle époque géologique, l'anthropocène, terme proposé par le nobélisé de chimie Paul Crutzen (Blanc et al., 2015; Wikipédia, 2019a), désignant l'ère de l'Homme qui, à l'image d'une force géologique, modifie tant la biosphère que la lithosphère.

Plusieurs analyses, telles que le Panel International des Ressources (ONU, 2019a), présentent un état de la situation des ressources naturelles mondiales peu rassurant. Nombres des ressources réserves, comme les forêts primaires, les ressources issues de la mer et pêchées en eaux profondes, les hydrocarbures, tels que le gaz ou le pétrole, qui se forment sur plusieurs centaines de millions d'années, les métaux et les minerais, en général, sont non renouvelables, leur quantité disponible est finie et limitée, et il ne sera pas possible de les exploiter indéfiniment sans qu'elles finissent par tarir.

Bien que certains minerais, comme le fer, soient disponibles en grandes quantités, presque inépuisables, la plupart des minerais et métaux, ainsi que les ressources énergétiques telles que pétrole, gaz, charbon, et certains minéraux comme la potasse ou les phosphates sont disponibles en quantité limitée à l'échelle mondiale. Un des grands enjeux dans la gestion des ressources réside dans l'évaluation précise des réserves. Ceci étant presque impossible, la connaissance de la quantité de minerai ou d'hydrocarbure exactement disponible pour que l'exploitation soit durable, pendant 500 ans par exemple, demeure sans réponse exacte. Certaines ressources renouvelables peuvent se régénérer plus ou moins rapidement (poissons, forêt), être disponibles peu importe le prélèvement effectué, mais intermittentes dans leur

disponibilité (rayonnement solaire ou vent), difficiles d'accès ou rares (eau douce propre à la consommation), ou encore facilement contaminées (air ou eau).

Le modèle économique linéaire actuel dépend de l'extraction ou de la collecte permanente de ressources qui sont transformées en biens, quelque peu recyclés, mais surtout éliminés en fin de vie. Entre 1970 et 2017, l'extraction annuelle de ressources au niveau mondial a triplé, passant de 27 à 92 milliards de tonnes (ONU, 2019a). Depuis 2000, la croissance des taux d'extraction de ressources augmente d'environ 3,2 % / an en raison de la construction d'infrastructures et l'amélioration du niveau de vie dans les pays en développement (Chine, Inde...).

Au niveau des métaux, une croissance annuelle de 2,7 % de l'utilisation des minerais métalliques s'opère depuis 1970. Les minéraux non métalliques, comme le sable ou le gravier, ont connu une croissance dans leur utilisation qui est passée de 9 milliards de tonnes en 1970 à 44 milliards de tonnes en 2017(ONU, 2019a). Pour leur part, les combustibles fossiles ont vu leur consommation passer de six milliards de tonnes en 1970 à 15 milliards de tonnes en 2017. La demande en biomasse est passée de neuf milliards de tonnes en 1970 à 24 milliards de tonnes en 2017 surtout en raison de l'augmentation des pâturages. La consommation d'eau au niveau mondial surtout à des fins agricoles (70 % des prélèvements) industrielles (19 %) ou urbaines (11 %) est passée de 2 500 à 3 900 km³ /an entre 1970 et 2010.

Plusieurs indicateurs ont été développés pour évaluer la consommation de ressources. L'indicateur de « Consommation Intérieure Apparente de Matières » évalue directement la masse de matières extraites dans un pays ou importées vers celui-ci. Cet indicateur permet le suivi de l'objectif de développement durable (ODD 12.2), qui appelle à la gestion durable des ressources naturelles d'ici 2030. L'indicateur d'« Empreinte Matières » permet d'attribuer au consommateur final toutes les ressources mobilisées au niveau mondial pour satisfaire ses besoins. Cet indicateur des flux de matières a été choisi pour réaliser le suivi de l'objectif de développement durable de l'ONU (ODD 8.4) qui concerne l'utilisation efficace des ressources.

De grandes tendances mondiales au niveau de la consommation de ressources se dégagent de l'analyse de ces indicateurs. Les pays en développement connaissant de fortes croissances économiques comme l'Inde ou la Chine, s'industrialisent et construisent de nouvelles infrastructures ce qui consomme de nombreuses ressources. D'un autre côté, les pays à revenu élevé (Amérique du Nord, Europe) externalisent sans compensation, vers les pays plus pauvres, la production de nombreux produits qui consomment des matières premières, de l'énergie et génèrent des impacts environnementaux. Ainsi, l'empreinte matières par habitants des pays riches (27,1 t/hab) dépasse de 60 % (ONU, 2019a) celle des pays à revenu intermédiaire (16,9 t/hab), et est 13 fois plus importante que celle des pays les plus pauvres de la planète (2 t/hab).

Les 5^e, 6^e et 7^e principes de biomimétisme invitent à la protection de la biodiversité et de la biosphère dont l'état continue de se dégrader. La plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques IPBES (Díaz et al., 2019) présente un constat alarmant sur cette question. Le rapport d'évaluation mondiale sur la biodiversité et les services écosystémiques est le document le plus exhaustif réalisé à ce jour. Il évalue les changements au niveau de la Nature qui se sont opérés sur 50 ans, et étaye les liens forts entre le développement économique et les impacts environnementaux. Ainsi, ce rapport indique que « La santé des écosystèmes dont nous dépendons, ainsi que toutes les autres espèces, se dégrade plus vite que jamais. Nous sommes en train d'éroder les fondements mêmes de nos économies, nos moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, la santé et la qualité de vie dans le monde entier ». Aujourd'hui 75 % du milieu terrestre est sévèrement altéré par les activités humaines (Díaz et al., 2019). Le rapport met donc en évidence que les choix de société actuels ne permettront pas d'atteindre les objectifs mondiaux de conservation et d'exploitation durable de la nature.

Compte tenu des impacts majeurs sur la nature et la biodiversité, les objectifs de développement durable (ODD) proposés par l'ONU (ONU, 2015), surtout ceux liés à la pauvreté, la faim, la santé, l'eau, les villes, le climat, les océans et les sols risquent de ne pas être atteints d'ici 2030. La perte de biodiversité est donc non seulement un problème environnemental, mais aussi un enjeu lié au développement, à l'économie, à la sécurité, à la

société et à l'éthique. Comme piste de solution, ce rapport souligne l'importance de la promotion de solutions basées sur la nature, comme le propose le biomimétisme, ainsi que la prise en considération systématique de la biodiversité dans la planification de tous les secteurs, y compris celui du transport et de la mobilité.

Les trois derniers principes font échos au domaine de l'économie circulaire. En effet, le principe qui invite à utiliser les déchets comme ressources est parfaitement mis en œuvre dans le cadre de l'écologie industrielle. La diversification et la coopération retrouvées dans le principe 9, sont mises de l'avant par l'économie de la fonctionnalité.

1.1.7 Synthèse

Ce chapitre visait à présenter une synthèse de l'approche de conception biomimétique, approche inspirée du plus vieux laboratoire de recherche et développement du monde : la Nature et ses 3,8 milliards d'années d'évolution! Le biomimétisme offre certainement des pistes de réflexion et des modèles inspirants à suivre. Cependant, cette approche ne doit jamais s'ériger en dogme, mais plutôt se présenter comme une démarche complémentaire à celles déjà disponibles pour innover et viser une réduction des impacts environnementaux négatifs des produits et processus. Le biomimétisme constitue l'une des boîtes à outils de la prochaine révolution industrielle (Durand et al., 2012) mais, la conception biomimétique est encore en phase de développement, et dispose de peu d'outils de quantification afin d'en faciliter la diffusion en ingénierie. Ce projet de recherche vise précisément à combler cette lacune. L'approche biomimétique offre cependant une perspective intéressante pour inspirer les ingénieurs ou designers dans leurs recherches de solutions.

La prochaine section présentera l'analyse de cycle de vie dont les méthodes quantitatives reconnues peuvent être appliquées dans le processus de conception biomimétique.

1.2 Analyse de cycle de vie et quantification des impacts

L'analyse de cycle de vie (ACV) ou Écobilan est un outil permettant d'évaluer l'ensemble des impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur tout son cycle de vie, depuis l'étape d'extraction de la matière première, pendant la fabrication, l'utilisation, et lors de la disposition finale du produit.

L'outil d'analyse de cycle de vie permet également de comparer divers produits ou processus entre eux en termes d'impacts environnementaux, ou de définir une priorité d'action pour rendre le produit ou le service plus écologique tout en optimisant le rapport efficacité environnementale et coût.

1.2.1 Normes et étapes de l'analyse de cycle de vie

Les normes encadrant la démarche de l'ACV sont ISO 14040 : 2006 (Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre) et ISO 14044 : 2006 (Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices).

L'ACV est généralement réalisée selon les quatre étapes suivantes :

- 1) définition des objectifs et du système : unité fonctionnelle, frontières du système, flux de référence seront définis durant cette étape
- 2) inventaire des émissions et des extractions : généralement réalisé à l'aide d'une base de données comme Ecoinvent cette étape consiste à évaluer l'ensemble des émissions dans l'air, l'eau et le sol qui résultent des processus (matériaux, transport, énergie) requis
- 3) analyse de l'impact environnemental et caractérisation des dommages : cette étape consiste à répartir les très nombreuses données issues de l'inventaire des émissions dans diverses catégories d'impacts et de dommages (climat, ressources, santé humaine)
- 4) interprétation des résultats : cette étape permettra de tirer des conclusions, de définir des pistes d'action et des recommandations basés sur les résultats de l'analyse des impacts

Parmi les nombreuses méthodes d'évaluation des impacts et dommages utilisées durant la 3^e étape de l'ACV certaines se concentrent sur les changements climatiques, d'autres sur la santé humaine ou encore sur la dégradation de l'énergie ou de l'exergie pour ne citer que ces catégories d'impacts et de dommages. L'énergie peut être transformée, mais en accord avec la première loi de la thermodynamique, elle est toujours conservée. Par opposition, l'exergie est toujours dégradée sous forme d'entropie en accord avec la deuxième loi de la thermodynamique (Bösch et al., 2007). La diminution des impacts environnementaux passe par une réduction de la dégradation exergetique (Hajjaji, 2011) afin de tendre vers plus de durabilité pour les processus ou les technologies (Genoud, 2012).

1.2.2 Méthodes d'évaluation des impacts utilisées en ACV

Plusieurs méthodes d'impacts comme ReCIpe 2016, Impact 2002+ , ILCD, et EPD 2013 en contexte européen; TRACI en contexte nord-américain; GHG Protocol, IPCC 2013, ou USEtox en contexte global sont utilisées en ACV, et bien décrites dans la littérature (PRé-Consultants, 2018). Ces méthodes permettent une évaluation quantitative des impacts sur l'environnement, ce qui facilite la prise de décisions. Toutes ces méthodes d'impacts utilisent des facteurs de caractérisation qui constituent des indicateurs représentant chaque catégorie d'impact, avec leur propre valeur et unité de mesure.

Par exemple, le facteur de caractérisation du forçage radiatif menant aux changements climatiques est évalué en kg eq-CO₂. Chaque gaz à effet de serre (GES) est alors converti en kg eq-CO₂ grâce à un facteur multiplicatif. Les facteurs de caractérisation sont basés sur des chaînes de causes à effets qui relient différents mécanismes environnementaux entre eux au sein d'une catégorie d'impacts. À titre d'illustration, les émissions de GES entraînent une augmentation de leur concentration atmosphérique, qui conduit à une amplification du forçage radiatif, qui à son tour induit une augmentation de la température et la fonte des glaciers. Ce phénomène se traduira ensuite par une élévation du niveau des océans et des perturbations climatiques qui auront des conséquences sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes.

Les facteurs de caractérisations sont, de plus, basés sur le choix d'un indicateur à l'intérieur de cette chaîne de cause à effet, ce qui permettra de calculer la contribution relative de chaque polluant à la catégorie d'impacts analysée. Les facteurs de caractérisation contribuent à l'analyse des impacts soit au niveau intermédiaire « problème » (midpoint) soit au niveau final « dommage » (endpoint). Le « dommage » est situé à la toute fin de la chaîne de cause à effet et représente l'impact des polluants sur la santé humaine, les écosystèmes, les ressources naturelles...alors que le niveau « problème » se situe à une position intermédiaire, dans la chaîne de cause à effet et traite spécifiquement une catégorie d'impact très ciblée.

Les différentes méthodes d'évaluation des impacts environnementaux présentent chacune leurs forces, faiblesses, limites et offrent un outil de quantification tant des impacts intermédiaires que des dommages qui correspondent à l'agrégation des catégories d'impacts intermédiaires. Ces multiples méthodes quantitatives peuvent évaluer une ou plusieurs catégories d'impacts et de dommages différents. Il est reconnu que les catégories d'impacts intermédiaires présentent moins d'incertitudes que les catégories de dommages, et sont basées sur des modèles scientifiques plus largement acceptés (Thériault, 2011). Par contre, les résultats issus de ces méthodes sont souvent plus difficiles à interpréter.

Les catégories d'impacts intermédiaires couvrent de façon plus précise et ciblée des enjeux associés directement au monde du vivant (éco-toxicité, eutrophisation) que ne le propose les catégories de dommages, qui elles sont plus globales et issus d'agrégations de catégories d'impacts. Il est intéressant de noter que pour les calculs d'impact, chaque méthode considère un nombre différent de substances chimiques issues de l'inventaire des émissions.

Les méthodes d'impact les plus utilisées au sein de la communauté scientifique œuvrant dans le domaine de l'ACV sont implémentées dans des bases de données comme Ecoinvent (Frischknecht et al., 2005) et disponibles dans de très nombreux logiciels d'analyse de cycle de vie tels que Simapro (PRé-Consultants, 2018) ou Open LCA (OpenLCA, 2018). Des méthodes d'évaluations des impacts, gratuites et compatibles avec Open LCA sont disponibles sur le site Nexus Open LCA (NexusOpenLCA, 2018). La documentation accompagnant ces

logiciels présente les principales méthodes d'évaluation et leurs catégories d'impacts. (Goedkoop et al., 2008).

Les nombreuses méthodes, tant régionales que globales, ont été analysées et comparées dans la littérature, selon l'impact à évaluer (Thériault, 2011). De plus, les méthodes d'impacts retenues pour l'évaluation des principes de biomimétisme sont décrites plus en détail dans le chapitre 3 qui présente l'article publié dans la revue *Biomimetics*.

Une synthèse des principales catégories d'impacts et des multiples méthodes d'évaluation utilisées en ACV est présentée dans le tableau 1-6. Ce tableau permet de comparer sommairement les méthodes sur la base des impacts qu'elles vont évaluer. Certaines méthodes ne disposent que d'une seule catégorie d'impact alors que d'autres en présentent plus d'une dizaine.

Les indicateurs ou facteurs de caractérisation présentés dans le tableau 1-6 permette de découvrir les polluants considérés comme représentatifs d'un impact particulier. Une case complétée avec un tiret (-) dans le tableau, indique que la méthode ne traite pas l'impact considéré.

Tableau 1-6 Présentation de quelques méthodes et catégories d'impacts

Catégories d'impacts	Méthodes d'impacts					
	ReCIPe	Cumulative Energy Demand	Cumulative Exergy Demand	AWaRe	IPCC 2013 GWP100a	USEtox2
Changement climatique	kg CO ₂ eq	-	-	-	kg CO ₂ eq	-
Depletion de O ₃ Stratosphérique	kg CFC-11 eq	-	-	-	-	-
PM 2.5 dans émissions aériennes	kg PM2.5 eq	-	-	-	-	-
Modification du taux de formation O ₃ et précurseurs (NOx et COVNM)	kg NOx eq	-	-	-	-	-
Potentiel d'acidification terrestre	kg SO ₂ eq	-	-	-	-	-
Eutrophication de l'eau	kg P eq	-	-	-	-	-
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-dichlorobenzène (1,4-DCB)	-	-	-	-	PAF m ³ kg ⁻¹
Ecosotoxicité humaine - morbidité	-	-	-	-	-	nb de cas / kg de substance
Consommation Ress. minérales	kg Cu eq	-	-	-	-	-
Occupation des sols	m ² *yr. crop eq	-	-	-	-	-
Consommation Ress. fossiles	kg pétrole eq	-	-	-	-	-
Quantité énergie utilisée	-	MJ eq	-	-	-	-
Quantité exergie Dégradation qualité énergie	-	-	MJ eq	-	-	-
Disponibilité ressources en eau	Conso Eau m ³	-	-	Indice: 0.1-100	-	-

1.3 Mobilité urbaine et territoire

Cette section présente la mobilité urbaine efficiente qui est au cœur de la transition vers une ville plus économe en ressources et en énergie. Ce sujet représente un cas d'application intéressant pour une démarche de conception biomimétique. En effet, la mobilité reprend de nombreuses caractéristiques des écosystèmes naturels. Dans les deux cas, ce sont des systèmes complexes composés de multiples réseaux ou cohabitent des composantes (modes de transport vs espèces) sur un territoire donné. Les diverses composantes subissent des contraintes de disponibilités des ressources et doivent éviter que leurs impacts ne dégradent leur environnement.

L'implantation d'un réseau de transport urbain est longue et coûteuse. Aussi, il est fondamental de considérer l'évolution anticipée des besoins en mobilité (Gouvernement du Québec, 2018), des aléas, et des contraintes qui pèseront sur le réseau à court et moyen termes, sans quoi ce dernier manquera de résilience et deviendra rapidement inadapté aux besoins évolutifs des usagers. Afin de tendre vers plus de durabilité, il est possible d'opter pour de nouvelles approches et d'avoir recours à de nouveaux outils d'analyse de scénarios en mobilité urbaine. L'approche systémique et la méthodologie de conception biomimétique offrent des possibilités peu explorées pour l'élaboration de solutions efficaces, ayant un fort potentiel d'innovation qui bonifieront la durabilité (Ricard, 2015).

1.3.1 Analyse et compréhension du système de mobilité

La mobilité urbaine est un champ d'études dont l'objet est de relier différentes localisations d'intérêt pour les activités quotidiennes des individus (habitat, travail, épicerie, socialisation, loisir, consommation, service, santé) et d'assurer ainsi le fonctionnement du système urbain. La mobilité est motivée par la recherche de ce qui n'est pas disponible au lieu de départ, comme c'est parfois le cas de l'emploi situé loin du lieu de résidence. La mobilité constitue donc un maillon fondamental du développement social et économique de la ville. Le système de mobilité urbaine devrait viser plusieurs objectifs, tels que contribuer au bien-être, ne pas dégrader l'environnement, garantir la meilleure accessibilité à tous et soutenir l'économie.

Les éléments clés de la mobilité urbaine sont définis par la demande en transport, l'offre de service, le coût, le flux de trafic, l'accessibilité, la flexibilité, la gestion de la congestion, la réduction des impacts environnementaux, la sécurité, la rapidité du service et la diminution de temps de trajet (ARTM, 2019; Gouvernement du Québec, 2018; Guicheteau, 2012). Lorsque l'on parle de mobilité pour la ville durable, il faut tout d'abord définir ce qu'est la ville dans une perspective systémique. Les villes sont des lieux d'échange de flux et peuvent être décrites comme des écosystèmes imparfaits (Da Cunha, 2005) dont le fonctionnement génère des externalités négatives. Ainsi, la ville canalise des flux de matière, d'énergie et d'information, mais elle a besoin des régions avoisinantes pour s'approvisionner et évacuer ses flux de déchets et d'émissions. En cela, la ville actuelle n'est pas durable, et les principes d'écologie urbaine ou de biomimétisme invitent à penser à la fermeture des cycles d'énergie et de matière pour construire des villes plus sobres, adaptées aux changements du climat, plus résilientes, ayant la capacité d'assurer les services avec le moins de perturbations même en cas d'aléas majeurs, résilientes, inspirées par la circularité de la nature (Rosier, 2019).

En 2014, plus de la moitié de la population mondiale vivait en ville, et les projections estiment que ce niveau d'urbanisation atteindra 70 % en 2050 (OCDE, 2012). Les problèmes de transport et de mobilité, déjà nombreux en milieu urbain, vont empirer. Il est donc important de se préoccuper des questions de mobilité urbaine, car la durabilité de la ville passera par la maîtrise et la gestion du trafic, la prise en compte de la qualité de vie, la réduction des impacts environnementaux ainsi que sur la santé humaine, l'intégration de tous ou encore l'accès pour tous à un espace public de qualité. L'étalement urbain, problème d'urbanisme moderne clairement identifié, augmente la pression sur l'environnement et le territoire, et impose des modes de transports non soutenables, car trop souvent articulés autour de l'automobile solo. Les causes documentées de l'étalement urbain sont liées à la croissance démographique, la croissance économique, l'organisation familiale, les nouveaux besoins et standards en termes d'espace et de surface habitable, l'accès au crédit, la valorisation du logement individuel plus confortable, l'augmentation des possibilités de parcours de distances élevées dans un temps restreint grâce à l'automobile.

D'une manière générale, les villes où la mobilité tend vers une plus grande durabilité présentent un certain nombre de caractéristiques communes (Fusco, 2003; Newman et al., 1988; Verry et al., 2005). Tout d'abord, ces villes offrent des niveaux élevés d'accessibilité (facilité à atteindre les emplois, les services) et une fluidité du trafic. Généralement, il s'agit de villes disposant d'une offre de transport multimodale. Ce ne sont pas des villes sans automobiles - difficile dans l'état actuel des choses de renoncer à la contribution de l'automobile dans le fonctionnement du système de transport urbain- mais elles se présentent comme des villes où le rôle de l'automobile est encadré et limité par une forte utilisation d'un transport en commun efficient, et de la mobilité active, telle que la marche et le vélo pour répondre aux besoins des usagers (Moeinian, 2018). La Serenissima Venise constitue un exemple mythique de ville fonctionnelle sans voitures, mais il est vrai que c'est l'histoire et l'urbanisme même de la ville, plus qu'une volonté politique qui conditionne cette situation exceptionnelle. Cependant, plusieurs villes modernes comme Masdar City aux Émirats Arabes Unis, Geat City en Chine, Pontevedra en Espagne ou encore Oslo en Norvège encadrent de façon très serrée l'usage de l'automobile en leur cœur(Wikipedia, 2021).

Comme le présente Jane Jacobs (Jacobs, 1961), pour minimiser les besoins en transport, il faudrait redéfinir la ville pour que les quartiers soient multifonctionnels et offrent à proximité habitat, travail, divertissements, services, écoles, alimentation, bureau de poste, centre de sport, loisir, restaurants, lieux de socialisation, service de santé. La densification et la ville de courte distance font partie de la solution, sans en être la seule, pour tendre vers une plus grande durabilité en milieu urbain. Cependant, l'évolution des services devra prendre en compte l'augmentation de la taille de la population pour ne pas se trouver en dépassement de capacité. Il faudra de plus que les systèmes de transport évoluent pour limiter la congestion et diminuer la pollution qui sinon pourrait altérer profondément le cadre de vie en milieu urbain. L'augmentation du nombre de voies rapides pour les automobiles sans déploiement d'un même effort pour améliorer la performance du transport en commun est vouée à un échec en termes de réduction de la congestion, d'augmentation de la vitesse des véhicules et de réduction des émissions polluantes. En effet, le paradoxe de Downs-Thomson (Lefebvre et al., 1995) démontre que l'augmentation du nombre de voies réduit la vitesse moyenne des véhicules et

diminue l'utilisation du transport en commun. Un transfert modal s'opère du transport en commun vers l'automobile jusqu'à saturer une fois de plus le nouveau réseau routier.

1.3.2 Impacts systémiques de la mobilité urbaine

La ville et la mobilité urbaine peuvent être qualifiées de systèmes, et une approche systémique est appropriée pour en faire l'étude (Donnadieu et al., 2003; Terrier, Berdier, et al., 2017). Les systèmes, selon leur comportement, peuvent être classés en diverses catégories génériques (Bossel, 1999). Ainsi, la mobilité urbaine peut être considérée comme un système métabolique qui requiert de l'énergie ou de la matière pour fonctionner. Plus un système est complexe, plus il répond aux définitions de nombreuses catégories décrivant un système, plus il est composé de nombreux sous-systèmes, et possède de boucles de rétroactions et d'interactions.

La mobilité est donc un sous-système de celui encore beaucoup plus complexe qui constitue la ville. Pour être durable, le système mobilité doit inclure les dimensions environnementales (peu polluantes), mais également sociales (assurer le lien social, l'accès aux ressources, à la culture) et économiques (faciliter les échanges, accessibilité). Sa mise en œuvre doit être socialement acceptée et les solutions devraient être issues d'un processus de consultation des principales parties prenantes, dont les usagers.

Le tableau 1-7 expose les caractéristiques et décrit les différentes catégories de systèmes naturels pouvant inspirer la mobilité.

Tableau 1-7 Catégories de systèmes naturels pouvant inspirer le développement du système de mobilité urbaine

Tiré et adapté de Bossel (1999)

Catégorie de systèmes	Caractéristiques	Décrit le système de mobilité actuel
Métabolique	Requiert de l'énergie, de la matière ou de l'information pour exister (ex: moteur)	Oui. Le système de transport fonctionne par la transformation d'énergie.
Auto-organisé	Peut changer sa structure pour s'adapter aux évolutions de son environnement (ex : plante)	Non, mais devrait tendre vers cette catégorie. Les technologies devraient s'adapter aux enjeux climatiques, et aux besoins des usagers.
Non isolé	Modifie son comportement selon la présence d'autres systèmes (ex : proie – prédateur)	Plus ou moins. Les automobiles laissent la voie libre au transport collectif.
Auto-reproducteur	Système ayant tendance à se reproduire sous la même forme (ex : cellules)	Oui, mais ne devrait justement pas toujours recopier les erreurs du passé et s'adapter.

Afin de mieux cerner les grands enjeux auxquels doit faire face la ville durable, les sections suivantes présentent les principaux impacts retrouvés dans chaque grande dimension de la mobilité.

- Impacts environnementaux

La mobilité moderne présente plusieurs externalités environnementales négatives (Boillat, 2014) comme la pollution atmosphérique et la consommation énergétique, qui sont en augmentation significative. Certes, les progrès techniques des systèmes de dépollution des automobiles, comme le filtre à particules ou le convertisseur catalytique ont énormément contribué à la réduction des impacts environnementaux, mais la croissance des distances parcourues en voiture a annulé les gains (Poliquin, 2012). La prise de conscience générale au niveau des impacts négatifs liés à la mobilité, comme les changements climatiques, induit peu de modifications au niveau des choix modaux pour le transport des personnes (La Branche, 2011). Par contre, cette prise de conscience facilite la mise en place et l'acceptabilité sociale de mesures contraignantes (Péages urbains, tarification et réduction du stationnement) si cela devait s'avérer incontournable.

Une étude sur l'acceptabilité sociale des mesures en transport et en mobilité durable (GRAME, 2010) permet de découvrir un classement élaboré par les participants (décideurs, fonctionnaires municipaux, représentants des chambres de commerce, associations de consommateurs, experts en transport, groupes environnementaux et associations d'automobilistes et de camionneurs). Les mesures ayant des impacts fiscaux sont, d'une manière générale, plus difficiles à faire accepter, et moins équitables pour les citoyens à faibles revenus.

Sur le plan de la consommation d'énergie et des émissions de polluants atmosphériques, il est généralement accepté que la congestion oblige le fonctionnement des véhicules à moteur thermique sur des points de faible rendement. L'hypothèse souvent avancée, énonçant que la réduction de la congestion urbaine contribuerait à diminuer la consommation énergétique des véhicules et les émissions polluantes, a été infirmée par une étude menée par Newman et Kenworthy, dans 32 villes du monde. Cette étude reprise et analysée dans le livre *l'autre écologie* (Lefebvre et al., 1995), démontre que même si l'efficacité marginale des véhicules à moteur thermique augmente lorsqu'ils ne circulent pas dans la congestion, la consommation globale de carburant et les émissions polluantes augmentent en raison de la plus grande utilisation des véhicules lorsque le trafic est plus fluide.

La consommation énergétique globale est influencée par la disponibilité du transport en commun. Ainsi, à parité de flux de trafic, les villes à grande accessibilité aux services et emplois via les transports en commun présentent une consommation énergétique réduite (Fusco, 2003). Au plan technique, des véhicules ayant une plus faible masse et des moteurs de plus petite cylindrée entraîneraient un décalage vers des points d'opération plus efficaces permettant de réduire les émissions polluantes.

- Impacts sociaux

Qu'il soit public ou privé, motorisé ou actif, chaque mode de transport est caractérisé par ses champs d'influence au niveau social, sur les plans de la santé publique et de l'accessibilité. Le transport actif présente de nombreux bienfaits pour la santé, tout en étant moins cher à utiliser. Le transport collectif permet un accès à la mobilité pour tous (ou presque), avec de faibles

externalités sociales. De plus, il contribue à la cohésion sociale et à l'inclusion des jeunes, des familles, des aînées et des strates les plus défavorisées de la population.

En termes de sécurité, dans le contexte urbain québécois, le transport en commun est environ de 15 à 17 fois plus sécuritaire que l'utilisation de l'automobile (Beaudet et al., 2010). Cependant en ville, le transport actif comme la marche ou le vélo est plus risqué que l'automobile ou le transport collectif. Une étude menée aux États-Unis démontre que le risque d'accident mortel par kilomètre parcouru en ville est 36 fois plus élevé pour un piéton et 11 fois plus élevé pour un cycliste que pour un automobiliste (Pucher 2000).

Malgré tous les aspects négatifs découlant de l'usage de l'automobile, son utilisation est en croissance. En France entre 1980 et 2000, les déplacements urbains en automobiles ont progressé de 41 % à plus de 60 % (Kaplan et al., 2008). L'enquête origine destination (OD) menée dans la ville de Québec en 2017 a démontré que sur le territoire de la capitale, l'usage de l'automobile a connu une croissance de 23 % entre 2001 et 2017 (MTQ, 2019). À Montréal, 68 % des déplacements à l'heure de pointe sont réalisés en automobile ou à moto (ARTM, 2018). De nombreuses données quantitatives (ARTM, 2018, 2019) décrivant les déplacements quotidiens en période de pointe du matin dans la région métropolitaine de Montréal sont disponibles en annexe I.

- Impacts économiques

La ville à mobilité durable considère les déplacements comme un coût de fonctionnement qu'il faut minimiser, car cela démontre une inefficience de l'organisation urbaine. Certains modes de transport urbain privés comme l'automobile génèrent plus d'externalités négatives que le transport public collectif. En effet, la contribution de l'automobile à la dégradation de la qualité de l'air en milieu urbain, les pertes économiques dues à la congestion, la contribution à l'étalement urbain, les espaces occupés par les stationnements au détriment d'autres activités sont autant d'aspects négatifs supportés par l'ensemble de la société (Beaudet et al. 2010).

La réalisation de projets de transports en commun en sites propres doit prendre la place des projets d'autoroutes urbaines qui visent l'adaptation continue de la ville à l'automobile (Fusco, 2003).

Sur le plan individuel, l'utilisation d'une automobile coûte de huit à dix fois plus cher que le transport en commun (Beudet et al., 2010) et, pour la communauté métropolitaine de Montréal, les coûts liés à la congestion et supportés collectivement sont évalués à 4,2 milliards (Lévesque, 2018).

1.3.3 Les modes de transport: composants structurels de la mobilité

Comme cela est présenté dans les enquêtes origine-destination (ARTM, 2018) ou dans les différents exercices de planification de la mobilité urbaine (ARTM, 2019), plusieurs modes de transport sont accessibles en milieu urbain, et tout comme un écosystème, la ville possède ses espèces dominantes en termes de modes de transport. Le transport collectif (Autobus, métro, train, tramway), le transport individuel motorisé (Automobiles), le transport actif (vélo, marche, patins...) et le transport innovateur (PRT-Personnal Rapid Transit, Serpentine) constituent les principaux modes du système de mobilité urbaine actuel ou en développement.

Le transport est responsable de 42 % des émissions de GES au Québec et de 76 % de la consommation d'hydrocarbures (Gouvernement du Québec, 2018). Aussi, pour réduire cet impact, le gouvernement du Québec a adopté une politique intitulée : *Transporter le Québec vers la modernité- la Politique de mobilité durable 2030* (Gouvernement du Québec, 2018). Cette politique, conjuguée avec le Plan d'action en électrification des transports, vise entre autres à permettre la présence de 300 000 véhicules électriques et hybrides sur les routes du Québec en 2026. Il y en avait moins de 40 000 en 2018 (Coderre et al., 2019), mais le parc de véhicules électriques au Québec est en croissance, et les chiffres du gouvernement du Québec indiquent que 70 000 véhicules électriques sillonnaient les routes de la province fin 2019 (Transition-énergétique-Québec, 2020).

L'électrification des transports vise principalement une réduction des émissions de GES de ce secteur qui contribuera ainsi à l'atteinte de la cible québécoise qui fixe une diminution des GES de 37,5 % sous le niveau de 1990 en 2030 (Gouvernement du Québec, 2018). L'électrification des transports apporterait à elle seule une réduction de 22% des émissions du Québec (Association des Véhicules Électriques du Québec, 2018). Implanter de telles technologies au Québec est positif étant donné que le réseau hydroélectrique de production d'énergie présente un faible taux d'émissions de GES évalué à 20,72 g éq-CO₂/kWh (Hydro Québec, 2015). Cependant, cette transition ne serait pas forcément souhaitable dans tous les pays, surtout ceux dont le réseau énergétique est alimenté par des centrales thermiques dépendant de la combustion d'énergies fossiles présentant des niveaux d'émissions compris entre 500 à 1100 g CO₂/kWh (Équilibre des Énergies, 2018).

Un véhicule électrique, de par le rendement plus élevé de son système de propulsion, consomme presque quatre fois moins d'énergie par kilomètre, soit 0,2 kWh/km contre 0,7 kWh/km pour un véhicule à moteur thermique (Expert-VE, 2013). D'après une analyse de cycle de vie menée en contexte québécois (CIRAIG, 2016) les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) peuvent être réduites de 65 % pour un véhicule électrique par rapport à son concurrent thermique, et ce pour le même service rendu, ou la même unité fonctionnelle, fixée à 150 000 km parcourus au Québec.

Malgré le niveau d'émissions élevé de ce secteur, transporter les marchandises et assurer la mobilité des personnes demeure une activité fondamentale pour le développement social et économique, tant au niveau d'une ville qu'à l'échelle d'un pays. La mobilité est donc une fonction importante qui devra gagner en durabilité. La mobilité se différencie du transport (Vodoz et al., 2004), car elle s'articule autour de dimensions sociales, temporelles, spatiales, environnementales, et économiques. Pour cela, la mobilité durable dépasse assurément la simple électrification des transports ou l'ajout de voies pour autobus, et d'autres pistes plus larges et multidimensionnelles sont à explorer.

1.3.4 Pistes de solutions pour une mobilité plus durable

Comme présenté par Lefebvre (Lefebvre et al., 1995) la mobilité urbaine durable s’articule autour de cinq principes soit augmenter la densité dans la ville, développer des infrastructures en transport autres que celles dédiées à l’automobile, développer des contraintes à l’usage de l’automobile (réduction des stationnements), regrouper géographiquement les services pour éviter les déplacements et améliorer la performance des transports collectifs.

Plusieurs études ont défini les objectifs de la mobilité durable (Boillat, 2014; Fusco, 2003; Guicheteau, 2012; Litman, 2011). Certes, il est souvent difficile d’assurer l’accessibilité rapide dans une ville dense, d’être économe en énergie, le tout à un coût abordable pour limiter l’exclusion sociale. Cependant, c’est en essayant de tendre vers la majorité des objectifs présentés au tableau 1-8 (La Branche, 2011; Litman, 2011) que la mobilité gagnera en durabilité.

