

Université Libre de Bruxelles

Institut de Gestion de L'environnement et d'Aménagement du Territoire

Faculté des Sciences

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Le biomimétisme offre-t-il une alternative à l'évaluation de la circularité dans une transition vers une économie circulaire ?**

Mémoire de fin d'études présenté par

Fournier Quentin

En vue de l'obtention du grade académique de  
Master en Science et Gestion de l'Environnement

Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG

Année Académique 2018-2019

Directeur : Achten Wouter



---

## Abstract

---

L'économie circulaire se présente comme grande candidate dans le changement de paradigme économique qui nous est imposé à travers les défis climatiques que nous avons enclenchés et une transition démographique globalisée. Les indicateurs, dans leur rôle d'accélérateur, manquent aux différents niveaux de mesure et se développent actuellement de manière isolée sans standardisation apparente. Les tendances à mesurer la circularité d'un produit, d'une organisation, d'une région ou même d'un pays croissent. L'économie circulaire voit ainsi émerger ses premiers instruments légaux dans l'Union Européenne ou particulièrement en Chine.

La notion même de Circularité est ainsi primordiale car elle façonne la forme et le fond des indicateurs. Ce mémoire s'intéresse à définir cette notion de circularité à travers une autre approche que celles proposées par l'économie circulaire ; le *biomimétisme*.

Les conclusions se résument comme suit :

- Une *circularité redéfinie* à travers les principes du vivant qui se veut *durable* et *dynamique* ou *biomimétique* ;
- Une *croissance* possible à condition qu'elle se définisse *horizontalement* ;
- Des niveaux de mesures *restructurés* et *systemiques* ;
- Un nouveau *paramétrage* des indicateurs de circularité identifié.



## Table des matières

Introduction .....	1
Partie I : L'économie circulaire et son besoin croissant d'indicateurs.....	3
1.1. Transition d'un système linéaire vers un système circulaire .....	3
1.1.1. Le modèle linéaire.....	3
1.1.2. Le modèle circulaire .....	6
1.1.3. Une transition nécessaire .....	11
1.2. Rôle des indicateurs économiques à travers une telle transition.....	14
1.2.1. Les indicateurs en général .....	15
1.2.2. Les indicateurs circulaires et innovation.....	18
1.3. Biomimétisme et économie circulaire .....	23
1.3.1. Life's Principles Framework .....	24
1.3.2. Soutenabilité forte .....	26
1.4. Conclusion.....	29
Partie II : Une redéfinition au besoin croissant d'indicateurs adaptés.....	30
2.1. Material Circularity Indicator [MCI] .....	30
2.2. Life Cycle Analysis [LCA].....	32
2.3. The Circular Economy Toolkit [CET] .....	35
2.4. The Circular Indicator Prototype [CEIP] .....	38
2.5. Material Flow Analysis [MFA] .....	39
2.6. Material Flow Cost Accounting [MFCA] .....	42
2.7. Conclusion.....	43
Partie III : Contribution du biomimétisme dans la création et la gestion d'indicateurs écocirculaires	44
3.1. Biomimétisme et économie circulaire .....	44
3.1.1. Évoluer pour survivre.....	45
3.1.2. Utiliser efficacement les ressources .....	49
3.1.3. S'adapter aux changements de conditions.....	52
3.1.4. Unir développement et croissance .....	54
3.1.5. Être branché sur son milieu et réactif.....	56
3.1.6. Utiliser une chimie respectueuse du vivant.....	58
3.2. Vers une circularité biomimétique ?.....	60
3.2.1. Une notion de circularité redéfinie.....	60
3.2.2. Approches actuelles : convergences et divergences .....	62
3.3. Limites et futures recherches .....	67

Conclusion.....	69
Bibliographie .....	I
Annexes.....	XII

## Table des figures

Figure 1. Économie circulaire - Réparatrice par conception (Ellen MacArthur, 2013) .....	8
Figure 2. Sources de création de valeur de l'économie circulaire (Ellen MacArthur, 2013). .....	10
Figure 3. Évolution du prix des produits de base.....	12
Figure 4. Life's Principle Framework .....	25
Figure 5. Schéma Simplifié - économie circulaire (Labbé, 2016) .....	28
Figure 6. Material Circularity Indicator - Flux des matériaux .....	31
Figure 7. Circular Economy Toolkit (Circulareconomytoolkit.org, 2019).....	36
Figure 8. CEIP Output exemple .....	39
Figure 9. MFA schéma (CGDD, 2014).....	40
Figure 10. Micro-circularité et biomimétisme .....	62



## Introduction

« Après des siècles de réflexion linéaire, constater et accepter le potentiel transformationnel de la méthode non linéaire constitue un défi » (Pauli, 2018). La méthode non linéaire se réfère de manière générale aux différentes tendances qui s'écartent de la logique linéaire et qui se veulent avant-gardistes et innovantes. Parmi celles-ci nous retrouvons le modèle d'économie circulaire ; et à travers celui-ci la notion même de circularité, nouveau paradigme économique (Stahel, 2012).

Le modèle linéaire, à la recherche d'une croissance continue symbolisée par le produit intérieur brut [PIB], a entraîné certes une hausse du niveau de vie dans les pays développés mais à des coûts environnementaux dépassant les bénéfices globaux (Le Moigne, 2018). Les tendances et défis contemporains témoignent du caractère non durable du modèle linéaire et de la nécessité d'un changement de paradigme économique.

Dans le courant de l'économie écologique, l'économie circulaire se présente comme un principe d'organisation visant la durabilité forte (Aurez & Georgeault, 2016). Les objectifs de l'économie circulaire diffèrent de ceux de la méthode linéaire étant donné le cadre systémique dans lequel évolue la première. Ainsi nos indicateurs actuels deviennent obsolètes et inadaptés à la mesure d'une circularité définie. Par conséquent, des indicateurs de circularité émergent et se caractérisent à travers la conception des objectifs de l'économie circulaire (EASAC, 2016).

Dans le même courant, le biomimétisme offre aussi un principe d'organisation qui vise la durabilité forte. Ce concept offre aussi une définition de la circularité à travers les différents principes du vivant et vient nourrir le développement du concept d'économie circulaire dont les fondements sont la nature ; plus bel exemple de circularité et de durabilité.

Cette seconde approche représente le cœur de ce mémoire et vient former la question de recherche de celui-ci : *le biomimétisme offre-t-il une alternative à l'évaluation d'une circularité authentique dans une transition vers une économie circulaire ?*

Ainsi, ce mémoire s'intéresse en première partie à contextualiser l'économie circulaire et le rôle important des indicateurs à travers le progrès d'une transition vers un système authentiquement circulaire. Cette première partie introduit aussi la notion de

biomimétisme sur laquelle une redéfinition de la circularité sera développée dans les parties suivantes.

En seconde partie, un état de l'art des différents indicateurs de circularité est dressé. Ces indicateurs se distinguent les uns des autres à travers leur approche respective mais aussi leur résultat et leur contribution dans la mesure effective d'une circularité propre à chacun. Les objectifs de chaque indicateur sont différents, traduisant une diversité dans la forme, les mesures et les résultats des indicateurs.

Enfin la troisième partie représente la discussion quant à la question de recherche initiale et s'intéresse donc à redéfinir la circularité à travers la dimension biomimétique, dans le but d'ouvrir une voie à la construction d'indicateurs durablement circulaires. Cette dernière partie développe les différents principes du vivant caractéristique d'une circularité durable et dynamique. Elle dresse ainsi les conclusions à la question de recherche initiale étudiant les divergences et convergences entre cette *circularité biomimétique* et celle établie à travers les différents domaines de l'économie circulaire.

## Partie I : L'économie circulaire et son besoin croissant d'indicateurs

### 1.1. Transition d'un système linéaire vers un système circulaire

#### 1.1.1. Le modèle linéaire

Le flux des composants, matériaux et produits dans une économie linéaire suit un schéma relativement simple où l'extraction de ressources naturelles, la transformation de celles-ci en produits, l'utilisation ou consommation de ces produits, engendre des déchets non valorisés et coûteux. Les ressources sont, in fine, jetées de manière souvent préjudiciable pour l'environnement (Le Moigne, 2018).

Ce modèle linéaire « Take-Make-Dispose » trace les limites et jauge les risques qu'il engendre sur la croissance économique mondiale (Ellen MacArthur, 2013). Plus profondément, c'est cette recherche continue de la croissance qui a motivé ce modèle économique et dont la remise en question est aujourd'hui indispensable (Jackson, 2010).

L'économie linéaire présente à présent des coûts qui dépassent ses bénéfices et elle a atteint ses limites. (Le Moigne, 2018) Ainsi, quatre des neuf « limites planétaires » identifiées par le Stockholm Resilience Center sont dépassées, à savoir ; le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, l'utilisation des terres, et le cycle de l'azote et du phosphore (Stockholm Resilience Centre, 2019).

Ainsi le modèle linéaire est confronté à de nombreuses limites dans un monde où les ressources naturelles ne sont pas inépuisables et où la résilience des écosystèmes ne s'aligne plus aux incessantes perturbations externes qu'ils subissent (Ellen MacArthur, 2013).

La production linéaire transforme les services en produits qui peuvent être vendus, mais cette approche de débit incessant est un gaspillage (Stahel, 2012) et expose de plusieurs façons une dépense des ressources naturelles, à savoir :

#### ***Pertes à travers la chaîne de production***

Plus de 21 milliards de tonnes de matériaux ne sont pas incorporées dans les produits finaux chaque année au sein des pays membres de l'OCDE (Eurostat, 2019). Ce montant traduit d'importants volumes perdus entre l'extraction des ressources naturelles et leur transformation en produits finis. Ainsi, une partie importante des matériaux extraits n'entre jamais dans la boucle de consommation et représente des pertes avant même une potentielle

première utilisation, générant ainsi des résidus (Brears, 2018). Une meilleure prise en compte de ces ressources naturelles pourrait être une des manières les plus efficaces pour réduire notre impact sur l'environnement et améliorer le bien-être humain (International Resource Panel, 2017). En effet, une efficacité accrue tout le long du cycle de vie de l'utilisation des ressources implique une extraction des ressources plus efficace, une production moins énergivore et une consommation plus mature de celles-ci. De nombreuses publications démontrent les avantages économiques atteignables à travers une meilleure utilisation des ressources naturelles.

### ***Pertes liées aux produits en fin de vie***

En 2010, plus de 65 milliards de tonnes de matériaux entraient au sein du système économique mondial (Ellen MacArthur, 2013). Cette estimation reprend le volume de ressources extraites mondialement en vue d'une transformation industrielle ou de consommation directe et inclut les matériaux nécessaires à la génération d'énergie ou d'autres matériaux utilisés le long des chaînes de production. Un volume extrapolé à plus de 82 milliards de tonnes en 2020<sup>1</sup>. En Europe, 2,7 milliards de tonnes de déchets étaient émises en 2010 dont seuls 40% étaient réutilisés, recyclés, compostés ou digérés (Eurostat, 2011). Nous perdons, dès lors, toujours des quantités importantes de matériaux chaque année à travers de nombreuses industries<sup>2</sup>.

Par exemple, le domaine de la construction ne présente qu'un taux de recyclage de ces matériaux entre 20% et 30%. Ce taux relativement faible s'explique majoritairement par le design des infrastructures et la manière dont les bâtiments sont généralement construits. Les constructions ne se retrouvent pas pensées pour être démolies et désassemblées en pièces distinctes et réutilisables. Il en résulte une perte significative de matériaux à haute valorisation économique (EPA, 2009).

### ***Pertes énergétiques***

Dans le modèle linéaire, la mise en décharge des déchets engendre une perte de l'énergie résiduelle des produits. La transformation de matériaux extraits en produits finis et

---

<sup>1</sup> Cfr. Annexe 1

<sup>2</sup> Cfr. Annexe 2

commercialisables demande une quantité d'énergie considérable. L'incinération et le recyclage de ces produits permettent de récupérer une partie de cette énergie résiduelle. De plus, une restructuration des chaînes de production, en vue de les rendre moins dépendantes en amont, en utilisant à une moindre fréquence des nouveaux matériaux, les rend moins énergivores. Ainsi, la linéarité du modèle « Take-Make-Dispose » induit une dépendance aux énergies fossiles importante afin que l'approvisionnement s'aligne aux besoins en énergie.

La demande en énergie primaire devrait augmenter de 80% entre 2010 et 2050 selon une estimation du rapport « Back to Our Common Future » des Nations Unies. Selon celui-ci, les progrès en termes d'efficacité et d'intensité énergétique seront contrebalancés par une hausse toujours plus haute de la demande énergétique. À titre d'information, les combustibles fossiles alimentaient toujours plus de 78% de la demande en énergie mondiale en 2014 (Brears, 2018).

L'intensité énergétique est réduite dans un modèle circulaire qui déplace la dépendance en amont à travers le recyclage et la récupération d'une partie de cette énergie résiduelle. Il en découle une demande en nouvelles ressources énergétiques plus faible et encourage par la même occasion une transition vers des énergies renouvelables (Ellen MacArthur, 2013).

### ***Érosion des services écosystémiques***

Les activités de l'Homme modifient les écosystèmes qui subissent des changements plus rapides et intenses depuis les 50 dernières années (Steffen & al, 2011). L'érosion des services rendus par ces écosystèmes à l'humanité est aussi au moins importante que le changement climatique et montre que nous vivons aujourd'hui plus que ce que la Terre peut nous fournir durablement (De Fries, Pagiola & al, 2005). À travers les 24 services écosystémiques, 15 ont été identifiés comme dégradés ou consommés de manière non durable. Il en résulte une perte conséquente de la biodiversité terrestre. Durant les 300 dernières années, la densité des forêts mondiales a diminué d'environ 40% et on estime, par conséquent, que le taux d'extinction des espèces causé par l'homme est 1000 fois plus rapide que le taux naturel (TEEB, 2010 & Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

L'économie linéaire et le modèle de consommation qui en découle se sont développés sur une utilisation sans limites des ressources avec une intensification particulièrement forte

et exponentielle à partir de la Révolution industrielle. Elle a permis une amélioration notable des conditions de vie des populations et à réduire la pauvreté dans le monde (Le Moigne, 2018). Cependant, ces améliorations se sont faites au détriment de la nature dont les coûts apparaissent supérieurs aux bénéfices.

Ces observations devraient mener à la remise en question essentielle de la croissance économique et à l'expansion d'un nouveau modèle économique, appelé l'économie circulaire (Wijkman & Rockström, 2012).

### 1.1.2. Le modèle circulaire

Une économie circulaire est une économie dans laquelle la valeur des produits, des matières premières et des ressources est maintenue aussi longtemps que possible, réduisant ainsi au minimum les déchets et l'utilisation des ressources (Commission Européenne, 2015). Ce terme apparaît pour la première fois en 1989 dans un ouvrage qui s'appuie sur les publications de Kenneth E. Boulding (Le Moigne, 2018), qui décrivait déjà une économie de « cosmonaute » où « *La terre est devenue un vaisseau spatial isolé, sans réservoirs illimités ni pour l'extraction, ni pour la pollution, et dans lequel, par conséquent, l'homme doit trouver sa place dans un système cyclique écologique, capable d'une reproduction continue de toute forme matérielle* » (Boulding, 1966).

Le concept d'économie circulaire est fondé sur l'étude des systèmes non linéaires, en particulier des systèmes vivants<sup>3</sup>. Il s'inspire du fonctionnement cyclique de la nature (Le Moigne, 2018) et représente une alternative qui cherche à découpler la croissance économique de la dépendance en matériaux (UN environnement, 2019). L'idée d'optimiser des systèmes plutôt que des composants est une des notions les plus importantes que nous puissions retenir de la nature. (Ellen MacArthur, 2013) En effet, une approche d'économie circulaire présente différents bénéfices comme la possibilité de retenir la valeur ajoutée des produits le plus longtemps possible (Lilja, 2015), d'extraire leur valeur maximum et d'éliminer les déchets en gardant ces ressources au sein de l'économie (Valipour, 2015). Cette notion implique une gestion prudente des flux de matière, qui dans une économie linéaire peuvent être de deux types ; nutriments biologiques et nutriments techniques (Braungart & McDonough, 2002). Cette distinction met en évidence la séparation entre consommation et

---

<sup>3</sup> Sera développé plus en détail au point 1.3 de ce mémoire.

utilisation des produits. Les premiers désignent des biens conçus pour revenir à la biosphère en toute sécurité et au capital naturel (Ellen MacArthur, 2013), et reviennent ainsi à la terre (Le Moigne, 2018). Les seconds, quant à eux, sont conçus pour circuler sans pénétrer la biosphère (Ellen MacArthur, 2013). Ces matériaux sont cruciaux dû au risque de pénurie d'offres et le fait que l'impact d'une telle pénurie de matières premières aurait un impact sur l'économie (Lederer & al, 2014). Ainsi, ces produits sont recyclés, remanufacturés, reconditionnés, réparés, préparés au réemploi ou maintenus (Le Moigne, 2018).

L'économie circulaire affiche une multitude de définitions et souffre de la même plasticité sémantique que le « développement durable » essayait jadis (Bourg, 2018). En effet, on voit s'opposer le concept de durabilité faible et forte (Norton, 2005) au sein même des discussions sur le concept d'économie circulaire et du meilleur moyen de mesurer une transition comme celle-ci (Arnsperger & Bourg, 2016).

Dans son acceptation pleine, « *l'objectif de l'économie circulaire est la préservation de la biosphère afin d'en maintenir la viabilité, pour l'espèce humaine au premier chef* » (Arnsperger & Bourg, 2016). Ces auteurs identifient donc les mécanismes qui fragilisent les conditions propices à l'épanouissement des hommes sur la terre pour guider les réponses de manière la plus appropriée. Cette distinction est importante, car elle affectera aussi la construction d'un indicateur de circularité pertinent pour mesurer ce que les auteurs appellent la transition vers une économie permacirculaire<sup>4</sup> (Bourg, 2018). Ainsi, il est nécessaire pour atteindre une économie authentiquement circulaire de prendre en compte les flux nets de matière entrants dans le système global, car ils représentent les perturbateurs en matière de proportion de flux, qui peuvent mener à un nouvel état du système terre. Dans cette approche de l'économie circulaire, il est question de faire redescendre les flux de matière de nos activités à des niveaux permis par les limites planétaires qui délimitent un espace de sécurité mondial (Rockström & al, 2009). Enfin, il est nécessaire de mesurer « *le degré d'évolution des mentalités vers une sobriété volontaire* » (Arnsperger & Bourg, 2016). Ce dernier niveau démontre une certaine « *remise en cause fondamentale de la croissance comme principe de l'économie et de la société* » (Arnsperger & Bourg, 2016). Ainsi, face à une économie globalisée, l'économie circulaire devrait s'inscrire à travers une échelle planétaire

---

<sup>4</sup> Se référer au point 1.2.2 de présent ouvrage.

et intégrer aussi un niveau permacirculaire où l'objectif ultime se réconcilie avec une empreinte écologique globale correspondant à une planète (Bourg, 2018).

### Modèle circulaire et Principes

Malgré une multitude de définitions, l'économie circulaire, indépendamment de ses différents niveaux, est fondée sur quelques principes. Ceux-ci sont largement inspirés de l'étude des systèmes non linéaires, et donc particulièrement des écosystèmes (WBCSD, 2018). Elle « met en coopération les éléments simples que sont les industries, selon ces principes et crée des écosystèmes industriels technosphériques » (Delannoy, 2017). Ce modèle représente, en fait, l'opposé du modèle linéaire précédemment présenté et se base sur des