Tableau 1-8 Les objectifs de la mobilité durable

#	Objectifs
1	Réduction consommation d'énergie, d'eau et amélioration de l'efficacité
2	Consommation modérée des ressources selon leur capacité de régénération
3	Réduction de l'utilisation de combustibles fossiles
4	Réduction des émissions de GES
5	Diminution de la pollution de l'air, de l'eau et du sol
6	Respect de la capacité d'absorption du milieu
7	Réduction de l'emprise au sol
8	Approche multimodale pour augmenter la résilience du système
9	Réduction du coût négatif des transports sur l'économie
10	Augmentation de la productivité et du développement économique
11	Réponse aux besoins des usagers
12	Amélioration de la qualité de vie des usagers
13	Accès rapide et élevé aux biens et services
14	Limitation des impacts sur la santé humaine

Tableau 1-8 Les objectifs de la mobilité durable (suite)

15	Minimisation du bruit
16	Accessibilité pour tous sans barrières à l'entrée (situation de handicap)
17	Participation à l'équité et cohésion sociale
18	Coûts socialement supportables, tarifs adaptés au revenu des usagers
19	Niveau élevé de sécurité
20	Diminution de la mortalité par accident
21	Réduction du temps de trajet
22	Réduction de la congestion
23	Limitation de l'étalement urbain et contribution à la densification
24	Participation et inclusion des parties prenantes

Les nombreuses pistes de solutions proposées pour tendre vers une mobilité plus durable peuvent être réparties en quatre grandes familles de mesures présentées ci-dessous.

- Incitatifs comportementaux

Selon Guicheteau, l'atteinte de la mobilité durable passe par la mise en place de contraintes à l'utilisation urbaine de l'automobile (Guicheteau, 2012). La régulation de l'usage de l'automobile peut passer par le contrôle de la congestion qui lui fait perdre son côté rapide et pratique. Mais comme un trajet en automobile démarre et se termine sur un lieu de stationnement, des politiques relatives aux stationnements peuvent aussi être implantées. Les principes de base reposent sur le fait de restreindre l'accès à la ville pour les automobilistes pendulaires (usagers venant tous les jours travailler en ville sans y résider), tout en permettant le stationnement des habitants ou des clients et des visiteurs dans les lieux commerciaux.

Les horaires flexibles tant pour le travail que dans la possibilité d'accéder aux différents services vont aussi dans le sens de la réduction des contraintes de la mobilité dans le temps. Le fait de commencer sa journée après l'heure de pointe induira une réduction de perte de temps pour se rendre au travail. Le télétravail, intensément mis de l'avant pendant le confinement lié

à la pandémie Covid-19, est également un outil efficace pour réduire la congestion et les émissions de GES liées au transport, avec possiblement des effets rebonds encore non évalués. Une journée de télétravail par semaine permet à un travailleur de réduire de 20 % ses émissions hebdomadaires découlant de la mobilité pendulaire (I. Dubé, 2014).

- Développement de technologies

Pour Guicheteau (2012), les solutions technologiques (véhicules électriques, biocarburants) visant à réduire les émissions polluantes et à minimiser l'impact sur la qualité de l'air sont loin d'être une solution viable en mobilité durable étant donné qu'elles n'ont aucun impact sur les problèmes comme la congestion, l'occupation du sol, la sédentarité, les problèmes sociaux, la sécurité ou encore l'accessibilité. Pour l'auteure, seul le transfert modal de l'auto solo vers le transport en commun constitue une réelle solution vers la mobilité durable.

- Développement d'infrastructures

Bien sûr, les contraintes à l'usage de l'auto solo doivent être accompagnées par l'offre d'alternatives de qualité pour assurer les déplacements. Ces alternatives sont constituées par un système de transport collectif performant, par la densification et la mixité fonctionnelle des quartiers et la transformation de l'environnement bâti. La densification de l'habitat qui permet d'avoir tout à proximité (École, magasins, clinique, centre sportif, cinéma, restaurants) facilite l'accessibilité et la mobilité douce dans des zones où la marche et le vélo sont sécuritaires. Cette concentration apporte une plus-value sociale en créant des lieux du « vivre ensemble » où les ressources et les services sont partagés collectivement.

- Incitatifs économiques

Les politiques publiques ont également un important rôle à jouer dans la transition vers une mobilité plus durable. Elles encadrent, régissent et influencent la façon dont seront faits les déplacements. Ces politiques sont souvent d'ordre économique comme l'implantation de péages, de taxes, de subventions importantes pour l'achat de véhicules électriques (Transition-

énergétique-Québec, 2020). Cependant, force est de constater que ces politiques souvent coûteuses en ressources financières n'ont pas entraîné de réduction marquée de l'utilisation encore dominante de l'automobile individuelle en milieu urbain. (Guicheteau, 2012) met en garde contre les « fausses » solutions qui ne mènent pas à la diminution de l'utilisation de l'auto solo comme la tarification par péage ou le soutien à l'automobile électrique. Les péages urbains opérationnalisant le principe d'utilisateur-payeur ou de pollueur-payeur ont tendance à stabiliser l'usage de l'automobile, mais pas à le réduire. Les sommes collectées peuvent toutefois aider à financer des projets de mobilité durable tels que le transport en commun, encore faut-il veiller à ce que le coût de la gestion des mesures de tarification ne dépasse pas les bénéfices qui en sont retirés.

La tarification incitative (aide financière pour le transport en commun) ou dissuasive (taxe sur le carburant) n'a que peu d'impact sur l'utilisation de l'automobile, car l'usage de la voiture est considéré trop essentiel, voire indispensable, pour que certains utilisateurs puissent s'en passer. D'un point de vue économique, un type de bien comme l'essence ou l'automobile présente une demande dite inélastique et donc l'augmentation du prix n'a presque pas d'influence sur la quantité de biens consommés. Des études réalisées en France démontrent que même si le coût d'utilisation de l'automobile était doublé, la majorité des automobilistes continueraient de se déplacer en voiture. De telles mesures tarifaires seraient de plus inéquitables envers les moins nantis de la société (Guicheteau, 2012).

1.3.5 Prospective en termes de mobilité urbaine à Montréal

Montréal est la métropole du Québec (Canada). Cette ville, bâtie sur une grande île, compte environ 1,8 millions d'habitants.

- Mobilité collective

L'autorité régionale de transport métropolitain (ARTM, 2020) a publié une série de propositions d'actions à prioriser en transport collectif dans la région métropolitaine de Montréal afin de contribuer au Plan de relance économique du Québec. L'ARTM indique que

ces projets jugés prioritaires peuvent avoir un impact et des retombées économiques à court terme, et ce dans plusieurs secteurs. Ces propositions sont basées sur un contenu majoritairement québécois ou canadien, et répondent aux objectifs du projet de Plan stratégique de développement du transport collectif de la région métropolitaine de Montréal élaboré par l'ARTM, et aux orientations gouvernementales et métropolitaines en matière de mobilité et d'aménagement du territoire (ARTM, 2020). Voici les principaux axes des propositions d'actions en mobilité urbaine durable :

- 1) réaliser de grands projets d'infrastructures publiques de mobilité collective (Réseau Express Métropolitain, prolongement de la ligne bleue du métro de Montréal);
- 2) déployer les voies réservées du réseau d'autobus (Construction du SRB Pie-IX);
- 3) développer et déployer les outils informatiques et technologiques facilitant la mobilité;
- 4) accélérer les projets de maintien et d'amélioration des actifs en mobilité (décongestion de la ligne orange du métro, équipements pour l'accessibilité universelle);
- 5) accélérer l'électrification du transport collectif pour relier certaines zones de Montréal au centre-ville.

- Mobilité active

Même si le transport collectif montréalais présente des besoins de développement, la mobilité douce et active a elle aussi un grand besoin de voir sa capacité améliorée. Ainsi, la part modale du vélo pourra être stimulée avec le Réseau Express Vélo de 180 km (Ville de Montréal, 2020a). La marche sera rendue plus sécuritaire en allongeant le temps de traverse pour les piétons aux feux de circulation, et entretenant mieux les traverses prioritaires. L'ensemble des solutions devra faciliter la mise en œuvre de l'approche Vision Zéro, pour une mobilité plus sécuritaire à Montréal (Ville de Montréal, 2020c) et s'assurer qu'une attention particulière soit accordée à la marche, considérée comme un mode de transport à part entière (ARTM, 2019). En effet, la marche constitue le dénominateur commun de l'intermodalité, car peu importe l'équipement de transport collectif utilisé, il y a toujours une certaine distance couverte à pied. La marche est d'autant plus pratiquée que l'infrastructure est invitante pour le faire. Ainsi,

l'approche des rues conviviales retrouvée dans certaines municipalités redéfinit la rue pour que les modes actifs (marche ou vélo) puissent constituer de véritables alternatives de déplacement (ARTM, 2019). Compte tenu des éléments présentés dans le document de l'ARTM (ARTM, 2020), il est possible d'avancer que ces projets sont positifs sur le plan des sphères économiques et sociales du développement durable, car ils bonifieront l'offre en mobilité active, collective et inclusive, tout en favorisant la création d'emploi et l'utilisation de contenu local.

1.3.6 Perspectives au niveau de la mobilité urbaine

Assurer la mobilité des personnes demeure fondamental pour le développement social et économique tant au niveau d'une ville qu'à l'échelle d'un pays, mais force est de constater qu'à la lumière des critères qui caractérisent la mobilité durable, la mobilité urbaine n'est actuellement pas soutenable. En effet, dans sa politique de mobilité durable 2030, le gouvernement du Québec indique que « Pour être durable, la mobilité doit être efficace, sécuritaire, pérenne, équitable, intégrée au milieu et compatible avec la santé humaine et les écosystèmes. La mobilité durable limite la consommation d'espace et de ressources, donne et facilite l'accès. Elle favorise le dynamisme économique, elle est socialement responsable et respecte l'intégrité de l'environnement » (Gouvernement du Québec, 2018).

D'après le rapport sur les perspectives environnementales (OCDE, 2012), la population mondiale devrait passer de sept milliards à plus de neuf milliards en 2050. Près de 70 % de la population vivra en zone urbaine, amplifiant les problèmes de pollution, de congestion des transports et de gestion des déchets. La population est vieillissante et ses besoins en termes de mobilité seront spécifiques. La proportion des 65 ans et plus a augmenté de 16 % entre 2013 et 2018 dans la région métropolitaine de Montréal (ARTM, 2018). En 2050, les personnes âgées de plus de 65 ans représenteront plus de 25 % de la population dans les pays de l'OCDE, contre 15 % aujourd'hui. La tendance sera similaire en Chine et en Inde, mais inversée en Afrique.

Les conséquences et perturbations liées au changement climatique devraient s'aggraver et devenir irréversibles étant donné l'augmentation anticipée de 50 % des émissions mondiales de GES qui passeront de 40 Gt à 80 Gt d'eq. CO₂ entre 2010 et 2050. Avec une concentration atmosphérique de GES de plus de 550 ppm, la température moyenne mondiale devrait dépasser de 3°C à 6°C les niveaux préindustriels, et entraîner des modifications aux régimes pluviométriques (NCE, 2020), une fonte accrue des glaciers et du pergélisol, une montée du niveau des océans, et une augmentation de l'intensité et de la fréquence d'événements météorologiques extrêmes. La capacité d'adaptation des populations et des écosystèmes pourrait également être mise en péril. À cela s'ajoute la dégradation de la qualité de l'air surtout dans les villes qui seront de plus en plus peuplées. En 2050, la pollution atmosphérique devrait devenir la principale cause environnementale de décès prématurés à l'échelle mondiale, et entraîner la mort de 3,6 millions de personnes par an, surtout en Chine et en Inde en raison de l'exposition aux fortes concentrations de particules.

Compte tenu des prévisions, le développement d'une mobilité résiliente est indispensable. Les scénarios en mobilité devront intégrer les transformations prévues de l'environnement (réponse aux aléas), anticiper les changements de comportement, de valeur et de structure de la population (vieillesse), considérer l'évolution des technologies des systèmes de transport et de mobilité (électrification, hydrogène, biocarburants), considérer l'évolution des technologies complémentaires à celles des systèmes de transport (télétravail, ville intelligente). Trop souvent, la mobilité n'est pas inclusive (Laboratoire de Mobilité Inclusive, 2018). Elle présente un coût financier élevé en raison du besoin de posséder un véhicule, ce qui restreint les plus démunis en matière de mobilité. La faible disponibilité du transport en commun en dehors des grands centres oblige les usagers à se tourner vers une solution en mobilité personnelle. Mais au-delà de ces faits connus, les obstacles à la mobilité peuvent être divers et moins documentés. Ainsi, comment découvrir le fonctionnement et utiliser le transport en commun lorsqu'on ne sait pas lire ni consulter un plan? Lorsqu'on n'a pas accès à Internet ou que l'on vit en situation de handicap? Pour être durable, la mobilité doit être inclusive et intégrer de nombreuses dimensions sociales.

La mobilité est associée à un sentiment de liberté, et toute tentative de limitation de la mobilité pour la rendre plus durable trouvera sur son chemin une forte résistance, et ce, peu importe le bien-fondé des objectifs de cette initiative (Kaplan et al., 2008). Cependant, le Monde dispose de ressources finies (Jacquard, 1991) et la capacité de support des écosystèmes présente des limites bio géophysiques (Rockström et al., 2009a) qui font en sorte que la liberté d'usage de certains modes de transport restreint l'utilisation d'autres modes.

1.4 Synthèse du chapitre et ouverture

Ce chapitre visait à présenter l'état des connaissances dans les domaines au sein desquels s'inscrit cette thèse. Ainsi, les sujets du biomimétisme et de la conception biomimétique constituent le cœur de l'étude. L'analyse de cycle de vie, et la mobilité urbaine représentent des champs d'étude et d'application en lien avec le sujet de ce travail de recherche.

La première partie de ce chapitre a présenté l'approche de conception biomimétique, inspirée du plus ancien laboratoire de recherche et développement du monde : la Nature et ses 3,8 milliards d'années d'évolution! Le biomimétisme offre certainement des pistes de réflexion et des modèles inspirants à suivre. Cependant, cette approche ne doit jamais s'ériger en dogme, mais plutôt se présenter comme une démarche complémentaire à celles déjà disponibles pour innover et viser une réduction des impacts environnementaux négatifs des produits et processus. Le biomimétisme constitue pour certains auteurs l'une des boîtes à outils de la prochaine révolution industrielle (Durand et al., 2012). La conception biomimétique est encore en phase de développement et dispose de peu d'outils de quantification afin d'en faciliter la diffusion en ingénierie et ce projet de recherche vise à combler cette lacune. L'approche biomimétique offre, cependant, une perspective intéressante pour inspirer les ingénieurs ou designers dans leurs recherches de solutions.

Une seconde section de ce chapitre portait sur la présentation des étapes de l'analyse de cycle de vie, et des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux. Il est important de noter

qu'une présentation détaillée des méthodes d'évaluation des impacts est proposée dans le chapitre 3 qui expose l'article publié, consacré au développement de BiomiMETRIC.

Enfin, la troisième section de cette revue de la littérature portait sur la mobilité urbaine. Des innovations de ruptures devront être envisagées afin de proposer des modes d'organisation de la ville et de sa mobilité en adéquation avec les enjeux environnementaux. L'inspiration issue de la nature, conjuguée à la démarche de conception biomimétique, et à l'analyse de cycle de vie demeurent des pistes prometteuses, mais cependant trop peu explorées. Dans la suite de la thèse, une analyse de la performance environnementale de scénarios de mobilité est conduite avec une approche biomimétique. Cette analyse mobilise des outils qui ont été développés dans le cadre de cette thèse et qui seront présentés. Les scénarios intègrent les perspectives, à court terme, proposées par l'ARTM, les données prospectives, les données de l'enquête Origine Destination réalisée à Montréal ainsi que les orientations de la Politique de mobilité durable 2030 du gouvernement du Québec (Gouvernement du Québec, 2018).

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE

Ce chapitre présente le projet de recherche, et plus spécifiquement le sujet d'étude, les outils utilisés et les principales contributions à l'avancement de la recherche qui seront détaillés dans les chapitres 3 et 4.

2.1 Projet de recherche et contribution de la thèse

Le projet de recherche de cette thèse est scindé en deux grandes sections qui portent sur :

1) La bonification de la méthodologie de conception biomimétique avec :

- une approche de classification des dix principes de biomimétisme selon trois axes globaux d'éco-innovation;
- l'association des méthodes quantitatives d'évaluation des impacts utilisées en ACV avec les principes de biomimétisme élaborés par le Biomimicry Institut, et que l'on retrouve dans les écosystèmes matures;
- le développement de BiomiMETRIC, outil d'aide à la conception biomimétique qui facilite le calcul, la présentation et l'interprétation des résultats issus du couplage des méthodes d'impact avec les principes de biomimétisme.

2) L'application de BiomiMETRIC à l'évaluation de scénarios prospectifs en mobilité urbaine :

- en regard des principes biomimétiques;
- afin de faciliter le processus de prise de décision pour une meilleure performance environnementale.

La figure 2-1 présente un résumé de la structure de l'outil BiomiMETRIC, de son développement et de son utilisation.



Figure 2-1 Résumé du développement et de l'utilisation de BiomiMETRIC

2.2 BiomiMETRIC : conception biomimétique et évaluation des impacts

La méthodologie de conception biomimétique facilite la compréhension et l'intégration des fonctions et propriétés développées par le vivant (diversité, résilience, adaptation, efficacité énergétique) et qui se retrouvent au sein des écosystèmes matures. Comme la démarche d'évaluation de la performance biomimétique d'une solution (étape 7 de la séquence dans le tableau 1.5) est encore très qualitative, un outil d'analyse quantitatif utilisant des méthodes reconnues en ACV a été développé.

Une partie importante du travail de développement de l'outil BiomiMETRIC vise à analyser et sélectionner les méthodes issues de l'ACV qui sont les plus appropriées pour quantifier chaque principe de biomimétisme utilisé dans la démarche de conception biomimétique.

2.2.1 Outils pour la mise en œuvre du projet de recherche

Le logiciel Simapro Faculty V9.1.1, et la base de données Ecoinvent 3.6 permettent d'accéder aux différents outils, processus et méthodes utilisés en ACV. Le concept d'unité fonctionnelle, base de comparaison des produits ou scénarios est également issu de la méthodologie utilisée en ACV. L'idée de combiner la conception biomimétique et l'analyse du cycle de vie a déjà été suggérée (De Pauw et al., 2015; Earthshiftglobal, 2019). En effet, même si la méthodologie proposée par le Biomimicry Institut, ou celle décrite dans la norme ISO 18458 n'y font pas référence, il est intéressant d'évaluer plus finement les impacts environnementaux d'une solution biomimétique en ayant recours à une ACV complète ou au moins partielle. BiomiMETRIC, qui permet de synthétiser et d'interpréter les résultats, est développée à l'aide d'une feuille de calcul disponible en ligne (sur demande), et qui peut être facilement partagée.

2.2.2 Association des méthodes d'impacts avec les principes biomimétiques : prémices et précisions

La démarche visant le développement de l'outil BiomiMETRIC, consiste à associer chaque principe du vivant avec une méthode d'évaluation des impacts utilisée en ACV afin de pouvoir quantifier ce principe. BiomiMETRIC priorise des catégories d'impacts intermédiaires (Midpoint) plutôt que des catégories de dommages (Endpoint) plus agrégées et moins précises. La présentation détaillée du développement de l'outil BiomiMETRIC a donné lieu à une publication (Terrier et al., 2019) présentée dans le chapitre 3.

L'ACV est souvent considérée comme un outil pour mesurer les impacts environnementaux et la non-durabilité, tandis que la conception biomimétique, inspirée du vivant, vise à générer des innovations positives pour l'environnement afin d'atteindre la durabilité (De Pauw et al., 2015). Cependant, la conception biomimétique ne dispose pas d'outils quantitatifs aussi complets et précis que l'ACV. Afin de combler cette faiblesse, ce chapitre présente le développement de BiomiMETRIC outil d'assistance pour la conception biomimétique permettant la quantification de la performance biomimétique avec les prémices suivantes :

- les «10 principes du vivant » ou principes biomimétiques présentés par le Biomimicry Institute (Principle-Biomimicry-Institut, 2012) sont utiles, mais hélas non quantifiables et parfois difficiles à mettre en œuvre dans le cadre d'un projet que ce soit en ingénierie, architecture ou design;
- les méthodes d'évaluation des impacts utilisées en ACV, disponibles dans des bases de données comme Ecoinvent (Frischknecht et al., 2005; Weidema et al., 2013), permettent une quantification des impacts et dommages environnementaux tels que les changements climatiques, la dégradation des ressources, les impacts sur la santé humaine ou encore l'empreinte écologique;
- en associant les méthodes quantitatives d'évaluation des impacts utilisées en ACV, avec les principes et stratégies du vivant utilisés en biomimétique, il est possible de tendre vers une évaluation quantitative de la performance biomimétique d'une solution technologique, d'un concept ou d'un design.

2.3 Analyse systémique et prospective pour la génération de scénarios de mobilité

Cette section présente la genèse des scénarios de mobilité urbaine ainsi que la démarche d'application de BiomiMETRIC pour l'évaluation de la performance biomimétique des scénarios.

La mobilité urbaine devra s'adapter aux nouvelles exigences environnementales, et il faudra réorganiser le transport pour réduire la consommation énergétique et les émissions de GES. Tel que présenté dans la revue de la littérature, la mobilité durable se veut efficace, inclusive, sobre, peu impactante sur l'environnement, et soutenant le développement économique. Cette forme de mobilité offre plus d'options aux citoyens, augmente l'accessibilité aux diverses destinations, et favorise les solutions à faible empreinte carbone (ARTM, 2019).

2.3.1 Approche prospective simplifiée pour l'élaboration des scénarios

La méthode prospective qui permet de « se représenter les futurs possibles pour mieux peser les conséquences de la décision présente » (Lugan, 2006) est utilisée pour la génération des scénarios. La prospective vise à élaborer des scénarios d'avenir, à plus ou moins longs termes, pour aider les décideurs à définir des stratégies d'action pour le futur (Commissariat général au Développement Durable, 2009). « Parce qu'elle permet de corrélérer les impératifs du court terme aux perspectives du long terme afin que les bonnes solutions d'aujourd'hui ne deviennent pas demain des problèmes insolubles, la prospective est une démarche que l'idée de développement durable rend désormais indispensable » (Lugan, 2006).

La prospective est une approche systémique (Lugan, 2006). Elle part du diagnostic d'un ensemble d'enjeux comme l'évolution de la mobilité et de la demande en transport, pour simuler les changements ou les conséquences sur le territoire, les hommes, les activités, les écosystèmes. Ces facteurs de changement ou variables clés désignent des événements, des phénomènes, des tendances et des ruptures, des décisions, qui vont influencer l'évolution du système. Les facteurs sont variés et peuvent être issus de tendances, ils peuvent exprimer des faits porteurs d'avenir ou encore des signaux faibles, être en lien avec de nouvelles

technologies, avec une évolution des comportements, des prix de matières premières, en lien avec l'énergie, le réchauffement climatique ou encore la démographie. L'analyse et la prise en compte de ces multiples facteurs de changement ainsi que leur classement selon les priorités, permettront d'établir des hypothèses d'évolution et d'élaborer des scénarios prospectifs qui sont le reflet de ce qui pourrait advenir.

Ces scénarios se présentent sous la forme de textes qui décrivent la situation de façon qualitative. Cette approche méthodologique est déjà utilisée au Québec dans le domaine du transport, et certains groupes de recherche (Centre de mobilité durable de Sherbrooke CMDS, 2011) proposent des scénarios prospectifs d'évolution de la mobilité.

2.3.2 Approche biomimétique appliquée à la mobilité

La mobilité analysée avec une approche biomimétique peut être vue comme l'une des composantes de la mobilité durable. En effet, la mobilité durable se veut performante au niveau environnemental, social et économique. L'approche biomimétique appliquée à la mobilité a pour objectif de tendre vers une organisation de la mobilité conforme aux caractéristiques retrouvées dans les écosystèmes, le vivant ou la nature, et qui sont reconnues comme exemples aboutis de performance environnementale.

L'approche biomimétique appliquée à la mobilité ne couvre cependant pas les sphères sociales et économiques. En effet, ces deux domaines sont issus d'une construction sociale anthropique, qui est absente des écosystèmes résilients et performants au plan environnemental. La figure 2-2 présente le positionnement de cette forme de mobilité évaluée via une approche biomimétique, et que l'on pourrait qualifier de mobilité bioinspirée, dans une perspective de mobilité durable.

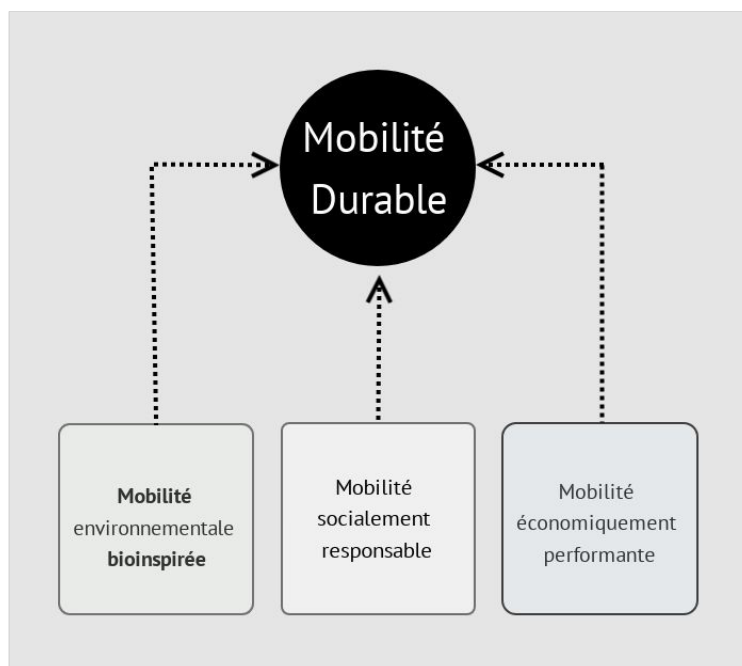


Figure 2-2 Positionnement de la mobilité bioinspirée dans une perspective de mobilité durable

Biomimetric est utilisé dans le cadre de cette thèse pour l'analyse de scénarios de mobilité selon la méthodologie suivante :

- 1) génération de scénarios en mobilité urbaine avec une approche systémique et prospective, basée sur les données de l'enquête Origine-Destination (MTQ, 2019) et les perspectives en transport, comme celles fournies par l'Autorité Régionale de Transport Métropolitain (ARTM, 2019);
- 2) analyse de la performance biomimétique des scénarios avec l'outil Biomimetric;
- 3) recommandations et sélection des scénarios optimaux basées sur les résultats de l'analyse biomimétique.

2.4 Généralités sur l'application de la méthode de conception biomimétique

Bien que Biomimetric présente les résultats permettant de quantifier certains impacts dans une perspective de conception biomimétique pour une solution donnée, il est recommandé de

réaliser une comparaison entre plusieurs solutions ou scénarios, afin de révéler celui qui présente la meilleure performance biomimétique. En effet, aucun seuil n'est actuellement établi pour chaque principe afin de déterminer qu'une solution est biomimétique. Même si des réserves peuvent être exprimées au sujet des principes de biomimétisme issus de l'analyse des écosystèmes matures, ils demeurent une source d'inspiration pour améliorer la performance environnementale des processus, des scénarios, des produits ou des projets.

Tenir compte de l'évolution des conditions environnementales, et des nouvelles contraintes dans la conception de solutions est caractéristique d'une approche biomimétique inspirée de la résilience et de l'adaptation qui définissent le vivant. Croître pour croître, sans limites, n'est pas un comportement durable et répandu dans la nature, où les organismes vivants doivent composer avec la rareté de l'énergie et des ressources. Ces principes de base devraient servir de phare dans le cadre de toutes démarches d'écoconception.

2.5 Principales contributions de ce projet de thèse

BiomiMETRIC peut être utilisé dans le cadre d'une démarche complète de conception biomimétique ou alors comme méthode d'analyse de la performance environnementale dans le cadre d'un processus de conception conventionnel. Cet outil permet également de présenter les résultats issus de questions qui visent à évaluer l'intégration du biomimétisme tout au long du projet.

Un article présentant le développement et l'utilisation de l'outil BiomiMETRIC a été publié dans la revue *Biomimetics* avec comité de lecture en juillet 2019 (Terrier et al., 2019). Cet article présente les étapes du travail qui ont conduit à la finalisation de BiomiMETRIC ainsi qu'une étude de cas portant sur la comparaison de matériaux d'isolation utilisés pour améliorer la performance énergétique d'un immeuble. Les deux matériaux, l'un biosourcé et l'autre industriel ont été comparés avec l'outil BiomiMÉTRIC en termes de performances environnementales. Cette étude de cas a permis de tester et de valider le fonctionnement de BiomiMETRIC.

Dans le cadre du chapitre 4, BiomiMETRIC est utilisé pour l'analyse de scénarios de mobilité urbaine, afin d'en évaluer la performance et d'en faciliter la sélection à l'aune des principes de biomimétisme garant d'une performance environnementale. La figure 2-3 présente schématiquement les principales contributions de cette thèse qui seront détaillées dans les chapitres 3 et 4.



Figure 2-3 Résumé schématique des contributions de la thèse

CHAPITRE 3

BIOMIMETRIC ASSISTANCE TOOL: A QUANTITATIVE PERFORMANCE TOOL FOR BIOMIMETIC DESIGN

Philippe Terrier ^a , Mathias Glaus ^b , Emmanuel Raufflet ^c

^a Laboratoire d'ingénierie pour le Développement Durable, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^c Département de Management, HEC Montréal,
3000 chemin de la Côte-Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada H3T 2A7

Article publié dans « Biomimetics », juillet 2019

Abstract: This article presents BiomiMETRIC, a quantitative performance tool for biomimetic design. This tool is developed as a complement to the standard ISO 18458 Biomimetics—terminology, concepts, and methodology to quantitatively evaluate the biomimetics performance of a design, a project, or a product. BiomiMETRIC is aimed to assist designers, architects, and engineers to facilitate the use of the biomimetic approach beyond the existing frameworks, and to provide an answer to the following question: How can a quantitative evaluation of biomimetic performance be carried out? The biomimetic quantitative performance tool provides a method of quantitative analysis by combining the biomimetic approach with the impact assessment methods used in life-cycle analysis. Biomimetic design is divided into eight steps. The seventh step deals with performance assessment, verifying that the concept developed is consistent with the 10 sustainable ecosystem principles proposed by the Biomimicry Institute. In the application of the biomimetic quantitative performance tool, stone wool and cork are compared as insulation materials used in biomimetic architecture projects to illustrate the relevance and added value of the tool. Although it is bio-based, cork

has a lower biomimetic performance according to the indicators used by the biomimetic quantitative performance tool presented in this article.

Keywords: biomimetic methodology; engineering design tool; life-cycle analysis.

3.1 Introduction

The idea of combining biomimetic design and life-cycle analysis (LCA) was previously suggested [1,2], but no tools or methods for evaluating biomimetics performance have been developed. LCA is often seen as a tool for measuring environmental impacts and unsustainability, whereas biomimetic and nature-inspired design is aimed to generate environmentally positive innovations to achieve sustainability [1].

Several frameworks have been proposed in the field of biomimicry. On one hand, two ISO standards are available: ISO 18458 [3], Biomimetics—Terminology, Concepts and Terminologies, which provides a framework for biomimetic terminology and a method for use in science, industry, and education; and ISO 18459, Biomimicry—Biomimetic Optimization, which specifies the functions and areas of application of biomimetic optimization methods to extend the life and reduce the mass of components. On the other hand, the Biomimicry Institute has proposed a biomimetic design sequence [4], recommending that during the design process, the Ask Nature database [5] be consulted in order to discover the “principles of Nature.” The main difficulties for neophytes in the field of biomimicry are first to know what to look for in the database and then to identify the keywords for searching the database in order to select a strategy. During the biomimetic design process, it is necessary to consider the function of the product in order to discover in the database, what nature does to achieve this function and what strategy “life” has put in place to achieve it. Despite the availability of standards such as ISO 18458 [3] and the exhaustive amount of information proposed by the Biomimicry Institute [6], the biomimetic design method is being developed, and the use of these frameworks is limited in fields such as engineering or design. This method is divided into eight steps, which are presented in Figure 3.1

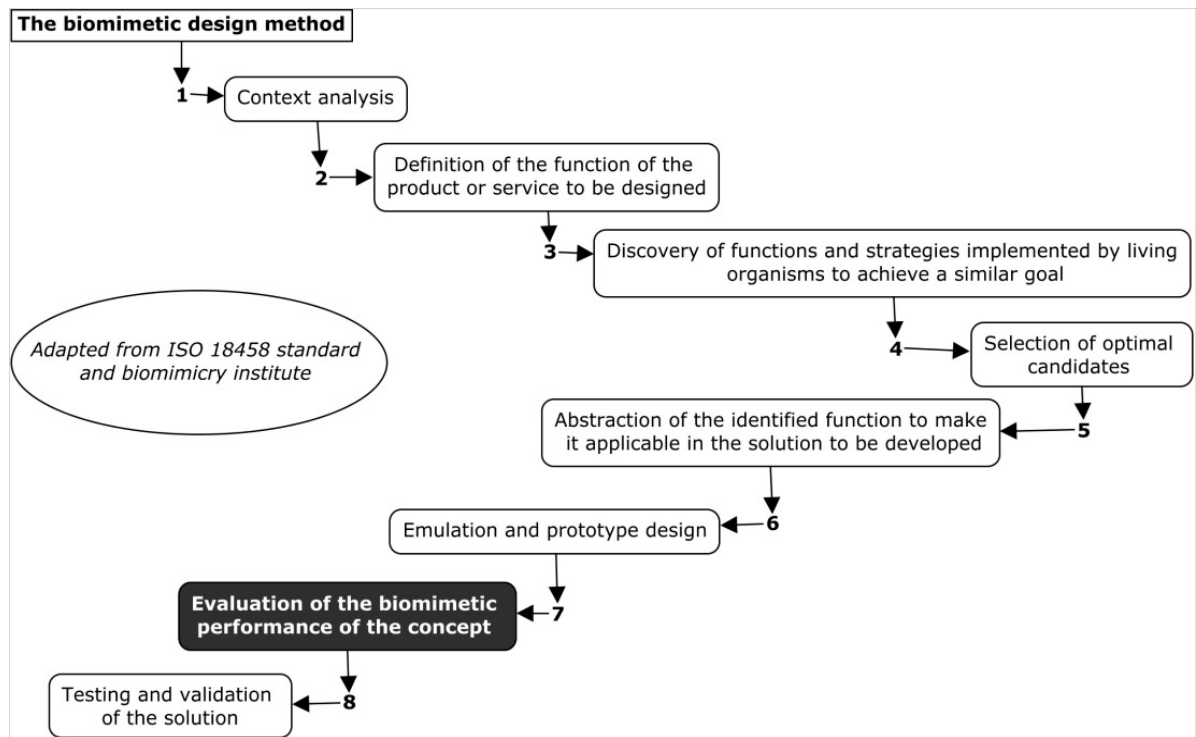


Figure 3-1 The biomimetic design method

The implementation of this approach has weaknesses and limitations [7], mainly at Step 7 in the assessment of biomimetic performance. Several tools for discovering solutions exist in nature [8–10], and some are based on computer-aided biomimetics software developed for the integration of biological knowledge in engineering to facilitate the search for solutions [9,11,12]. More than 40 tools are available [9] to facilitate the use of the biomimetic approach in design, architecture, and engineering, which are focused mainly on the steps involved in identifying and transposing biological models to technological applications. However, the approach is often qualitative, and the majority of publications are focused on bio inspiration and the technological solutions that result from it. Very few articles have dealt with a biomimetic methodology that could be used in design or engineering [13] with the emphasis on quantifying biomimetic performance. There are no quantification tools available for assessing the degree of inclusion of biomimicry in the solutions developed [9].

In order to address the biomimetic design methodology, this article proposes the development of BiomiMETRIC, a tool for quantifying biomimetic performance based on the following premises: The “Life’s Principles” [14] are useful, but unfortunately, they are not quantified, and they are often difficult to implement in the context of an engineering project. The environmental impact assessment methods used in life-cycle assessment (LCA), which are available in databases such as Ecoinvent [15,16], allow for the quantification of environmental impacts and damage, such as climate change, resource degradation, human health impacts, and ecological footprints. By combining the quantitative impact assessment methods used in LCA with the principles and strategies of living organisms used in biomimetic design, we structure a quantitative assessment of the biomimetic performance of a technological solution, concept, or design. This methodological approach will be developed in the form of a tool that will facilitate the implementation of the biomimetic design method. BiomiMETRIC is aimed to help designers and engineers choose quantitative impact methods from LCA to evaluate the “Life’s Principles” and to facilitate the assessment of biomimetic performance.

3.2 Context and Terminology in Biomimetics

In this Section, we will present important concepts in biomimicry and in life-cycle analysis, which will allow the better understanding of the development of BiomiMETRIC assistance tool.