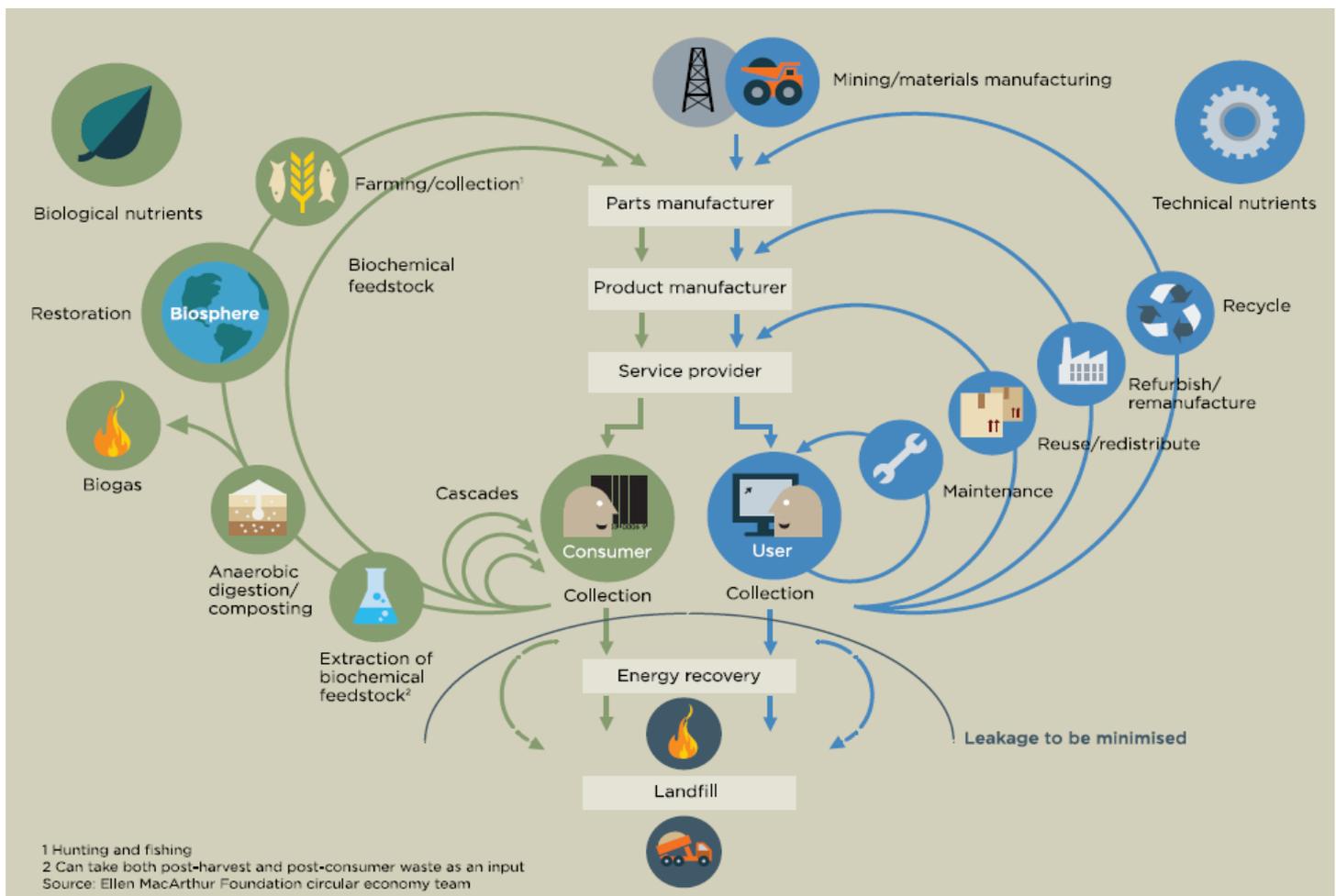


Figure 1. Economie circulaire - Réparatrice par conception (Ellen MacArthur, 2013)

boucles fermées comme un cycle de vie biologique (Pitt & Heinemeyer, 2015). La figure ci-dessous met en couleurs ces différents principes.

Premièrement, une telle économie va, en son cœur, avoir pour objectif de prendre en compte les déchets comme des ressources. Les déchets, en eux-mêmes, n'existent pas. Dès

lors, les produits sont pensés pour être désassemblés et réutilisés (World Economic Forum [WEF], 2014.) Ainsi, les nutriments biologiques ne sont pas toxiques et destinés à être compostés, contrairement aux nutriments techniques qui sont voués à être employés à nouveau en usant d'un minimum d'énergie nouvelle et avec un taux de rétention de la qualité le plus haut possible (Braungart & Mc Donough, 2002).

Deuxièmement, l'énergie requise par une telle économie se doit d'être renouvelable par nature (WEF, 2014). Ce principe démontre l'objectif de réduire notre dépendance aux énergies fossiles et augmenter la résilience de nos systèmes face à certains événements comme les chocs pétroliers. Nos systèmes se montrent souvent instables dû à leur uniformité industrielle et globalisée (Braungart & Mc Donough, 2002).

Troisièmement, les éléments sont en relation avec leur environnement, les infrastructures et le contexte social. L'économie circulaire réfléchit en termes de systèmes et met l'accent sur les flux de matière et leur écoulement à travers le temps, ce qui lui permet d'englober des conditions de régénération plutôt que de devoir se limiter à l'une ou l'autre ressource sur le court terme (Ellen MacArthur, 2013).

Enfin ces principes se matérialisent à travers 4 sources de création de valeur comme indiqué par la figure ci-dessous et décrit ci-après :

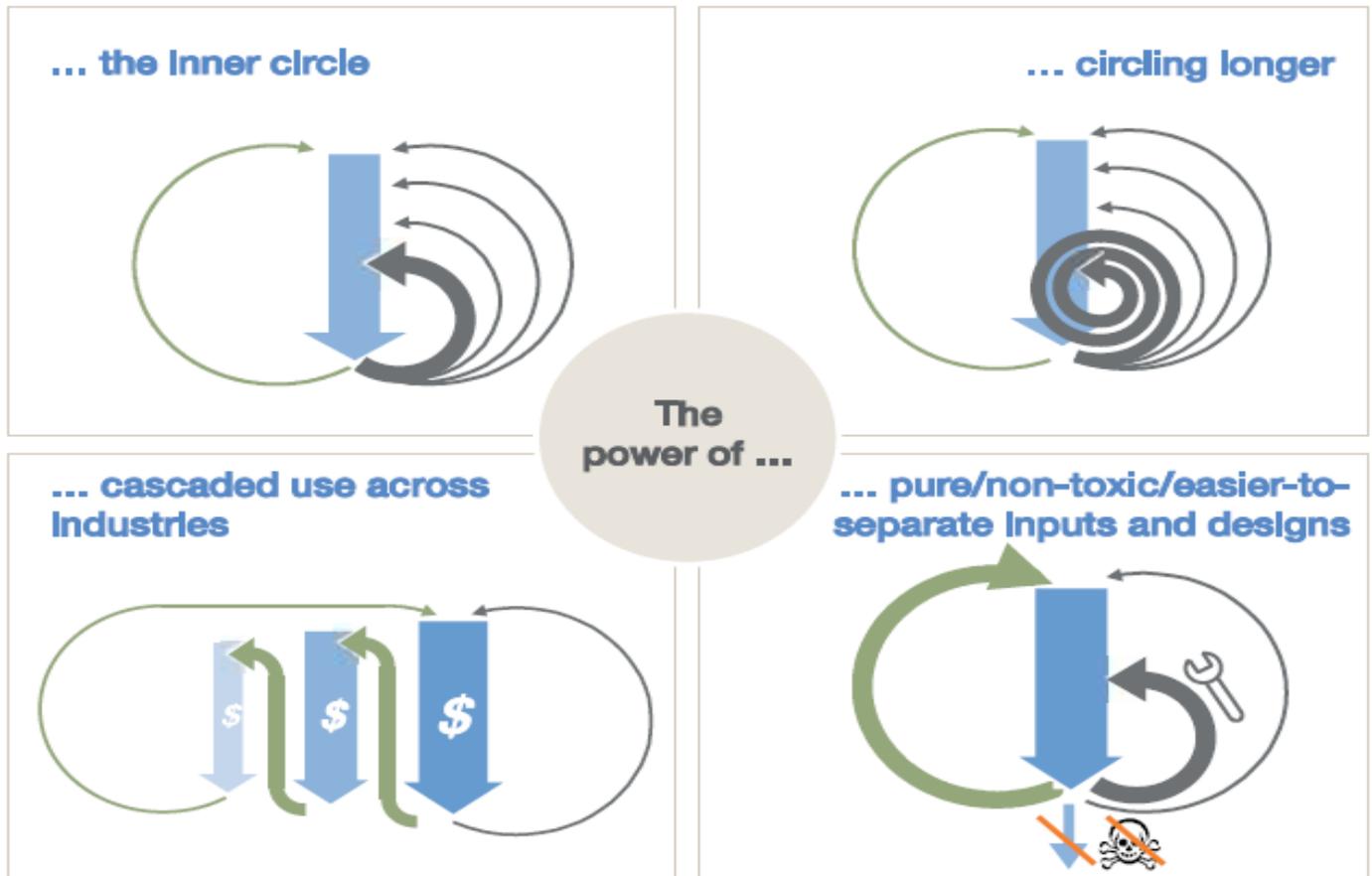


Figure 2. Sources de création de valeur de l'économie circulaire (Ellen MacArthur, 2013).

- **Pouvoir du cercle intérieur** : La maintenance/partage (Le Moigne, 2018) représente la boucle intérieure la plus courte et devrait théoriquement être celle qui économise le montant le plus important des coûts intégrés en termes de matériaux, main d'œuvre, énergie et externalités associées (WEF, 2014). On retrouve le recyclage comme boucle la plus longue. Ces boucles font preuve de sens économique à chaque fois que les coûts totaux associés à la collecte, le processus d'usine et la distribution du produit au sein de l'économie sont plus bas que son alternative linéaire. Un arbitrage qui devient de plus en plus attractif au vu de la volatilité des prix des matières premières et des coûts croissants liés au traitement des produits en fin de vie (Ellen MacArthur, 2013).
- **Pouvoir d'une circularité plus longue** : La création de valeur se fait à travers le maintien des produits, composants et matériaux plus longtemps au sein de l'économie à travers des cycles répétés un maximum par exemple (WEF, 2014). Cette capacité de l'économie circulaire

permet d'éviter la création d'un nouveau produit et donc de réduire la pression émise sur l'environnement.

- *Pouvoir d'utilisation en cascade* : Il s'agit à travers ce principe de diversifier l'utilisation d'un produit, matériau à travers la chaîne de valeur et différents secteurs. Ainsi, la création de valeur se traduit dans ces cascades par la substitution des flux de matières vierges et de leurs coûts intégrés par la réutilisation de matériaux déjà incorporés dans l'économie et aux coûts marginaux moins élevés (WEF, 2014 & Ellen MacArthur, 2013).
- *Pouvoir d'entrées pures* : Encourager des matériaux sains et non contaminants augmente l'efficacité de la collecte et de la redistribution des produits tout en maintenant leur qualité.

En résumé, le modèle circulaire et ses sources de création de valeur permettraient de réduire de manière importante l'extraction des matières premières ainsi que le taux de déchets reposant sur les sites d'enfouissement<sup>5</sup>. Il permettrait aussi de réduire le stock total de matériaux en activité à travers l'économie actuelle (Ellen MacArthur, 2013).

### 1.1.3. Une transition nécessaire

Le modèle linéaire, décrit ci-avant, a généré un niveau de croissance économique jamais égalé auparavant mais mène aujourd'hui à des contraintes en termes de disponibilité des ressources naturelles. Contraintes qui viennent s'ajouter aux problèmes déjà bien identifiés de génération de déchets et dégradation de l'environnement (Brears, 2018). La transition vers une économie authentiquement circulaire se pose comme l'un des candidats idéaux pour affronter les tendances actuelles que notre économie linéaire ne parvient plus à contenir (Bourg, 2018).

---

<sup>5</sup> Voir Annexe V

Ce modèle linéaire pèse sur la croissance économique par l'émergence de déséquilibres ; plus particulièrement se reflète dans la hausse du prix réel des produits de base et explique ainsi leur volatilité. La figure suivante démontre la forte hausse des prix des produits de base depuis 2000, effaçant les baisses de prix réels du 20<sup>e</sup> siècle.

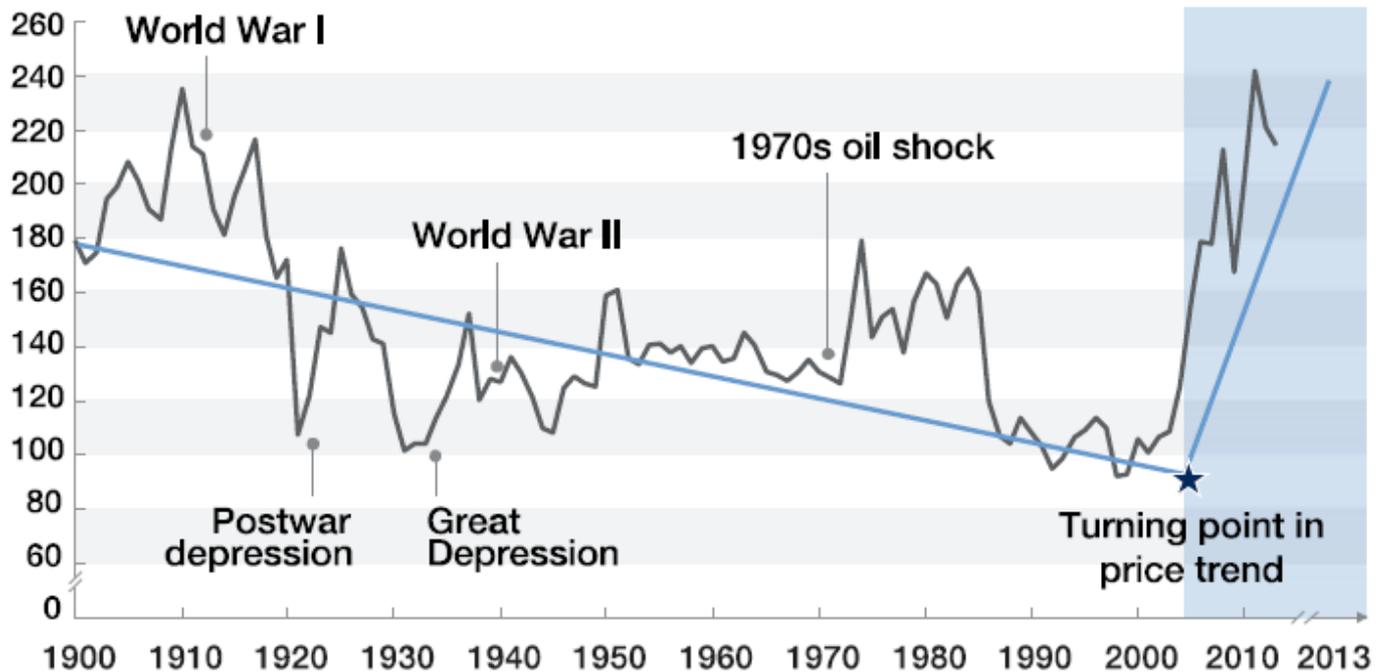


Figure 3. Évolution du prix des produits de base

Ensemble ces déséquilibres freinent la croissance de l'activité mondiale et donc de la croissance économique. Ces déséquilibres, exacerbés par un modèle économique qui n'optimise pas l'utilisation des ressources naturelles et qui est hautement dépendant des bénéfices énergétiques, vont probablement s'aggraver dû à différents facteurs (Ellen MacArthur, 2013 & Brears, 2018) :

- La **croissance économique** mondiale devrait grandir de 3% en moyenne par an entre 2014-2050. Si les activités mondiales continuent selon les tendances actuelles et de notre modèle linéaire en termes de consommation de matières premières, il a été estimé que nous aurions besoin de 2 planètes Terre d'ici 2050 pour nous soutenir (European Commission, 2011).
- Les **modèles de consommation** se transforment avec le niveau de revenu. La proportion de la consommation individuelle en termes de nourriture diminue et la consommation de protéines animales augmente au détriment d'aliments de base ce qui impacte l'environnement (WHO, 2017). La demande en vêtements et produits Hi-

Tech augmente quant à elle grandement avec une hausse des revenus ce qui actuellement impacte aussi négativement l'environnement (Brears, 2018).

- Un **accroissement de la population mondiale** qui ne devrait se stabiliser qu'en 2100 autour des 11,2 milliards d'habitants. D'ici à 2050, la population devrait atteindre 9,8 milliards d'habitants et la moitié de cette croissance devrait avoir lieu en Afrique (UNDP, 2017).
- Un **besoin d'infrastructures et technologies** adéquates afin de satisfaire une nouvelle demande à travers des réserves plus difficiles d'accès. Le montant total des investissements à fournir a été évalué à approximativement 3000 milliards \$ par an, à savoir un montant total 50% plus élevé que les montants investis actuellement (2000 milliards \$) (McKinsey, 2011).
- L'**actualité politique** et ses décisions décident de la formation de cartels, l'attribution de subsides et tracent les barrières commerciales. (Ellen MacArthur, 2013) Chacun d'eux a le pouvoir d'améliorer ou d'empirer la rareté des ressources, le niveau des prix et leur volatilité.
- La **globalisation des marchés** entraîne une certaine dépendance au niveau mondial sur le prix des marchandises et leur volatilité (UNEP, 2016). Par conséquent, les futures fluctuations du prix des denrées alimentaires mettront en péril la sécurité alimentaire dans les pays à faible revenu (Bekkers & al, 2017).
- Le **climat** et ses changements affectent particulièrement l'approvisionnement en eau douce, l'érosion des sols, les besoins d'irrigation et par conséquent l'industrie de l'agroalimentaire (Mc Kinsey, 2011). Le changement climatique aux États-Unis et en Europe pourrait théoriquement diminuer la croissance du PIB respectivement de 1,9% et 2,17% (Zhao & Huang, 2017).
- La **dégradation de l'eau** est un problème de plus en plus récurrent. Plus de 80% des eaux usées mondiales et plus de 95% dans certains pays en voie de développement sont rejetées dans l'environnement sans traitement adéquat, ce qui entraîne une pollution des rivières, lacs et eaux côtières. De plus, la demande mondiale en eau devrait dépasser l'offre de 40% et de 55% d'ici 2050 (UNESCO, 2015 & OECD, 2012 & UN-WATER, 2017).

- En 2018, notre économie générait 1,3 milliard de tonnes de **déchets** chaque année. Ce montant devrait atteindre approximativement les 2,2 milliards en 2025 (World Bank 2017). Le développement d'une méthode durable pour recycler et conserver les matières premières utilisées au sein de notre économie est requis et c'est pourquoi une transition vers le concept d'économie circulaire est nécessaire (Lederer & al, 2014).

À travers ces différentes tendances, notre modèle linéaire ne parvient plus à cacher ses criants défauts et peine solutionner chacun des points cités ci-dessus. Un changement radical est urgemment nécessaire. En 1972, « The limit of Growth » nous indique que « *si les tendances actuelles de croissance de la population, de l'industrialisation, de la pollution, de la production agricole et de la consommation des ressources restent inchangées, les limites de la croissance de cette planète seront atteintes quelque part dans la prochaine centaine d'années à venir. Le résultat le plus probable sera un déclin plutôt soudain et incontrôlé de la population et des capacités industrielles* » (Meadows, 1972).

## 1.2. Rôle des indicateurs économiques à travers une telle transition

Le modèle économique linéaire a atteint son paroxysme à travers plusieurs siècles de pratique et ne parvient plus aujourd'hui à dissimuler ses criants défauts. Ce modèle met en danger le développement de l'humanité et de nos sociétés. Comme mentionné ci-avant, il engendre une pression continue et exponentielle sur les écosystèmes et failli quant à la prise en compte des externalités qui en découlent. Ainsi l'économie linéaire n'est pas viable et la transition vers une économie circulaire, plus durable est à l'heure actuelle une nécessité (Le Moigne, 2018).

Face à ses limites et à leurs conséquences environnementales et sociales désastreuses, l'économie circulaire se présente comme le candidat diamétralement opposé et logique pour briser cette continuité nocive (Guénaire, 2016). Ainsi, les pouvoirs publics mais aussi les entreprises s'orientent vers de nouveaux modèles d'affaires qui intègrent les principes de l'économie circulaire. Ces démarches et stratégies qui s'intègrent dans une optique de transition écologique se pilotent à travers un besoin croissant d'indicateurs adaptés pour mesurer leur degré de circularité.

Ces indicateurs sont encore peu nombreux (Le Moigne, 2018) mais tendent à se multiplier rapidement, traduisant un besoin croissant d'uniformisation (WBCSD, 2018). On peut citer, à titre d'exemple, les efforts de la Fondation Ellen MacArthur dans sa proposition d'indicateurs de circularité, déjà aujourd'hui utilisés dans par des sociétés privées (EpE & INEC, 2018).

Cependant, il n'existe, en ce moment, pas de « méthode reconnue pour mesurer de l'efficacité d'un pays ou d'une entreprise dans la transition vers l'économie circulaire, et non plus d'outils holistiques de suivi pour appuyer un tel processus » (European Environmental Agency, 2016). La diversité des approches en termes de mesures circulaires, qui émergent à travers différents secteurs et régions, a créé un environnement où d'indications conflictuelles et compétitives quant au réel progrès atteint vers la transition à une économie circulaire (WBCSD, 2018).