3.2.1 Functions and Strategies of Living Organisms

Functions and strategies are two fundamental terms in the biomimetic lexicon. The function [17] of a natural system is usually an adaptation that helps the system survive and thrive. The function is implemented by the strategies of a living system. A biological strategy is a characteristic, mechanism, or process that performs a function for a living organism. The function to be achieved is therefore at the heart of the biomimetic design process. Carrying out a biomimetic design requires following an approach where it is necessary to question the function that the technological solution must achieve. The designer must approach the problem to be solved without unconsciously favoring an a priori solution. At a later stage in the

biomimetic design sequence, it has been recommended to analyze the conformity of the solution developed according to the “Life’s Principles” [14] that normally govern sustainable ecosystems. However, neither the approach proposed by the Biomimicry Institute nor the guidelines set out in the ISO standards provide quantitative tools to measure the biomimetic performance of the solutions developed.

3.2.2 The Principles of Living Organisms to Formalize Biomimicry

The Biomimicry Institute highlights 10 unified principles of nature (i.e., nature’s unifying patterns) or “Life’s Principle” [18], which strongly overlap those stated by Jeanine Benyus [6]:

- 1) Use materials sparingly.
- 2) Use energy efficiently.
- 3) Do not exhaust resources.
- 4) Source or buy locally.
- 5) Optimize the whole rather than maximize each component individually.
- 6) Do not pollute your nest.
- 7) Remain in dynamic equilibrium with the biosphere.
- 8) Use waste as a resource.
- 9) Diversify and cooperate.
- 10) Be informed and share information.

However, it remains difficult to assess the level of implementation of some principles in a project either because they are not quantifiable or because no measurement indicators have been developed. In any case, these principles are always effective guides or sources of inspiration during the biomimetic design process. They serve as the basis for the development of BiomiMETRIC assistance tool, the objective of which is to provide a quantification approach to each principle and a measurement indicator to assess biomimetic performance.

3.2.3 Biomimetic Principles from the Study of Living Organisms and Sustainable Ecosystems

By adapting the form to the function of the organism, its life is built with a minimum of resources [18]. In the context of a project or product development, a biomimetic approach invites the designer to learn about the use of resources and their environmental impacts in order not to generate the unsustainability or over-consumption of these resources. If toxic substances exist in living organisms, all toxic molecules are fairly quickly degradable. In addition, organisms only produce toxins to avoid damaging the environment and to respect its absorption capacity [18].

To evolve and adapt to their local environments, ecosystems rely on biodiversity, which is one of the keys of their resilience [19,20]. The higher the diversity, the greater the interactions and cooperation, the more effective the system will be in performing its functions despite unpredictable changes in the external environment. In a mature ecosystem, production and recycling circuits are in balance. Thus, in a forest, dead plants are recovered and degraded by organisms (e.g., fungi and bacteria). The latter redistribute the material, which is transformed in the form of nutrients, without generating waste [21]. The conditions necessary for life result from a series of exchanges between organisms and their environment. All withdrawn stocks circulate but do not decrease.

Using waste as an input for the manufacture of a product and providing other companies with its waste, which then becomes a resource, are approaches in this direction. Cooperation between companies ensures the closed circulation of resources, which is similar to that found in nature [21]. Within the framework of a biomimetic approach, it is necessary to encourage the implementation of industrial ecology or circular economy approaches by identifying opportunities for cooperation and the implementation of feedback loops.

3.3 Life-Cycle Assessment Method for Impact Evaluation

A wide range of LCA impact methods [22,23] is available: ReCiPe 2016, Impact 2002+, and EDP 2013 in the European context; TRACI and LUCAS in North American context; GHG Protocol, IPCC 2013, and USEtox in the global context. The main methods that are potentially relevant for the tool will be presented. However, this article does not describe in detail the methods in the literature [23]. These impact methods use characterization factors that are indicators that represent each impact category based on its own value and unit of measurement. For example, the characterization factor of radiative forcing leading to climate change is estimated in kg CO₂ eq. Each greenhouse gas (GHG) is then converted into a kg CO₂ eq using a multiplicative factor. All the methods used to assess environmental impacts have specific strengths, weaknesses, and limitations, and they all offer a tool for quantifying the impacts of midpoints and endpoints, which correspond to the aggregation of intermediate impact categories.

These multiple quantitative methods are used to assess one or more different categories of impacts. It is recognized that the midpoint impact categories have fewer uncertainties than the endpoint impact categories, and they are based on more widely accepted scientific models. However, the results of these methods are often more difficult to interpret [24]. To calculate impact, each method considers a different number of chemicals in the life-cycle emission inventory (LCI).

BiomiMETRIC presented in this article prioritizes midpoint impact categories rather than the more aggregated and less precise endpoint categories. In addition, the midpoint impact categories often cover issues that are directly associated with the living world, such as ecotoxicity, biodiversity, eutrophication, and resources. The many methods have been previously analyzed and compared according to the impact to be evaluated [24]. The following is a summary of the presentation of the main methods.

- ReCiPe

Method ReCiPe, which was revised in 2016 for use in life-cycle analysis [25,26], includes the impact categories of midpoint (problem-oriented) and endpoint (damage-oriented). The characterization factors (CF) of ReCiPe are given for the following 13 impact categories [25]: (1) Climate change. CF is the global warming potential based on the IPCC 2013 report. Unit: kg CO₂eq/ kg GHG; (2) stratospheric ozone depletion. CF accounts for the destruction of the stratospheric ozone layer by anthropogenic emissions of ozone depleting substances. Unit: kg CFC11-eq/ kg Ozone Depleting Substances; (3) ionizing radiation. CF accounts for the level of exposure for the global population. Unit: kBq Co-60 to air eq/kBq; (4) fine particulate matter formation. CF is the intake fraction of PM_{2.5}. Unit: kg PM_{2.5}-eq/kg; (5) a) photochemical ozone formation and human health. CF is determined from the change in the intake rate of ozone due to changes in the emission of precursors (NO_x and non-methane VOC). Unit: kg NO_x-eq/kg (5) b) photochemical ozone formation and terrestrial ecosystems. CF is determined from the change in the intake rate of ozone due to changes in the emission of precursors (NO_x and non-methane VOC). Unit: kg NO_x-eq/kg; (6) terrestrial acidification. CF is acidification potential (AP) derived using the emission weighted world average fate factor of SO₂. Unit: kg SO₂ equivalents/kg; (7) freshwater eutrophication. CF accounts for the environmental persistence (fate) of the emission of P (phosphorus)-containing nutrients. Unit: kg P-eq to freshwater/ kg; (8) marine eutrophication. CF accounts for the environmental persistence (fate) of the emission of N (nitrogen) containing nutrients. Unit: kg N-eq to marine water/kg; (9) ecotoxicity terrestrial, freshwater, marine, and human carcinogenic or human non-carcinogenic. The CF of human toxicity and ecotoxicity accounts for the environmental persistence (fate) and accumulation in the human food chain (exposure), and toxicity (effect) of a chemical. Unit: kg 1,4-dichlorobenzene (1,4-DCB) emitted to soil. (10) water use. CF is the amount of fresh water consumption. Unit: m³ water consumed. For the moment, this impact category does not include regionalized characterization factors. The AWARE method is better to evaluate impact on water; (11) land use. CF is the amount of land transformed or occupied for a certain time. Unit: m²*yr; (12) mineral resource scarcity. CF is the surplus ore potential. Unit : kg Cu-eq/kg ore; (13) fossil resource scarcity: CF is the fossil fuel potential, based on

the higher heating value. Unit: kg oil-eq/unit of resource. The characterization factors are representative of the global scale.

- CED

Method CED [27] enables the evaluation and comparison of energy criteria for products and services. The primary energy demand and all energy carriers that are found in nature are calculated for the entire lifetime. CED is the sum of the cumulative energy demands for the production, use, and disposal of the product. This method was published by Ecoinvent, and it is widely used as a screening indicator for environmental impacts [28]. The CF [23] of the energy resources are divided into five impact categories: (1) Non-renewable, fossil (based on the upper heating value of the resources); (2) non-renewable, nuclear (based on the upper heating value of the resources); (3) renewable, biomass (based on the amount of energy harvested or converted); (4) renewable, wind, solar, and geothermal (amount of energy harvested or converted); (5) renewable, water (based on the amount of rotation energy transmitted to the turbine). The unit of CF is megajoule equivalent (MJ eq), and the method has a global location (no regionalization).

- CExD

Method CExD. Exergy is a way to express the quality of energy rather than the context of energy. Exergy is a measure of the useful work that a certain energy carrier can offer. For instance, natural gas has a high exergy value, as it can be used to create high temperatures and highly pressured steam. In this method, exergy is used as a measure of the potential loss of useful energy resources. In order to quantify the life-cycle exergy demand of a product, the indicator cumulative exergy demand (CExD) is defined as the sum of exergy of all resources that are required to provide a process or product. [26]. The CF of the exergy resources are divided into 10 impact categories: (1) Non-renewable fossil; (2) non-renewable nuclear; (3) renewable kinetic; (4) renewable solar; (5) renewable potential; (6) non-renewable primary; (7) renewable biomass; (8) renewable water; (9) non-renewable metals; (10) non-renewable minerals. The unit of CF is megajoule equivalent (MJ eq).

- AWARE

Method AWARE [26] consists of the following: (1) A water-use indicator representing the relative available water remaining (AWARE) per area in a watershed after the demand of humans and aquatic ecosystems has been met; (2) the recommended method from WULCA (i.e., a working group under the umbrella of the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative) to assess water consumption impact in LCA. It is used to assess the potential of water deprivation in either humans or ecosystems (the less the available water remaining per area, the more likely it is that another user will be deprived). The AWARE indicator is calculated in two steps: (1) Relative to the area ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{month}$), the AWARE indicator (availability minus demand [AMD]) of humans and aquatic ecosystems; (2) the value is normalized with the world average result ($\text{AMD} = 0.0136 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ month}$) and inverted. The result represents the relative value in comparison with the average m^3 consumed in the world. The world average is calculated as a consumption-weighted average. The AWARE indicator is non-dimensional and ranges from 0.1 to 100, where 0.1 is the best target. A value of 1 is the world average; a value of 10 describes a region where there is 10 times less available water remaining per area than the world average.

- IPCC

Method IPCC 2013, which was developed by the International Panel on Climate Change (IPCC), lists the climate change factors with a timeframe between 20 and 100 years. This method is the most frequently recommended for GHG evaluation, and IPCC is used in many other methods. Direct global warming potentials (GWPs) are an index for indicating the impact of carbon dioxide and estimating the relative global warming contribution of a kg of a particular GHG compared to the emission of a kg of CO_2 [28]. The characterization factors of IPCC, expressed in $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$, are available in table based on a 100-year time horizon [29].

- USETOX 2

USEtox2 [26,30] is an environmental model for the characterization of human and ecotoxicological impacts. This method is designed to describe the fate, exposure, and effects

of chemicals. It is officially recommended as an assessment method by the European Commission, the World Business Council for Sustainable Development, and by the United States EPA. The CF [31] are as follows: (1) Human toxicity potential, where CF is expressed in comparative toxic units (CTUh), providing the estimated increase in morbidity in the total human population per unit mass of a contaminant emitted and assuming equal weighting between cancer and non-cancer effects. Unit: Disease cumulative cases/kg; (2) ecotoxicity potential. The ecotoxicological effect reflects the potentially affected fraction (PAF) of species. Unit: PAF m³ kg⁻¹. The CF is representative of the global scale. The impact methods most commonly used in the scientific community working in the field of LCA are implemented in databases such as Ecoinvent [15], which are available in a wide range of software, such as Simapro [23] or Open LCA [32]. Free impact assessment methods that are compatible with Open LCA are available on the Nexus Open LCA website [33]. The documentation accompanying these software packages presents the methods and impact categories analyzed [34].

3.4 Methodological Approach

3.4.1 Dimensions of Biomimetic Eco-Innovation

In this article, we propose a new approach by aggregating the 10 “Life’s Principles” into three dimensions of biomimetic eco-innovation, as shown in Figure 3-2.

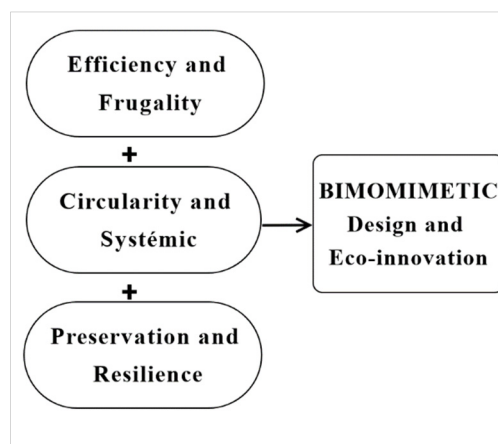


Figure 3-2 Dimensions proposed for grouping the principles of biomimetic

These dimensions are as follows:

- 1) Efficiency and frugality: This dimension include the principles of “Using materials and energy sparingly and effectively,” “Source or buy locally,” “Do not exhaust resources,” and “Optimizing the whole rather than maximizing each component individually.” Efficiency is associated with frugality in resource consumption.
- 2) Preservation and resilience: This dimension include the principles of “Do not pollute your nest” and “Remain in dynamic equilibrium with the biosphere.” Preservation is associated with resilience, which ensures that nature adapts to change.
- 3) Circularity and systemic approach: This dimension include the principles of “Use waste as a resource,” “Diversify and cooperate,” and “Be informed, share information, and implement feedback loops.” Circularity is associated with the systemic approach based on the analysis of flows into and out of the system boundaries.

3.4.2 Association of Environmental Impact Assessment Methods Used in LCA with the Principles of Living Organisms which Guide the Biomimetic Design

In this approach, which is aimed at developing BiomiMETRIC assistance tool, each principle of living organism is associated with an impact assessment method that is used in LCA to quantify this principle. For each “Life’s Principles” and each dimension of biomimetic eco-innovation presented in Figure 3.2, we will associate an impact method with a relevant indicator of the environmental aspect to be analyzed.

The efficiency and frugality dimension include the five biomimicry principles described in detail below. Efficiency is associated with frugality in resource consumption. Each impact method that is proposed to analyze a principle is also presented.

- 1) Use materials sparingly. This principle is proposed to reduce the quantities of materials and ores used. For this principle, we will use the ReCiPe method [25] to evaluate the consumption-mineral resource scarcity. The other impact categories of the ReCiPe method previously presented will be used to quantify other biomimetic “Principles”.

- 2) Use energy efficiently. This principle is proposed to maximize the efficiency of the energy conversion systems used, especially in the case of non-renewable resources and energy of mineral resources with the impact category or characterization factor, 12y. For this principle, we use the cumulative energy demand (CED) method to estimate the amount of energy used.
- 3) Do not exhaust resources. This principle invites us to focus on abundant, renewable, and easily accessible resources and to be aware of resource limitations or renewal rates. For this principle, we use the cumulative exergy demand (CExD) method to assess the quality degradation of the energy used. We will also use the ReCiPe method [25,26], which was presented above, to assess fossil resource consumption using the 13 Fossil resource scarcity impact category. For this principle, we also recommend the AWARE method for assessing the impacts on water availability [35]. Many impact analysis methods, such as ReCiPe, do not sufficiently consider the impact of water consumption on its availability and on health [36].
- 4) Source or buy locally. This principle concerns the reduction of the impact of transport, especially in terms of GHG emissions. We use the IPCC 2013 GWP 100a method to assess emissions in kg CO₂ eq.
- 5) Optimize the whole rather than maximize each component individually. The objective of this principle is to define optimization or quality according to the principles of sustainable development. No impact quantification method is applicable to this principle. To evaluate it, in BiomiMETRIC, we formulate the series of five questions presented below, which are evaluated and weighted according to their level of consideration in the product or solution. The higher the score, the more strongly the question is considered from the point of view of the implementation of biomimicry in the product or the design.

The following questions are implemented in BiomiMETRIC:

- Are repair, repackaging, dismantling, and recycling at the end of life possible?
- Is the quantity of residual materials reduced?
- Are the product and production aimed to respect the environmental support capacity?
- Do the product and production reduce environmental impacts?

- Is an ecolabel or environmental product declaration being sought?

The preservation and resilience dimension include the principles presented below. Preservation is associated with resilience, which ensures that nature adapts to change because it is consistent with the principles:

- 6) Do not contaminate your nest. This principle invites us to use green chemistry with low environmental impacts and to avoid the generation of pollutants. For this principle, we use the ReCiPe method [25,26] presented above to evaluate GHG emissions with the characterization factor 1, climate change, the depletion of the ozone layer with the characterization factor 2, stratospheric ozone depletion, the assessment of fine particulate matter emissions PM 2.5, PM 10 with characterization factor 4, fine particulate matter formation, and the formation of photochemical smog with characterization factor 5, photochemical ozone formation.
- 7) Remain in dynamic equilibrium with the biosphere. This principle invites us to minimize environmental impacts so that the capacity of the biosphere is not degraded in supporting life. For this principle, we use the ReCiPe method [25,26] presented above to evaluate the acidification of the environment with characterization factor 6, terrestrial acidification, the eutrophication of fresh water and oceans with the characterization factors 7, freshwater eutrophication and 8, marine eutrophication, human toxicity and aquatic and terrestrial ecotoxicity with characterization factor 9, ecotoxicity terrestrial, freshwater, marine, and human carcinogenic or human non-carcinogenic. In order to standardize the characterization of the impacts of chemical compounds at the human and ecotoxicological levels, the *USEtox2* method was developed under the aegis of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [36]. We will use this method to assess impacts such as soil acidification or water ecotoxicity. The *USEtox2* method is widely accepted in its field, and it is used in both Europe and North America [37] to assess the impacts of chemicals, both on humans (increase in cases of disease per kg of substances emitted) and on ecosystems (fraction of species affected per kg of substances emitted).

The circularity and systemic dimension include the principles presented below. These principles are qualitative and cannot be quantified using impact methods in LCA. To overcome this problem, we will develop a series of questions and a scorecard to quantify the performance of a solution regarding the principles of biomimicry.

- 8) Use waste as a resource. This principle invites us to close the loop in a circular economic logic. To evaluate this principle, we use the ReCiPe method [25,26] presented above to quantify land use with the characterization factor 11, land use. A closure of flows and a reduction in the amount of waste will reduce the demand for ground space to ensure the supply of resources and waste management.
- 9) Diversify and cooperate. This principle invites us to implement the circular economy. No impact quantification method is applicable to this principle. To evaluate it, we use in biomiMETRIC the series of five questions presented below, which are evaluated and weighted according to the level of consideration of the questions in the product or solution. The higher the score, the more strongly the question is considered from the point of view of the implementation of biomimicry in the product.

The following questions are implemented in BiomiMETRIC:

- Are functional economy (or cooperation economy) tools known and used?
 - Can the project be positioned in a non-competitive niche to avoid competition?
 - Have stakeholders been identified and consulted during the project?
 - Is the systemic approach used?
 - Are circular economy principles known and applied?
- 10) Be informed, share information, and implement feedback loops. This principle invites us to adopt a systemic vision. Circularity is associated with the systemic approach based on the analysis of flows into and out of the system boundaries. Living organisms receive and process a great amount of information to adapt to variations in their environment (e.g., temperature, season, and light). For this principle, we also formulate a series of five questions presented below.

The following questions are implemented in BiomiMETRIC:

- Is the information required to increase sustainability disseminated and accessible?
- Are training and evaluation on the biomimetic approach proposed?
- Does the company integrate social/environmental information in its decision-making?
- Is a special attention paid to scarce and over-exploited resources?
- Are the major issues related to sustainability and societal inequalities known and shared?

We present a summary of the association of each biomimetic “Life’s Principles” with the methods from life-cycle analysis in Table 3-1.

Tableau 3-1 Main impact assessment methods used for biomiMETRIC assistance tool and their association with the “Life’s Principles”

Biomimetic dimensions and principles		LCA Approach			
		Method	Impact category	Information	Unit
Efficiency and frugality					
1	Use materials sparingly	ReCIPe	12 - Mineral resource scarcity	Consumption of mineral resources	kg Cu eq
2	Use energy efficiently	Cumulative Energy Demand	Amount of energy used	Energy consumption	MJ eq
3	Do not exhaust resources	Cumulative Exergy Demand	Total exergy removal from nature. Quality degradation of the energy used	Sum of exergy of all resources required to provide a process or product.	MJ eq
		ReCIPe	13 - Fossil resource scarcity	Fossil resource consumption	kg oil eq
		AWARE	Relative Available Water REmaining per area in a watershed after the demand (humans & ecosystems) has been met	Impacts on water availability	Index: range [0.1;100]
4	Source or buy locally	IPCC 2013 GWP 100a	GHG emissions	Global warming potential of air emissions	kg CO ₂ eq
5	Optimize the whole rather than maximize each component individually	Specific questions	5 questions evaluated and weighted according to their level of consideration in the product	Optimization or quality according to the principles of sustainable development	According to weighting and evaluation of questions. Score between 2 and 2

Tableau 3-1 Main impact assessment methods used for biomiMETRIC assistance tool and their association with the “Life’s Principles” *Cont.*

Preservation and resilience					
6	Do not contaminate your nest	ReCIPe	1 - Climate changes	Global warming potential of pollutants	kg CO2 eq
			2 - Stratospheric ozone depletion	Destruction of the stratospheric ozone layer	kg CFC-11 eq
			4 - Fine particulate matter formation	PM 2.5 in air emissions	kg PM2.5 eq
			5 - Photochemical ozone formation	Change in intake rate of ozone due to change in emission of precursors (NOx and NMVOC)	kg NOx eq
7	Remain in dynamic equilibrium with the biosphere	ReCIPe	6 - Terrestrial acidification	Acidification Potential	kg SO2 eq
			7 - Freshwater eutrophication	Emission of P(phosphore)	kg P to freshwater
			8 - Marine eutrophication	Emission of N (nitrogen)	kg N to marine water
		USEtox2	9 - Ecotoxicity Terrestrial, Freshwater, Marine and Human carcinogenic or Human non-carcinogenic	Ecotoxicity accounts for the environmental persistence and accumulation in the human food chain	kg 1,4- dichlorobenzeen (1,4-DCB)
			Human toxicity potential	Estimated increase in morbidity in the total human population per unit mass of a contaminant emitted	Disease cumulative cases / kg substance
			Ecotoxicity potential	Potentially Affected Fraction (PAF) of species	PAF m ³ kg ⁻¹

Circularity and systemic					
8	Use waste as a resource	ReCIPe	11 - Land Use	Amount of land transformed or occupied for a certain time	m2*yr. crop eq
9	Diversify and cooperate	Specific questions	5 questions evaluated and weighted according to their level of consideration in the product	Implement the circular economy	According to weighting and evaluation of questions. Score between -2 and 2
10	Be informed, share information and implement feedback loops	Specific questions	5 questions evaluated and weighted according to their level of consideration in the product	Adopt a systemic vision	According to weighting and evaluation of questions. Score between -2 and 2

3.4.3 Development of BiomiMETRIC: Tool for Biomimetic Design

This article provides the foundations and characteristics of BiomiMETRIC, a tool in the form of spreadsheets to assist in biomimetic design. BiomiMETRIC will help to quantify the principles and strategies of living organisms to assist the engineer, architect, or designer in the biomimetic design process. Admittedly, not all living principles and strategies could always be implemented in the process of biomimetic eco-innovation. However, by considering as many biomimetic criteria as possible, the solution may be developed for greater consistency with

sustainability issues. The “Life’s Principles” have been grouped according to their similarity, and a dimension of biomimetic eco-innovation is proposed for each group. To evaluate the biomimetic performance of a product, project, or concept, BiomiMETRIC is aimed to quantify each principle of living organisms using the characterization factors and indicators derived from the environmental impact assessment methods recognized in the life-cycle analysis. The principles that cannot be quantified by impact methods will be assessed using weighted questions.

The treatment of each question will be carried out as follows:

- 1) Weight the question according to its importance in the context of the project. The weighting is on a scale of 1 to 5, and it serves as a calibration of the weight that is given to the question in the context. A weighting of 1 means that it is desirable for the question to be considered, and a weighting of 3 indicates that the question is necessary, whereas a level 5 indicates the indispensable need to consider the question.
- 2) Evaluating the question is equivalent to assigning a score that is (—), (–), 0, (+) or (++), depending on how the project, concept, or product answers the question.
- 3) Subsequently, according to the weighting and evaluation of the question, a score between –2 and 2 is granted according to the values presented in the matrix shown in Table 3-2

Tableau 3-2 Results matrix according to the evaluation and weighting of the questions in BiomiMETRIC

		Evaluation					
		S/O	(—)	(–)	(0)	(+)	(++)
weighting	S/O	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0.2	0.4
	2	0	–0.25	–0.1	0.25	0.6	0.8
	3	0	–0.5	–0.3	–0.1	0.9	1.2
	4	0	–1.5	–1	–0.5	1.35	1.6
	5	0	–2	–1.5	–1	1.7	2

We performed a distribution of scores as shown in Table 3-2 so that a high weight (5) gives a high score (−2 or +2) based on a significant evaluation (− −) or (++). The distribution is not linear in order to reinforce the impact (negative or positive) related to strong evaluations (− −) or (++) and to give less importance to the more neutral evaluations (−; 0; +). We also chose to rate the positive aspects more strongly than highlight the negative aspects. For example, for the same weighting of a question equal to 4, if the question is evaluated (−), it will receive a score of (−1) whereas if it is evaluated (+) it will receive a score of (+1.35). For each principle, the average of the scores obtained for each question is then calculated. The average value of the notes to the question series is represented on a graph under the “qualitative results” tab in the biomiMETRIC tool. This window will be presented later as part of the analysis of an example.

3.5 Results

BiomiMETRIC assistance tool, presented in this article synthesizes, presents, and interprets all the results of the LCA methods used to evaluate the biomimetic principles (“Life’s Principles”). It also presents the answers to questions about the biomimetic approach used in the design. Although the tool presents the results to quantify certain impacts of a biomimetic design perspective on a given solution, it is recommended that a comparison be made between several solutions to determine which has the best biomimetic performance. The assessment is therefore relative rather than absolute because we do not yet have thresholds that can indicate, for example, the maximum acceptable greenhouse gas level for considering that a solution is biomimetic.

3.5.1 Procedure for Using BiomiMETRIC

The steps in using the tool to conduct the analysis are presented in Figure 3-3 and described below.

- 1) Using LCA software such as Open LCA [32] or Simapro [23], which are equipped with databases such as Ecoinvent [16,28], select the materials and processes that constitute Scenario A, the biomimetic performance of which you wish to evaluate.

- 2) Select the impact assessment methods recommended in the tool for each biomimetic principle. The methods used are those presented: ReCiPe, USEtox2, IPCC 2013, AWARE, CED, and CExD. Evaluate each impact category and record the results associated with each biomimetic principle presented in the tool (one principle per tab in the spreadsheet).
- 3) For each biomimetic principle, in addition to the results of the LCA methods, evaluate the questions asked using the evaluation and weighting grid available in BiomiMETRIC. A quantitative value will then be calculated by BiomiMETRIC based on the level of integration of the questions asked in the project, the concept, the product, or the design.
- 4) Repeat the sequence for scenario B, and compare its performance with scenario A.
- 5) After recording the results of the LCA for the two scenarios A and B to be compared, evaluate the questions on the 10 “Life’s Principles”:
 - open the *quantitative results* Table. This sheet will present a summary of the results and the scenario that best meets the biomimetic principles,
 - open the *quantitative results graphs* tab, where the compared results of the two scenarios are presented in graphical form,
 - open the *qualitative results* Table. This sheet will present a performance evaluation based on the answers to the qualitative questions about the biomimetic approach implemented in the project. In this section, there is no comparison between the scenarios A and B, as we consider that the general principles evaluated by the questions will be implemented in a similar way regardless of the scenario chosen. The sheet also presents the biomimetic principles for which corrective action is required.

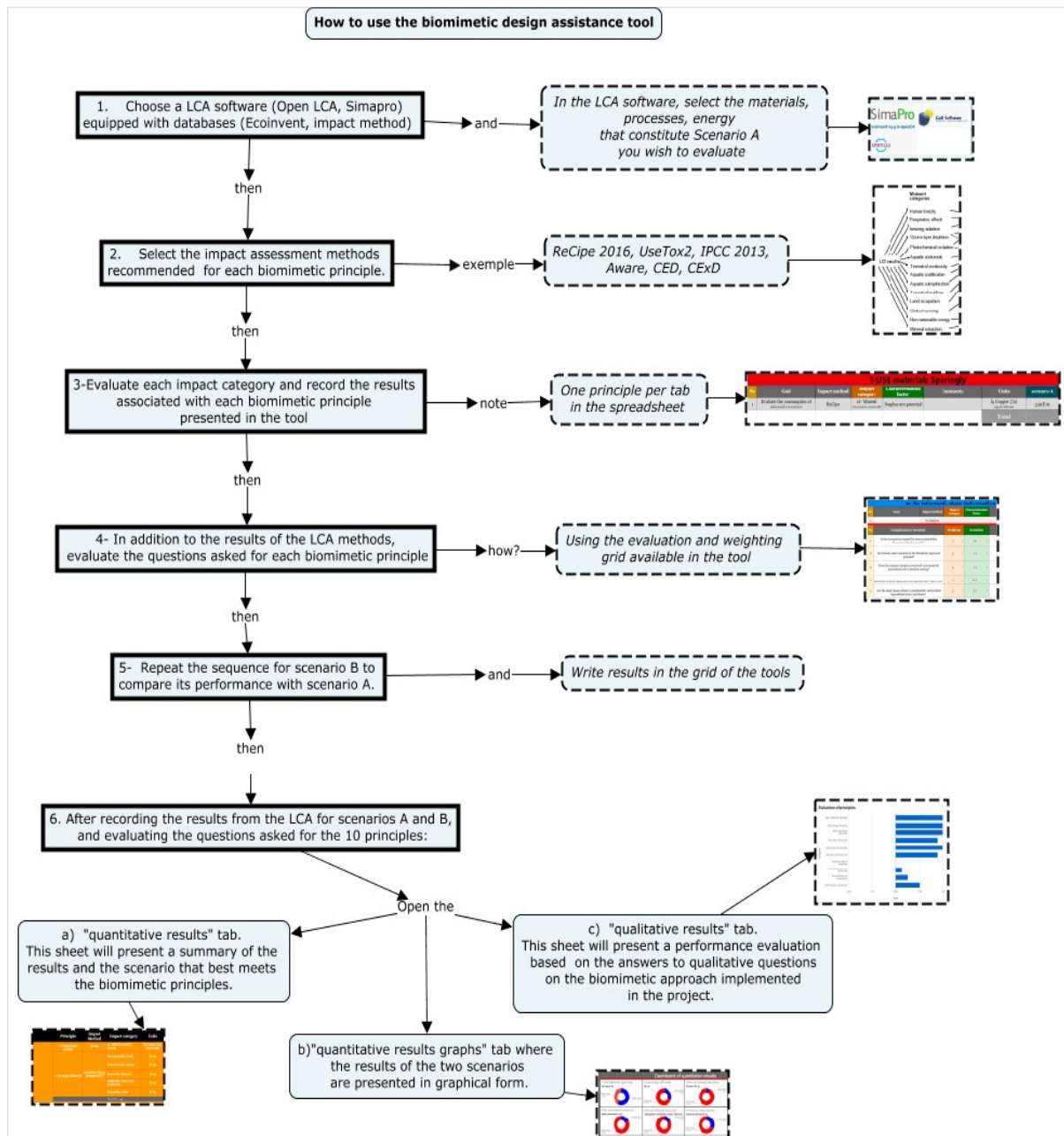


Figure 3-3 Algorithm for using BiomiMETRIC

3.5.2 Using BiomiMETRIC: An Illustration

BiomiMETRIC quantitative performance tool provides a comparison of the biomimetic performance of scenarios A and B. To demonstrate the potential use of the tool, we compared two insulation materials: Stone wool and cork panels. The characteristics of these two alternatives, which can be used in a biomimetic architectural project, are presented in Table 3-3. The impacts of these materials are considered over the entire life cycle in this analysis (i.e., extraction, processing, implementation, and end-of-life management are taken into account).

Tableau 3-3 Comparison of materials for a biomimetic architectural project to obtain the same thermal performance R

Material	Coefficient of Thermal Resistance R (m ² K/W) for 100 mm of Thickness	Density (kg/m ³)	Mass Required to Insulate a 1 m ³ Space
Stone wool (depending on quality) [38]	2.7	70	70
Cork panel (depending on quality) [39]	2.7	110	110

The same thermal insulation will be achieved by using 70 kg of stone wool or 110 kg of cork panel for the walls in an architectural project, which we will assume is designed following the biomimetic approach described in ISO 18458. Both materials are evaluated using the 10 principles of biomimetic design integrated into BiomiMETRIC, as well as using the qualitative questions to reveal which of the two insulators has the best biomimetic performance. BiomiMETRIC allows us to see that in terms of material consumption, for example, stone wool has a greater impact than cork. It appears that the impacts on resource use (ReCiPe 2016/mineral resources scarcity) are 0.391 and 0.287 kg copper equivalent, respectively, for stone wool and cork. Stone wool, therefore, puts more pressure on resources than cork does. The indicator used for resource scarcity assessment indicates the amount of ore to be extracted to obtain 1 kg of copper, which is considered a reference resource. The scarcer the resource becomes, the greater the necessity to dig the earth and extract ore to obtain 1 kg of copper. Each

material is converted into kg of equivalent copper via a conversion factor presented in the method documentation [25]. A material therefore has the higher potential for scarcity if its numerical value in kg Cu eq is high.

The quantitative results dashboard of BiomiMETRIC presented in Figure 3-4 shows the impact of each scenario (A or B) in relation to the sum of the impacts of the scenarios (A + B). For example, in graph 1 of the dashboard, entitled resource consumption, cork (in red) represents 42,3%, and stone wool (in blue) represents 57,7% of the sum of the total impacts expressed in kg Cu eq in this category. Stone wool therefore has more impacts than cork has.

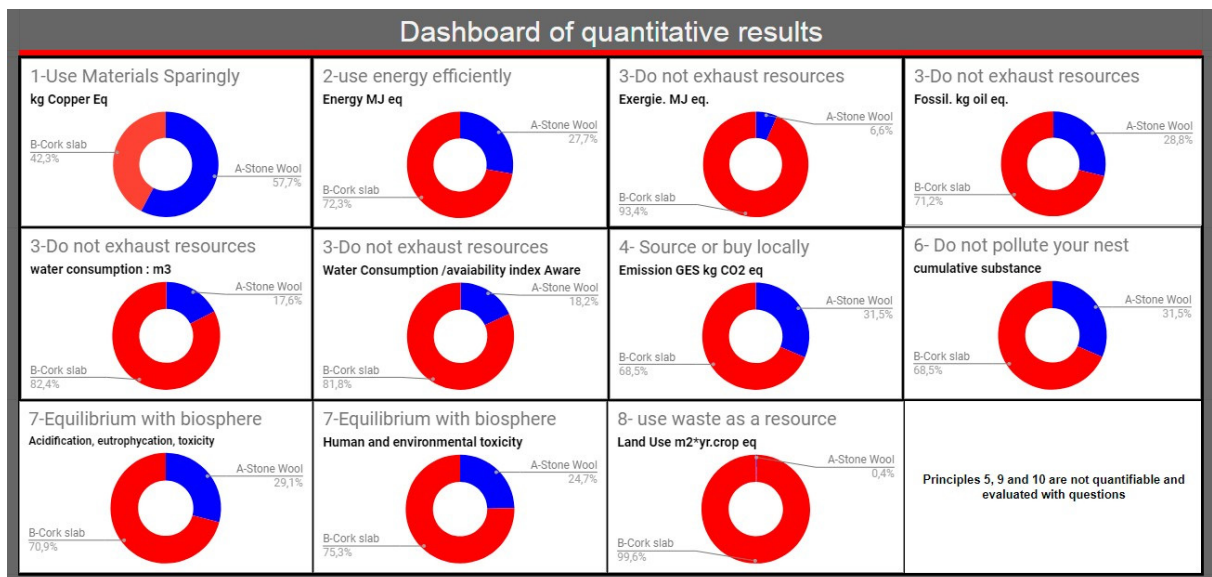


Figure 3-4 Dashboard of the quantitative results given by BiomiMETRIC for each quantifiable biomimetic principle

The analysis of the graphs of each quantifiable principle shows that stone wool is relatively more efficient in terms of biomimicry because it has lower environmental impacts in terms of energy demand, degradation of energy quality (exergy), consumption of fossil resources, water consumption, GHG emissions, accumulation of toxic substances, acidification of water, eutrophication, and land use. In this category of quantitative results, stone wool has superior biomimetic performance compared to cork.

The principles that cannot be quantified by LCA methods are assessed based on the answers to the questions, as explained previously. The results show the overall strengths and weaknesses of the project, product, or concept. This analysis does not present a comparison of scenarios A and B; instead, it shows the overall assessment of the implementation of the biomimicry principles in the project. Figure 3-5 presents a summary of the qualitative results for each principle. The figure shows that the project using the insulating materials (stone wool or cork) warrants corrective action in terms of integrating principle 8, Use waste as a resource (score = 0.25 out of 2), which could be implemented using a circular economy approach. Principle 9, *diversification and cooperation*, also needs to be improved (score = 0.5 out of 2) by using, for example, the product-service systems (PSS) [40] approach, which would offer the customer insulation performance and guaranteed comfort in addition to the insulation material.

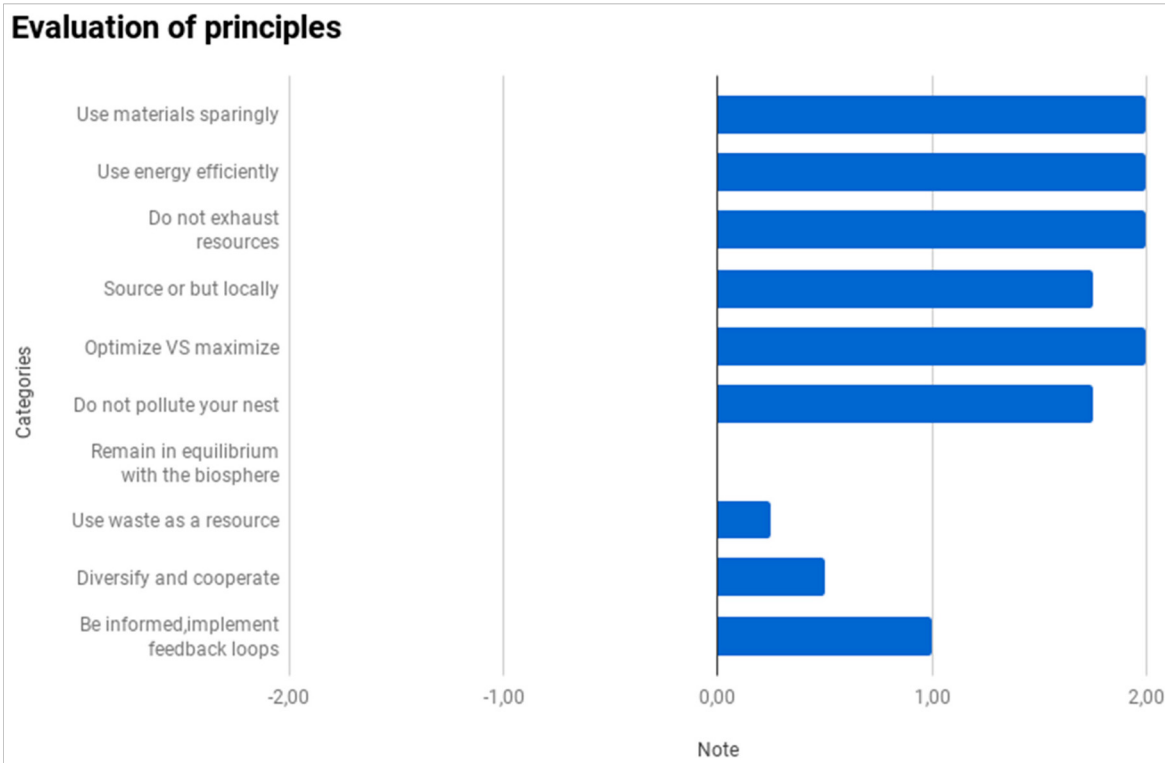


Figure 3-5 Average value of the notes to questions for each principle. Dashboard of the qualitative results given by BiomiMETRIC

3.6 Discussion

To facilitate the design of sustainable solutions, engineers and designers need tools to guide them in their choices. These tools must integrate not only the main principles proposed in the biomimetic design approach but also the quantitative approaches to impact assessment, such as those proposed by the life-cycle analysis. The main results of this research demonstrate that BiomiMETRIC, the tool developed and presented in this article facilitates decision-making in choosing the scenario that is the most in line with the biomimetic principles. Thus, in the very brief example in which we compared two insulating materials, the results showed that stone wool offered a better biomimetic performance compared with cork, which is a bio-based material. It is mainly in terms of water consumption, GHG emissions, energy demand, energy quality degradation, and land use that stone wool is more advantageous than cork, and it is more efficient in terms of low material consumption.

BiomiMETRIC has therefore made it possible to quantify the biomimetic principles that have so far been evaluated subjectively. The use of the tool validates the fundamental principles of biomimetic design as presented in the ISO 18458 standard or by the Biomimicry Institute using methods derived from life-cycle analysis. In conducting a conventional life-cycle analysis, not all the methods selected for each “Life’s Principles” analyzed in BiomiMETRIC are used. Moreover, a conventional LCA that is carried out in accordance with the ISO 14040 and 14044 Standards [41] requires specialized expertise, which may not be readily available in all design teams.

The answers to the qualitative questions revealed that regardless of the material, the design approach had weaknesses in terms of the principle of using waste as a resource (industrial ecology) and the principle of diversification and cooperation (product-service systems). These principles could be improved by taking into account the questions asked and the answers. Initially and before the analysis, it could have been obvious that a bio-based material such as cork has a higher biomimetic performance than an industrial material such as stone wool, and yet the analysis showed the opposite.

3.7 Conclusion

In this article, we proposed a functional tool to achieve the linkage between LCA and biomimetic principles: BiomiMETRIC assistance tool. This tool facilitates quantification and decision-making in the biomimetic approach to help to design sustainable products or sustainable projects. We also proposed a group of biomimetic principles according to three dimensions: (1) Efficiency and frugality; (2) preservation and resilience; (3) circularity and a systemic approach. BiomiMETRIC allowed us to compare two scenarios and determine the one with the best biomimetic performance according to the principles proposed by the Biomimicry Institute, which are evident in sustainable ecosystems. BiomiMETRIC could be very useful for designers and engineers that seek design solutions using a biomimetic approach. It should be recalled that a significant part of the work in developing the tool presented in this article was aimed to analyze and justify the choice of the method resulting from the life-cycle analysis, which was the most appropriate for quantifying each “Life’s Principles” used in the biomimetic approach. BiomiMETRIC could be used as part of a biomimetic design approach or as a method for analyzing environmental performance as part of a conventional design process.

The newly developed impact world method [36], which is not available at the moment in the LCA software, must be tested, as it could provide a new alternative method for quantifying the principles used in the biomimetic design process. Although it is recognized and potentially adapted to the quantification of biomimicry principles, the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (TRACI) was developed by the U.S. EPA specifically for use in the US [26,42] was not used to develop BiomiMETRIC presented in this article. TRACI is a North American reference method used for environmental product declaration. It generally presents impact categories similar to ReCiPe or USEtox, which would lead to redundancy in the impact assessment; however, TRACI evaluates fine particulate matter PM 2.9.5, which is not found in other methods, which instead treat PM 10. TRACI is a midpoint-oriented life-cycle impact assessment methodology with 10 characterization factors. This method could be considered for use in the development of a second version of

BiomimETRIC. In a subsequent work, it would be interesting to develop a biomimetic index that could be obtained by normalizing and aggregating the results of each of the biomimetic design principles presented here. The index would be between 0 and 1, which would make it easier to choose the scenario with the highest biomimetic performance.

Although the biomimetic principles can be queried, they remain a source of inspiration for achieving sustainability in processes, products, projects, and design. The consideration of changing environmental conditions and new constraints in the design of solutions is characteristic of the biomimetic approach, which is inspired by the principles of resilience and adaptation. Unlimited growth is not a sustainable or widespread behaviour in nature, where living organisms must deal with the scarcity of energy and resources. Zero waste, zero emissions, and the circularity of flows are basic principles of life in nature (“Life’s Principles”), which must be prioritized and used to guide all ecodesign approaches.

Author Contributions: Conceptualization, P.T., M.G., and E.R.; data curation, P.T.; formal analysis, P.T.; investigation, P.T.; methodology, P.T., M.G., and E.R.; project administration, M.G. and E.R.; resources, P.T., M.G., and E.R.; software, P.T.; supervision, M.G. and E.R.; validation, P.T., M.G., and E.R.; Visualization, P.T. and M.G.; writing—original draft, P.T., M.G., and E.R.; writing—review and editing, P.T., M.G., and E.R.

Funding: This research received no external funding.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Reference

1. ISO. Organisation Internationale de Normalisation ISO 18458-Biomimétique—Terminologie, Concepts et Méthodologie. 2015. Available online: <https://www.iso.org/fr/standard/62500.html> (accessed on 12 October 2017).
2. Biomicry-Institut. Méthode de Design Biomimétique 2016. Available online: <http://toolbox.biomicry.org/methods/> (accessed on 16 June 2019).
3. Benyus, J.M. *Biomimétisme—Quand la Nature Inspire des Innovations Durables*; Rue de l'échiquier: Paris, France, 2011; p. 407. [Google Scholar]
4. De Pauw, I.; Kandachar, P.; Karana, E. Assessing sustainability in nature-inspired design. *Int. J. Sustain. Eng.* **2015**, *8*, 5–13. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Earthshiftglobal. Webinar: Life Cycle Assessment (LCA) & Biomimicry. 2019. Available online: <https://www.earthshiftglobal.com/brownbag#Biomimicry> (accessed on 25 April 2019).
6. Ask-Nature. Ask Nature Data Base. 2015. Available online: <http://www.asknature.org/> (accessed on 16 June 2019).
7. Terrier, P.; Glaus, M.; Raufflet, E. Biomimétisme: Outils pour une démarche écoinnovante en ingénierie. Available online: <http://journals.openedition.org/vertigo/17914> (accessed on 16 June 2019).
8. Chayaamor-Heil, N.; Guéna, F.; Hannachi-Belkadi, N. Biomimétisme en architecture: État, méthodes et outils. *Les Cahiers de la Recherche Architecturale Urbaine et paysagère* **2018**, *1*. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Wanieck, K.; Fayemi, P.; Maranzana, N.; Zollfrank, C.; Jacobs, S. Biomimetics and its tools. *Bioinspired Biomim. Nanobiomater.* **2017**, *6*, 53–66. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Chakrabarti, A.; Siddharth, L.; Dinakar, M.; Panda, N.; Keshwani, S. Idea Inspire 3.0—A tool for analogical design. In *International Conference on Research into Design*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017. [Google Scholar]
11. Kruiper, R.; Vincent, J.F.V.; Abraham, E.; Soar, R.C.; Konstant, L.; Chen-Burger, J.; Desmulliez, M.P.Y. Towards a design process for computer-aided biomimetics. *Biomimetics* **2018**, *3*, 14. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
12. Vincent, J.F. The trade-off: A central concept for biomimetics. *Bioinspired Biomim. Nanobiomaterials* **2016**, *6*, 67–76. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Lenau, T.A. Biomimetics as a design methodology-possibilities and challenges. In Proceedings of the DS 58-5: The 17th International Conference on Engineering Design (ICED '09), Palo Alto, CA, USA, 24–27 August 2009; Volume 5. [Google Scholar]
14. Principle-Biomicry-Institut. Principle of Life. 2012. Available online: <https://biomicry.net/the-buzz/resource/designlens-lifes-principles/> (accessed on 16 June 2019).
15. Frischknecht, R.; Rebitzer, G. The ecoinvent database system: A comprehensive web-based LCA database. *J. Clean. Prod.* **2005**, *13*, 1337–1343. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Weidema, B.P.; Bauer, C.; Hirschier, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G. *Overview and Methodology: Data Quality Guideline for the Ecoinvent Database Version 3*; Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Edinburgh, UK, 2013. [Google Scholar]
17. Biomicry-Institut. Taxonomy du Biomimétisme. Découvrir les Fonctions de la Nature. 2017. Available online: http://asknature.org/resource/biomimicry-taxonomy/#.V__ZTrczX_U (accessed on 29 May 2018).
18. Biomicry-Institut. Nature's Unifying Patterns 2015. Available online: <http://biotoolbox.wpengine.com/wp-content/uploads/2015/04/NUPs-Examples-PDF.pdf> (accessed on 29 May 2018).

19. Thompson, I.; Mackey, B.; McNulty, S.; Mosseler, A. *Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems*; Secrétariat de la Convention sur la Diversité Biologique: Montréal, QC, Canada, 2009; pp. 43, 67. [Google Scholar]
20. Thompson, I.D.; Okabe, K.; Tylianakis, J.M.; Kumar, P.; Brockerhoff, E.G.; Schellhorn, N.A.; Parrotta, J.A.; Nasi, R. Forest biodiversity and the delivery of ecosystem goods and services: Translating science into policy. *BioScience* **2011**, *61*, 972–981. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Bear, R.; Rintoul, D.; Snyder, B.; Smith-Caldas, M.; Herren, C.; Horne, E. Principles of Biology. Available online: <http://cnx.org/contents/db89c8f8-a27c-4685-ad2a-19d11a2a7e2e@24.18> (accessed on 9 July 2019).
22. Handbook, I. *Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context*; Publications Office of the European Union: Luxemburg, 2011. [Google Scholar]
23. PRé-Consultants. SimaPro Database Manual Methods Library. 2018, p. 65. Available online: <https://www.pre-sustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf> (accessed on 9 July 2019).
24. Thériault, N. *Dans le cadre d'une ACV, conception d'un outil d'aide à la sélection d'un jeu de catégories d'impact pour les entreprises européennes et Nord-Américaines du secteur textile*; Centre Universitaire de Formation en Environnement de l'Université de Sherbrooke: Sherbrooke, QC, Canada, 2011. [Google Scholar]
25. Huijbregts, M.; Steinmann, Z.; Elshout, P.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Hollander, A.; Zijp, M.; van Zelm, R. *ReCiPe 2016: A Harmonized Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level Report I: Characterization*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016. [Google Scholar] [CrossRef]
26. Pré-Sustainability. *SimaPro Database Manual Methods Library*; Pré Sustainability: Amersfoort, The Netherlands, 2016. [Google Scholar]
27. Mert, G.; Linke, B.; Aurich, J. Analysing the cumulative energy demand of product-service systems for wind turbines. *Procedia CIRP* **2017**, *59*, 214–219. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.-J.; Hirschier, R.; Doka, G.; Bauer, C.; Dones, R.; Nemecek, T.; Hellweg, S.; Humbert, S. *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods; Data V2.0*, Ecoinvent Report No. 3; Ecoinvent Centre: Zurich, Switzerland, 2007. [Google Scholar]
29. GHG-Protocol. *Global Warming Potential Values*; World Resources Institute: Washington, DC, USA, 2015; Available online: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf (accessed on 16 June 2019).
30. USEtox-Team. A Scientific Model for Characterizing Human and Ecotoxicological Impacts of Chemicals. Available online: <https://www.usetox.org/> (accessed on 9 July 2019).
31. Fantke, P.; Bijster, M.; Guignard, C.; Hauschild, M.; Huijbregts, M.; Joliet, O.; Kounina, A.; Magaud, V.; Margni, M.; McKone, T.; et al. *USEtox® 2.0 Documentation*, version 1.00; Technical University of Denmark: Kongens Lyngby, Denmark, 2017. [Google Scholar]
32. OpenLCA. Open Source and Free Software for Sustainability and Life Cycle Analysis. 2018. Available online: <http://www.openlca.org/> (accessed on 11 October 2018).
33. NexusOpenLCA. Source of LCA Data Sets. 2018. Available online: <https://nexus.openlca.org/> (accessed on 11 October 2018).
34. Goedkoop, M.; Oele, M.; De Schryver, A.; Vieira, M.; Hegger, S. *SimaPro Database Manual Methods Library*; PRé Consultants: Amersfoort, The Netherlands, 2008; pp. 22–25. [Google Scholar]

35. WULCA Working Group. Available Water REMaining 2015. Available online: <http://www.wulca-waterica.org/aware.html> (accessed on 14 February 2019).
36. Bulle, C.; Margni, M.; Patouillard, L.; Boulay, A.M.; Bourgault, G.; Bruille, V.D.; Cao, V.; Hauschild, M.; Henderson, A.; Humbert, S.; et al. IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2018**, 1–22. [Google Scholar] [CrossRef]
37. USEtox-2.0-Method. Characterizing Human and Ecotoxicological Impacts of Chemicals. 2018. Available online: <https://www.usetox.org/> (accessed on 14 February 2019).
38. Tout-sur-isolation. Laine de Roche. Available online: <https://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Les-isolants/Isolants-en-laine-minerale/Laine-de-roche> (accessed on 7 April 2019).
39. Naturel21. Fiche Technique Panneau de Liege. Available online: <http://www.naturel21.com/upload/file/telechargement/fiche%20technique%20liege%20panneau%20et%20vrac.pdf> (accessed on 7 April 2019).
40. Baines, T.S.; Lightfoot, H.W.; Evans, S.; Neely, A.; Greenough, R.; Peppard, J.; Roy, R.; Shehab, E.; Braganza, A.; Tiwari, A.; et al. State-of-the-art in product-service systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part, B. *J. Eng. Manuf.* **2007**, 221, 1543–1552. [Google Scholar] [CrossRef]
41. Hauschild, M.Z.; Huijbregts, M.A. *Introducing Life Cycle Impact Assessment*; Springer: Berlin, Germany, 2015; pp. 1–16. [Google Scholar]
42. Bare, J.C. TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. *J. Ind. Ecol.* **2002**, 6, 49–78. [Google Scholar] [CrossRef]

3.8 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a présenté l'article publié dans la revue Biomimetics qui portait sur le développement et l'utilisation de BiomiMETRIC outil d'aide à la conception biomimétique. Plus spécifiquement, l'article présente les 10 principes de biomimétisme, une revue des principales méthodes d'évaluation des impacts environnementaux utilisées en ACV, et le couplage des principes de biomimétisme avec les méthodes d'impact. Cet article expose ainsi les deux volets des premiers résultats de la thèse.

Le premier volet de résultats propose une nouvelle classification des principes de biomimétisme selon trois axes globaux d'éco-innovation:

- Efficacité et frugalité;
- Préservation et résilience;
- Circularité et systémique.

Cette classification permet de regrouper et clarifier la portée des principes de biomimétisme.

Le deuxième volet de résultats présente l'association des méthodes d'évaluation des impacts reconnues en analyse de cycle de vie avec les principes de biomimétisme. Cette association servira de base pour le développement de BiomiMETRIC et permettra de palier l'une des faiblesses de la méthodologie de conception biomimétique qui manque de quantification.

Ce chapitre présente également les caractéristiques de BiomiMETRIC, ainsi que son utilisation. BiomiMETRIC permet une évaluation quantitative des principes de biomimétisme, cependant, ceux qui ne sont pas directement quantifiables par des méthodes d'impacts issues de l'ACV, le sont par des questions qui seront pondérées puis évaluées, tel que cela est présenté dans l'article.

La démarche d'utilisation de BiomiMETRIC, qui requiert notamment l'utilisation d'un logiciel d'analyse de cycle de vie pour avoir accès aux méthodes d'évaluation des impacts, a été présentée sous la forme d'un algorithme. BiomiMETRIC développé dans une feuille de calcul, génère automatiquement les graphiques de performance biomimétique afin de faciliter l'interprétation des très nombreux résultats issus de l'ACV. Le chapitre 4 mettra l'accent sur les résultats issus de l'utilisation de BiomiMETRIC appliqué à l'analyse des scénarios de mobilité urbaine.

CHAPITRE 4

APPLICATION DE L'OUTIL BIOMIMETRIC À L'ÉTUDE DE SCÉNARIOS POUR UNE MOBILITÉ URBAINE BIOINSPIRÉE

L'analyse des scénarios de mobilité urbaine est basée sur une comparaison entre chaque scénario alternatif, et le cas initial, de référence, représenté par le scénario Statu Quo, qu'il s'agit ici de bonifier pour tendre vers une mobilité plus efficiente au plan environnemental.

BiomiMETRIC opère à deux niveaux successifs dans le cadre de l'analyse de la mobilité.

- Au premier niveau, une analyse qualitative, basée sur une série de questions pondérées permet d'évaluer la mise en œuvre de la pensée biomimétisme, approche plus conceptuelle. Il s'agit ici de révéler la prise en compte des grands principes de biomimétisme qui peuvent être opérationnalisés selon plusieurs approches (circularité, efficacité énergétique, réduction des matières dangereuses...).
- Au second niveau, l'analyse proposée par BiomiMETRIC porte sur l'évaluation quantitative de la performance biomimétique grâce au couplage des méthodes d'impacts issues de l'ACV avec les dix principes de biomimétisme. Ce second niveau s'inscrit dans une démarche de conception biomimétique plus structurée et encadrée par la norme ISO 18458.

La figure 4-1 résume les différences entre la pensée biomimétisme, et la conception biomimétique à travers les deux volets d'analyse proposés par BiomiMETRIC.

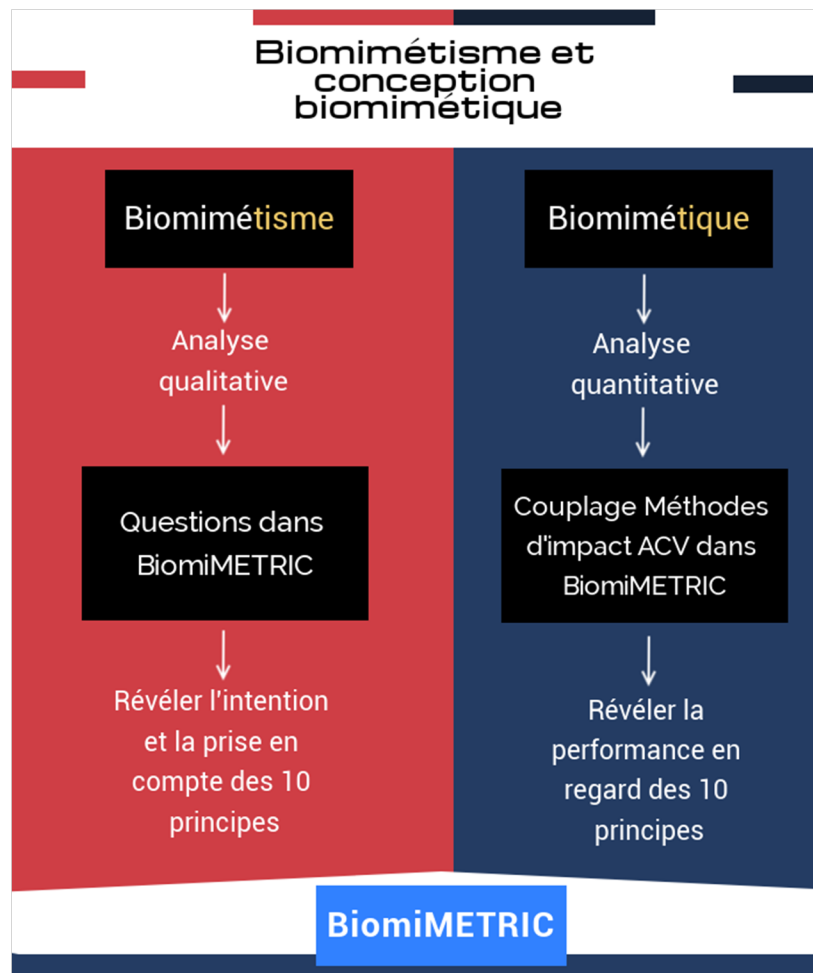


Figure 4-1 Biomimétisme et conception biomimétique dans BiomiMETRIC

4.1 Présentation détaillée des scénarios prospectifs de mobilité urbaine

La mobilité urbaine est ici considérée comme un système composé de plusieurs sous-systèmes représentés notamment par les divers modes de transport. Chaque système de mobilité présente ses frontières (territoire), son réseau de relations (interaction avec les autres systèmes), son environnement (milieu urbain, climat, contexte socio-économique), ses flux entrants (passagers, marchandises, énergie, matière, informations) et ses flux sortants (émissions, impacts, déchets).

L'étude de la mobilité est réalisée par l'analyse de scénarios prospectifs, basés sur les informations de mobilité quotidienne à Montréal issues de l'enquête OD-Origin Destination (ARTM, 2018; MTQ, 2019), des multiples rapports proposés par l'autorité régionale de transport métropolitain (ARTM, 2019, 2020), et par la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2020a, 2020b, 2020c).

Un scénario correspond au « déroulement hypothétique d'un certain nombre de processus consécutifs à des données de départ [...] à la description de l'état présent d'un système, d'un état futur possible de ce système et de l'ensemble des processus permettant de passer de cette situation présente à cette situation future » (Lugan, 2006). Une base commune, l'unité fonctionnelle, permettra la comparaison des divers scénarios. Cette unité fonctionnelle élaborée sur la base des informations fournies dans l'enquête O-D (MTQ, 2019) intégrera, entre autres, la part modale de chaque mode de transport et la distance à couvrir.

Chaque scénario de mobilité est analysé afin de quantifier objectivement ses performances au plan environnemental avec l'approche biomimétique mise en œuvre grâce à l'outil BiomiMETRIC. Afin d'être réalistes, de considérer les technologies disponibles à court ou moyen termes, d'intégrer certaines caractéristiques des usagers, d'anticiper les contraintes environnementales et sociales à venir, les scénarios de mobilité proposés et analysés dans cette thèse :

- correspondront à différentes combinaisons de modes de transport utilisées par les usagers pour satisfaire leurs besoins en mobilité;
- intégreront la part modale des différentes alternatives en mobilité disponibles sur le territoire;
- considéreront les qualités des modes de transports habituellement recherchées par les usagers (vitesse, ponctualité, confort, flexibilité, coût, accessibilité, sécurité...);
- viseront à répondre de différentes manières aux exigences de réduction des impacts environnementaux globaux, et de consommation de ressources.

4.1.1 Caractéristiques des scénarios d'étude de la mobilité

Afin d'analyser la durabilité des divers scénarios de mobilité, il est nécessaire d'évaluer et de comparer, en plus de la dimension environnementale couverte par l'approche biomimétique, les performances économiques et sociales afin d'intégrer toutes les dimensions de la durabilité. Cependant, ces dimensions économiques et sociales dépassent le cadre de cette thèse qui se limitera au développement d'un outil et à son utilisation pour l'analyse de la performance environnementale des scénarios en mobilité avec une approche biomimétique. Le tableau 4.1 présente les caractéristiques du système au sein duquel s'encrent les scénarios de mobilité proposés ainsi que l'unité fonctionnelle qui fournit une base de comparaison des scénarios.

Tableau 4-1 Caractéristiques du système où s'encreront les scénarios

Caractéristiques du système	Description
Frontière et environnement	Limites géographiques de la communauté urbaine de Montréal, climat continental humide, pays développé et industrialisé, niveau de revenu élevé.
Flux entrant	Usagers, marchandises, énergie, équipements, informations
Flux sortant	Émissions et impacts vers l'environnement. Considérations qualitatives des impacts socio-économiques.
Unité fonctionnelle permettant la comparaison des scénarios et basée sur l'enquête OD (MTQ, 2019)	Mobilité d'une personne sur une distance moyenne de 11 km/déplacement, répartis selon les divers modes de transport en tenant compte de la part modale de chacun.

4.1.2 Unité fonctionnelle : base de comparaison des scénarios

Ces scénarios doivent permettre de réaliser le même service ou la même fonction de mobilité ou d'accessibilité pour les usagers, car ils se posent en substitution les uns aux autres. Ce service est défini par l'unité fonctionnelle, basée sur les données de l'enquête OD (ARTM, 2018), qui permettra d'assurer aux usagers des systèmes de mobilité de l'agglomération montréalaise, une accessibilité à leurs activités quotidiennes (travail, étude, obligations, loisir, divertissement) dans un délai raisonnable, pour un coût économiquement acceptable, et de façon sécuritaire et inclusive (ainés, jeunes, mobilité réduite).

L'évaluation de la performance biomimétique des scénarios de mobilité est donc faite sur la base d'une unité fonctionnelle commune, qui dans ce cas est équivalente au trajet d'une personne parcourant 11 km (ou 11 personne.km), distance correspond à la distance moyenne d'un déplacement dans l'agglomération montréalaise selon l'enquête OD (MTQ, 2019). Il n'est pas utile d'ajuster la valeur de l'unité fonctionnelle selon le nombre d'usagers et la distance totale parcourue sur une période de temps, information également disponible dans les résultats de l'enquête OD, car l'approche se veut comparative entre les scénarios et non évaluative de la totalité des impacts.

L'analyse de la mobilité est réalisée par l'étude de cinq scénarios qui sont comparés au scénario de référence (statu quo) basé sur l'état actuel de la situation. Chaque scénario est constitué d'un regroupement de modes de transport qui représentent chacun une part modale des déplacements des travailleurs à l'heure de pointe du matin sur l'Île de Montréal. Chaque part modale en transport, décrite dans l'enquête OD et évalué en pourcentage (%) des déplacements totaux, représente une fraction équivalente en % de l'unité fonctionnelle. Par exemple, si dans le scénario A, l'automobile représente une part modale de 50 % des déplacements, alors la distance considérée pour le parcours en automobile dans le cadre de l'analyse est égale à 50 % de l'unité fonctionnelle fixée à 11 personne.km, soit 5,5 personne.km.

4.1.3 Scénario Statu Quo Actuel

Ce scénario est basé sur les résultats de l'enquête OD (MTQ, 2019) et représente les parts modales actuelles pour chaque mode de transport de l'agglomération de Montréal. Ce scénario servira de référence, ou de point de comparaison pour l'analyse. Les données concernent la période comprise entre 5h et 9h le matin pour un jour ouvrable de semaine. Cette période compte 2 497 000 déplacements sur les 9 426 000 effectués au cours de la journée ouvrable typique. La distance moyenne d'un déplacement dans l'agglomération de Montréal est de 11 km. Dans ce scénario l'automobile occupe 68 % de part modale pour les déplacements. Le taux de remplissage des automobiles est de 1,2 personne/voiture. La part modale du transport collectif se situe aux environ 22 % et celle du transport actif représente 10 % des déplacements.

4.1.4 Scénario Transport Collectif

Ce scénario est basé sur un transfert important des usagers de l'auto solo vers le transport en commun actuellement disponible ou prévu à moyen terme au niveau de l'agglomération de Montréal.

Dans ce scénario, la part modale de l'automobile serait de 40 %, alors que celle du transport collectif serait de 48 % et celle de la mobilité active de 12 %. Il est démontré (ARTM, 2020) que l'accroissement de la part modale du transport collectif permet de profiter des bénéfices économiques reconnus de ce mode de transport. Ces bénéfices se déclinent sous la forme d'une réduction des dépenses des ménages en transport et en stationnement, diminution de la congestion routière, gain de productivité, amélioration de la rapidité des déplacements, réduction des effets négatifs sur l'environnement, retombées économiques locales en termes d'emplois liés à la production d'équipement de transport, optimisation de l'occupation du sol en favorisant la densité des activités résidentielles, croissance de la valeur foncière de la région, amélioration de l'accessibilité aux différents lieux d'activités économiques et de consommation, amélioration du pouvoir d'achat des ménages (Les coûts de transport représentent le 3^e poste de dépense en importance après le logement et l'alimentation).

4.1.5 Scénario Transport Actif et Télétravail

Ce scénario est basé sur un transfert important de 30 % des usagers de l'auto solo, et de 10 % de ceux du transport collectif vers la mobilité active comme la marche, le patin, mais surtout le vélo, étant donné la distance de 11 km fixée par l'unité fonctionnelle servant de base de comparaison. Dans ce scénario, il est également envisagé une réduction des déplacements en raison du recours au télétravail. De plus, le taux de remplissage des automobiles sera de 1 et non 1,2, car dans un contexte de pandémie et de télétravail, le covoiturage est moins populaire, et les automobilistes continuant de se déplacer vont être considérés comme dépendant de l'auto solo.

Ce scénario privilégie donc un transfert modal vers des solutions à faible impact environnemental, dont le vélo constitue le fer de lance. Que ce soit pendant les guerres mondiales, les crises économiques comme celle de 1929 aux États-Unis, les pandémies ou les grands mouvements sociaux qui perturbent les transports, la bicyclette a toujours fait preuve d'une étonnante résilience dans les contextes les plus difficiles. Depuis les années 2000, la pratique du vélo s'intensifie dans toutes les grandes villes du monde où l'on peut noter des taux de croissance annuelle pouvant atteindre 15 % (Héran, 2020), car le vélo demeure un substitut logique à la fois à des transports publics saturés et à l'automobile coûteuse, polluante et ralentie dans la congestion. En 2020, la crise sanitaire liée à la Covid-19 positionne le vélo comme un moyen simple d'assurer naturellement une distanciation sociale suffisante entre usagers en contexte de pandémie. Malgré les inconvénients de ce mode de transport, qui expose le cycliste aux intempéries, et qui dans les villes moins bien desservies en infrastructures dédiées aux vélos peut apparaître peu sécuritaire, le vélo permet de couvrir aisément 30 à 40 km dans sa déclinaison électrique. Avec quelques infrastructures facilitant l'usage sécuritaire du vélo en ville, les données démontrent que sa pratique devrait tripler au cours des prochaines années, et aucun autre mode de transport ne présente un essor aussi marqué (Héran, 2020).

Dans ce scénario, l'automobile est créditée d'une part modale des déplacements de 38 %, le transport collectif représentera 12 % et la mobilité active de 50 %.

4.1.6 Scénario Hybride Novateur

Ce scénario est basé sur un transfert majeur des usagers de l'auto conventionnelle solo à moteur à combustion interne vers d'autres modes, pour atteindre la répartition suivante des parts modales des déplacements. Le transport collectif implanté ou potentiellement réalisable représente 37 % de part modale. La mobilité active ou le télétravail représentent 42 % de part modale, les véhicules électriques 13 % de part modale avec un taux de remplissage de 1 pers/ auto. Les nouvelles solutions en mobilité personnelle (Petit véhicule autonome électrique, scooter électrique...) représentent 2 % de part modale. Les véhicules en autopartage occupent 6 % de part modale, et leur taux de remplissage est de 1,4 pers/ véhicule.

4.1.7 Scénario Résilience aux Aléas

Ce scénario analysera une redéfinition des modes de transport en fonction d'aléas environnementaux (changements climatiques) et économiques (taxe sur le carbone) qui limiteraient l'usage de l'auto, ou d'aléas sanitaires (propagation de maladie) qui réduiraient l'usage du transport en commun. Dans ce dernier contexte, le vélo se positionnerait alors comme une alternative sérieuse pour de nombreux usagers (Héran, 2020).

De nombreux aléas, tels que les changements climatiques ou de nouvelles pandémies, vont inévitablement se matérialiser et, étant donné le faible succès des mesures d'atténuation surtout au niveau climatique, il faudra plutôt miser sur les solutions d'adaptation. Ainsi, en cas de perturbation climatique majeure il faudrait envisager une réduction de la part modale de la mobilité active qui perdrait ses adeptes en cas de fortes pluies sur de longues périodes par exemple. Il faut aussi envisager une réduction éventuelle de la mobilité motorisée (privée ou collectives) en cas d'inondation des rues, ou de tempête de verglas rendant les routes impraticables. Pour ne pas que les villes densément peuplées deviennent paralysées par une mobilité impossible ou réduite, peu importe la raison, ne vaudra-t-il pas mieux miser sur le télétravail, sur des quartiers multifonctionnels et des services de proximité? C'est ce que proposent certains acteurs engagés dans la recherche de solutions pour une mobilité plus durable (Vivre en Ville, 2020).

Dans ce scénario prospectif, il est envisagé que l'automobile à moteur à combustion interne a disparu (taxes, réglementations) de la ville au profit de véhicules électriques, où l'on considère un taux de remplissage de 1,4 personne/ véhicule, et occupant une part modale de 20 % des déplacements. La mobilité active incarnée par le vélo représente 20 % des déplacements, et les vélos électriques, nouvelle tendance, également 20 % de part modale. Ces derniers, en version fat bike (vélos à pneus surdimensionnés) électrique permettent de circuler toute l'année sur un réseau express vélo (REV) déneigé en hiver. Le transport collectif assure pour sa part 40 % de part modale d'une unité fonctionnelle pour les déplacements fixée à 11 km.personne.