Enfin, les indicateurs actuellement disponibles se heurtent à une critique d'incomplétude et d'inefficacité. En effet, ces indicateurs ne se focaliseraient que sur les niveaux opérationnels et entrepreneuriaux des entités individuelles et des secteurs de productions (Arnsperger & bourg, 2016).

#### 1.2.1. Les indicateurs en général

Les indicateurs représentent un ensemble de mesures quantifiables, pouvant être utilisés pour évaluer la performance d'acteurs sociétaux à travers le temps (Investopedia, 2019). Ces indicateurs déterminent le progrès de ces acteurs dans la réalisation de leurs objectifs stratégiques et opérationnels et supportent la prise de décision. Ils sont, dès lors, critiques pour une évaluation économique à tous niveaux (Entreprises, régional, national ou mondial) (EASAC, 2016). De plus, un indicateur pertinent réunit trois caractéristiques : mesurabilité, crédibilité, et reproductibilité dans l'espace et le temps (EpE & INEC, 2018) et ont la capacité de résumer, de concentrer et de condenser l'énorme complexité de notre environnement dynamique en une quantité raisonnable d'informations utiles (Geoffrey & Todd, 2001). Enfin, ils présentent la possibilité d'évaluer le changement et peuvent donc être utilisés pour résumer la complexité de notre environnement et pour supporter l'évolution d'une économie vers une économie circulaire (Church & Rogers, 2006).

Les entreprises et pouvoirs publics utilisent des indicateurs pour de multiples raisons. Ils permettent de mesurer la performance et donc de comparer des produits, entités individuelles ou secteurs entre eux. Ils permettent d'orienter la prise de décision et, par conséquent, de piloter une stratégie donnée (EpE & INEC, 2018). Les indicateurs doivent être impliqués dans la prise de décision et dans l'instauration d'une stratégie de développement durable. Ils ne permettent pas, en eux-mêmes, d'atteindre une production circulaire mais représentent un outil important pour orienter une organisation vers cet objectif (Beratan & al, 2004). Leur définition aidera à définir le projet de société. En effet, adapter la mesure est une manière d'imposer un nouveau concept. Selon Tom Bauler, c'est « *la mesure de l'activité industrielle via le PIB qui a défini la « société de consommation »* » (Bauler, 2019). Lui qui échoue à : « *rendre compte des évolutions de la base des actifs, à intégrer des pertes réelles de bien-être découlant de la répartition inégale des revenus [...] à inclure les coûts externes de la pollution et des dégâts environnementaux à long terme* » (Jackson, 2010). De nouveaux indicateurs émergent pour soutenir la transition mentionnée ci-avant et compléter une liste non exhaustive d'indicateurs de plus en plus nombreux et de plus en plus diversifiés (Senard, 2018).

Les indicateurs découlent directement de la stratégie (EpE & INEC, 2018) et servent donc à suivre la progression vers ses objectifs. Les entreprises peuvent s'inspirer des différents référentiels déjà existants mais doivent aussi s'informer des normes et cadres existants qui sont pertinents. De tels standards subsistent déjà, à savoir, la Global Reporting Initiative [GRI], le Natural Capital Protocol et le Cadre de L'international Integrated Reporting Council [IIRC] (WBCSD, 2018). Le GRI G4 représente une directive volontaire qui a pour objectif la divulgation des dimensions économiques, sociales, environnementales et de gouvernances des produits, activités et services proposés (Ramanan, 2018). Elle permet d'orienter la construction d'indicateurs pertinents pour se préparer à la construction de rapports de développement durable et propose des outils d'aide pour introduire ce type de déclaration dans les activités quotidiennes des intéressés (GRI, 2019).

Il est question, ici, de diviser cette liste d'indicateurs en évolution constante entre *indicateurs linéaires* et indicateurs circulaires (EASAC, 2016). Cette distinction a pour objectif

de catégoriser la majorité des indicateurs selon leur contribution dans la transition vers une économie authentiquement circulaire (Arnsperger & Bourg, 2016).

Ainsi sont à considérer comme indicateurs linéaires, les indicateurs qui n'intègrent pas au moins une dimension circulaire à leur finalité. Au contraire, les indicateurs circulaires englobent les indicateurs qui aident à mesurer et piloter une démarche d'économie circulaire, de mesurer les impacts sur l'environnement et de communiquer intérieurement et extérieurement les efforts vers une économie circulaire (EpE & INEC, 2018).

### ***Les indicateurs linéaires et leurs faiblesses d'aujourd'hui***

Les indicateurs linéaires englobent globalement la majorité des indicateurs popularisés et utilisés de nos jours. Comme tous les indicateurs, ils orientent les décisions et permettent aux acteurs de mesurer l'état d'avancement et les efforts investis afin d'atteindre des objectifs fixés au préalable (European Commission, 2015). Il est important de souligner le rôle critique des indicateurs linéaires avant de considérer de nouveaux indicateurs appropriés à la mesure de la transition vers une économie circulaire (EASAC, 2016). En effet, l'introduction de nouveaux indicateurs peut se heurter à certaines résistances de la part des instituts statistiques, des décideurs, chercheurs, sociétés privées ou organisations gouvernementales ou non. Le PIB en tant que mesure de la performance économique ne peut supporter la prise de décision politique, car il ne prend pas en compte les aspects sociaux et les thèmes environnementaux en compte (Van Den Bergh & Antal, 2016).

Cependant, ceux-ci se retrouvent inefficaces face à des questions qui intègrent les dimensions circulaires et l'impact environnemental des produits, activités des entreprises ou plus globalement des activités de nature anthropiques (Senard, 2018). Les entreprises sont de plus en plus nombreuses à explorer de nouveaux modèles d'affaires qui intègrent les principes de l'économie circulaire (EpE & INEC, 2018). L'absence d'indicateurs reconnus pour supporter la transition vers l'économie circulaire entraîne l'émergence d'une diversité de nouveaux indicateurs prêts à englober ces dimensions, et ce à travers des niveaux distincts (European Environmental Agency, 2016).

Une étude du WBCSD parue en 2017 stipule qu'ils existent des risques dus à l'inertie du modèle linéaire au sein de notre économie. Ces risques représentent des incitateurs à

transiter vers une économie authentiquement circulaire et ont été discutés majoritairement ci-avant<sup>6</sup>. Pour rappel, il s'agit principalement de volatilité des prix des ressources primaires et produits de base, la prospérité des activités et par conséquent la sécurité liée à l'approvisionnement des ressources (WBCSD, 2018).

### 1.2.2. Les indicateurs circulaires et innovation

La sélection d'indicateurs circulaires a de nombreuses implications et il est nécessaire d'y être attentif afin d'employer les indicateurs les plus appropriés pour atteindre les objectifs politiques fixés (EASAC, 2016). En effet, afin d'évaluer le progrès dans la transition vers une économie circulaire et d'évaluer l'efficacité des actions prises au niveau européen et au niveau national, il est important de pouvoir compter sur un ensemble d'indicateurs fiables (European Commission, 2015). D'après une étude du WBCSD et BCG group, 97% des participants stipulent que l'instauration de pratiques circulaires encourage l'innovation et rend leur organisation plus responsable et compétitive (WBCSD & BCG, 2018). Cette innovation se développe à travers la constitution d'indicateurs circulaires qui ont le pouvoir de changer les produits et processus à travers le temps ainsi que de créer de la valeur financière pour l'organisation.

L'économie circulaire prône une diminution des flux de matériaux, de l'extraction des réserves naturelles et de la production de déchets en dépôt afin d'avoir un impact destructeur moins important sur l'environnement (EASAC, 2016). Dès lors, les indicateurs analysant les flux de matériaux sont très pertinents. Cependant, la manière d'interpréter ces flux dépend grandement du type de matériaux considérés (EIPRM, 2016). De plus, l'utilisation de ces indicateurs peut aussi varier en fonction de leur application à des sociétés individuelles, des secteurs ou au niveau économique national ou mondial (Bringezu & al, 1997). Ensuite, il s'avère que certains de ces flux peuvent aussi se retrouver séparés en plusieurs substances, matériaux (papiers...) ou produits (ordinateurs...) (EASAC, 2016) Enfin, la notion d'« *ecological rucksack* » (Von Weizsäcker & al, 1998) vient dénoncer la partie de ces flux qui est cachée et traduit le montant total de ressources naturelles extraites de la nature pour créer un produit, auquel on soustrait le poids effectif du produit. Cette notion dénote du « gaspillage » de ressources naturelles observé afin d'extraire une certaine matière première et/ou créer un

---

<sup>6</sup> Voir section 1.1.1

produit. Cet indicateur mesure donc l'efficacité de l'utilisation des ressources lors de la fabrication d'un produit (Le Moigne, 2018).

Comme mentionné ci-dessus, l'économie circulaire ne s'intéresse pas qu'à la réduction de ces flux mais vise aussi à allonger la durée d'utilisation et l'efficacité de ces biens (WBCSD, 2018) notamment à travers la réutilisation, le partage ou la réparation (Le Moigne, 2018). Par conséquent, des indicateurs non matériels peuvent aussi se retrouver pertinents pour mesurer la transition vers une économie circulaire. En particulier ceux associés à des changements sociaux ou de modèles d'affaires (EASAC, 2016).

En résumé, la circularité des organisations est mesurée pour 5 raisons qui sont les suivantes<sup>7</sup> (WBCSD, 2018) :

1. Stimuler la performance ou la stratégie de l'entreprise
2. Justifier la réussite extérieurement
3. Intégrer la circularité à travers l'organisation
4. Atténuer et gérer les risques cités et associés au modèle d'organisation linéaire existant
5. Connaître l'impact des activités et actions circulaires

### ***Tendances actuelles et cycle de vie***

L'étude mentionnée précédemment<sup>8</sup> souligne certaines tendances à la sélection de ces nouveaux indicateurs écocirculaires et à leur diffusion. Les distinctions qui sont faites permettent de catégoriser et, par conséquent, de sélectionner les indicateurs les plus pertinents pour chaque situation (EpE & INEC, 2018). Ces différenciations mettent aussi en lumière la complexité derrière la construction d'un cadre commun, ou d'un ensemble d'indicateurs pour mesurer la circularité des organisations (WBCSD, 2018).