4.1.8 Scénario Mobilité Low Tech

Ce scénario proposera un agencement de modes de transport issu des recommandations d'une étude portant sur l'approche Low Tech en mobilité (Gorce-Moskovitz, 2020). L'approche Low Tech est arrimée avec les principes retrouvés dans la nature (circularité, résilience, respect de la capacité de support des écosystèmes) et donc en conformité avec les principes de biomimétisme et de durabilité (Sirois-Cournoyer, 2018). Ce scénario intègre également la « démarche Low Tech » plus systémique que simplement « l'approche Low Tech » qui, pour sa part, ne couvre que l'aspect purement technique du Low Tech (Gorce-Moskovitz, 2020).

Promus, entre autres par des acteurs comme le Low Tech Lab, les Low Tech invitent (Low tech Lab, 2020) à développer des technologies, des systèmes techniques, des services ou des savoir-faire qui sont :

- utiles en répondant à des besoins essentiels;
- durables sur toutes les étapes de leur cycle de vie;
- accessibles en tenant compte de la capacité à payer des usagers et des connaissances et compétences pour la maîtrise et la pérennité technologique.

Une définition du Low Tech proposée par Sirois(Sirois-Cournoyer, 2018) indique que :

Le Low-tech est un ensemble de moyens et de procédés simples utilisés en vue d'atteindre une fin. Il est soutenable, accessible et favorise l'autonomie de son utilisateur, tout en s'insérant et s'adaptant à différents contextes. Il se base sur une approche systémique, ce qui suppose et implique un autre rapport au monde; pas seulement un autre rapport aux humains (principe de justice) et à soi-même (principe d'autonomie), mais également un autre rapport à la nature et au temps notamment puisqu'il aborde la création de technique dans une perspective cyclique s'inspirant ainsi de la nature (principe de soutenabilité). (Sirois-Cournoyer, 2018).

Appliquée à la mobilité, l'approche Low-Tech recommande sans surprise le vélo, la marche et la mobilité active. Le métro et le train, bien que performants en termes de remplissage en passagers, sont moins recommandés étant donné les coûts d'infrastructures importants tant financier que matériel ainsi que le manque de flexibilité (Gorce-Moskovitz, 2020).

La démarche Low Tech recommande l'implantation du tramway qui est également un mode de transport efficace au plan énergétique étant donné sa faible résistance au roulement et sa vitesse réduite, limitant d'autant les forces résistives. Au niveau des modes de transports véhiculaires, l'approche Low Tech recommande le Trolley Bus qui est peu cher, relativement écologique, facile et rapide à déployer, plus flexible et plus manœuvrable encore que le tramway. (Gorce-Moskovitz, 2020). Les autobus hybrides électriques constituent également une solution advenant le cas où les Trolleys Bus ne pourraient pas être implantés. Dans ce scénario prospectif, il est envisagé que la mobilité active, incarnée par le vélo, représente 30 % de part modale des déplacements et que les vélos électriques occupent 20 % de part modale. Le transport en Trolley Bus assure 40 % et le tramway 10 % de part modale. L'unité fonctionnelle pour les déplacements est fixée à 11 km.personne.

Le tableau 4-2, présente les paramètres de modélisation des scénarios qui sont saisis dans un logiciel d'analyse de cycle de vie, via les processus disponibles dans Ecoinvent.

Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios

0-Scénario Satu Quo-Référence	Qté	Unité	Description
Transport, passenger car, medium size, petrol, Euro5 {GLO.}. Market for cut-off, s	6,23	km	68 % de part modale pour l'auto. Unité fonctionnelle (UF) =11 km 68% de 11 km = 7,48 km Taux de remplissage de 1,2 alors distance parcouru/personne= 6.23 km
Transport, regular bus {GLO.} Market for cut-off, s	1,21	Person.km	Transport en commun: 22% de part modale. Deux modes de transport en commun avec 11% de part modale chacun 11% de UF (11km) = 1,21 km
Transport, tram {GLO.}. Market for cut-off, s	1,21	Person.km	
Transport, passenger bicycle {GLO.}. Market for cut-off, s	1,1	Person.km	Mobilité active: 10% de part modale. Sur 11 km parcourus par un usager 1,1 km sont faits en mobilité active représentée ici par le vélo

Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios (suite)

1-Scénario Transport Collectif	Qté	Unité	Description
Transport, passenger car, medium size, petrol, Euro5 {GLO} Market for cut-off, s	3,67	km	Part modale de l'auto passe de 68 % à 40% Unité fonctionnelle = 11 km Taux de remplissage de 1,2 Distance parcourue en auto = $0,40 * 11 / 1,2 = 3,67$ km
Transport, regular bus {GLO} Market for cut-off, s	2,64	Person.km	Transport en commun: 48% de part modale. Deux modes de transport en commun avec 24% de part modale chacun 24% de UF (11km) = 2,64 km
Transport, tram {GLO} Market for cut-off, s	2,64	Person.km	
Transport, passenger bicycle {GLO} Market for cut-off, s	1,32	Person.km	Mobilité active: 12% de part modale. Sur 11 km parcourus par un usager, 1,32 km sont faits en mobilité active représentée ici par le vélo

Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios (suite)

2-Scénario transport actif télétravail	Qté	Unité	Description
Transport, passenger car, medium size, petrol, Euro5 {GLO} Market for cut-off, s	4,18	km	Part modale de l'auto passe de 68 % à 38%. Unité fonctionnelle = 11 km. Taux de remplissage de 1 Distance parcourue en auto = $0,38 * 11 = 4,18$ km
Transport, regular bus {GLO} Market for cut-off, s	0,66	Person.km	Transport en commun: 12% de part modale. Deux modes de transport en commun avec 6% de part modale chacun 6% de UF (11km) = 0,66 km
Transport, tram {GLO} Market for cut-off, s	0,66	Person.km	
Transport, passenger bicycle {GLO} Market for cut-off, s	5,5	Person.km	Mobilité active: 50% de part modale. Sur 11 km parcourus par un usager, 5,5km sont faits en mobilité active représentée ici par le vélo

Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios (suite)

3-Scénario transport hybride novateur	Qté	Unité	Description
Transport, passenger car, medium size, petrol, Euro5 {GLO} Market for cut-off, s	0,471	km	Part modale de l'auto passe de 6%. Unité fonctionnelle = 11 km Taux de remplissage de 1,4 Distance parcourue en auto = $0,06 * 11 / 1,4 = 0,471$ km
Transport, regular bus {GLO} Market for cut-off, s	2,035	Person.km	Transport en commun: 37% de part modale. Deux modes de transport en commun avec 18,5% de part modale chacun $18,5\% \text{ de UF (11km)} = 2,035$ km
Transport, tram {GLO} Market for cut-off, s	2,035	Person.km	
Transport, passenger bicycle {GLO} Market for cut-off, s	4,62	Person.km	Mobilité active: 42% de part modale. Sur 11 km parcourus par un usager, 4,62 km sont faits en mobilité active (vélo)
Transport, passenger, electric scooter {GLO} Market for cut-off, s	0,22	km	Innovation en mobilité. Part Modale = 2% de UF (11km) = 0,22 km
Transport, passenger car, electric {GLO} Market for cut-off, s	1,43	km	13% de part modale pour les voitures électrique = 13% de UF (11km) = 1,43 km

Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios (suite)

4-Scénario résilience aléas	Qté	Unité	Description
Transport, regular bus {GLO} Market for cut-off, s	2,2	Person.km	Transport en commun: 40% de part modale. Deux modes de transport en commun avec 20% de part modale chacun. $20\% \text{ de UF (11km)} = 2,2$ km
Transport, tram {GLO} Market for cut-off, s	2,2	Person.km	
Transport, passenger bicycle {GLO} Market for cut-off, s	2,2	Person.km	Mobilité active: 20% de part modale Sur 11 km parcourus par un usager, 2,2km sont faits en mobilité active représentée ici par le vélo
Transport, passenger car, electric {GLO} Market for cut-off, s	1,57	km	20% de part modale pour les voitures électrique avec taux de remplissage = 1,4. Distance parcourue en auto = $0,2 * 11 / 1,4 = 1,57$ km
Transport, passenger, electric bicycle {GLO} Market for cut-off, s	2,2	km	20% de part modale pour la mobilité novatrice résiliente incarnée par le vélo électrique 4 saisons Distance parcourue en vélo électrique pour UF (11km) = $0,2 * 11 \text{ km} = 2,2$ km

Tableau 4-2 Paramètres de modélisation des scénarios (suite et fin)

5-Scénario mobilité Low Tech	Qté	Unité	Description
Transport, trolleybus {GLO} Market for cut-off, s	4,4	Person.km	40% de part modal pour ce mode de transport considéré comme Low-Tech 40% de UF (11km) = 4,4 km
Transport, tram {GLO} Market for cut-off, s	1,1	Person.km	10% de part modal pour ce mode de transport collectif 10% de UF (11km) = 1,1 km
Transport, passenger bicycle {GLO} Market for cut-off, s	3,3	Person.km	Mobilité active: 30% de part modale Sur 11 km parcourus par un usager, 3,3 km sont faits en mobilité active représentée ici par le vélo
Transport, passenger, electric bicycle {GLO} Market for cut-off, s	1,43	km	20% de part modale pour la mobilité novatrice résiliente incarnée par le vélo électrique 4 saisons Distance parcourue en vélo électrique pour UF (11km) = 0,2*11km = 2,2 km

Certains scénarios intègrent les aléas climatiques ou sociaux pouvant se matérialiser et induire des transferts d'usagers d'un mode de transport vers un autre. Le tableau 4-3 présente ces divers aléas envisagés et leurs impacts sur le transfert modal.

Tableau 4-3 Aléas envisagés et leurs impacts sur les parts modales des transports

Aléas / facteurs de changement	Impacts sur les parts modales		
	Auto Solo	Transport collectif	Mobilité active
Changements climatiques et contraintes	Réduction	Augmentation	Variable
Pandémies	Augmentation	Réduction	Augmentation
Augmentation du prix de l'énergie (taxe carbone)	Variable Demande inélastique	Augmentation	Augmentation
Acceptabilité sociale et valeur protection de l'environnement	Réduction	Augmentation	Augmentation
Exigence confort, liberté de mode de vie	Augmentation	Réduction	Augmentation
Croissance urbaine et densification	Réduction	Augmentation	Augmentation

4.2 Méthodologie pour l'évaluation des scénarios avec BiomiMETRIC

BiomiMETRIC vise à quantifier chaque principe du vivant à l'aide des facteurs de caractérisations issus des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux reconnues en ACV, ainsi qu'avec une série de questions qualitatives qui va permettre de révéler le niveau d'intégration de la philosophie du biomimétisme dans les scénarios de mobilité.

4.2.1 Intégration du biomimétisme dans les scénarios: questions qualitatives

Les principes non quantifiables avec les méthodes d'impacts sont évalués à l'aide de questions qualitatives pondérées. Le traitement de chaque question est effectué comme suit :

- 1) L'utilisateur de BiomiMETRIC pondère la question à traiter en fonction de son importance dans le contexte du projet. La pondération se fait sur une échelle de 1 à 5, et elle sert à calibrer le poids qui est donné à la question dans le contexte des scénarios. Une pondération de 1 signifie qu'il est souhaitable que la question soit examinée. Une pondération de 3 indique que la question est nécessaire, tandis qu'un niveau 5 indique qu'il est indispensable d'examiner la question.
- 2) Par la suite, l'utilisateur de BiomiMETRIC évalue la question, ce qui équivaut à attribuer une cote (- -), (-), 0, (+) ou (++), en fonction du niveau d'intégration de la question qu'apporte le projet, le concept ou le produit.
- 3) Selon la pondération et l'évaluation de la question, BiomiMETRIC accorde une note comprise entre -2 et 2 en fonction des valeurs présentées dans la matrice figurant au tableau 4-4.

Tableau 4-4 Matrice de résultats selon l'évaluation et la pondération des questions dans BiomiMETRIC

		Évaluation					
		s/o	(--)	(-)	(0)	(+)	(++)
Pondération	s/o	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0,2	0,4
	2	0	-0,25	-0,1	0,25	0,6	0,8
	3	0	-0,5	-0,3	-0,1	0,9	1,2
	4	0	-1,5	-1	-0,5	1,35	1,6
	5	0	-2	-1,5	-1	1,7	2

Une distribution des notes a été effectuée comme indiqué dans le tableau 4-4, de sorte qu'une pondération élevée (5) donne un score élevé (-2 ou +2) selon l'évaluation (--) ou (++) ayant été faite. La distribution n'est pas linéaire afin de renforcer l'impact (négatif ou positif) lié aux évaluations fortes (--) ou (++) et de donner moins d'importance aux évaluations plus neutres (- ; 0 ; +). Il a également été choisi d'accorder une note plus élevée aux aspects positifs. Par exemple, pour une pondération équivalente de 4, une question évaluée (+) recevra une note de (+1.35) alors qu'elle recevrait une note de (-1) si elle était évaluée (-). La moyenne des notes obtenues pour chaque question est ensuite calculée. La valeur moyenne des notes de la série de questions est représentée sur un graphique sous l'onglet "Résultats qualitatifs" dans l'outil BiomiMETRIC. Pour chaque principe du vivant, une méthode d'évaluation des impacts est utilisée, et les résultats quantifiés permettront d'évaluer la performance biomimétique du projet, du concept, de la solution ou du scénario.

4.2.2 Procédure d'utilisation de BiomiMETRIC

Cette section présente les étapes à suivre pour réaliser l'analyse, et l'évaluation de la performance biomimétique de deux scénarios dans une optique de comparaison. Le travail est réalisé pour les cinq scénarios alternatifs, et pour le scénario de référence précédemment présentés. Les étapes de l'analyse sont présentées ci-dessous.

- 1) À l'aide d'une interface permettant l'accès à la base de données Ecoinvent et aux diverses méthodes d'évaluation des impacts utilisées en ACV, sélectionner les matériaux, procédés, énergies et processus de transport qui constituent le scénario « A » dont l'évaluation de la performance biomimétique par rapport au scénario « B » est requise. Les logiciels comme Open LCA (OpenLCA, 2018) ou Simapro (PRé-Consultants, 2018), équipés des bases de données telle qu'Ecoinvent (Frischknecht et al., 2007; Weidema et al., 2013) peuvent être utilisés pour réaliser cette étape.
- 2) Choisir les méthodes d'évaluation des impacts recommandées dans BiomiMETRIC pour chaque principe biomimétique. Les méthodes à utiliser sont celles présentées dans le chapitre 3, soit ReCipe, UseTox2, IPCC 2013, AWaRe, CED, CExD. Évaluer chaque catégorie d'impacts et inscrire les résultats associés à chaque principe biomimétique présenté dans BiomiMETRIC.
- 3) Pour chaque principe biomimétique, en plus des résultats issus des méthodes ACV, évaluez les questions posées en utilisant la grille d'évaluation et de pondération disponible dans BiomiMETRIC. Une valeur quantitative est alors calculée, basée sur le niveau d'intégration des questions posées au sein du scénario, projet, concept ou produit en cours d'analyse.
- 4) Recommencez la séquence pour le scénario « B » afin de comparer sa performance avec la première solution évaluée « A ».
- 5) Après avoir inscrit les résultats issus du logiciel ACV (Ecoinvent et méthode d'impacts) pour les deux scénarios « A » et « B », et évalué les questions pour les 10 principes, alors il faut:
 - ouvrir l'onglet « *résultats quantitatifs* ». Cette feuille présente une synthèse des résultats, et le scénario répondant le mieux aux principes biomimétiques;
 - ouvrir l'onglet « *graphiques des résultats quantitatifs* » où les résultats comparés des deux scénarios sont présentés sur forme graphique;
 - ouvrir l'onglet « *résultats qualitatifs* ». Cette feuille présente une évaluation de performance selon les réponses aux questions qualitatives sur la démarche biomimétique mise en œuvre dans le cadre du projet. Pour cette section, il n'y a pas de comparaison entre les scénarios, car il est considéré que les principes généraux évalués par les questions seront mis en place de façon similaire peu importe le

scénario retenu. La feuille de calcul présente également les principes biomimétiques pour lesquels une action corrective est requise.

4.3 Résultats de l'étude des scénarios de mobilité avec BiomiMETRIC

Les scénarios proposés précédemment ont été modélisés grâce aux données disponibles dans la base Ecoinvent via un logiciel d'analyse de cycle de vie qui facilite l'accès aux données. La prise en compte des principes de biomimétisme est évaluée dans BiomiMETRIC avec deux approches :

- 1) qualitative : les résultats sont issus des réponses aux questions fondamentales de la pensée biomimétisme (pondération et évaluation, tel que décrit dans le chapitre 3);
- 2) quantitative : les résultats numériques sont issus de l'évaluation de chaque principe de biomimétisme avec les méthodes d'impacts provenant des méthodes d'impact issues de l'ACV (facteurs de caractérisations, unités pour chaque catégorie d'impact).

Certains principes de biomimétisme sont très difficiles ou simplement impossibles à quantifier avec les méthodes issues de l'ACV. Le *principe 9 - Se diversifier et coopérer*, en est un bon exemple. Ces principes sont donc évalués dans BiomiMETRIC en fonction des réponses à des questions qui précisent la portée du principe, et le traduisent quantitativement grâce à un système de pondération et d'évaluation sur une échelle allant de -2 à +2, tel que présenté au tableau 4-4.

Cependant, même si certains principes peuvent être évalués par des méthodes quantitatives, comme c'est le cas du *principe 7, rester en équilibre avec la biosphère*, BiomiMETRIC propose également une série de questions afin d'en évaluer la performance globale qualitative avec un angle plus large que celui se limitant aux indicateurs des méthodes quantitatives. Cette analyse qualitative ne présente pas une comparaison des scénarios, comme le propose l'approche quantitative, mais une évaluation globale de leur intégration, une réflexion sur leur prise en considération, un élargissement des horizons quant à leur mise en œuvre ainsi que les forces et faiblesses globales des scénarios de substitution.

Pour cette étude consacrée à la mobilité urbaine, étant donné le côté subjectif, qualitatif, large et ouvert des questions posées pour l'évaluation qualitative de chaque principe de biomimétisme, il n'a pas été jugé nécessaire d'évaluer cette performance pour chaque scénario en les soumettant successivement à la grille de questions. Tous les scénarios proposés le sont dans une perspective de bonification du scénario Statu Quo, avec la même ouverture quant à l'intégration maximale des principes de biomimétisme.

Il n'y a pas de raison de répondre différemment aux questions qualitatives en fonction du scénario envisagé puisque chaque scénario vise une prise en compte maximale des principes de biomimétisme. Aussi, il est posé comme postulat dans cette étude que les réponses, données par les mêmes répondants, aux mêmes questions, demeurent similaires, peu importe le scénario, étant donné que ce sont des questions d'ordre général en lien avec les principes de biomimétisme.

Afin d'atténuer la subjectivité des questions, il serait pertinent de soumettre l'exercice d'évaluation de la performance de mise en œuvre des principes de biomimétisme à un groupe large de répondants impliqués dans l'élaboration des scénarios, afin de tendre vers un état de saturation empirique où les nouvelles réponses ne diffèrent plus des précédentes.

Cependant, si la réponse à une même question qualitative peut varier d'un répondant à l'autre, mais demeurer similaire peu importe le scénario analysé par le même répondant, l'évaluation quantitative, pour sa part, basée sur les résultats des méthodes d'impacts ACV est différente pour chaque scénario compte tenu des variations de modes de transport qui constituent chaque scénario, et donc des impacts qui seront différents.

L'approche quantitative peut révéler une performance réduite de certains scénarios au regard de quelques indicateurs, cependant l'intention de prise en compte des principes de biomimétisme, évaluée par les questions qualitatives n'en est pas pour autant absente.

4.3.1 Performance biomimétique globale des scénarios

Dans une première analyse, l'intégration des principes de biomimétisme dans l'ensemble des scénarios, ou encore la prise en considération de ces principes par l'utilisateur qui a généré les divers scénarios, est évaluée avec les questions qualitatives. La figure 4-2 présente une synthèse des résultats qualitatifs pour chaque principe de biomimétisme. Les valeurs sont affectées par BiomiMETRIC selon les choix de pondération et d'évaluation lors du traitement des questions pour chaque principe.

Il apparaît que les scénarios en mobilité méritent une action corrective au niveau de l'intégration du principe 7- Rester en équilibre avec la biosphère (note de -1,75). Le principe 8-utiliser les déchets comme ressources est également à améliorer (note de 0,01). Ces performances seront analysées dans la suite de ce chapitre.

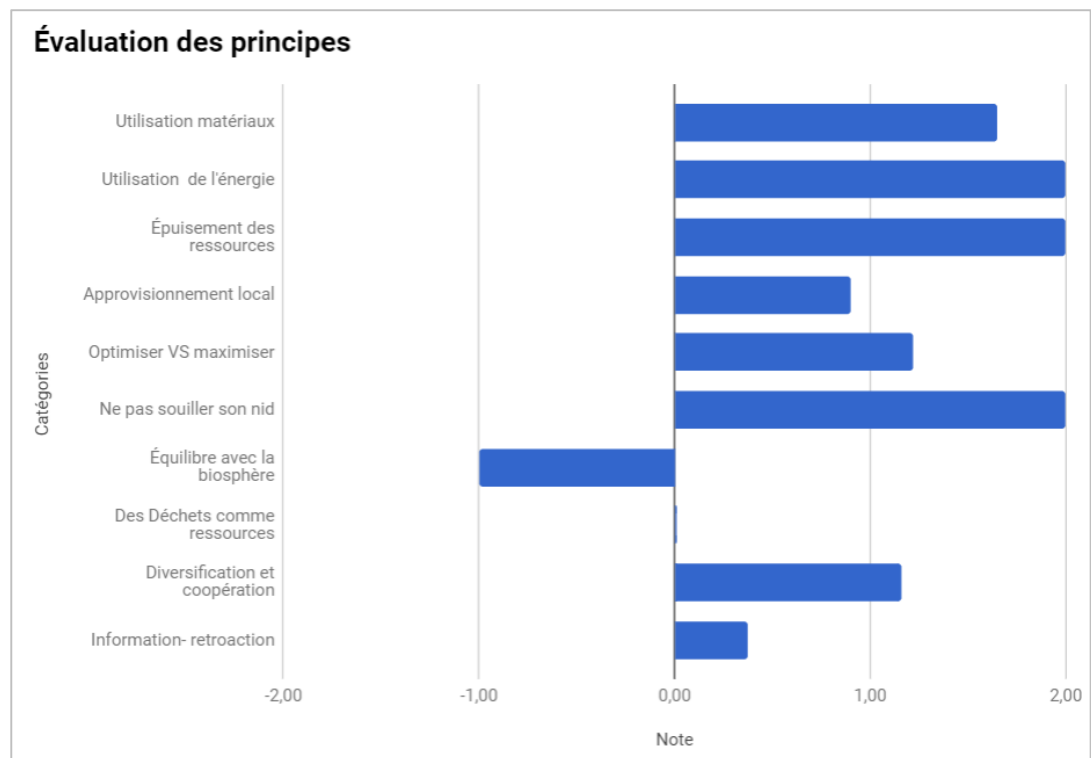


Figure 4-2 Résultats de l'évaluation qualitative des principes de biomimétisme

Par la suite, les scénarios sont comparés sur la base de leur performance au regard de chaque principe de biomimétisme quantifiable. La figure 4-3 présente, sous la forme d'un graphique radar, dont chaque axe expose un principe de biomimétisme, la performance des cinq scénarios par rapport au scénario de Statu Quo initial.

Pour représenter graphiquement les résultats, les valeurs numériques issues de chaque méthode d'impact et permettant d'évaluer chaque principe ont été transformées en pourcentage (%) de la valeur du scénario de Statu Quo. Ainsi la valeur calculée pour le scénario de Statu Quo initial représente 100 % de l'impact possible (courbe bleu foncé, la plus à l'extérieur), et pour le même principe de biomimétisme, la valeur obtenue pour chaque scénario de mobilité est calculée en pourcentage et présentée sur le graphique déterminant ainsi une enveloppe couverte par chaque scénario. Le scénario le plus performant d'un point de vue biomimétique est celui présentant la plus petite enveloppe, ou surface proche du centre du radar. Par ordre du plus performant au moins performant au plan biomimétique, le scénario Low-Tech se classe en première position, suivi dans l'ordre par le scénario Résilience Aléas et hybride novateur.

Les scénarios Actif-Télétravail et Transport Collectif peuvent être considérés comme équivalents selon les principes de biomimétisme considérés. En effet au niveau de « l'Utilisation des matériaux avec parcimonie (Principe 1) » et du « Maintien de l'équilibre avec la biosphère (Principe 7) », le scénario transport collectif est plus performant. Par contre le scénario Actif Télétravail est légèrement plus performant sur le plan des principes « Utiliser l'énergie avec efficacité (principe 2) », « Ne pas épuiser les ressources (principe 3) », « S'approvisionner localement (principe 4) », « Ne pas souiller son nid (principe 6) », « Utiliser les déchets comme ressources (principe 8) ».

Il est intéressant de noter que le scénario Low-Tech, évalué comme le plus performant au plan biomimétique, apporte une réduction des impacts de 70 % en moyenne pour l'ensemble des principes par rapport au scénario Statu Quo initial. De plus, tous les scénarios proposés sont toujours plus performants que le scénario Statu Quo initial, et ce pour l'ensemble des principes de biomimétisme.

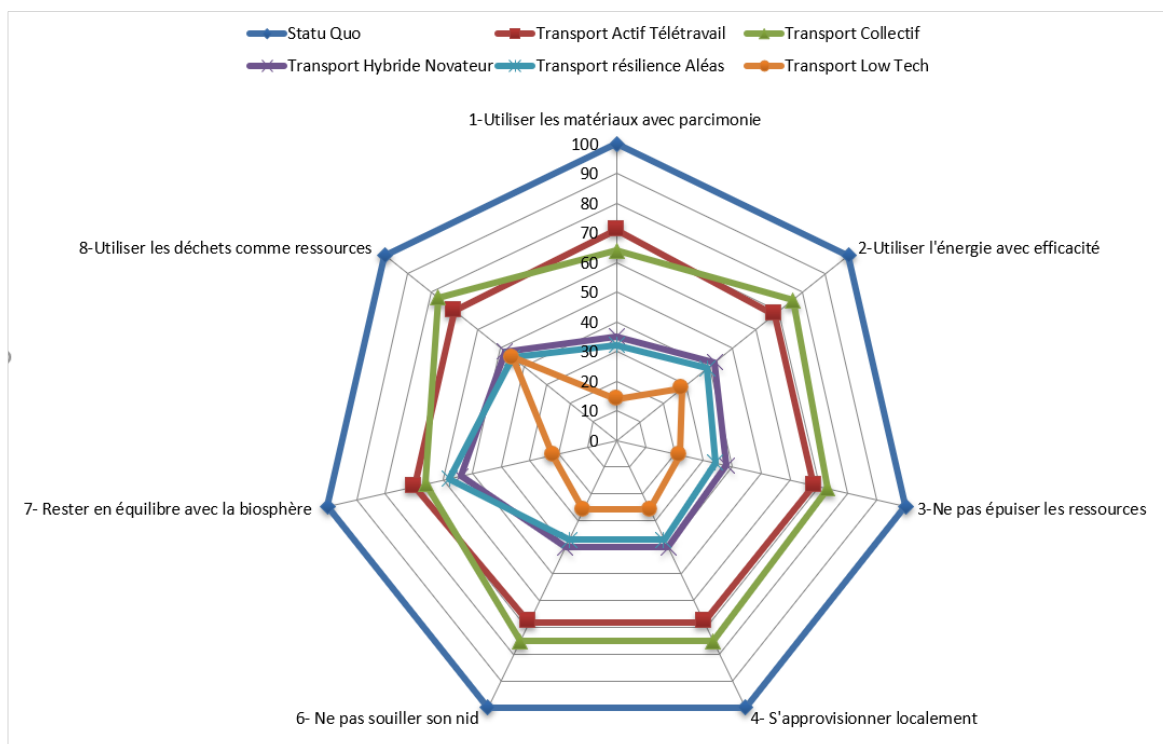


Figure 4-3 Performance biomimétique globale des scénarios de mobilité pour chaque principe de biomimétisme quantifiable

La figure 4-4 présente la performance d'intégration des principes de biomimétisme quantifiables dans les scénarios. Ainsi le principe « 8-Utiliser les déchets comme ressources » (courbe rouge, figure 4-4) affiche les impacts les plus élevés, et donc l'enveloppe la plus étendue sur le graphique radar. Ceci démontre que ce principe est le moins bien mis en œuvre dans l'ensemble des scénarios. Même pour le scénario Low Tech qui affiche la performance biomimétique globale la plus élevée, le principe 8-Utiliser les déchets comme ressources, n'est pas implanté de manière optimum. Ce principe fait souvent référence à la mise en œuvre de pratique en écologie industrielle, où les entreprises essayent de faire en sorte que les extrants des uns deviennent les intrants des autres. Cette approche pourrait être mise en œuvre au niveau du maillage et du développement de synergies entre les entreprises qui produisent des équipements de transport sur un même territoire.

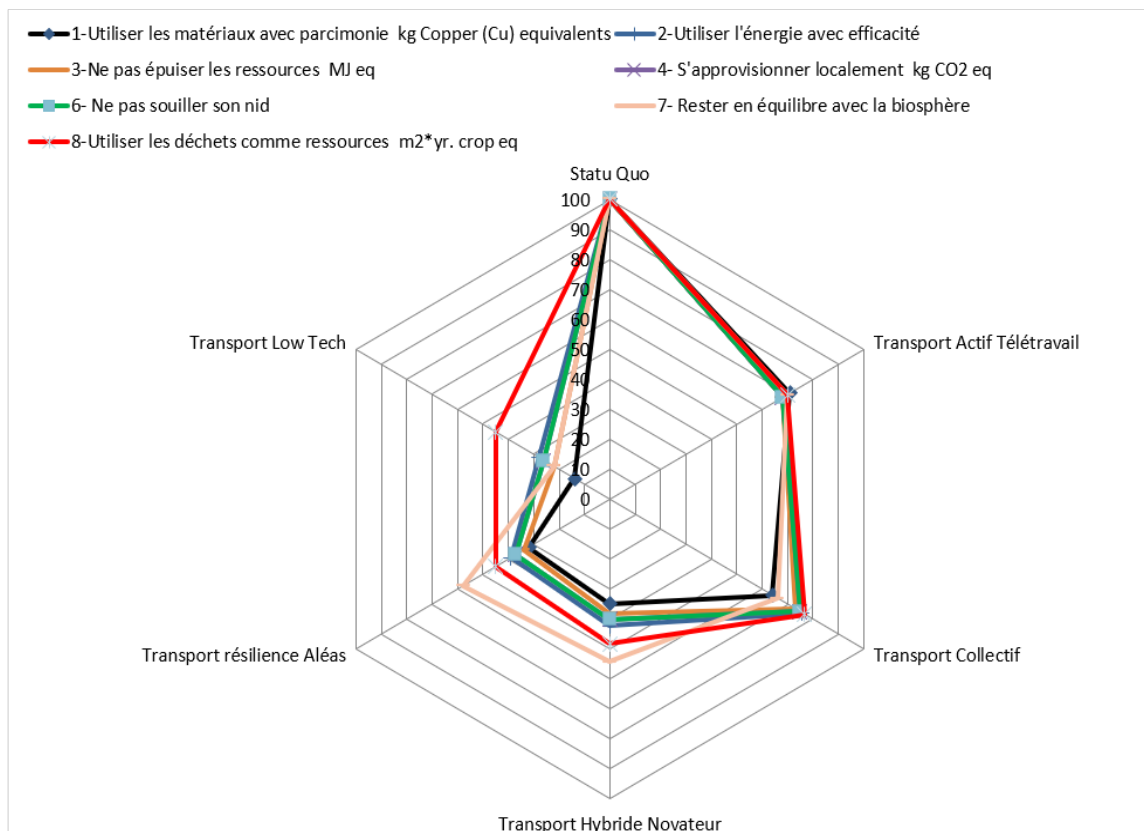


Figure 4-4 Évaluation des principes de biomimétisme quantifiables pour chaque scénario de mobilité

La figure 4-4 montre également que le principe 7- rester en équilibre avec la biosphère présente une enveloppe assez large et donc un impact élevé. Sa mise en œuvre n'est donc pas optimum, et ce, pour plusieurs scénarios (Résilience Aléas, hybride Novateur). Ce principe est évalué entre autres avec la méthode ReCIPe (Huijbregts et al., 2016) dont les facteurs de caractérisation quantifient les émissions de substances comme l'azote et le phosphore qui contribuent à l'eutrophisation du milieu. Cet enjeu a déjà bien été analysé dans la littérature qui se consacre à l'évaluation des limites biogéochimiques de la planète et aux impacts sur les écosystèmes (Rockström et al., 2009b).

4.3.2 Comparaison des scénarios. Principe 1 : utiliser les matériaux avec parcimonie

Le tableau 4-5 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, la pondération, l'évaluation et les commentaires de l'approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-5 Questions qualitatives : utiliser les matériaux avec parcimonie

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Une démarche d'écoconception est-elle suivie?	4	(++)	Oui, possible pour les véhicules ou équipements de transport. Une prise en compte des documents de déclaration environnementale de produit pourrait guider les choix	Conforter
	Un effort de réduction de la quantité de matériaux utilisés a t'il été réalisés?	4	(0)	Très variable dans le secteur des infrastructures pour la mobilité selon les scénarios. En règle générale, les matériaux et les ressources naturelles sont surexploités	Améliorer

Ce principe est évalué quantitativement par la catégorie d'impact « *mineral resource scarcity* » tirée de la méthode ReCipe. La comparaison des scénarios, sur la base des « kg cuivre équivalent », permet de mettre en évidence que le scénario Low Tech est le plus performant sur le plan de la consommation de matériaux (3,09 10.e-3 kg Cu eq), suivi en seconde position par le scénario Résilience Aléas avec 7,19 10.e-3 kg Cu eq. Les valeurs peuvent paraître très faibles en absolu pour un système de transport, mais il ne faut pas perdre de vue qu'elles correspondent à l'unité fonctionnelle qui est de 11 personne.km. Les résultats des performances de chaque scénario pour ce premier principe sont présentés au tableau 4-6.

Tableau 4-6 Résultats quantitatifs: utiliser les matériaux avec parcimonie

Utiliser les matériaux avec parcimonie					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Évaluer conso ressource minérale	ReCipe	12-Mineral resource scarcity	Surplus ore potential	kg Cu eq.	2,24 10 ⁻²	1,60 10 ⁻²	1,43 10 ⁻²	7,84 10 ⁻³	7,19 10 ⁻³	3,09 10 ⁻³

4.3.3 Comparaison des scénarios. Principe 2 : utiliser l'énergie efficacement

Le tableau 4-7 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l'approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-7 Questions qualitatives : utiliser l'énergie avec efficacité

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Les énergies renouvelables sont-elles privilégiées?	5	(++)	Oui, l'électrification des transports est présente dans plusieurs scénarios. Dans le contexte du Québec, l'électricité est majoritairement issue de sources renouvelables. Des biocarburants de 2 ^e génération sont utilisés dans les autobus (biodiesel – Projet Biobus STM). Les scénarios Low Tech privilégient le vélo et la marche.	Conforter

Ce deuxième principe est évalué quantitativement par cinq catégories d'impact issues de la méthode de la Demande Cumulative en Énergie (CED). Les résultats des performances de chaque scénario pour ce second principe sont présentés au tableau 4-8.