Le cadre permet de confirmer les éléments pertinents à mesurer pour assurer des progrès à travers une économie authentiquement circulaire. L'échelle, ensuite, recentre les indicateurs sur un horizon presque géographique d'analyse et de mesure. Une analyse de la distribution des indicateurs actuels le long du cycle de vie d'un produit ou service permet

---

<sup>7</sup> Par ordre d'importance

<sup>8</sup> WBCSD & BCG Group 2018 et WBCSD 2018.

d'identifier les plus fréquemment utilisés et leur visée à travers chaque étape de l'extraction des ressources premières au traitement du produit en fin de vie. Enfin, l'étude démontre une certaine évolution quant à la sélection du type d'indicateurs par rapport à la maturité de l'organisation à travers sa transition. (WBCSD & BCG, 2018).

- *Cadre* : Les principaux éléments cités comme cibles importantes à la mesure varient fortement parmi les participants et parmi les secteurs; excepté pour les matériaux qui se retrouvent suggérés à chaque fois. L'énergie vient en seconde position suivie de l'utilisation de l'eau et enfin des émissions de gaz à effet de serre<sup>9</sup>
- *Échelle* : les parties prenantes d'un modèle aussi large que l'économie circulaire sont plurielles. Leurs rôles au sein de la société sont très diversifiés et, par conséquent, leurs objectifs aussi. Le WBCSD distingue ainsi 4 niveaux d'analyse qui séparent les actions stratégiques des parties prenantes ; à savoir les niveaux *Macro*, *Meso*, *micro* et *nano* (WBCSD, 2018) :
  - Le niveau *macro* (Balanay & Halog, 2016) représente les villes, pays et agences internationales et où la circularité se traduit par l'imposition de lois, programmes et infrastructures adéquates au développement d'une circularité authentique ou permacirculaire où les limites planétaires sont considérées (Arnsperger & Bourg, 2016). L'impact sociétal d'une circularité macro se distingue des autres niveaux par un niveau d'attraction des villes, pays plus élevé grâce à la création de valeur et de travail. De plus, la dépendance du pays en imports et dû à la volatilité des ressources naturelles rares s'en retrouve réduite (WBCSD, 2018).
  - Le niveau *Meso* (Balanay & Halog, 2016) est le niveau qui relie les entreprises et secteurs entre eux. La circularité se traduit par la création d'entrepreneuriats, d'efficience logistique et de symbiose industrielle (Erkman, 2001). Ce niveau mesure la redescende d'une économie (Bourg, 2018). Les impacts d'une circularité Meso se retrouvent dans un dynamisme et une attractivité croissants des territoires, dans une réduction de l'impact des activités sur l'environnement et par la création et allocation de nouvelles opportunités de travail (WBCSD, 2018).
  - Le niveau *Micro* (Balanay & Halog, 2016) vise les entreprises et les consommateurs individuellement, à l'échelle d'un site industriel ou d'un secteur (Bourg, 2018). La circularité Micro a pour objectif d'augmenter l'efficience énergétique et de rendre la

---

<sup>9</sup> Voir Annexe 3

production plus respectueuse de l'environnement. On parle notamment à ce niveau-ci d'écoconception et de recyclage (EASAC, 2016). Les avantages à en retirer sont la construction d'un avantage concurrentiel face à leurs concurrents pour les organisations, une meilleure image de marque et un impact réduit de leurs activités personnelles sur l'environnement.

- Enfin, le niveau *nano* désigne les produits et composants. La circularité cible une consommation plus responsable des biens et services ainsi qu'un rallongement de la durée de vie des produits à travers leur recyclage, leur réutilisation et leur réparation (Le Moigne, 2018).
- *Cycle de vie et Industrie* : Presque la moitié des indicateurs<sup>10</sup> actuellement présents et utilisés se rapportent aux processus internes et à l'efficacité des opérations et activités. On y retrouve notamment des indicateurs comme le taux d'énergie renouvelable utilisé ou l'efficacité énergétique, traitement de l'eau. Les indicateurs liés aux matières premières et au traitement des produits<sup>11</sup> en fin de vie viennent ensuite compléter le classement. Les étapes liées au design du produit, à leur utilisation intrinsèque et à leur distribution<sup>12</sup> affichent ensemble moins d'indicateurs que toutes les autres étapes du cycle de vie.<sup>13</sup> (WBSCD, 2018).
- *Maturité* : Les entreprises n'affichent pas un même niveau de maturité et d'avancement à travers leur transition vers des activités opérées de manière circulaire. Ce niveau de maturité permet de distinguer les indicateurs en 3 catégories (WBSCD, 2018) :
  - *Indicateurs d'efficacité opérationnelle* : Ils rassemblent les indicateurs généralement présents avant même l'introduction d'une stratégie de développement durable. On y retrouve notamment des mesures de la consommation énergétique, de l'eau ou des déchets.
  - *Indicateurs de performance de durabilité* : Ces indicateurs prennent en compte certains critères environnementaux et impacts sociaux comme les émissions de gaz à effet de serre ou l'impact sur la biodiversité des activités.

---

<sup>10</sup> 48% des indicateurs observés parmi les entretiens.

<sup>11</sup> Respectivement 19% et 22% des indicateurs observés parmi les entretiens.

<sup>12</sup> Respectivement 6%, 4% et 1% des indicateurs observés parmi les entretiens.

<sup>13</sup> Voir Annexe 4.

- *Indicateurs de création de valeur circulaire* : Cette dernière catégorie mesure les bénéfices et la valeur ajoutée des activités circulaires sur l'organisation. Elle permet d'observer comment l'organisation bénéficie de la transition engagée.

### ***Un indicateur permacirculaire***

La croissance économique, moteur de toute l'économie, présente des effets pervers donc un indicateur d'économie authentiquement circulaire devrait prendre en compte (Arnsperger & Bourg, 2016). Il est question, à travers cette section de souligner une des dimensions qui importe le plus et dont toute quantification de la circularité devrait envisager. Authenticité qui n'est possible qu'avec l'introduction d'une dimension de « réduction » (Bourg, 2018).

Ainsi, une économie ne peut être authentiquement circulaire qu'avec l'introduction d'une quatrième dimension, celle de la *Réduction*. Appelé le 4<sup>e</sup> R, il suit ceux de la Réutilisation, de la Refrabrication et du Recyclage. Cette authenticité stipule que l'efficacité réelle de ces « 3R » est conditionnée par la croissance matérielle et l'accumulation. Ainsi, *« aborder, l'élaboration d'une économie circulaire uniquement par d'ambitieuses politiques pilotées par la valorisation maximale des déchets serait vouée à l'échec : valoriser 100% des flux en fin de vie d'une matière première dont la consommation croît de plusieurs pourcents par an ne produit qu'un effet dérisoire à l'échelle de quelques décennies. Il n'est donc point d'économie circulaire qui n'inclue un ralentissement de la croissance matérielle et de l'accumulation »* (Grosse, 2010). En effet, même avec un recyclage des matières premières à 100%, il ne serait pas possible de couvrir nos besoins étant donné la croissance actuelle de la consommation mondiale (INEC, 2018)<sup>14</sup>

On s'approchera donc d'une économie authentiquement circulaire qu'en acceptant une croissance relativement faible et un taux des approches circulaires très élevé (Arnsperger & Bourg, 2016). Il s'agit de caractéristiques systémiques qui doivent être prises en compte dans la construction d'un indicateur de circularité authentique ou permacirculaire.

En résumé, la liste des indicateurs qui mesure la progression de la transition vers l'économie circulaire est relativement courte et en développement (Giurco & al, 2014) de

---

<sup>14</sup> Voir le cas de la consommation d'acier en 2014 (INEC).

manière très décentralisée et personnalisée. Aucune méthode reconnue n'existe pour évaluer de l'efficacité d'un produit ou d'une organisation à travers sa transition d'un modèle linéaire à un modèle circulaire (Avdiushchenko & al, 2017). Les différentes tendances actuelles dénoncent la complexité qui se cache derrière un indicateur communément utilisé et révèlent le besoin urgent de mesures communes afin de supporter et d'accélérer une transition circulaire. Enfin, la notion de permacircularité vient rajouter une couche à la complexité générale quant à la construction d'un indicateur circulaire pertinent. Il convient, d'après plusieurs auteurs, de prendre en compte « *la mesure quantitative des réductions effectives des flux nets de matière entrants dans le système global et de mesurer qualitativement les progrès collectifs en direction d'une culture de la sobriété volontaire* » (Arnsperger & Bourg, 2016) pour limiter réellement les impacts sur les cycles biogéochimiques naturels de notre système global.

### 1.3. Biomimétisme et économie circulaire

Le biomimétisme est : « *une approche qui propose de puiser dans le génie du vivant une source d'innovation durable* » (Conseil économique social et environnemental [CESE], 2015). L'**économie circulaire**, de par sa dimension durable, peut être qualifiée de biomimétique, car elle s'inspire du bouclage des flux et notamment celui du carbone qui caractérise les écosystèmes durables (CESE, 2015). « *Réconcilier les activités industrielles et le développement économique avec la préservation de l'environnement, des ressources et de la biodiversité devient possible en prenant les systèmes biologiques comme modèles* » (CEEBIOS, 2017). Les principes de l'économie circulaire convergent vers le fonctionnement des écosystèmes naturels, érigeant le pilier majeur que représente le biomimétisme au sein de celle-ci.

On distingue généralement trois approches les apports du biomimétisme aux productions humaines (CESE, 2015) :

- **Selon les formes** : Les activités humaines s'inspirent, à travers cette approche, de la forme des organismes vivants. On y distingue la finalité esthétique ou fonctionnelle de la finalité technologique où la nature est considérée comme une ressource aux services des activités

humaines. La seconde finalité privilégie l'efficacité et l'efficience des processus ou produits. Il s'agit du niveau le plus simple qui demande le moins de remise en question (Chapelle, 2015).

- **Selon les procédés et matériaux** : Cette approche s'inspire des structures et procédés mis en place par les organismes vivants pour répondre à leurs besoins et aux contraintes de leur environnement. La nature arrive, en effet, à « *non seulement produire des matériaux très complexes et parfaitement fonctionnels, mais encore les fabriquer à température et pression ambiantes, sans utiliser de produits toxiques* (CESE, 2015).
- **Selon les écosystèmes** : Les écosystèmes matures<sup>15</sup> sont les modèles dont s'inspire le biomimétisme. Les interrelations complexes qui les caractérisent constituent l'approche la plus ambitieuse du biomimétisme mais potentiellement aussi la plus impactante (CESE, 2015). Un système est défini comme « *constitué d'un ensemble d'éléments interconnectés qui sont organisés de manière à atteindre quelque chose (fonction ou but)* » (Meadows, 2008). Cette définition relative à la pensée systémique de Meadows forme celle des écosystèmes et souligne l'importance des connexions possibles entre les organismes vivants. Le biomimétisme écosystémique « *s'applique à des échelles spatiales et temporelles plus élevées [...] et nous ramène ultimement à notre interdépendance avec le reste de la biosphère* » (Chapelle, 2015).