Tableau 4-8 Résultats quantitatifs: utiliser l'énergie avec efficacité

Utiliser l'énergie avec efficacité					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Maximiser rendement systèmes énergétique	Cumul. Energy Demand (CED)	Non renewab le, fossil	Upper heating value of resource	MJ eq	32,90	22,30	24,70	12,50	11,30	7,550
idem	CED	Non renew. nuclear	idem	MJ eq	1,030	0,704	0,994	1,140	1,220	1,210
idem	CED	Renew. biomass	Amount of energy harvested or converted	MJ eq	0,238	0,166	0,184	0,159	0,160	0,131
idem	CED	Renew. wind, solar	Idem	MJ eq						
idem	CED	Renew. water	Rotation energy trans. to the turbine	MJ eq						
					0,534	0,396	0,490	0,573	0,607	0,573

La comparaison des scénarios, sur une base exprimée en mégajoules, permet de montrer que le scénario Low Tech est encore le plus performant sur le plan de la consommation d'énergie, surtout pour la catégorie relative à l'utilisation des énergies fossiles non renouvelables où le scénario Low Tech affiche une consommation de 7,55 MJ eq contre 32,90 MJ eq pour le scénario Statu Quo initial. Le scénario Résilience Aléas affiche également une bonne performance dans cette catégorie d'impact avec 11,30 MJ eq.

4.3.4 Comparaison des scénarios. Principe 3 : ne pas épuiser les ressources

Le tableau 4-9 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l’approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-9 Questions qualitatives : ne pas épuiser les ressources

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Les ressources renouvelables sont-elles privilégiées?	5	(++)	C’est un des objectifs des scénarios de mobilité durable. L’approvisionnement en électricité hydroélectrique est une énergie renouvelable mise au service de la mobilité. Cependant, l’indicateur empreinte ressource des pays développés est très élevé et toujours en augmentation. Certains scénarios (Low tech) misent sur des solutions simples et moins consommatrices de ressources.	Conforter

Ce troisième principe est évalué quantitativement par dix catégories d’impact issues de deux méthodes d’évaluation des impacts. Huit catégories d’impacts proviennent de la *Demande Cumulative en Éxergie* (CExD) et deux catégories sont tirées de la méthode ReCIpe.

La méthode CExD, utilise également le mégajoule équivalent (MJ eq) pour exprimer la performance exergetique du scénario analysé. La catégorie d’impact « Fossil Resources Scarcity » tirée de ReCIpe utilise l’indicateur « kg oil equivalent » comme unité pour évaluer la consommation de ressources.

AWaRe fait appel au volume exprimé en m³ pour évaluer la consommation d’eau. Les performances de chaque scénario pour ce principe de biomimétisme qui vise à ne pas épuiser les ressources sont présentées au tableau 4-10.

Tableau 4-10 Résultats quantitatifs: ne pas épuiser les ressources

Ne pas épuiser les ressources					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Évaluer dégrad. qualité énergie utilisée	Cumul. Exergy Demand (CExD)	Non renew. fossil		MJ eq	33,30	22,60	24,90	12,60	11,30	7,580
"	CExD	Non Renew. nuclear		MJ eq	1,03	0,704	0,994	1,14	1,220	1,210
"	CExD	Renew. kinetic		MJ eq	0,096	0,064	0,094	0,11	0,119	0,119
"	CExD	Renew. solar		MJ eq	0,003	0,002	0,003	0,02	0,024	0,003
"	CExD	Renew. potential		MJ eq	0,543	0,396	0,490	0,57	0,607	0,573
"	CExD	Renew. biomass		MJ eq	0,249	0,175	0,193	0,17	0,168	0,138
"	CExD	Non renew. metals		MJ eq	6,02	4,070	3,600	1,46	1,120	0,125
"	CExD	Non renew. minerals		MJ eq	0,132	0,0915	0,108	0,076	0,074	0,061
Évaluer conso ress. fossiles	ReCipe	13-Fossil resource scarcity.	fossil fuel potent.	kg oil eq.	0,719	0,488	0,538	0,272	0,246	0,164
Utilisation de l'eau	AWARE Available Water Remaining	Renew. water		m3	0,207	0,147	0,158	0,134	0,136	0,107

La comparaison des scénarios, permet de mettre en évidence que le scénario Low Tech est encore le plus performant sur le plan de la consommation d'eau avec 0,164 m³, contre 0,719 m³ pour le scénario Statu Quo initial soit une réduction d'environ 77%. Au niveau des résultats issus de la méthode CExD, même s'ils ne sont pas les plus performants pour toutes les catégories d'impacts, Low Tech et Résilience Aléas présentent les meilleures performances

globales surtout en raison de la plus faible dégradation de la qualité de l’énergie liée à l’usage d’une quantité réduite de carburants fossiles. Cette catégorie d’impact, en raison de ces valeurs, de loin les plus élevées et de plusieurs ordres de grandeur, prime lors de l’évaluation d’une moyenne pour l’ensemble des impacts exprimés en MJ.

4.3.5 Comparaison des scénarios. Principe 4 : s’approvisionner localement

Le tableau 4-11 présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l’approche qualitative pour le principe analysé.

Le fait de dépendre des échanges internationaux pour le transport des biens a révélé la vulnérabilité des longues chaines logistiques pour l’approvisionnement. Ceci s’est illustré au début de la pandémie de Covid-19. Dans le domaine des équipements de transport collectif au Québec, un fort contenu local est généralement présent, mais la situation est bien différente au niveau des systèmes de mobilité individuelle comme l’automobile ou le vélo.

Tableau 4-11 Questions qualitatives : s’approvisionner localement

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	L’approvisionnement local (moins de 300 km) est-il considéré et favorisé?	3	(0)	Les équipements de transport collectif présentent un fort contenu local. Ce n’est cependant, pas le cas des vélos ou des automobiles. Beaucoup de matériaux sont fabriqués à l’échelle nationale, mais cela dépasse souvent le seuil de distance fixé à moins de 300 km.	Enjeux long terme

Ce principe est évalué quantitativement par la méthode IPCC qui ne contient qu’une seule catégorie d’impacts liés aux changements climatiques. La comparaison des scénarios, est réalisée sur la base des « kg CO₂ équivalent », et elle démontre que les scénarios Low Tech et Résilience Aléas sont les plus performants avec respectivement 0,61 et 0,87 kg CO₂ eq, contre 2,36 kg CO₂ eq pour le Statu Quo. Les résultats des performances de chaque scénario pour ce principe sont présentés au tableau 4-12.

Tableau 4-12 Résultats quantitatifs: s’approvisionner localement

S’approvisionner localement					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail travail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Réduire Impact du transport en termes émissions de GES	IPCC 2013 GWP 100a	Climate change	global warming potential (GWP) relative to CO2	kg CO2 eq	2,36	1,61	1,77	0,95	0,87	0,61

4.3.6 Comparaison des scénarios. Principe 5 : optimiser l'ensemble versus maximiser chaque composant

Le tableau 4-13 présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l’approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-13 Questions qualitatives : optimiser l'ensemble vs maximiser chaque composant

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Réparation, reconditionnement, démontage, recyclage en fin de vie sont-ils possibles?	3	(+)	Longue durée de vie des équipements qui seront recyclés et démontés en fin de vie	Conforter
2	La quantité de matières résiduelles est-elle réduite?	3	(++)	La réduction des déchets est considérée. Les matières sont gérées en conformité avec les lois environnementales	Conforter
3	Le produit/ la production intègre-t-il le respect de la capacité de support de l’environnement?	5	(++)	Les méthodes d’impact vont permettre de quantifier et de réduire les impacts. Cependant les seuils ne sont pas toujours connus sauf pour les changements climatiques.	Conforter
4	Le produit/ la production est- t-il conçu afin de réduire les impacts sur l’environnement?	5	(++)	Écoconception dans le domaine du transport. De plus, l'approche biomimétique vise la réduction des impacts environnementaux.	Conforter
5	Un écolabel ou une déclaration environnementale de produits sont-ils recherchés?	1	(0)	Pas d’écolabels pour les projets ou scénarios. Cependant, les équipements de transport peuvent faire l’objet d’une déclaration environnementale de produit (ex Camion, train, autobus)	Non prioritaire

Ce principe est seulement évalué par l'approche qualitative, car aucune méthode d'impact n'est appropriée pour quantifier le fait d'optimiser l'ensemble plutôt que de maximiser chaque composante.

4.3.7 Comparaison des scénarios. Principe 6 : ne pas souiller son nid

Le tableau 4-14 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l'approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-14 Questions qualitatives : ne pas souiller son nid

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	L'utilisation de matières dangereuses est-elle réduite et/ou encadrée en conformité avec les lois en règlements applicables?	5	(++)	La gestion des matières résiduelles dangereuses sera réalisée en conformité avec la loi sur la qualité de l'environnement du Québec	Conforter

Ce sixième principe est évalué quantitativement sur la base de 4 catégories d'impacts tirées de la méthode ReCIpe. Les contaminants liés à la qualité de l'air tels que particules fines, trou dans la couche d'ozone et précurseurs de smog constituent les indicateurs d'évaluation de la performance des scénarios au regard de ce principe.

Le scénario Low-Tech est encore le plus performant en termes d'émissions de particules fines, PM 2.5 et d'oxyde d'azote. Les résultats des performances quantitatives de chaque scénario pour ce principe sont présentés au tableau 4-15.

Tableau 4-15 Résultats quantitatifs: ne pas souiller son nid

Ne pas souiller son nid					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Utiliser chimie verte à faible impact environnemental Éviter génération polluants	ReCipe	4. Fine particulate matter formation	Fract. of PM2.5	yr/kg PM 2.5 eq.	2,7 10e-3	1,9 10e-3	2,4 10e-3	2,0 10e-3	2,0 10e-3	1,4 10e-3
	ReCipe	5. Photo chemical ozone formation	Change intake rate O ₃ due to change in emission precursors (NOx and NMVOC). Human health	yr/kg NOx eq.	4,8 10e-3	3,2 10e-3	5,4 10e-3	4,1 10e-3	4,2 10e-3	1,6 10e-3
	ReCipe	5. Photo chemical ozone formation	Change intake rate O ₃ due to change in emission precursors (NOx and NMVOC) Terrestrial Ecosystem	yr/kg NOx eq.	5,1 10e-3	3,4 10e-3	5,7 10e-3	4,3 10e-3	4,4 10e-3	1,7 10e-3

4.3.8 Comparaison des scénarios. Principe 7 : rester en équilibre avec la biosphère

Le tableau 4-16 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l'approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-16 Questions qualitatives : rester en équilibre avec la biosphère

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Les limites, seuils, capacités d'absorption environnementales sont-ils connus et considérés?	4	(-)	Très difficile de savoir si la capacité d'absorption des écosystèmes est respectée. Plus la solution est simple et Low-Tech et moins d'impacts sont générés sur l'environnement. Les scénarios Low-Tech sont mieux placés à ce niveau.	Agir

Ce septième principe est évalué quantitativement par neuf catégories d'impacts issues des méthodes d'impacts ReCIpe et USEtox2. Ce sont principalement des indicateurs visant à évaluer l'impact sur le plan de la contribution à l'acidification ou à la modification du cycle de l'azote et du phosphore qui sont à la base de l'eutrophisation du milieu. On retrouve également les effets cancérigènes, ainsi que la toxicité sur l'espèce humaine, et sur les écosystèmes, évalués par la méthode USEtox2.

Le scénario Actif-Télétravail présente la seconde meilleure performance derrière le scénario Low Tech sur le plan de la toxicité humaine et des effets cancérigènes. Il se présente même comme le plus performant pour ce qui a trait à l'eutrophisation de l'eau douce avec $2,810^{-4}$ kg /Phosphore par an contre $4,0 \cdot 10^{-4}$ pour le scénario Statu Quo, et $3,1 \cdot 10^{-4}$ pour Low Tech.

Les résultats des performances de chaque scénario pour ce principe sont présentés au tableau 4-17.

Tableau 4-17 Résultats quantitatifs: rester en équilibre avec la biosphère

Rester en équilibre avec la biosphère					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Minimiser les impacts environnementaux pour ne pas dégrader la capacité de support de la biosphère	ReCipe	6 Terrest. acidif.	Acidif. Potential	yr/kg SO2 eq	6,09 10 ⁻³	4,17 10 ⁻³	4,22 10 ⁻³	3,91 10 ⁻³	3,99 10 ⁻³	2,34 10 ⁻³
	ReCipe	7 Fresh water eutrophic	Emission P phosphore	yr/kg P fresh water eq.	4,0 10 ⁻⁴	2,8 10 ⁻⁴	3,4 10 ⁻⁴	3,9 10 ⁻⁴	4,2 10 ⁻⁴	3,1 10 ⁻⁴
	ReCipe	8 Marine eutrophic	Emission N (nitrogen) containing nutrients	yr/kg N to marine eq.	4,0 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁵	3,0 10 ⁻⁵	2,0 10 ⁻⁵
	ReCipe	9 Ecotox Terrest.	Ecotox. accounts for enviro. persistence (fate) and accumul.	yr/kg 1,4-dichloro benzeen (1,4-DCB)	12,60	8,65	8,30	6,19	6,63	2,30
	ReCipe	9 Ecotox. Fresh water, Marine	in human food chain	yr/kg 1,4-DCB	0,220	0,157	0,142	0,136	0,149	0,055
	ReCipe	9. Ecotox. Human non-cancer	Human toxicity	yr/kg 1,4-DCB	2,46	1,88	1,71	1,90	2,09	1,06
Évaluer impacts composés chimiques au plan humain et éco toxicologique	USEtox 2	Human toxicity, Cancer	Estimated increase in morbidity the total human population	disease cumul. cases / kg.	3,62 10 ⁻¹⁰	2,45 10 ⁻¹⁰	3,64 10 ⁻¹⁰	2,73 10 ⁻¹⁰	3,18 10 ⁻¹⁰	8,18 10 ⁻¹¹
	USEtox 2	Human toxicity, NOn cancer	per unit mass of a contaminant emitted	disease cumul. cases / kg.	4,70 10 ⁻¹⁰	3,16 10 ⁻¹⁰	2,88 10 ⁻¹⁰	5,62 10 ⁻¹¹	2,40 10 ⁻¹¹	1,43 10 ⁻¹¹
	USEtox 2	Fresh water Ecotox.	Potentially Affected Fraction (PAF) of species	PAF m3 .day	1,65 10 ⁻¹	1,11 10 ⁻¹	9,81 10 ⁻²	1,54 10 ⁻²	3,12 10 ⁻²	6,86 10 ⁻⁴

4.3.9 Comparaison des scénarios. Principe 8 : utiliser les déchets comme ressources

Le tableau 4-18 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l’approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-18 Questions qualitatives : utiliser les déchets comme ressources

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Les extrants (Rejets, matières résiduelles, retailles) d’une autre entreprise sont-ils utilisés dans une optique d’écologie industrielle ou d’économie circulaire?	1	(o)	Pas vraiment applicable dans le cas des scénarios de mobilité. D’un point de vue plus conceptuel, les usagers de l’auto solo (extrants) doivent devenir des intrants absorbés par les alternatives en mobilité plus durable	Non prioritaire

Ce principe est évalué quantitativement par la catégorie d’impact « *Land Use* » tirée de la méthode ReCipe. Une fois de plus, les scénarios Low Tech et Résilience Aléas sont les moins impactants en termes d’occupation des sols, indicateur choisit pour évaluer le bouclage des flux dans une logique d’économie circulaire. Les résultats des performances de chaque scénario pour ce principe sont présentés au tableau 4-19.

Tableau 4-19 Résultats quantitatifs: utiliser les déchets comme ressources

Utiliser les déchets comme ressources					Scénarios Transport					
Objectif	Méthode Impact	Catégorie Impact	Facteur caractérisation	Unité	Satu Quo	Actif Télétravail	Collectif	Hybride novateur	Résilience Aléas	Low-Tech
Boucler la boucle Logique d’écono- mie circulaire	ReCipe	11 Land use	The amount of land transformed or occupied for a certain time	m2*yr . crop eq	5,61 10 ^{e-2}	3,91 10 ^{e-2}	4,32 10 ^{e-2}	2,69 10 ^{e-2}	2,54 10 ^{e-2}	2,55 10 ^{e-2}

4.3.10 Comparaison des scénarios. Principe 9 : se diversifier et coopérer

Le tableau 4-20 tirée de BiomiMETRIC présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l'approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-20 Questions qualitatives : se diversifier et coopérer

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	Des outils d'économie de la fonctionnalité ou de la coopération sont-ils connus et utilisés?	3	(o)	Outils moins connus. Économie de la fonctionnalité pourrait avoir sa place au niveau de la mise en marché des véhicules	Enjeux long terme
2	Le projet peut-il se positionner dans une niche non concurrente pour éviter la compétition?	2	(-)	Hélas, mobilités collective et active sont en compétition avec la mobilité personnelle, motorisée	Non prioritaire
3	Les parties prenantes ont-elles été identifiées et consultées durant le projet?	5	(+)	Un rapport GRI peut être rédigé en tenant compte des Parties Prenantes, principe important en RSE et ingénierie durable. L'approche BNQ 21000 peut être implantée dans les entreprises impliquées dans le projet	Améliorer
4	L'approche systémique est-elle utilisée?	5	(++)	Oui, les scénarios en mobilité sont systémiques et prospectifs	Conforter
5	Les principes d'économie circulaire sont-ils connus et appliqués?	5	(++)	Ces principes sont au cœur même du biomimétisme et peuvent être appliqués dans le cas des scénarios	Conforter

Ce principe n'est pas évalué quantitativement, car aucune méthode d'impact n'est appropriée pour en quantifier la mise en œuvre.

4.3.11 Comparaison des scénarios. Principe 10 : s'informer et implanter des boucles de rétroaction

Le tableau 4-21 présente les questions, pondération, évaluation et commentaire de l'approche qualitative pour le principe analysé.

Tableau 4-21 Questions qualitatives : s’informer et implanter des boucles de rétroaction

No	Questions complémentaires	Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération
1	L’information requise pour plus de durabilité est-elle diffusée et accessible?	4	(++)	La problématique de la durabilité des transports est connue et documentée	Conforter
2	Des formations et évaluations sur la démarche biomimétique sont-elles proposées?	3	(o)	Démarche moins connue, mais il y a quelques exemples en transport (Ex.Shinkansen)	Enjeux long terme
3	L’entreprise intègre-t-elle les informations sociales et environnementales dans sa prise de décisions?	4	(o)	Mobilité inclusive? Peu de prise en compte des personnes à mobilité réduite (aspect plus social). Les informations environnementales sont mieux documentées	Améliorer
4	Une attention aux ressources rares et surexploitées a-t-elle été portée?	4	(o)	Réduction de la consommation de ressources fossiles, mais augmentation de la consommation d’autres ressources (lithium)	Améliorer
5	Les grands enjeux liés à la durabilité, aux inégalités sociales sont-ils connus et partagés	4	(+)	Oui, connus, partagés, mais pas toujours appliqués	Améliorer

Ce principe n’est pas évalué quantitativement, car aucune méthode d’impact n’est appropriée pour en quantifier la mise en œuvre.

4.4 Recommandations d’un scénario de mobilité et discussion

L’analyse conduite avec BiomiMETRIC démontre que le scénario Low Tech est le plus prometteur sur le plan de la conformité avec les principes de biomimétisme, cependant son implantation nécessite un changement profond au niveau des habitudes de mobilité des usagers. Le scénario Résilience Aléas se classe en seconde position, et il est plus réaliste en termes de mise en œuvre, de technologies et d’acceptabilité par les usagers à court ou moyen termes dans un contexte de sensibilisation grandissante aux impacts des changements climatiques. Ce scénario Résilience Aléas misant sur la mobilité collective, la mobilité active et l’électrification des transports se présente comme une alternative viable qui est maintenant comparée avec le scénario actuel de Statu Quo, afin de quantifier les réductions d’impacts évaluées selon les principes de biomimétisme mis de l’avant dans BiomiMETRIC.

Le scénario Résilience Aléas est plus performant que le scénario Statu Quo pour l'ensemble des 10 principes de biomimétisme. Sur le plan de la consommation de matériaux par exemple, le scénario Résilience Aléas présente un impact plus faible que le Statu Quo comme montré au tableau 4-8 où les impacts sur l'utilisation des ressources (méthode ReCipe/mineral resource scarcity) sont de 0,0224 et 0,00719 kg cuivre équivalent, respectivement pour les scénarios Statu Quo et le Résilience Aléas. Le Scénario Statu Quo entraîne donc une plus grande pression sur les ressources que le Résilience Aléas. Cet indicateur utilisé en analyse de cycle de vie pour l'évaluation de la raréfaction des ressources indique la quantité de minerai à extraire pour obtenir un kilogramme de cuivre, considéré comme ressource de référence. Plus la ressource devient rare et faiblement concentrée, plus il faut creuser la terre et extraire du minerai pour obtenir 1 kg de cuivre. Chaque matériau est converti en « kg de cuivre équivalent » via un facteur de conversion présenté dans la documentation de la méthode ReCipe (Huijbregts et al., 2016). Un matériau présente donc un potentiel de raréfaction plus élevé, si sa valeur numérique en kg de Cu eq est élevée. Afin de comparer les valeurs entre elles, les deux dernières colonnes du tableau 4-22 présentent la contribution (%), des impacts de chaque scénario par rapport à l'impact total.

Tableau 4-22 Exemple de résultats pour l'évaluation du principe « utiliser les matériaux avec parcimonie ». Méthode ReCipe- Mineral resource Scarcity- kg Cu eq

Principe	Méthode d'impact	Catégorie d'impact	Unité	Statu Quo	Transport Résilience Aléas	Statu Quo en % du total	Résilience Aléas en % du total
1-Utiliser les matériaux avec parcimonie	ReCipe	12- Mineral resource scarcity	kg Copper (Cu) equivalents	2,24E-02	7,19E-03	76%	24%

Le tableau de bord des résultats quantitatifs, présenté à la figure 4-5 permet de visualiser graphiquement, l'impact de chaque scénario (Statu Quo ou Résilience Aléas) par rapport à l'impact total pour chaque principe. Par exemple pour le cadran 1 du tableau de bord des résultats quantitatifs, intitulé « Consommation de matériaux », le scénario Résilience Aléas (en rouge) représente 24,3 %, et le Statu Quo (en bleu) 75,7 % de la somme des impacts totaux exprimés en kg de Cu eq pour cette catégorie. Le tableau de bord expose, de manière

visuelle, que le scénario Résilience Aléas est plus performant selon les principes de biomimétisme que le Statu Quo initial. En effet, pour tous les principes, la section du disque colorée en rouge et associée à l’impact attribuable au scénario Résilience Aléas est toujours plus faible que la section bleue qui expose l’impact du Scénario Statu Quo.

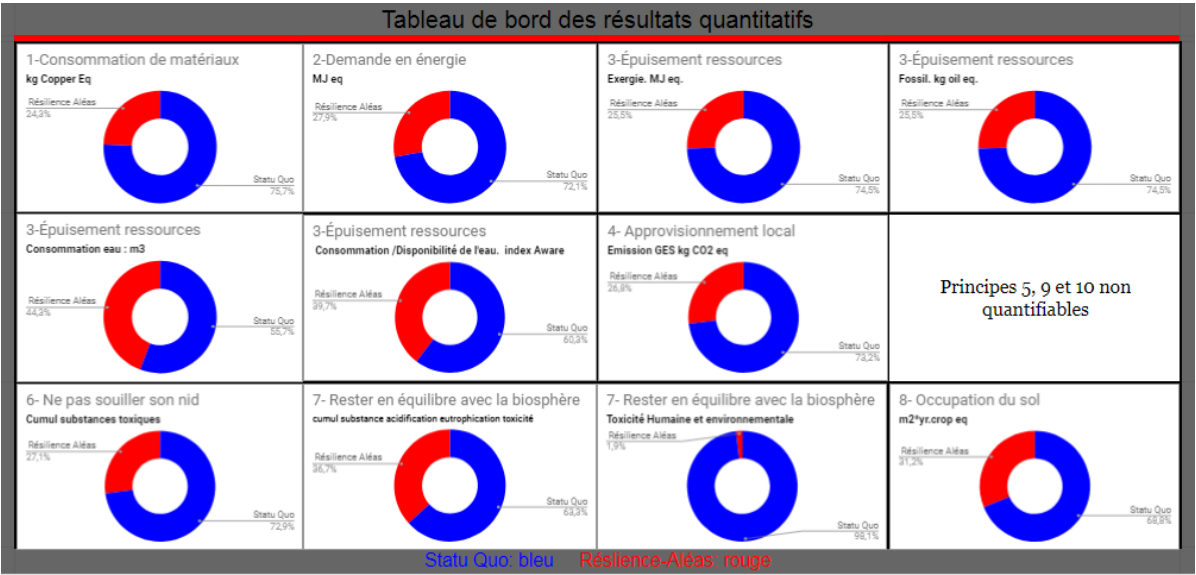


Figure 4-5 Tableau de bord des résultats quantitatifs donnés par l’outil pour chaque principe de biomimétisme pouvant être quantifié

4.5 Synthèse du chapitre

L’analyse des résultats et des graphiques, pour chaque principe quantifiable de biomimétisme, a démontré que les scénarios alternatifs au scénario Statu Quo sont plus performants en termes de biomimétisme.

Bien que présentant la meilleure performance globale, le scénario Low-Tech, en raison des transformations profondes qu’il imposerait à l’organisation de la mobilité n’a pas été sélectionné pour une comparaison plus détaillée de ses performances par rapport au scénario Résilience Aléas. Ce dernier, classé en deuxième position, juste derrière le scénario Low Tech, et également très performant au plan biomimétique, présente des impacts environnementaux systématiquement plus faibles que le scénario Statu Quo au niveau de la consommation de

matériaux, de la demande en énergie, de la dégradation de la qualité de l'énergie (exergie), de la consommation de ressources fossiles, de la consommation d'eau, de l'approvisionnement et des émissions de GES qui en découlent, du cumul de substances toxiques, de l'acidification et eutrophisation du milieu aquatique ainsi que de l'occupation du sol. À la lumière des résultats quantitatifs, ce scénario Résilience Aléas s'impose largement face au Scénario Statu Quo ayant une performance biomimétique moindre.

L'analyse qualitative basée sur des listes de questions, vise à évaluer l'ensemble des principes de biomimétisme, mais surtout ceux qui ne sont pas évalués par les méthodes quantitatives, tels que les principes 5-Optimiser l'ensemble versus Maximiser chaque composant, 9-Se diversifier et coopérer, et 10-S'informer et implanter des boucles de rétroaction. L'analyse des résultats a montré que c'est cependant au niveau de l'intégration des principes 7-Rester en équilibre avec la biosphère, et 1-Utiliser des matériaux avec parcimonie, que les scénarios en mobilité méritent une action corrective.

Les principaux résultats permettent de démontrer que BiomiMETRIC facilite l'analyse biomimétique et la prise de décisions pour sélectionner le scénario de mobilité le plus en accord avec les principes de biomimétisme. BiomiMETRIC a donc permis la quantification de principes biomimétiques jusque-là évalués subjectivement. Les questions qualitatives ont révélé les faiblesses dans la mise en œuvre de certains principes de biomimétisme. Même si un scénario alternatif est plus performant que la solution initiale, il n'est pas assuré que ce dernier soit parfait sur le plan de la mise en œuvre de tous les principes. BiomiMETRIC a permis de montrer que peu importe le scénario de mobilité envisagé, certains principes mériteraient d'être bonifiés en tenant compte des questions posées afin d'augmenter la performance environnementale globale dans une perspective de développement durable.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Ce chapitre présente une synthèse des travaux, ainsi qu'une analyse des incertitudes et des limites associées au développement de BiomiMETRIC, outil d'aide à la conception biomimétique. Des améliorations à apporter à cet outil seront également proposées. De plus, ce chapitre présentera les retombées potentielles découlant de l'utilisation de BiomiMETRIC et se terminera par des recommandations et une étude épistémologique sur la construction du savoir en biomimétisme afin de susciter une réflexion sur cette nouvelle approche d'inspiration et de conception.

5.1 Synthèse des travaux de recherche

5.1.1 Synthèse des articles

Trois articles ont été publiés tout au long de ce projet de recherche. Le premier article, dont le résumé est disponible en annexe III, présente un état de l'art du biomimétisme, et des applications en ingénierie pour l'éco-innovation (Terrier, Glaus, et al., 2017). Le second article traite de l'approche systémique pour l'analyse de la mobilité avec une étude de cas réalisée sur le Campus de Lyon Tech La Doua (Terrier, Berdier, et al., 2017). Enfin, le troisième article présenté dans le chapitre 3 expose le développement d'une nouvelle approche quantitative pour bonifier la méthodologie de conception biomimétique et faciliter la prise de décision. Cette approche basée sur le couplage des principes de biomimétisme avec les méthodes d'impacts utilisées en analyse de cycle de vie est au cœur du développement de l'outil BiomiMETRIC qui permet une évaluation quantitative de la performance biomimétique des scénarios, solutions ou produits analysés.

5.1.2 Synthèse du projet de thèse

Cette thèse comporte principalement deux grands volets. Le premier volet traite du développement de BiomiMETRIC, outil d'assistance pour la conception biomimétique. Le second volet présente l'application de la démarche et l'utilisation de l'outil pour l'analyse de la performance environnementale de scénarios en mobilité urbaine. Ces deux volets ont permis d'apporter trois principales contributions au développement des connaissances :

- premièrement, une nouvelle classification des dix principes de biomimétisme selon trois axes globaux d'écoconception a été proposée et une association des principes de biomimétisme et des méthodes d'impacts issues de l'ACV a été réalisée;
- deuxièmement, un outil d'assistance à la conception biomimétique, BiomiMETRIC, basé sur le croisement des méthodes ACV avec les principes de biomimétisme a été développé. L'outil permet une évaluation qualitative (biomimétisme) et quantitative (biomimétique) de l'approche de conception biomimétique;
- troisièmement, cinq scénarios misant sur l'utilisation du transport collectif, l'adaptation aux aléas environnementaux, l'augmentation de la mobilité active ou encore la priorisation des « Low Tech » en remplacement du scénario actuel pour la mobilité urbaine à l'heure de pointe à Montréal ont été analysés avec BiomiMETRIC.

5.2 Innovation et particularité de l'approche proposée

5.2.1 Principes généraux

Le biomimétisme et la conception biomimétique font maintenant partie de la panoplie d'outils au service de l'ingénierie durable. L'outil BiomiMETRIC innove en facilitant l'évaluation de la performance environnementale d'un scénario, d'un produit ou d'une solution à l'aune des dix principes de biomimétisme. Dans la démarche de conception biomimétique proposée par le Biomimicry Institut, ou présentée dans la norme ISO 18458 (ISO, 2015a), cette étape d'évaluation de la performance inscrite dans la méthodologie de conception présentait des faiblesses en raison du manque de quantification. Ce manque de quantification limitait l'utilisation de la méthodologie de conception biomimétique en ingénierie, et ce, malgré la

publication de la norme ISO 18458 qui balise la démarche, mais sans la rendre plus opérationnelle.

BiomiMETRIC pose les bases d'une nouvelle approche de couplage des principes de biomimétisme avec les méthodes d'évaluation des impacts utilisées en ACV afin de quantifier la démarche de conception biomimétique. BiomiMETRIC guide l'utilisateur en associant chaque principe à une, ou plusieurs méthodes quantitatives d'évaluation des impacts utilisées en ACV. De plus, des questions permettant d'évaluer la performance en termes d'intégration des principes de biomimétisme viennent compléter la démarche.

BiomiMETRIC fait certes appel aux méthodes d'impacts et aux processus issus des bases de données comme Ecoinvent, utilisés en analyse de cycle de vie, cependant BiomiMETRIC ne vise pas à se substituer à l'analyse de cycle de vie qui est une démarche normalisée et dont la réalisation requiert une expertise de pointe. BiomiMETRIC accompagne les parties prenantes et favorise ainsi une sélection plus objective de solutions présentant les meilleures performances au regard des principes et de la vision du biomimétisme.

5.2.2 Intérêt et retombées potentielles de BiomiMETRIC

BiomiMETRIC propose une approche novatrice aux concepteurs, architectes ou ingénieurs soucieux d'implémenter la conception biomimétique dans la recherche d'innovation de rupture. Les exemples de mise en œuvre d'une démarche d'inspiration du vivant et de la nature (Kapsali, 2017) pour la création de produits sont multiples, mais ces exemples sont, pour la majorité, développés sans référence à la norme ISO 18458. BiomiMETRIC permettrait de quantifier la performance biomimétique de ces innovations afin d'aider les décideurs à sélectionner les solutions bio inspirées les plus performantes au plan environnemental.

5.3 Limites de la démarche, bonifications de BiomiMETRIC et recommandations

Cette section explore quelques limites de BiomiMETRIC et propose des pistes d'amélioration qui pourront être suivies ultérieurement.

5.3.1 Analyse d'incertitudes

BiomiMETRIC repose sur l'utilisation de méthodes d'évaluation des impacts issues de l'analyse de cycle de vie, aussi les mêmes limitations que celles retrouvées en ACV s'appliquent lors de l'utilisation de BiomiMETRIC. Par exemple, des incertitudes sont associées aux données spécifiques des solutions ou scénarios comparés avec BiomiMETRIC. Les processus sélectionnés dans les bases de données (par exemple un processus de transport sélectionné dans la base Ecoinvent) peuvent ne pas représenter fidèlement la réalité de la situation, et induire des incertitudes au niveau des résultats.

Les résultats issus des méthodes de calcul des impacts présentent, de plus, leur lot d'incertitudes, notamment en raison du fait que pour une même catégorie d'impact, chaque méthode d'analyse ne considère pas le même nombre de substances issues de l'inventaires des émissions. Des incertitudes résident également dans la modélisation complexe des mécanismes environnementaux, et dans la quantification des différents impacts associés. Les modèles de caractérisation, comme tous modèles, ne proposent qu'une simplification de la réalité.

Lors d'une analyse de cycle de vie, l'incertitude peut être partiellement réduite en utilisant plusieurs méthodes d'évaluation des impacts et en comparant les résultats. BiomiMETRIC fait appel à six méthodes, ReCipe, UseTox2, IPCC 2013, AWaRe, CED, CExD, présentées dans le chapitre 3, section 3.3, qui permettent ainsi de limiter les incertitudes sur les résultats et conclusions au niveau de la performance biomimétique des solutions analysées.

5.3.2 Une démarche à bonifier

La démarche de conception biomimétique présente encore des limites. En effet, cette approche ne considère que les aspects et impacts environnementaux ou la capacité de support et d'absorption de l'environnement. Cependant, le biomimétisme n'offre pas une garantie de performance sociale, morale, éthique ou économique, car ces axes ne sont pas évalués par la méthodologie. La conception biomimétique s'inscrit dans une perspective de développement durable, mais n'embrasse pas à elle seule toutes les dimensions de la durabilité. Certaines valeurs propres à la société humaine (droit, éthique) ne sont pas présentes dans la nature, mais la prise en compte de ces considérations non environnementales contribuerait à l'amélioration de la durabilité de la démarche de conception biomimétique (Durand et al., 2012). Pour cette raison, l'approche biomimétique doit être complétée avec d'autres outils d'analyse économique et sociale afin d'évaluer pleinement la durabilité d'un projet.

Lors de l'étude des scénarios, il est nécessaire de choisir des processus de modélisation dans des bases de données comme Ecoinvent (Frischknecht et al., 2005). Ces processus peuvent être des modes de transport, mais également des activités industrielles, des modes de production d'énergie ou encore des matériaux. Les scénarios sont donc modélisés par des processus dans les limites de ceux disponibles au sein des bases de données. Les processus sont sélectionnés avec le plus de rigueur et de jugement possible, mais demeurent des modélisations approximatives de la réalité, ancrées dans un contexte géographique et induisant inévitablement des incertitudes sur leur représentativité.

Il faut également noter que, d'une manière générale, les méthodes d'impacts et bases de données ACV sur lesquels repose BiomiMETRIC présentent des limites. Par exemple, certains impacts environnementaux comme le bruit, les odeurs ou la pollution lumineuse ne sont pas considérés. Il en est de même au niveau des impacts sociaux et économiques ou encore des accidents et des risques.

L'analyse sociale et économique complémentaire des scénarios peut être faite avec différents outils comme des grilles qualitatives d'analyse de la durabilité des projets. Par exemple, la grille d'analyse de la durabilité des projets, développée par l'Université du Québec à Chicoutimi pourraient être utilisées afin d'évaluer sommairement la performance économique et sociale des scénarios (Villeneuve et al., 2009). Cet outil, simple d'utilisation est constitué d'une série de questions et de critères d'évaluation qui permettent d'inscrire la démarche dans une perspective de développement durable. De plus, des critères d'acceptabilité ou de responsabilité sociale des projets pourraient également être considérés.