Les enjeux auxquels nous sommes confrontés sont directement liés au caractère destructeur de nos activités. Parallèlement aux enjeux et conséquences de l'économie linéaire<sup>16</sup>, l'homme et son mode de consommation ont transformé la Terre physiquement et chimiquement, créant une nouvelle époque géologique : l'Anthropocène (Biomimicry Institute, 2015). Ainsi, la plus grosse erreur commise fût et reste peut-être l'oubli que l'Homme fait partie de l'écosystème de la Terre et ne s'en détache pas (Benyus, 2011). Dès lors, le biomimétisme, au même titre que l'économie circulaire, nous offre l'opportunité d'adopter une vision systémique de notre monde et de commencer à vivre dans les limites de notre planète (Biomimicry Institute, 2015).

### 1.3.1. Life's Principles Framework

---

<sup>15</sup> Écosystèmes dans lesquels les êtres vivants maintiennent un équilibre dynamique dans le long terme (CESE, 2015).

<sup>16</sup> Voir point 1.1.3

Il s'agit d'une liste développée par Biomimicry 3.8, représentant l'organisation créée par Janine Benyus. Cette liste peut être utilisée comme un outil au service des biomiméticiens dont le point de départ est que « *la vie crée les conditions favorables à la vie* » (Chapelle, 2015). En effet, la vie a mis au point des stratégies qui ont duré plus de 3,8 milliards d'années. Dès lors, les principes de la vie représentent ces tendances globales parmi les espèces qui prospèrent. Il nous est, par conséquent, possible à travers ces leçons de conception approfondies de modéliser des stratégies innovantes, les mesurer par rapport à ces critères de durabilité et nous permettre de nous laisser guider par le génie de la nature en utilisant les principes de la vie comme inspiration (Biomimicry 3.8, 2015).

Ceux-ci sont présentés à travers le schéma suivant :



Figure 4. Life's Principle Framework

Cet outil est divisé en 6 blocs avec entre 3 et 4 sous principes. Il est inspiré grandement d'une autre liste publiée dans un ouvrage de référence aux États-Unis<sup>17</sup>. Cette liste décrit le fonctionnement du vivant à toutes les échelles mais n'a pas été établie pour le biomimétisme (Chapelle, 2015).

Ces 6 blocs représentent les principes de la vie sur lesquels il nous est donné de nous inspirer afin d'interagir avec notre environnement de manière durable. On distingue, ainsi, les 6 principes et sous principes suivants :

- *Évoluer pour survivre* : En reproduisant les stratégies qui fonctionnent, en intégrant l'inattendu et en remaniant les informations.
- *Utiliser efficacement les ressources* : En utilisant un design multifonctionnel, des procédés économes en énergie, en recyclant tous les matériaux et en adaptant la forme à la fonction.
- *S'adapter aux changements de conditions* : En préservant l'équilibre par autorégénération, en renforçant la résilience par la variation, les duplications, la décentralisation et en incluant la diversité.
- *Unir développement et croissance* : En combinant les composants modulaires et emboîtés, en construisant de manière ascendante et en s'auto-organisant.
- *Être branché sur son milieu et réactif* : En utilisant une énergie et des matériaux facilement accessibles ainsi que les boucles de rétroaction, en cultivant les relations de coopération et en investissant dans les processus cycliques.
- *Utiliser une chimie respectueuse de l'environnement* : En construisant à bon escient en utilisant peu d'éléments, en décomposant les produits en éléments inoffensifs et en pratiquant la chimie dans l'eau.

La plupart de ces principes présentent rapidement un lien fort avec les différents modèles d'affaires de l'économie circulaire. Ces différents liens seront analysés et soulignés dans la Partie III<sup>18</sup> du présent mémoire. Ils constituent, d'ailleurs, la pierre angulaire qui soutient l'apport du biomimétisme dans la création et la gestion d'indicateurs écocirculaires.

### 1.3.2. Soutenabilité forte

---

<sup>17</sup> Dodson, B, Hauck, J & Hoagland, M. (2001). *Exploring the Way Life Works: The Science of Biology*. Jones & Bartlett Learning.

<sup>18</sup> Contribution du biomimétisme dans la création et la gestion des indicateurs écocirculaires.

Le concept de soutenabilité se rapporte à la dimension durable du développement. Il est important ici de bien distinguer le concept de développement de celui de croissance. À travers le modèle de soutenabilité forte, on cherche à « *déterminer des limites quantitatives à la croissance, tout en laissant ouvertes des possibilités de développement qui s'expriment de manière qualitative* » (Vivien, 2009). Ainsi on insère « *l'économie au sein de régulations sociales, les sociétés devant à leur tour s'insérer dans les régulations de la biosphère* » (Vivien, 2009). On retrouve un lien relativement fort avec la critique émise par Bourg sur la logique linéaire et les limites planétaires de Rockström & al. En effet, la soutenabilité forte défend l'idée que le capital humain n'est pas entièrement substituable au capital naturel.

Ce concept s'insurge face à la logique actuelle véhiculée par l'économie circulaire et la soutenabilité faible qui en découle et se caractérise par « *la nécessité de maintenir, à travers le temps, un stock de « capital naturel critique », dont les générations futures ne sauront se passer* » (Vivien, 2009).

La durabilité forte défend ainsi les flux matériels de l'économie qui remplissent trois conditions pour être considérés comme durables (Aurez & Georgeault, 2016) :

- La consommation des ressources renouvelables ne doit pas dépasser leur régénération.
- La vitesse de consommation des ressources non renouvelables ne doit pas dépasser le temps de substitution nécessaire pour les substituer par des ressources renouvelables et durables.
- Les émissions globales émises ne peuvent pas excéder la capacité d'assimilation de cette pollution par l'environnement

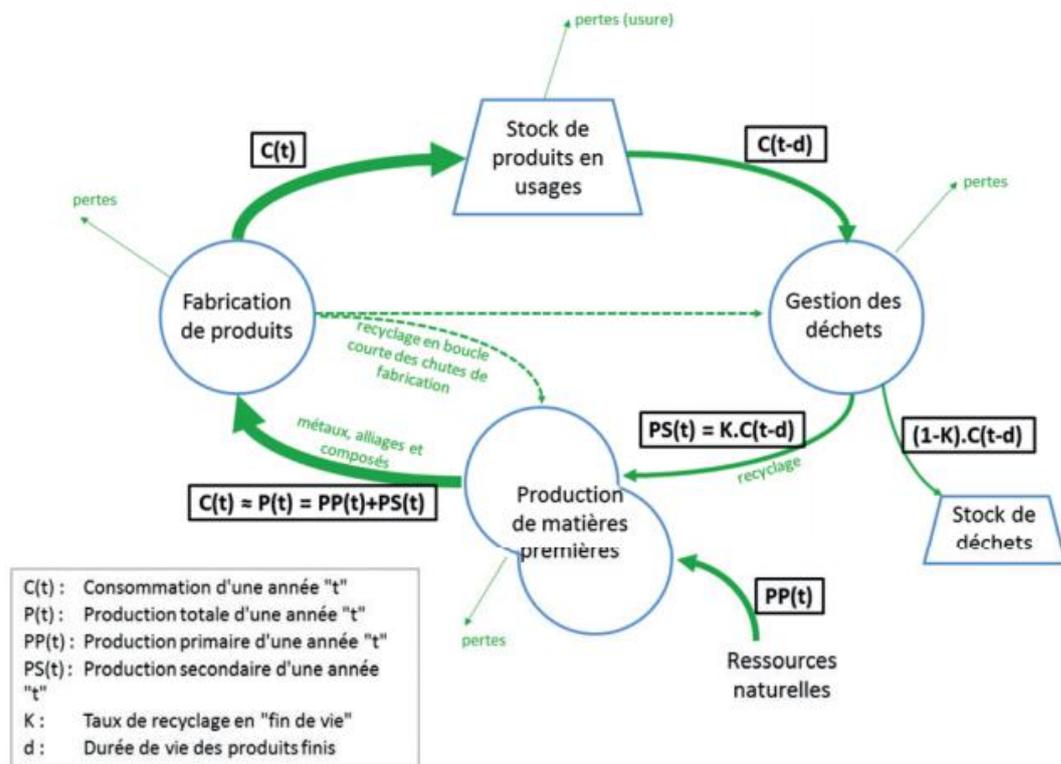


Figure 7 : Schéma simplifié de l'économie circulaire introduisant les notions de stock de produits en usage, de différentiel de temps et de flux entre la consommation et la remise en circuit des produits en fin de vie. Les boucles courtes (chutes de fabrication, ici en pointillés gras) et les diverses pertes (pointillés maigres) sont ici négligées <sup>(8)</sup>.

Figure 5. Schéma Simplifié - économie circulaire (Labbé, 2016)

Cette soutenabilité forte demeure la prémisse d'une première critique à l'économie circulaire. Le schéma ci-dessus démontre qu'une consommation croissante  $C(t+1)$  peut contrecarrer les bénéfices à long terme du recyclage et de l'allongement des durées de vie (Aurez & Georgeault, 2016). En effet, le stock de produits en usages  $S_t$  qui devient disponible en  $t+n$  ne représentera qu'une fraction du volume total de ressources  $S_{t+n}$ . On retrouve aussi ici, l'idée des travaux de Grosse démontrant que c'est bien le taux entrant qui conditionne l'efficacité du recyclage et non l'inverse (Bourg, 2018).

Le biomimétisme tend vers la même vision et soutient cette soutenabilité forte en remettant l'homme comme part du système Terre. Il nous incite à adopter une vision systémique et à commencer à vivre dans les limites de notre planète (Biomimicry 3.8, 2015).

La notion même de développement durable s'en retrouve affectée à travers le modèle de soutenabilité forte et ne permet plus une substitution entre les 3 piliers<sup>19</sup> qui la constituent.

#### 1.4. Conclusion

L'économie linéaire est un modèle qui s'essouffle et qui ne parvient pas à surmonter les défis contemporains. Le réchauffement climatique est une réalité et son atténuation une nécessité. Un changement de paradigme est urgent et le modèle circulaire représente une opportunité à saisir le plus rapidement possible.