5.3.3 Amélioration de l'outil BiomiMETRIC

- Au niveau des méthodes d'analyse des résultats

Dans un travail ultérieur, il serait intéressant d'explorer différentes avenues pour le traitement des résultats. Dans le contexte d'utilisation de BiomiMETRIC, la prise de décision est basée sur de nombreux paramètres ou principes de biomimétisme, eux-mêmes évalués avec plusieurs méthodes, ce qui complexifie rapidement le choix du scénario optimum. Afin de traiter ce problème, le recours aux méthodes de type multicritères est envisagé (Caillet, 2003). Deux principales approches sont possibles pour réaliser une analyse de type multicritères.

La première approche consiste à agréger les données en un critère unique par l'intermédiaire d'une somme pondérée après normalisation. Il s'agirait, dans ce cas, de poursuivre le développement actuel de BiomiMETRIC où l'agrégation des résultats de chacun des principes de conception biomimétique permettrait de proposer le calcul d'un indice biomimétique. L'indice compris entre 0 et 1 permettrait de sélectionner plus facilement le scénario présentant la performance biomimétique la plus élevée.

La deuxième approche également très intéressante est basée sur les méthodes dites de surclassement qui proposent d'analyser des préférences entre plusieurs scénarios ou possibilités selon une liste de critères définis et pondérés qui seront alors comparés. Plusieurs méthodes telles qu'ELECTRE ou PROMÉTHÉE ont été développées dans ce domaine de l'évaluation

multicritères. L'analyse multicritères pourrait de plus s'avérer intéressante pour intégrer les dimensions sociales et économiques dans la sélection des scénarios, en complément à l'évaluation environnementale proposée par BiomiMETRIC. Pour l'ensemble des méthodes, des critères devront être définis, de façon précise, afin de bien encadrer et évaluer la problématique. Une analyse de sensibilité viendra vérifier comment la variation des paramètres influence les résultats. L'analyse de la robustesse indique, de son côté, comment le résultat demeure constant malgré les variations des paramètres.

- Au niveau des méthodes d'évaluation des impacts

La méthode Impact World (Bulle et al., 2018), qui n'est pour l'instant pas disponible dans le logiciel d'analyse de cycle de vie et la version de la base de données Ecoinvent utilisés, pourrait être testée, car elle fournirait une méthode alternative ou supplémentaire pour quantifier les principes utilisés dans le processus de conception biomimétique, et réduire ainsi les incertitudes.

Bien que reconnue et potentiellement adaptée à la quantification des principes de biomimétisme, la méthode nord-américaine d'évaluation des impacts dénommée TRACI (Bare, 2002; Pré-Sustainability, 2016) n'a pas été utilisée dans le cadre du développement de cette première version de BiomiMETRIC. TRACI est une méthode de référence développée par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) et utilisée notamment dans le cadre de la déclaration environnementale de produits. Cependant comme TRACI présente globalement des catégories d'impacts similaires à ReCipe ou Usetox, cela entraînerait une redondance dans l'évaluation des impacts. TRACI avec ses dix facteurs de caractérisation évalue entre autres les particules fines PM 2.5, évaluation qui ne se retrouvent pas dans les autres méthodes, qui pour leur part traitent plus spécifiquement les particules fines de 10 microns (PM10). TRACI pourrait être envisagée dans une seconde version de l'outil BiomiMETRIC.

5.3.4 Recommandations

La méthode de conception biomimétique offre une voie intéressante pour l'innovation dans un contexte d'ingénierie durable. Appliquée à la conception de scénarios ou à la comparaison de solutions, cette approche permet d'évaluer la performance environnementale sous un angle nouveau et complet qui intègre les principes mis en place par le vivant et la nature.

L'utilisation de BiomiMETRIC facilite le développement ou le choix d'une solution en permettant une évaluation chiffrée de sa réelle performance environnementale. Cependant, même si la méthode de conception biomimétique n'est pas appliquée dans son intégralité, le fait de considérer les principes de biomimétisme ou principes des écosystèmes durables constitue assurément une référence pour atteindre des performances environnementales élevées.

5.4 Épistémologie : construction du savoir en biomimétisme

Le développement du concept de biomimétisme est porté par un sentiment d'urgence face aux menaces environnementales qui mettent en péril l'existence de l'humanité. Le biomimétisme s'inscrit comme nouveau paradigme technique et scientifique qui se pose en allié de la cause environnementale, en proposant un nouveau regard sur la nature vue comme Mentor et comme Mesure. Cette approche de connexion repensée avec la nature n'est pas sans critiques (Kamili, 2019). Certain y voit un positionnement opportuniste, utilitariste et anthropocentré ou Homo sapiens souhaite protéger la biodiversité pour en tirer parti par la suite. La nature est une fois de plus évaluée sur sa valeur d'usage plus que sur son simple droit d'exister. Certains penseurs (Mathews, 2011) présentent le biomimétisme comme voie intermédiaire entre l'écologie profonde écocentrique et le conservationnisme environnemental anthropocentrique. Entre ces deux extrêmes - ou l'Homme occupe une place centrale ou alors il se retrouve complètement ignoré - le biomimétisme propose un positionnement qui permet à l'humain d'exister en préservant l'intégrité écologique planétaire, dans une éthique environnementale bio-inclusive, en harmonie avec les autres espèces vivantes, sans intention d'en tirer profit.

5.4.1 Le biomiméticien et les bases de sa méthode

Au-delà de cette réflexion sur le positionnement du biomimétisme au sein des grands courants environnementalistes, il est intéressant d'essayer de comprendre le cheminement scientifique du biomiméticien ainsi que les bases et hypothèses ayant permis la construction du biomimétisme. Le biomiméticien contemporain est surtout un scientifique occidental moderne, qui imite des processus observés dans la nature, objectivés et interprétés via le prisme des sciences naturalistes et des technologies. Ce n'est pas une imitation directe de la nature et du génie du vivant, mais bien une copie selon la compréhension rendue possible par les connaissances scientifiques, leurs propres fondements et limites. La méthodologie de conception biomimétique est elle-même élaborée sur le modèle de la science traditionnelle lorsqu'elle vise à comprendre, identifier, catégoriser, abstraire, émuler, mesurer et itérer afin de concevoir un produit comme l'aurait soi-disant fait la nature et le vivant, mais avec ici l'intention d'apporter une contribution bénéfique au progrès et à l'humanité, ou à tout le moins au biomiméticien lui-même. Mais le vivant, a-t-il une « intention » en sélectionnant les solutions les plus adaptées?

Quelle est donc l'intention derrière le développement du savoir en biomimétisme et du développement d'une méthodologie? Certains auteurs (Kamili, 2019) demeurent critiques sur les objectifs du biomimétisme, même s'ils ne sont finalement pas toujours clairement définis. En cherchant à réconcilier la société humaine et son organisation capitaliste avec la Nature, la démarche biomimétique ne contribue-t-elle pas à pérenniser le rapport de dominance d'Homo sapiens sur les autres espèces que cette approche de (re)connection biomimétique visait à dépasser? Le biomimétisme gagnerait à comprendre la forme et la fonction dans la grande aventure du vivant plutôt qu'à chercher à le copier. Le biomiméticien copie le vivant qui lui apparaît un modèle à suivre en raison de son adaptation aux ressources et limites de son environnement. Mais l'existence du vivant résidera dans l'adaptation au monde du futur que les êtres vivants ne connaissent pas encore, mais qu'ils ont le pouvoir de permettre ou de compromettre par les décisions prises aujourd'hui (Blanc et al., 2015). Imiter ce qui existe déjà informe le biomiméticien sur les solutions qui fonctionnent dans le monde d'aujourd'hui. Sans

comprendre comment le vivant a trouvé la solution ni quels sont les principes intelligents qui l'animent, Homo sapiens aura toujours un « coup de retard » sur le génie du vivant.

La science du biomimétisme s'est développée selon une posture épistémologique naturaliste (Kamili, 2019) avec le postulat que la nature et le vivant détenaient la clé de durabilité écologique. Mais Homo sapiens fait aussi partie du vivant, alors pourquoi seule cette espèce se serait déconnectée au point d'avoir perdu cette sensibilité adaptative qui la conduirait maintenant, inévitablement à l'effondrement? D'un point de vue diamétralement opposé, l'espèce humaine pourrait être la seule qui, consciente de son existence et de ce dont elle dépend, se préoccupe des limites de la planète. Et si la nature « voulait » que « nous voulions » la protéger, car nous sommes une part de cette nature intelligente à la base du biomimétisme.

5.4.2 Intention biomimétique et perspective anthropocentrique

Il serait intéressant de se questionner sur les motivations des adeptes du biomimétisme. Dans bien des cas, le vivant est intéressant pour sa capacité à apporter des solutions que l'industrie, dans une perspective capitaliste pourra observer, tenter de comprendre en isolant les fonctions, abstraire puis émuler dans une perspective d'en tirer un potentiel ou un intérêt commercial. Les travaux en biomimétisme ne sont pas animés par ce que le vivant constitue, ou représente, mais par ce que le vivant peut produire comme capital, ce qu'il sera possible d'en faire pour en tirer un certain profit. L'exploitation du vivant et des ressources par l'Homme se poursuit derrière un nouveau masque, plus socialement acceptable, mais qui n'atténue pas le côté anthropocentrique des actions de l'Homme. Comment dépasser ce stade et réussir enfin à imiter la nature pour s'y fondre en équilibre et en harmonie, dans les limites de la bio capacité en considérant le même droit d'exister à toutes les espèces du règne du vivant.

CONCLUSION

Pour faciliter la conception d'alternatives, le développement de produits ou la comparaison de scénarios avec la méthodologie biomimétique, les designers, architectes ou ingénieurs ont besoin d'outils pour évaluer la performance environnementale des solutions développées. Cette étape est importante pour guider les concepteurs vers des choix plus performants au plan environnemental. Cette thèse s'inscrit dans une optique d'élaboration d'outils et de méthodes visant à faciliter les choix de solutions dans une perspective de développement durable.

Cette thèse visait la quantification des 10 principes de biomimétisme grâce aux méthodes d'évaluation des impacts issues de l'analyse de cycle de vie. BiomiMETRIC, outil d'aide à la conception biomimétique développé dans ce projet, permet l'appariement des méthodes d'évaluation des impacts utilisées en ACV avec les 10 principes fondamentaux du biomimétisme afin de quantifier la performance biomimétique de solutions, de produits, ou de scénarios.

Cette thèse s'inscrit donc dans une optique d'amélioration de la méthodologie de conception biomimétique présentée par le Biomimicry Institut ainsi que par la norme ISO 18458 (ISO, 2015a). Le projet de recherche portait sur la bonification de l'étape d'évaluation de la performance biomimétique, l'une des dernières du processus de conception biomimétique. Cette amélioration méthodologique est obtenue grâce au développement d'un outil opérationnel, BiomiMETRIC, établissant un lien entre les méthodes quantitatives issues de l'analyse de cycle de vie, et les dix principes de biomimétisme, également connu sous l'appellation de principes du vivant, ou des écosystèmes durables, et qui sont proposés dans l'approche de conception biomimétique. BiomiMETRIC facilite la prise de décision dans l'approche de conception biomimétique visant l'analyse et la sélection de produits, de projets ou de scénarios dans une perspective de développement durable. L'outil propose également un regroupement des principes de biomimétisme selon trois dimensions : 1) l'efficacité et la

frugalité ; 2) la préservation et la résilience ; 3) la circularité et une approche systémique. Cette approche favorise la compréhension des visées de chaque principe.

Le premier résultat significatif de ce travail de recherche consiste en l'analyse, la sélection et la justification des choix de chaque méthode d'évaluation des impacts issue de l'ACV afin de quantifier chaque principe de biomimétisme. Ainsi, six méthodes d'évaluation des impacts telles que ReCipe, UseTox2, IPCC 2013, AWaRe, CED, CExD présentant 20 catégories et indicateurs d'impacts ont été sélectionnées pour évaluer quantitativement les 10 principes de biomimétisme.

Le deuxième résultat important de ce travail de recherche se traduit par le développement de BiomiMETRIC, qui pourra être utilisé dans le cadre d'une approche de conception biomimétique, ou encore comme outil d'analyse des performances environnementales dans le cadre d'un processus d'écoconception. BiomiMETRIC consiste en un ensemble de feuilles de calcul qui permet de colliger les résultats quantitatifs des méthodes d'évaluation des impacts associées à chaque principe de biomimétisme. De plus, BiomiMETRIC propose, pour chaque principe, des questions d'évaluation qualitative qui seront notées et pondérées afin d'évaluer la performance liée à la mise en œuvre de la méthodologie de conception biomimétique telle que décrite dans la norme ISO 18458. Le développement de BiomiMETRIC a donné lieu à une publication dans le journal *Biomimetics* (Terrier et al., 2019).

La troisième contribution importante de cette thèse porte sur l'utilisation de BiomiMETRIC pour l'évaluation de la performance biomimétique de scénarios en mobilité urbaine. Cette étude est développée au niveau de la mobilité des passagers à l'heure de pointe sur l'Île de Montréal, et utilise les nombreuses données, enquêtes et évaluations prospectives. Six scénarios, dont le scénario actuel et cinq scénarios alternatifs, allant de la mobilité collective, en passant par le télétravail, le Low Tech ou les modèles hybrides ont été évalués avec BiomiMETRIC pour comparer et sélectionner les scénarios présentant la meilleure performance biomimétique dans une perspective d'amélioration de la durabilité de la mobilité.

Le scénario en mobilité nommé Résilience Aléas est recommandé comme alternative au scénario actuel, Statu Quo. Résilience Aléas mise sur la mobilité collective, la mobilité active et l'électrification des transports. Ce scénario est plus performant que le scénario Statu Quo pour l'ensemble des dix principes de biomimétisme. Ainsi, il présente un gain environnemental en termes de réduction de la consommation d'eau, de matériaux, d'énergie, d'émissions de GES et d'utilisation des sols pour ne citer que ces catégories d'impacts. Les réponses aux questions qualitatives proposées dans BiomiMETRIC ont révélé que, quel que soit le scénario alternatif, l'approche de conception présentait des faiblesses au niveau de la mise en œuvre du principe 7- Rester en équilibre avec la biosphère et du principe 1- Utilisation des matériaux avec parcimonie qui devraient être améliorés en tenant compte des questions posées.

Aborder l'étude de la mobilité durable revient à analyser les possibilités technologiques en transport (modes) en fonction des déterminants (besoins) qui motivent les usagers à opter pour certains choix plutôt que d'autres, le tout dans l'optique de réduire les impacts environnementaux, de garantir une acceptabilité sociale, d'assurer l'équité d'accès et une viabilité économique. Mais la mobilité durable n'est pas simplement le résultat d'un choix technologique. En effet, il est possible d'affirmer qu'aujourd'hui aucune technologie n'est encore disponible à grande échelle pour permettre à des centaines de millions d'individus de se déplacer autant qu'ils le souhaitent, sans générer d'externalités environnementales et sociales négatives. Le comportement des usagers, le choix du mode de transport ainsi que l'intensité dans son utilisation vont continuer de représenter un enjeu significatif dans l'atteinte d'une mobilité vraiment durable.

Le bénéfice de l'usage de BiomiMETRIC par rapport à la réalisation d'une analyse de cycle de vie conventionnelle réside dans le fait que lors de la réalisation d'une ACV, toutes les méthodes d'analyse des impacts disponibles ne sont pas systématiquement utilisées. De plus, la réalisation d'une ACV en conformité avec les normes ISO 14040 et 14044 (Finkbeiner et al., 2006) nécessite une expertise qui peut ne pas être disponible dans toutes les équipes de

conception ou d'ingénierie. BiomiMETRIC, pour sa part a recours à de très nombreuses méthodes d'évaluation des impacts, dans leur intégralité ou partiellement, afin que quantifier la performance du projet ou du produit, en regard de chaque principe de biomimétisme.

Enfin, BiomiMETRIC suscite la réflexion sur l'approche de conception biomimétique en proposant des questions qualitatives pour chaque principe de biomimétisme. La conjugaison des deux approches qualitatives et quantitatives multicritères au sein d'un même outil permet une analyse plus large et plus poussée de la performance environnementale d'un produit, d'un projet ou d'un scénario. BiomiMETRIC invite donc l'utilisateur à adopter une pensée systémique globale dans l'approche innovante de conception biomimétique afin de tendre vers plus de durabilité.

ANNEXE I

DÉPLACEMENTS QUOTIDIENS À MONTRÉAL

Les déplacements quotidiens en période de pointe du matin dans la région métropolitaine de Montréal en quelques chiffres (Basée sur l'enquête OD, 2018) et les données de l'ARTM (ARTM, 2019) sont présentés dans le tableau A-I-1

Tableau A-I-1 Données sur la mobilité à Montréal

Paramètres	Valeurs	Source
Déplacements quotidiens	9 426 000	Enquête OD
Part modale Automobile-Moto	68 %	Enquête OD
Part modale transport collectif (TC) et bimodale	Environ 1 500 000 déplacements par jour. Part modale du transport collectif : 18 %. Pour 2031, l'objectif de part modale du TC est de 35 %	Idem et (ARTM, 2019)
Part modale transport collectif Autobus	1 million de déplacements sont effectués en totalité ou en partie en autobus chaque jour, ce qui représente 66 % des déplacements en transport collectif.	(ARTM, 2019)
Part modale transport collectif Train	Chaque jour, 85 000 déplacements sont effectués en train de banlieue	(ARTM, 2019)
Part modale transport collectif : Métro	860 000 déplacements effectués en totalité/ou partie en métro chaque jour, soit 57 % des déplacements TC. En période de pointe du matin, 250 000 personnes empruntent le métro. Des usagers peuvent emprunter l'autobus et le métro, ce qui fait que les sommations dépassent 100 %	(ARTM, 2019)
Part modale transport actif Vélo. Idéal déplacement < 10 km	Chaque jour, 150 000 déplacements sont effectués à vélo, ce qui représente un peu moins de 2 % de l'ensemble des déplacements dans la région.	(ARTM, 2019)
Parc automobile	2 601 000 véhicules (+ 5 % entre 2013 et 2018)	idem
Taux remplissage	1,2 personne par voiture	idem
Destination	Centre-ville : 21 % des déplacements pour le travail	idem
Motif déplacement	Travail : 51 % des déplacements	idem
Consommation énergétique carburant au Québec	Énergie pour le transport des personnes : 293 PJ, soit 62 % de la consommation d'énergie du secteur des transports, dont la majeure partie (219 PJ) pour des motifs dits urbains. L'énergie nécessaire au transport des marchandises : 159 PJ soit 30 % du total	Enquête OD

ANNEXE II

EXEMPLE DE CONCEPTION BIOMIMÉTIQUE : ÉQUIPEMENT DE PROTECTION POUR CYCLISTES

Cet exemple présente les principales étapes de la conception biomimétique d'un système de protection pour la tête des cyclistes contre les impacts. La première erreur à éviter est de tomber dans le piège invitant à « reproduire » la solution que l'on connaît déjà en se limitant à simplement concevoir, dans le cas présent, un casque de vélo tel qu'on le connaît.

La première étape de la conception biomimétique consiste à se questionner sur la fonction du produit. Dans le cas présent, l'équipement de protection de la tête du cycliste vise plusieurs fonctions dont la principale consiste à absorber l'énergie de l'impact. La seconde fonction pourrait être d'assurer une évacuation de la chaleur du crâne, et une ventilation efficace de la tête. Une troisième fonction viserait par exemple l'amélioration de l'aérodynamisme du cycliste en réduisant la traînée aérodynamique, et enfin une ultime fonction consisterait à rendre le cycliste plus visible sur la route.

La méthodologie suivie dans le cadre de cet exemple est globalement celle proposée par le biomimicry Institut et représentée sur l'outil « Design Lens » présenté à la figure -AII-1. Cependant quelques étapes d'évaluation de la performance de la solution au niveau sociale et économique avec des outils comme la grille UQAC pour l'analyse du développement durable ont été ajoutées. L'outil BiomiMETRIC développé dans le cadre de cette thèse s'avèrerait fort utile pour la réalisation de l'étape d'évaluation des performances biomimétiques comme cela sera démontré dans la suite du document.

La conception biomimétique fait appel à l'observation de fonctions et de stratégies du vivant qu'il est nécessaire de préciser pour une meilleure compréhension des termes. Une fonction de la nature est habituellement une adaptation qui aide le système vivant à survivre et prospérer. La fonction sera mise en œuvre par les stratégies d'un système vivant. Une stratégie biologique ou stratégie de la nature est une caractéristique, un mécanisme ou un processus qui exécute une fonction pour un organisme vivant.

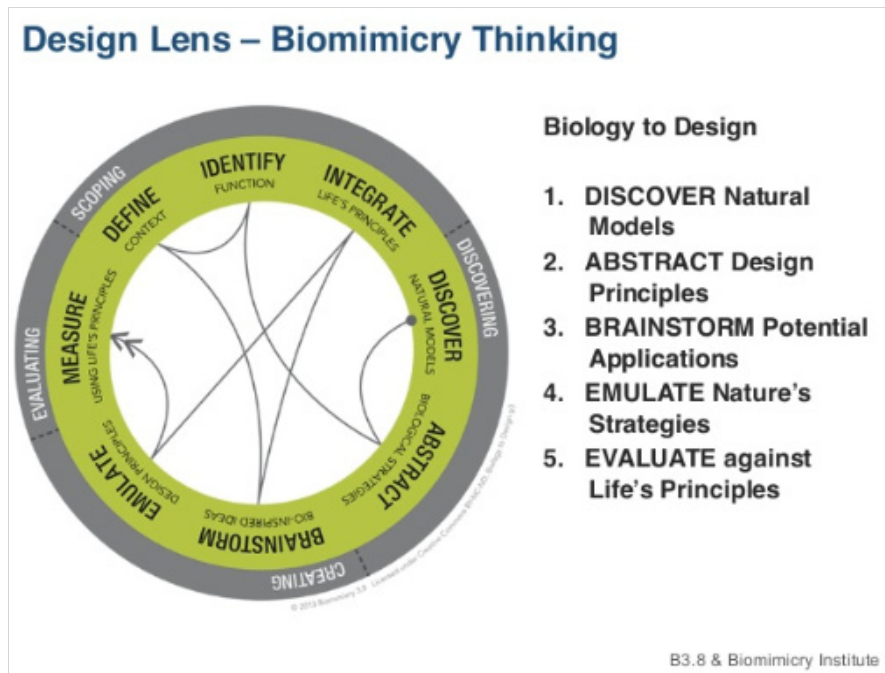


Figure-AII-1 Design Lens : Étapes de la procédure de conception biomimétique
Tirée de Biomimicry Institut (2016)

Les étapes de la conception biomimétique sont les suivantes :

1- Se poser les bonnes questions sur la fonction de l'objet

Quelle est la fonction d'un casque? Les réponses possibles sont les suivantes : protéger des chocs et impacts, absorber l'énergie de l'impact, assurer une bonne performance aérodynamique, faciliter la ventilation de la tête, réfléchir le rayonnement solaire, assurer une bonne visibilité du cycliste...

2- Explorer la base de données Ask Nature

Comment la nature protège des impacts? Pour cela, on peut consulter la taxonomie du biomimétisme qui décrit les fonctions retrouvées dans la nature et dont un exemple est présenté à la figure -AII-2

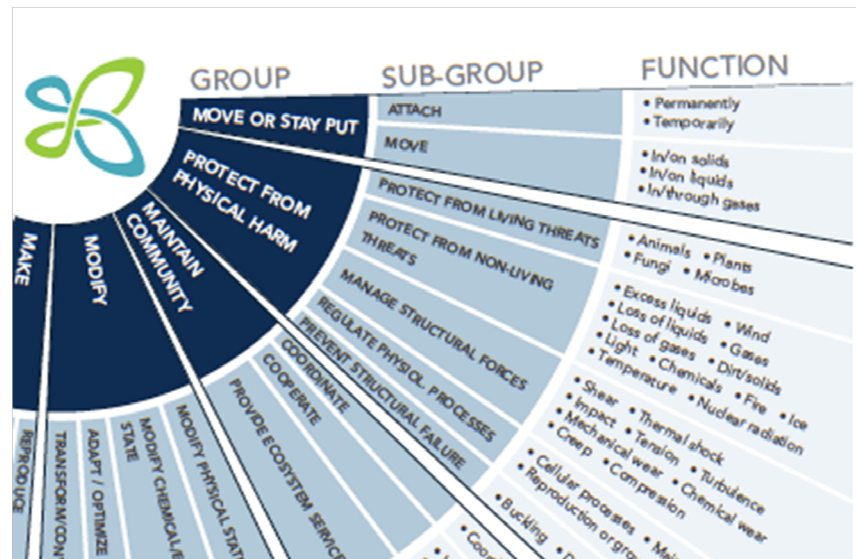


Figure-AII-2 Extrait de la Taxonomie du biomimétisme
Tirée de Biomimicry Institut (2021)

Par la suite, il est possible d'effectuer une recherche dans la base de données Ask Nature.org (Biomimicry institut, 2015a) en inscrivant la fonction recherchée ou en utilisant la classification taxonomique. Dans le cas étudié ici, la recherche pourrait contenir les mots-clés : *protect form physical Harm : manage impact*... La figure-AII-3 présente quelques résultats obtenus dans la base de données Ask Nature suite à cette recherche. Les résultats les plus pertinents seront sélectionnés pour la prochaine étape.

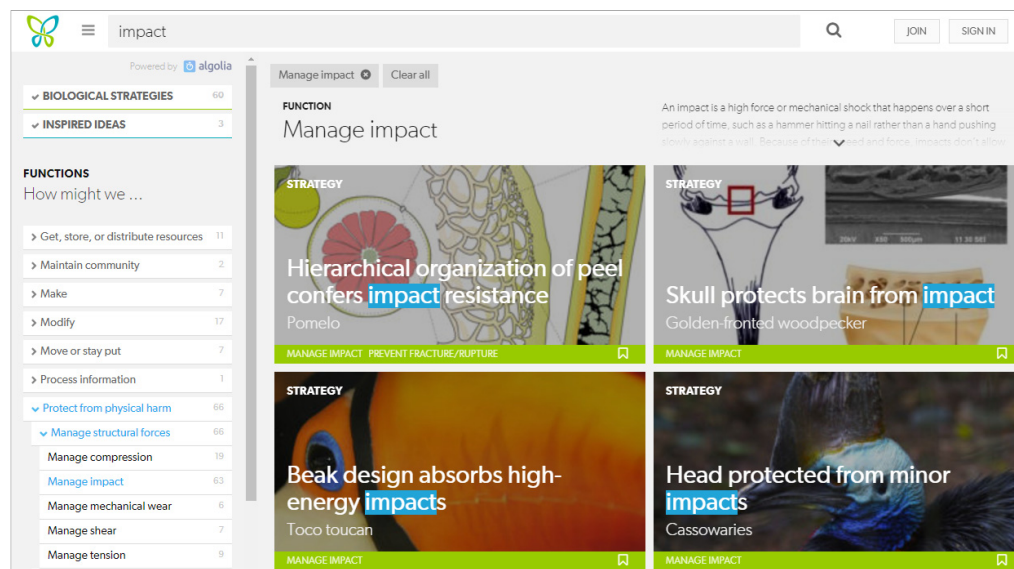


Figure-AII-3 Copie d'écran des résultats de recherche obtenus dans la
Base de données Ask Nature

3- Analyse des résultats

De chaque exemple retenu comme candidat potentiel, il faudra « extraire » les propriétés intéressantes. Le processus d'abstraction (abstract dans le « Design Lens » présenté à la figure AII-1) permettra de rendre les propriétés indépendantes du système biologique lui-même afin de pouvoir les implanter dans la solution. Il faut sortir le vivant du portrait et ne conserver que les caractéristiques, propriétés, organisation de la matière qui donne à l'organisme vivant la fonction recherchée.

Par exemple, le pélican brun présente une stratégie d'absorption des chocs en plongée. Le « pic bois » possède un crâne dont l'anatomie permet d'absorber les impacts, la structure interne du pomelo lui permet de résister à l'impact d'une chute de 10m. Les copies d'écran tirées de Ask Nature sont présentées à la figure-AII-4.

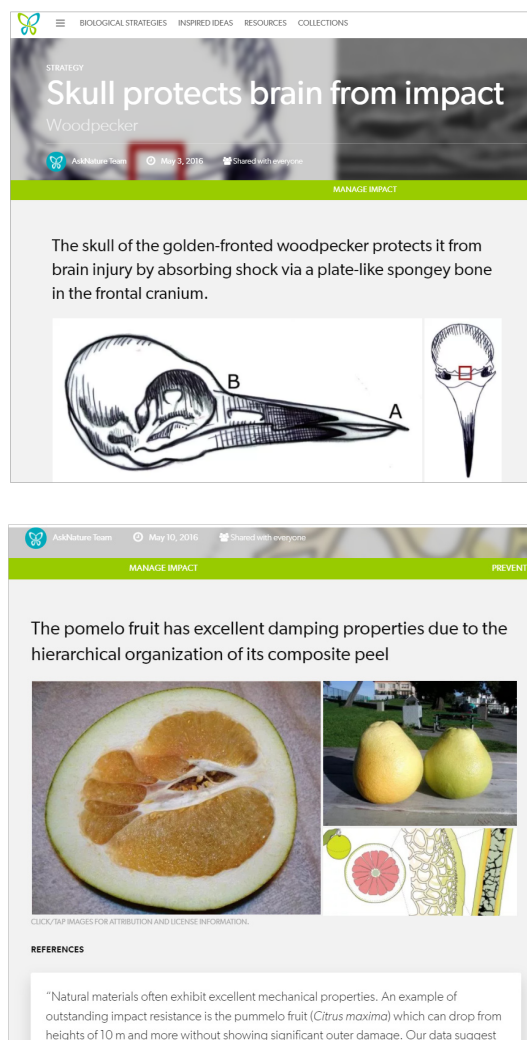


Figure-AII-4 Résultats de recherche dans la Base de données Ask Nature

4- Concept, design, test

Cette étape consistera à modéliser les concepts, réaliser des dessins, des calculs... Adopter des pratiques d'écoconception, choisir des matériaux recyclables, penser à la gestion en fin de vie du produit. Un prototype sera réalisé et testé afin de valider la rencontre des objectifs de conception.

5- Validation en conformité avec les « principes de vie »

Viendra par la suite l'étape de validation de la conformité de la solution face aux « principes de vie » ou « principes des écosystèmes durables » proposés par le Biomimicry Institut et qui sont:

- 1) Utiliser les matériaux avec parcimonie
- 2) Capter et utiliser l'énergie avec efficacité
- 3) Ne pas épuiser les ressources
- 4) S'approvisionner localement
- 5) Optimiser l'ensemble plutôt que de maximiser chaque composant
- 6) Ne pas souiller son nid
- 7) Rester en équilibre avec la biosphère
- 8) Utiliser les déchets comme ressources
- 9) Se diversifier et coopérer
- 10) S'informer et implanter des boucles de rétroaction

BiomiMETRIC développé dans le cadre de cette thèse permettra de quantifier la performance biomimétique des solutions développées et au besoin d'itérer sur certains aspects de conception.

6- Évaluer les enjeux de développement durable

Bien que cela ne soit pas spécifiquement proposé par le Biomimicry Institut ou dans la norme ISO 18458 (ISO, 2015a), une évaluation plus fine des enjeux de développement durable concernant la solution retenue pourrait être réalisée en ayant recours à une grille d'analyse de la durabilité, comme la « grille 35 questions » proposée par l'UQAC (Villeneuve et al., 2009).

ANNEXE III

RÉSUMÉ DE L'ARTICLE BIOMIMÉTISME : OUTILS POUR UNE DÉMARCHE ÉCOINNOVANTE EN INGÉNIERIE

Article publié dans « VertigO : La revue électronique en sciences de l'environnement » en janvier 2017.

Résumé : Faire en sorte que l'innovation en ingénierie contribue au développement de solutions en harmonie avec la capacité de support de l'environnement, voilà ce que propose le biomimétisme. Cet article est une revue de littérature sur le biomimétisme, en lien avec l'ingénierie. Après la présentation générale du concept de biomimétisme, l'emphasis sera portée sur les méthodes et outils de mise en œuvre concrète de la démarche biomimétique en ingénierie afin de faciliter son implantation dans le processus de génération d'idées et d'innovation. L'ensemble des méthodes proposées constitue une boîte à outils au service de l'écoinnovation. Nous retrouvons dans cette boîte de solutions, les démarches fondées sur la consultation de la base de données AskNature, l'utilisation de cartes de conception, les moteurs de recherche scrutant la littérature biologique ainsi que la méthode Biotriz qui seront présentés dans cet article. Les mises en garde devant accompagner l'opérationnalisation du processus de conception inspirée par la nature ainsi qu'une méthodologie pour la mise en œuvre de l'approche biomimétique en ingénierie seront également présentées.

Mots clés: Biomimétisme, écoinnovation, ingénierie, design, opérationnalisation du biomimétisme

APPENDICES

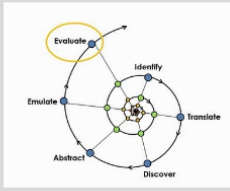
COPIES DES PRINCIPAUX ONGLETS DISPONIBLES DANS BIOMIMETRIC

Onglet *Démarche de conception biomimétique*

Biomimetric : Outils d'assistance pour la conception biomimétique
La conception biomimétique est une approche d'éco-innovation conforme aux principes d'ingénierie durable

But de l'outil: Faciliter la démarche de conception biomimétique en concordance avec les recommandations de la norme ISO 18458:2015 Biomimétique-terminologie, concepts et méthodologie. Encourager l'utilisation de la base de données en biomimétisme AskNature.org. Présenter la démarche cyclique, les principes de vie et une méthode de mise en oeuvre du biomimétisme

Fonctionnement: Utilisez les grilles d'évaluations proposées dans ce document afin d'intégrer les principes de biomimétisme dans la conception d'un produit, d'un système, d'un service, d'un projet.



Démarche de conception biomimétique

1- Analyser

- Définir le contexte
- Définir la fonction du produit- système- service...

2- Découvrir la base de données AskNature.org

- Découvrir les modèles naturels, les idées inspirantes, les fonctions et stratégies de la nature disponibles dans Ask Nature
- Identifier la ou les fonctions et stratégies du vivant pouvant être utilisées dans le projet
- Sélectionner les organismes "champions" pouvant être mimés
- Faire "l'abstraction" des principes, c'est à dire les rendre génériques, détachés de l'organisme vivant. Traduction de la biologie vers le génie.

3- Créer

- Brainstorm des idées bio-inspirées,
- Émuler les principes de conception,
- Fabriquer le prototype

4-Évaluer et quantifier la performance biomimétique

-Évaluer la performance biomimétique au regard des principes du vivant qui peuvent être quantifiés grâce à l'outil disponible ici. Les critères à considérer pour une démarche de conception biomimétique sont présentés dans les onglets suivants.

5- Évaluer la performance environnementale, sociale et économique dans une optique de développement durable

L'ACV peut être utilisée pour la performance environnementale

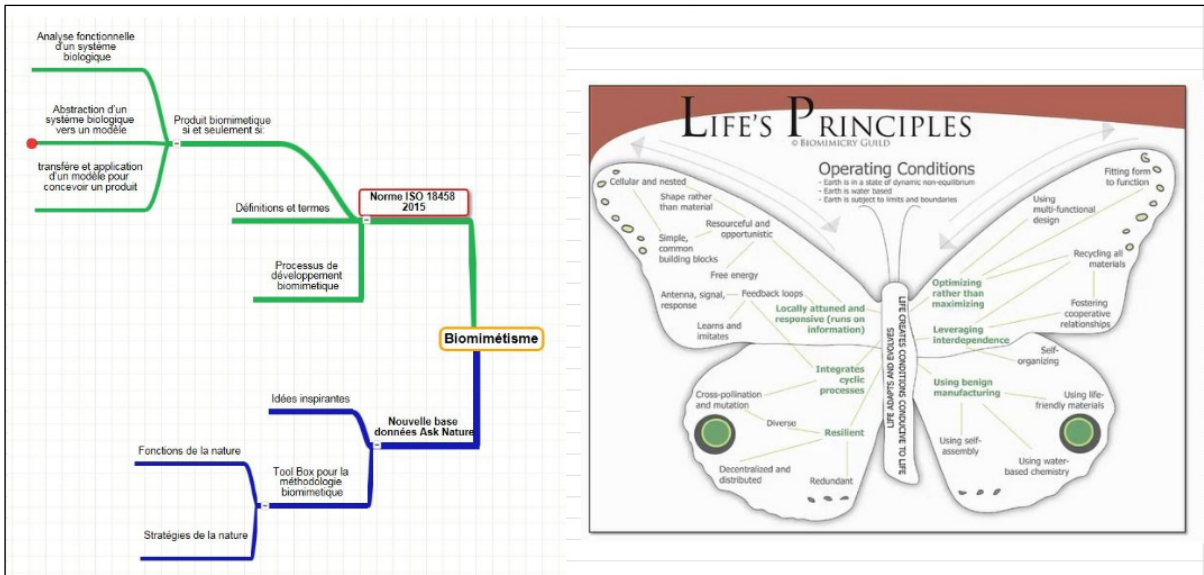
Les grilles d'analyse de la durabilité (UQAC, boussole bernoise....)peuvent permettre d'évaluer les sphères sociales et économiques.

Cet outil propose une nouvelle approche en agrégeant les dix principes du vivant selon trois axes globaux d'éco-innovation biomimétique présentés ci-dessous :

1. L'efficacité et frugalité : Cet axe inclut les principes « Utiliser les matériaux et l'énergie avec parcimonie et efficacité », « S'approvisionner localement » et « Ne pas épuiser les ressources », « Optimiser l'ensemble plutôt que maximiser chaque composant individuellement ». L'efficacité est associée à la frugalité dans la consommation des ressources.

2. La préservation et résilience : cet axe inclut les principes « Ne pas souiller son nid » et « Rester en équilibre avec la biosphère ». La préservation est associée à la résilience qui fait en sorte que la nature s'adapte aux changements.

3. Circularité et systémique : cet axe inclut les principes « Utiliser les déchets comme ressources », « Se diversifier et coopérer » et « S'informer et implanter des boucles de rétroaction ». La circularité est associée à l'approche systémique basée sur l'analyse des flux entrant et sortant des frontières du système.



Onglet *Utilisation de BiomiMETRIC*

Utilisation de BiomiMETRIC
1-Pour chaque principe retrouvé dans les onglets de cet outil, évaluer la performance biomimétique:
a) en évaluant les impacts avec la méthode recommandée issue de l'analyse de cycle de vie. Il faudra calculer les impacts avec un logiciel ACV (Open LCA ou Simapro - Ecoinvent) puis reporter les valeurs numériques dans chaque onglet selon le principe biomimétique à quantifier.
b) en évaluant les questions posées dans chaque onglet
2-Analysez les résultats:
a) en consultant l'onglet resultats quantitatifs
b) en consultant l'onglet Graphique des resultats quantitatifs
c) en consultant l'onglet resultats qualitatifs
d) en consultant l'onglet Indice biomimétique (développement en cours)

Onglet d'un *principe de biomimétisme quantifiable* (extrait)

3- Ne pas épuiser les ressources												
No	Objectif	Méthode d'impact	Catégorie impact	Facteur de caractérisation	Commentaires	Unité	Statu Quo	Transport Actif Télétravail	Transport Collectif	Transport Hybride Novateur	Transport résilience Aléas	Transport Low Tech
1	Évaluer la dégradation de qualité de l'énergie utilisée	Cumulative Energy Demand (CED)	Non renouvelable, fossile			MJ eq	33,300	22,600	24,900	12,600	11,300	7,580
2	"	"	Non renouvelable, nucléaire			MJ eq	1,030	0,704	0,994	1,140	1,220	1,210
3	"	"	Renouvelable kinétique			MJ eq	0,096	0,064	0,094	0,111	0,119	0,119
4	"	"	Renouvelable solaire			MJ eq	0,003	0,002	0,003	0,021	0,024	0,003
5	"	"	Renouvelable potentiel			MJ eq	0,543	0,396	0,490	0,573	0,607	0,573
7	"	"	Renouvelable biomasse			MJ eq	0,249	0,175	0,193	0,167	0,168	0,138
9	"	"	Non renouvelable métaux			MJ eq	6,020	4,070	3,600	1,460	1,120	0,125
10	"	"	Non renouvelable minéraux			MJ eq	0,132	0,0915	0,108	0,0757	0,0745	0,0614
11	Évaluer la consommation de ressources	ReCipe	13-Fossil resource scarcity.	fossil fuel potential, based on the higher		kg oil equivalents	0,719	0,488	0,538	0,272	0,246	0,164
11	Consommation d'eau	ReCipe	13 Water consumption			m3	0,00682	0,00487	0,00556	0,00527	0,00542	0,0046
12	Utilisation de l'eau	AWARE Available Water Remaining	Renouvelable, water			m3	0,207	0,147	0,158	0,134	0,136	0,107

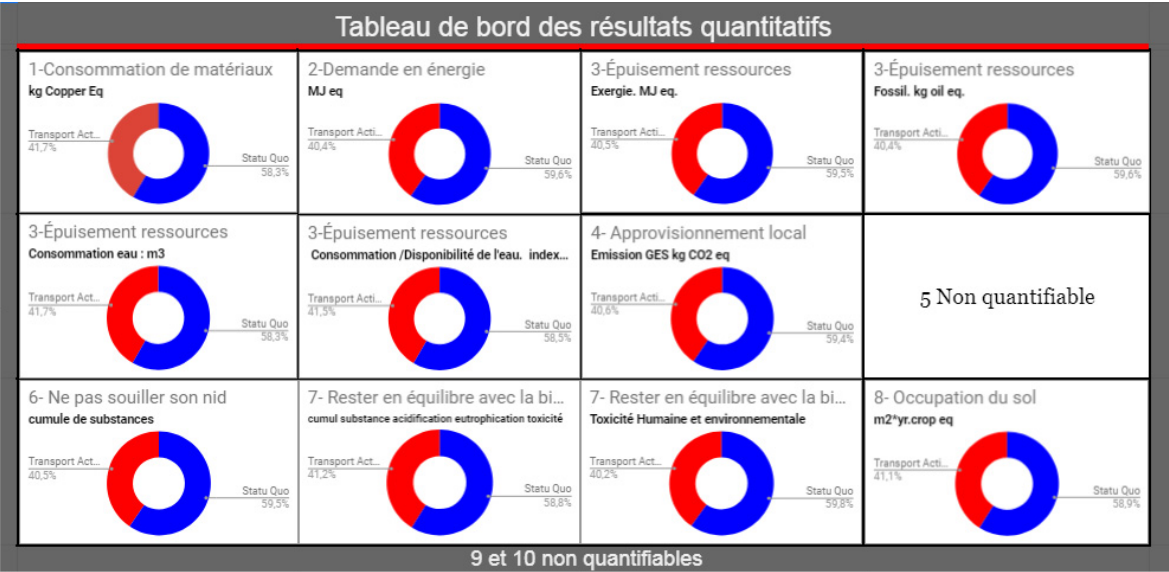
Onglet d'un *principe de biomimétisme NON quantifiable*

10- S'informer et implanter des boucles de rétroaction												
No	Objectif	Méthode d'impact	Catégorie impact	Facteur de caractérisation	Commentaires	Unité	Statu Quo	Transport Actif-Télétravail	Transport Collectif	Transport Hybride Novateur	Transport résilience Aléas	Transport Low Tech
1		aucune méthode										
No	Questions complémentaires		Pondération	Évaluation	Commentaires	Niveau de considération	Note	Poids				
1	L'information requise pour plus de durabilité est-elle diffusée et accessible?		4	++	La problématique de la durabilité des transports est connue et documentée	Conforter	2	4				
2	Des formations et d'évaluation sur la démarche biomimétique sont-elles proposées?		3	+	Démarche moins connue mais avec quelques exemples en transport (Shinkansen)	Conforter	2	4				
3	L'entreprise intègre-t-elle les informations sociales et environnementales dans sa prise de décision?		4	o	mobilité inclusive? Peu de prise en compte des personnes à mobilité réduite (aspect plus social)	Améliorer	1,75	5				
4	Une attention aux ressources rares, surexploitées a-t-elle été portée?		4	o	réduction consommation ressources fossiles, mais consommation d'autres ressources (lithium)	Améliorer	1,75	5				
5	les grands enjeux liés à la durabilité, aux inégalités sociales sont-ils connus et partagés?		4	+	Oui, connus, partagés mais pas toujours appliqués	Améliorer	1,75	5				
						Plus haut niveau de considération	Moyenne	Total				
						Conforter	2,00	23				

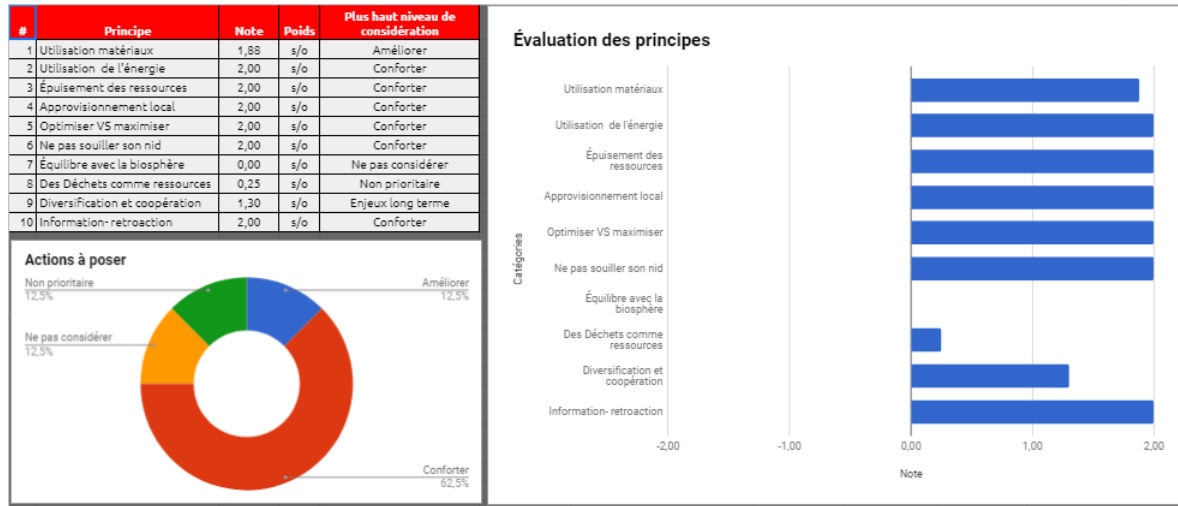
Onglet *Résultats Quantitatifs* (extrait)

	Principe	Méthode d'impact	Catégorie d'impact	Unité	Statu Quo	Transport Actif Télétravail	Transport Collectif	Transport Hybride Novateur	Transport résilience Aléas	Transport Low Tech
Efficacité et frugalité	1-Utiliser les matériaux avec parcimonie	ReCipe	12- Mineral resource scarcity	kg Copper (Cu) equivalents	2,24E-02	1,60E-02	1,43E-02	7,84E-03	7,19E-03	3,09E-03
	2-Utiliser l'énergie avec efficacité	Cumulative Energy Demand (CED)	Non renewable, fossil	MJ eq	32,900	22,300	24,700	12,500	11,300	7,550
			Non renewable, nuclear	MJ eq	1,030	0,704	0,994	1,140	1,220	1,210
			Renewable, biomass	MJ eq	0,238	0,166	0,184	0,159	0,160	0,131
			Renewable, wind, solar, geothermal	MJ eq	0,113	0,076	0,110	0,150	0,162	0,139
			Renewable, water	MJ eq	0,534	0,396	0,490	0,573	0,607	0,573
			Total Energy		3,48E+01	2,37E+01	2,65E+01	1,45E+01	1,35E+01	9,61E+00
	3-Ne pas épuiser les ressources	Cumulative Energy Demand (CExD)	Non renewable, fossil	MJ eq	3,33E+01	2,26E+01	2,49E+01	1,26E+01	1,13E+01	7,58E+00
			Non renewable, nuclear	MJ eq	1,03E+00	7,04E-01	9,94E-01	1,14E+00	1,22E+00	1,21E+00
			Renewable kinetic	MJ eq	9,56E-02	6,43E-02	9,40E-02	1,11E-01	1,19E-01	1,19E-01
			Renewable solar	MJ eq	3,30E-03	2,18E-03	2,66E-03	2,13E-02	2,41E-02	2,64E-03
			Renewable potential	MJ eq	5,43E-01	3,96E-01	4,90E-01	5,73E-01	6,07E-01	5,73E-01
			Non renewable primary	MJ eq	4,32E-04	2,89E-04	3,82E-04	3,36E-04	3,39E-04	2,61E-04
			Renewable biomass	MJ eq	2,49E-01	1,75E-01	1,93E-01	1,67E-01	1,68E-01	1,38E-01
			Renewable, water	MJ eq	-4,17E-01	-2,81E-01	-4,48E-01	-5,93E-01	-6,42E-01	-6,56E-01
					+ ☰ Résultats quantitatifs Radar ▾		Résultats quantitatifs Radar Adapte ▾		Graphique3 ▾ Radar 1	

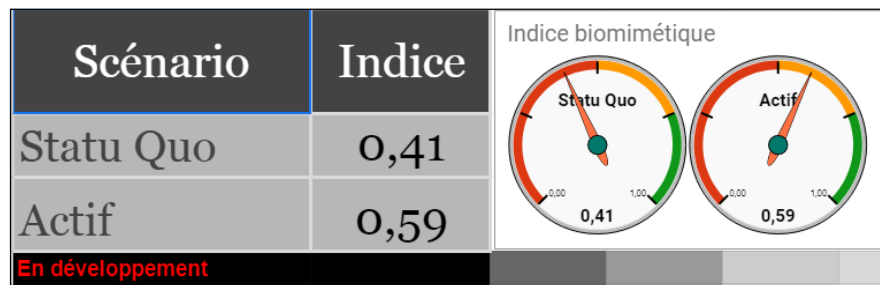
Onglet *Tableau de bord des résultats quantitatifs*



Onglet *Résultats qualitatifs*



Onglet *Calcul de l'indice biomimétique : (développement en cours)*



LISTE DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham, Y.-M. (2019). *Guérir du mal de l'infini. Produire moins, partager plus, décider ensemble*: Ecosociété (Editions).
- Arnsperger, C., & Bourg, D. (2016). Vers une économie authentiquement circulaire. *Revue de l'OFCE*(1), 91-125.
- ARTM. (2018). Autorité régionale de transport métropolitain-Enquête Origine-Destination. Retrieved from <https://www.artm.quebec/enqueteod/>
- ARTM. (2019). *Autorité régionale de transport métropolitain : Parlons mobilité*. Accessible: https://parlonsmobilité.quebec/app/uploads/2019/03/ARTM_Document_Mobilité_WEB_03-14-2019.pdf
- ARTM. (2020). Plan de relance économique du Québec-Proposition d'actions prioritaires en transport collectif dans la région métropolitaine de Montréal. Accessible: https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/05/RP_Plan-relance-economique_Proposition_actions_prioris%C3%A9es_2020-05-01-1.pdf
- Association des Véhicules Électriques du Québec. (2018). Bilan des émissions de GES du Québec. Accessible: <https://www.aveq.ca/actualiteacutes/dernier-bilan-des-emissions-de-ges-du-quebec>
- Aubin, L. (2015). *Éthique, capitalisme avancé, néolibéralisme, transparence et communication*. (Maîtrise), Université du Québec à Montréal, Montréal (Québec, Canada), Accessible: <https://archipel.uqam.ca/8527/>
- Bar-Cohen, Y. (2005). *Biomimetics: mimicking and inspired-by biology*. Paper presented at the Smart Structures and Materials 2005: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 7 March 2005, USA.
- Bar-Cohen, Y. (2006). Biomimetics-using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration & Biomimetics*, 1(1), 1-12. doi:10.1088/1748-3182/1/1/P01
- Bare, J. C. (2002). TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. *Journal of industrial ecology*, 6(3-4), 49-78.
- Barthélémy, P. (2021, 12 avril 2021). Le jour où la vie s'arrêtera sur Terre. *Le Monde*. Accessible: https://www.lemonde.fr/sciences/article/2021/04/12/le-jour-ou-la-vie-s-arretera-sur-terre_6076512_1650684.html

- Beaudet, G., Morency, C., Sioui, L., et al. (2010). Étude sur la contribution du transport en commun au développement durable. Association du transport urbain du Québec.
Accessible: http://www.atuq.com/library/images/contentImages/ET_Contribution_TEC_Dev_durable_2010_7Mo.pdf
- Bely, P.-Y., Christian, C., & Roy, J.-R. (2008). *250 réponses à vos questions sur l'astronomie*. Le Gerfaut Ed.
- Bendell, J. (2018). Deep adaptation: A map for navigating climate tragedy.
- Benyus, J. M. (2011). *Biomimétisme - Quand la nature inspire des innovations durables*. Rue de l'échiquier Ed.
- Bhushan, B. (2009). Biomimetics: lessons from nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1445-1486. doi:10.1098/rsta.2009.0011
- Bibard, E. (2012). *Application d'un algorithme biomimétique pour la gestion d'une flotte de véhicules dédiés à une mobilité individuelle en milieu urbain*. Ecole de technologie supérieure,
- Bihouix, P. (2014). *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable: Vers une civilisation techniquement soutenable*: Le Seuil Ed.
- Biomimicry Institut. (2012). Taxonomy.
- Biomimicry institut. (2015a). Ask Nature Data Base. Accessible: <http://www.asknature.org/>
- Biomimicry Institut. (2015b). Nature's unifying patterns. *Nature's unifying patterns*.
Accessible: <http://biotoolbox.wpengine.com/wp-content/uploads/2015/04/NUPs-Examples-PDF.pdf>
- Biomimicry Institut. (2016). Méthode de design biomimétique. Accessible: <http://toolbox.biomimicry.org/methods/>
- Biomimicry Institut. (2021). Ask Nature. Taxonomy du biomimétisme. Découvrir les fonctions de la nature. Accessible: <https://asknature.org/resource/biomimicry-taxonomy/>
- BioPowerSystems. (2015). Wave and tidal power conversion. Accessible: <http://www.biopowersystems.com/>
- Blanc, M., & Kolbert, E. (2015). *La 6e Extinction. Comment l'homme détruit la vie*: La Librairie Vuibert.

- Boillat, P. (2014). *De la mobilité à la mobilité durable: politiques de transport et outils de gestion de la mobilité en milieu urbain*. Paper presented at : De la géographie des transports à la géographie de la mobilité: réflexions sur les enjeux spatiaux des infrastructures et des pratiques de déplacement. Colloque en l'honneur du prof. Giuseppe Pini et leçon d'adieu UNIL, Bâtiment Géopolis.
- Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A., et al. (2007). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), 181-190.
- Bossel, H. (1999). *Indicators for sustainable development: theory, method, applications* (1895536138). Accessible: <http://www.ulb.ac.be/ceese/STAFF/Tom/bossel.pdf>
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., et al. (2018). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-22. doi:10.1007/s11367-019-01583-0
- Caillet, R. (2003). *Analyse multicritère: Étude de comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie*.
- Centre de mobilité durable de sherbrooke CMDS. (2011). Plan de mobilité durable de sherbrooke. Scénarios d'évolution. Accessible: <http://www.mobilitedurable.qc.ca/participez-au-plan-de-la-mobilite-durable/etape-4-scenarios-devolution/>
- Chakrabarti, A., Siddharth, L., Dinakar, M., et al. (2017). *Idea Inspire 3.0—A tool for analogical design*. Paper presented at the International Conference on Research into Design- ICoRD 2017. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 66. .
- Chayaamor-Heil, N., Guéna, F., & Hannachi-Belkadi, N. (2018). Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils. *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*(1). doi:10.4000/craup.309
- CIRAIG. (2016). Centre international de référence sur le cycle de vie des produits procédés et services. Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicules électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois. Accessible: <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf>
- Coderre, L.-C., Goulet, M., & Purdon, M. (2019). Aperçu des politiques du climat, de l'énergie et des transports au Québec.

- Commissariat général au Développement Durable. (2009). Vers une prospective territoriale post-Grenelle de l'environnement. Questions et modes d'emploi. *Études & documents*.
- Commissariat général au Développement durable. (2012). *Dossiers du CRDD- Le biomimétisme*. Centre de ressources documentaires du développement durable
Accessible: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DossierCRDD_Biomimetisme.pdf.
- Da Cunha, A. (2005). *Enjeux du développement urbain durable: transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- De Guillebon, B., & Bihouix, P. (2012). *Quel futur pour les métaux?: Raréfaction des métaux: un nouveau défi pour la société*: EDP sciences.
- De Pauw, I., Kandachar, P., & Karana, E. (2015). Assessing sustainability in nature-inspired design. *International Journal of Sustainable Engineering*, 8(1), 5-13.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., et al. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*.
- Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., et al. (2003). L'approche systémique: de quoi s'agit-il? *Union Européenne de Systemique*. Accessible: <http://www.afscet.asso.fr/SystemicApproach.pdf>
- Dubé, I. (2014). Le télétravail, une arme contre la congestion routière. *La presse*. Accessible: <https://www.lapresse.ca/actualites/montreal/201410/05/01-4806561-le-teletravail-une-arme-contre-la-congestion-routiere.php>
- Dubé, R., & Etcheverry, P. (2012). *Application du biomimétisme dans l'aménagement et le fonctionnement d'un développement domiciliaire en milieu rural*. Centre universitaire de formation en environnement. Université de Sherbrooke.
- Durand, H., & Larrieu, C. (2012). *Étude sur la contribution du biomimétisme à la transition vers une économie verte en France :état des lieux, potentiel, leviers*. Accessible: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etude-sur-la-contribution-du.html>.
- Earthshiftglobal. (2019). Webminar : Life Cycle Assessment (LCA) & Biomimicry. Accessible: <https://www.earthshiftglobal.com/brownbag#Biomimicry>
- Ehrlich, P. R. (1971). Impact of population growth . *Science* 171: 1212-1217.

- Équilibre des Énergies. (2018). Le contenu en CO2 du kWh. Accessible: <https://www.equilibredesenergies.org/12-10-2018-le-contenu-en-co2-du-kwh>
- Expert-VE. (2013). Emission de CO2 du puits à la roue. Accessible: <http://www.expert-ve.fr/voiture-electrique-bilan-c02.html>
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., et al. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 80-85.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., et al. (2007). *Implementation of life cycle impact assessment methods. Data v2. 0 (2007). Ecoinvent report No. 3.*
- Frischknecht, R., & Rebitzer, G. (2005). The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production*, 13(13-14), 1337-1343.
- Fusco, G. (2003). *Un modèle systémique d'indicateurs pour la durabilité de la mobilité urbaine: les cas de Nice et Gênes dans une comparaison internationale.* Nice, France.
- Genoud, S. (2012). *La dimension énergétique du développement durable.* Université de Neuchâtel.
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Accessible: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
- Goedkoop, M., Oele, M., de Schryver, A., et al. (2008). SimaPro database manual methods library. *PRé Consultants, the Netherlands*, 22-25.
- Gorce-Moskovitz, A. (2020). *RAPPORT D'EXPERTISE. Low-tech & mobilités du quotidien. Peut-il y avoir un intérêt, pour la transition écologique et solidaire, à développer les low-tech dans le champ de la mobilité du quotidien en France?* Rennes, France. Accessible: <https://cloud.fabmob.io/s/HyYFkrTg2KWcX6D#pdfviewer>
- Gouvernement du Québec. (2018). Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Transporter le Québec vers la modernité- Politique de mobilité durable 2030.
- GRAME. (2010). Groupe de recherche appliquée en macroécologie. LES TRANSPORTS URBAINS ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA VILLE. FICHE NO. 4. STRATÉGIE INTÉGRÉE DE RÉDUCTION DES GES ET TRANSPORT DURABLE. Accessible: <http://www.grame.org/Fiche4.pdf>

- Guicheteau, J. (2012). *Projets efficaces pour une mobilité durable*: Presses internationales Polytechnique.
- Hajjaji, N. (2011). *Analyse de cycle de vie exergétique de systèmes de production d'hydrogène*. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- Héran, F. (2020, 12 mai 2020). Le vélo, ce mode de déplacement super résilient. *La conversation*. Accessible: <https://theconversation.com/le-velo-ce-mode-de-deplacement-super-resilient-138039>
- Hugon, P. (2016). Du bilan mitigé des Objectifs du Millénaire pour le développement aux difficultés de mise en œuvre des Objectifs de développement durable. *Mondes en développement*(2), 15-32.
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., et al. (2016). ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization.
- Hydro Québec. (2015). Taux d'émission de GES associés à l'électricité d'Hydro-Québec. Accessible: <https://www.hydroquebec.com/developpement-durable/documentation-specialisee/taux-emission-ges.html>
- ISO. (2015a). Organisation internationale de normalisation ISO 18458-Biomimétique -- Terminologie, concepts et méthodologie. Accessible: <https://www.iso.org/fr/standard/62500.html>
- ISO. (2015b). Organisation internationale de normalisation ISO 18459-Biomimétique — Optimisation biomimétique. Accessible: <https://www.iso.org/fr/standard/62501.html>
- Jacobs, J. (1961). *The death and life of great American cities*: Random House LLC.
- Jacquard, A. (1991). *Voici le temps du monde fini*: Seuil Ed.
- Johnson, E. R. (2011). *Reanimating Bios: biomimetic science and Empire*.
- Kamili, L. (2019). Biomimétisme et bio-inspiration: nouvelles techniques, nouvelles éthiques? *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*.
- Kaplan, D., & Marzloff, B. (2008). *Pour une mobilité plus libre et plus durable* (Vol. 1): FYP editions.
- Kapsali, V. (2017). *Le grand livre du biomimetisme* (Dunod Ed.).
- Kruiper, R., Vincent, J., Abraham, E., et al. (2018). Towards a Design Process for Computer-Aided Biomimetics. *Biomimetics*, 3(3), 14.

- La Branche, S. (2011). La gouvernance climatique face à la mobilité quotidienne. Le cas des Lyonnais. *Environnement urbain/Urban Environment*, 5, 10-23.
- Laboratoire de Mobilité Inclusive. (2018). La mobilité, un enjeux d'égalité. Accessible: <https://www.mobiliteinclusive.com/la-mobilite-un-enjeu-degalite-2/>
- Lefebvre, J.-F., Guérard, Y., & Drapeau, J.-P. (1995). *L'autre écologie. Économie, transport et urbanisme : une perspective macroécologique* (MultiMondes et GRAME ed.). Sainte-Foy, Québec.
- Léonard, A., Belboom, S., Gerbinet, S., et al. (2020). L'analyse du cycle de vie: un outil multicritères et quantitatif pour l'évaluation des impacts environnementaux. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*.
- LePoint. (2017). Le biomimétisme selon Idriss Aberkane #7 : les Indiens. Accessible: https://www.lepoint.fr/environnement/le-biomimetisme-selon-idriss-aberkane-7-les-indiens-28-02-2017-2108231_1927.php
- Lévesque, K. (2018). Les coûts de la congestion évalués à 4,2 milliards pour 2018. Accessible: <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/201809/13/01-5196357-les-couts-de-la-congestion-evalues-a-42-milliards-pour-2018.php>
- Litman, T. (2011). Sustainability and Livability. Summary of Definitions, Goals, Objectives and Performance Indicators. Accessible: http://www.vtpi.org/sus_liv.pdf
- Low Tech Lab. (2020). Accessible: <https://lowtechlab.org/fr>
- Lugan, J.-C. (2006). LEXIQUE de SYSTEMIQUE et de PROSPECTIVE. Accessible: <http://www.foad-mooc.auf.org/IMG/pdf/LexiqueProspective.pdf>
- Maiorano, M. (2013). *Approche biomimétique dans la conception d'un réseau de transport: application à un système de transport cybernétique*. École de technologie supérieure,
- Mathews, F. (2011). Towards a deeper philosophy of biomimicry. *Organization & Environment*, 24(4), 364-387.
- McLachlan, L. (2019). Les microplastiques dans les denrées alimentaires et l'environnement.
- Mediaterre. (2018). Les droits de la nature: un nouveau paradigme pour la protection de l'environnement. Traduction libre de l'article de Mumta Ito originalement paru dans *The Ecologist* en mai 2017. Accessible: <https://www.mediaterre.org/actu,20171120224126,16.html>
- Michel, Y. A. (2015). Biomimicry and innovation in sustainable design: understanding its innovation supporting characteristics compared to ecodesign.

- Miyamoto, M. (2020). Poverty reduction saves forests sustainably: Lessons for deforestation policies. *World Development*, 127, 104746.
- Moeinian, M. (2018). Car-less Cities.
- MTQ. (2019). Ministère des Transports du Québec. Enquête OD 2017 : La mobilité des personnes dans la région de Québec-Lévis. Accessible: https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/Planification-transports/enquetes-origine-destination/quebec/2017/Documents/EOD17_faits_saillants_VF.pdf
- NCE. (2020). The New Climate Economy -Commission mondiale sur l'économie et le climat Accessible: <http://newclimateeconomy.net/>
- Newman, P. W., & Kenworthy, J. R. (1988). The transport energy trade-off: fuel-efficient traffic versus fuel-efficient cities. *Transportation Research Part A: General*, 22(3), 163-174.
- NexusOpenLCA. (2018). Source of LCA data sets. Accessible: <https://nexus.openlca.org/>
- OCDE. (2012). Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction. Accessible: <http://www.oecd.org/fr/environnement/perspectivesdelenvironnementdelocdealhorizon2050lesconsequencesdelinaction.htm>
- Ojo, A., & Thomas, K. (2011). *Artificial photosynthesis: The solution to an energy problem*. Paper presented at the Eleventh Annual Freshman Conference, University of Pittsburgh. Swanson School of Engineering.
- ONU. (1992). *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement*. Paper presented at the Assemblée Générale.
- ONU. (2015). Objectifs de développement durable : 17 objectifs pour transformer notre monde. Accessible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/>
- ONU. (2019a). *Panel international des ressources. Perspectives des ressources mondiales 2019- Des ressources naturelles pour l'avenir que nous voulons*. Accessible: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook>
- ONU. (2019b). *Rapport sur les objectifs de développement durable, 2019*. Accessible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/rapports-sur-les-objectifs-de-developpement-durable/>
- OpenLCA. (2018). Open source and free software for Sustainability and Life cycle analysis. Accessible: <http://www.openlca.org/>

- Ozaki, K., & Reinhard, C. (2021). The future lifespan of Earth's oxygenated atmosphere. *Nature Geoscience*, 14(3), 138-142.
- PNUE. (2019). *Programme des Nations Unies pour l'environnement. Sixième rapport sur L'avenir de l'environnement mondial (GEO-6) : une planète saine pour des populations en bonne santé*. Accessible: Nairobi: <https://www.unenvironment.org/fr/resources/lavenir-de-lenvironnement-mondial-geo6>
- Poliquin, É. M. (2012). *Mieux comprendre les déterminants du choix modal*. (Maîtrise), DÉPARTEMENT GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL,
- PRé-Consultants. (2018, 2018). SimaPro database manual methods library. Accessible: <https://www.pre-sustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf>
- Pré-Sustainability. (2016). SimaPro Database Manual Methods Library. *Pré Sustainability: Amersfoort, The Netherlands*.
- Principle from Biomimicry-Institut. (2012). Principle of life. Accessible: <http://biomimicry.net/about/biomimicry/biomimicry-designlens/lifes-principles/>
- Quinn, S., & Gaughran, W. (2010). Bionics—An inspiration for intelligent manufacturing and engineering. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6), 616-621. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2010.06.021>
- Ramirez, M. (2012). *Insights into ecodesign practices amongst the world's largest carmakers*. Paper presented at the 16th ERSCP European Roundtable for sustainable Consumption and Production, Istanbul.
- Ricard, P. (2015). Le biomimétisme: s'inspirer de la nature pour innover durablement. *Les avis du conseil économique, social et environnemental, France*.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., et al. (2009a). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, 14(2).
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., et al. (2009b). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472.
- Rosier, F. (2019). Journal Le Monde . Comment construire des villes durables en s'inspirant de la nature. Accessible: https://www.lemonde.fr/sciences/article/2019/12/02/quand-la-nature-inspire-l-architecture_6021386_1650684.html

- Salgueiredo, C. F. (2013). *Modeling inspiration for innovative NPD: lessons from biomimetics*. Paper presented at the 20 th international product développement management conférence, Paris, France.
- Shields, A. (2018). L'humanité a épuisé les ressources de la planète pour 2018. *Le Devoir* (31 juillet 2018).
- Shu, L., Stone, R. B., McAdams, D. A., et al. (2007). *Integrating function-based and biomimetic design for automatic concept generation*. Paper presented at the DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07. 2007.
- Sirois-Cournoyer, A. (2018). *La nature du low-tech: un travail conceptuel et exploratoire*. (Maitrise en Sciences de la gestion.), HEC Montréal,
- Terrier, P., Berdier, C., & Bouyer, M. (2017). La mobilité sur le campus Lyon Tech-la-Doua: Approche systémique et scénarios en éco-mobilité. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 8(1).
- Terrier, P., Glaus, M., & Raufflet, E. (2017, 09 -07-2019). Biomimétisme: outils pour une démarche écoinnovante en ingénierie. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*. Retrieved from <http://journals.openedition.org/vertigo/17914>
- Terrier, P., Glaus, M., & Raufflet, E. (2019). BiomiMETRIC Assistance Tool: A Quantitative Performance Tool for Biomimetic Design. *Biomimetics*, 4(3), 49.
- Thériault, N. (2011). *Dans le cadre d'une ACV, conception d'un outil d'aide à la sélection d'un d'un jeu de catégories d'impact pour les entreprises européennes et Nord-Américaines du secteur textile*. (maître en environnement (M.Env.)), Centre Universitaire de Formation en Environnement de l'Université de Sherbrooke,
- Transition-énergétique-Québec. (2020). Un véhicule rechargeable qui répond à vos besoins. Accessible: <https://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/assets/pdf/Brochure-roulons-eclectrique-FR-2020.pdf>
- Varian, H. R. (2015). *Introduction à la microéconomie moderne*: De Boeck Ed.
- Verry, D., & Nicolas, J.-P. (2005). Indicateurs de mobilité durable: de l'état de l'art à la définition des indicateurs dans le projet SIMBAD. *Rapport du Laboratoire d'Économie des Transports pour le compte de la DRAST (Ministère de l'Équipement) et de l'ADEME. Paris*.
- Ville de Montréal. (2020a). Réseau express vélo (REV). Accessible: https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8957,143276111&_dad=portal&_schema=PORTAL

- Ville de Montréal. (2020b). Service de livraison urbaine offert aux commerçants. Accessible: https://montreal.ca/programmes/service-de-livraison-urbaine-offert-aux-commerçants?fbclid=IwAR1bAwuVp7s_dstlFT_solh7PRMFGRhxBtRBml6hh5L2tXy-2_IaNjPRuT8
- Ville de Montréal. (2020c). Vision Zéro. Accessible: <https://ville.montreal.qc.ca/visionzero/>
- Villeneuve, C., Riffon, O., Wells, J.-R., et al. (2009). Une grille d'analyse pour le développement durable. *Encyclopédie du développement durable*. Edition des Recollets. Accessible: http://www.encyclopedie-dd.org/IMG/pdf_N_85_Villeneuve.pdf
- Vincent, J. F. (2016). The trade-off: a central concept for biomimetics. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 6(2), 67-76.
- Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., et al. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482. doi:10.1098/rsif.2006.0127
- Vivre en Ville. (2020). Construire avec le climat. Accessible: <https://www.construireavecleclimat.org/strategies/localisation-et-mobilite/>
- Vodoz, L., & Jemelin, C. (2004). *Les territoires de la mobilité: l'aire du temps*: PPUR presses polytechniques.
- Wanieck, K., Fayemi, P.-E., Maranzana, N., et al. (2017). Biomimetics and its tools. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials, Volume 6 Issue 2, June 2017*, pp. 53-66.
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., et al. (2013). Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.
- Whalepower. (2015). WhalePower's Tubercle Technology. Accessible: <http://www.whalepower.com/drupal/?q=node/3>
- Wikipedia. (2021). Ville sans voiture. Accessible: https://fr.wikipedia.org/wiki/Ville_sans_voiture
- Wikipédia. (2019a). Anthropocène. Accessible: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Anthropoc%C3%A8ne>
- Wikipédia. (2019b). Collapsologie. Accessible: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Collapsologie>
- Wikipédia. (2019c). Cornucopien. Accessible: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cornucopien>