Afin d'encourager une telle transition, il est nécessaire d'en évaluer les progrès à travers de nouveaux indicateurs pertinents. Cependant, la construction d'indicateurs écocirculaires se heurte à la pluridisciplinarité des questions d'environnement et à la complexité d'une vision systémique inévitable.

Dans une telle perspective, le biomimétisme nous incite à nous inspirer encore et toujours de la nature et supporte le modèle circulaire comme un modèle plus naturel et ancré dans les limites de notre planète. Le modèle circulaire se veut plus durable et limite la dimension économique aux contraintes biosphériques. Dès lors, la nature n'est-elle pas source première de leçons de durabilité du haut de ses 3,8 milliards d'années d'existence ?

---

<sup>19</sup> Environnement, Société & Économie

## Partie II : Une redéfinition au besoin croissant d'indicateurs adaptés

Cette section du deuxième chapitre a pour objectif de présenter les différents indicateurs actuels en matière d'écocircularité. Comme présenté ci-avant, ces indicateurs sont multiples, variés et font face à nombre de difficultés quant à leur uniformisation au sein des différents niveaux de l'économie circulaire mentionnés.

### 2.1. Material Circularity Indicator [MCI]

Cet indicateur, développé par la Fondation Ellen MacArthur, Granita Design<sup>20</sup> et la Commission Européenne à travers LIFE<sup>21</sup>. Il mesure le degré de restauration des flux matériels d'un produit ou d'une organisation, et intègre des indicateurs additionnels qui permettent de prendre en compte des impacts et des risques additionnels (EMF & al, 2015). Il mesure donc la circularité des produits constitués de matériaux non renouvelables (EpE & INEC, 2018), ou appelés « techniques » (Braungart & McDonough, 2002). Il est destiné à être utilisé dans un contexte d'entreprise (Linder & al, 2017).

Le MCI se défend d'attribuer un degré de circularité d'un produit en « *identifiant des paramètres cohérents, mesurables et précis* » (EpE & INEC, 2018) et donne une valeur entre 0 et 1. Plus la valeur est proche de 1, plus le produit est considéré comme circulaire (EMF & al, 2015). Ainsi le score MCI est attribué en fonction de plusieurs paramètres :

- Nature des intrants dans la production
- Durée de vie du produit
- Taux de collecte des produits en fin de vie
- Taux de recyclage du produit

Ainsi, un produit entièrement circulaire<sup>22</sup> ne contiendra pas de matière première vierge, aura le taux d'utilisation moyen de son produit le plus haut du marché, verra son taux de collecte entièrement réalisé et son taux de recyclage à 100%. Il s'agit d'un indicateur dont les dérivés commerciaux ont déjà été observés<sup>23</sup> (Griffiths & Cayzer, 2017). Le diagramme

---

<sup>20</sup> Société de logiciel en ingénierie des matériaux.

<sup>21</sup> Instrument financier de la commission Européenne pour supporter les projets à caractère environnemental et de conservation de la nature.

<sup>22</sup> Avec un score MCI de 1.

<sup>23</sup> Voir section 2.1.7 et le Kingfisher "Closed Loop Calculator" indicateur.

présenté ci-dessous affiche les différents flux de matériaux pris en compte pour construire l'indicateur. MCI (EMF & al, 2015) :

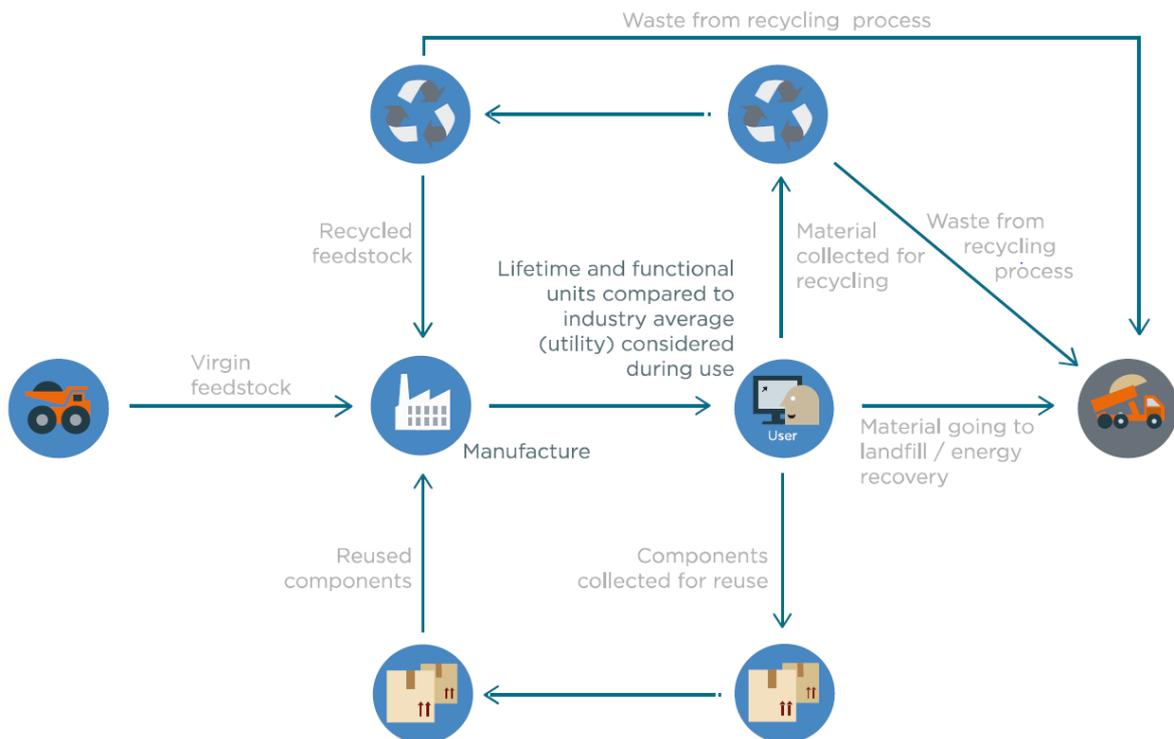


Figure 6. Material Circularity Indicator - Flux des matériaux

Le MCI est un indicateur développé au niveau produit et donc au niveau *nano* (Bourg, 2018) présenté ci-avant. Cet indicateur peut être extrapolé au niveau *micro* (Bourg, 2018), basé sur l'hypothèse que la circularité des matériaux d'une organisation peut être construite à partir de la circularité des matériaux de chacun de ces produits par agrégation et pondération. Ainsi le MCI d'une organisation est obtenu en prenant la moyenne pondérée des scores de chaque produit en normalisant soit par la masse soit par le revenu (EMF & al, 2015).

### Limites du Material Circularity Indicator

L'outil n'est actuellement développé qu'au niveau du produit et la construction de son degré de circularité au degré organisationnel est ouverte à certaines critiques. Un indicateur agrégé ne prendra, dès lors, pas en compte les fonctions de support, car difficilement imputable à un produit précis (EpE & INEC, 2018). Enfin, le MCI ne mesure que le degré de restauration des flux matériels non renouvelables. Par conséquent, il exclut volontairement

une partie des risques et impacts sur l'environnement (Saidani & al, 2017). C'est pourquoi la Fondation Ellen MacArthur propose, de manière optionnelle, l'utilisation d'indicateurs aux côtés du MCI pour prendre en compte la rareté des matériaux utilisés, leur toxicité, l'intensité énergétique ou encore le CO<sub>2</sub> (EMF & al, 2014).

Cet indicateur est complexe et très détaillé du point de vue de la gestion des ressources. La possibilité d'utiliser un nombre élevé d'indicateurs d'impact environnemental aux côtés du MCI peut rendre la signification de chacun des indicateurs plus désuète (Kampelmann, 2016). Enfin, un tel indicateur ne peut en plus pas être utilisé pour évaluer le degré de circularité au niveau régional ou global (Avdiushchenko & al, 2017).

## 2.2. Life Cycle Analysis [LCA]

L'analyse du cycle de vie est un outil efficace pour une évaluation environnementale des impacts environnementaux d'un produit mais peut aussi être valorisée au niveau régional (Generowicz & al, 2015) et « *s'attache à modéliser les ressources mobilisées et examiner l'impact environnemental à chaque phase de vie : fabrication, utilisation, transport et élimination* » (EpE & INEC, 2018). Cette approche a, d'ailleurs, été définie par la Commission Européenne comme la méthode basique pour mesure l'éco-efficacité d'un projet ou d'une organisation. Dès lors, elle devrait être adaptable à la dimension écocirculaire d'une région (Avdiushchenko & al, 2017). Dans les travaux de Sleeswijk, on retrouve d'ailleurs une LCA utilisée comme outil d'évaluation de la différenciation régionale dans une perspective globale (Sleeswijk, 2011). On retrouve aussi certains travaux consacrés à l'éco-efficacité d'une région à l'aide de LCA (Hammer & al, 2003). Enfin, il s'agit d'une méthode standardisée<sup>24</sup> qui constitue la base de l'écoconception (EpE & INEC, 2018).

Kulczycka et Smol considèrent qu'à l'heure actuelle, l'analyse du cycle de vie constitue la méthode qui permet l'identification, la documentation et la quantification la plus complète des impacts sur l'environnement (Kulczycka & Smol, 2015). De plus, dans leur recherche d'éco-efficacité, beaucoup d'organisations cherchent souvent des synergies entre elles pour atteindre une plus grande compétitivité et durabilité (Varbanov and Seferlis, 2014). Dès lors, un avantage considérable présenté par LCA est la possibilité de substituer différents

---

<sup>24</sup> ISO 14040 et ISO 14044

matériaux et produits. Des matières premières vierges peuvent donc être substituées par des déchets (Avdiushchenko & al, 2017). L'intégration d'une LCA

De plus, LCA change la vision apportée sur le produit et propose d'approcher celui-ci à travers la fonction qu'il remplit. On parle d'unité fonctionnelle. Cette « *nouvelle vision est indispensable pour pouvoir prendre suffisamment de recul sur la solution technique étudiée et envisager des solutions innovantes de reconception* » (Guineheuc, 2012). Elle autorise ainsi l'arbitrage entre plusieurs situations en les comparant sur base de la même unité fonctionnelle (Aurez & Georgeault, 2016).

Cet indicateur implique de bien en comprendre les limites et faiblesses pour être utilisé comme aide à la décision. Elle constitue une première étape dans la prise en compte des problématiques environnementales sur la totalité du cycle de vie des produits et supporte de nouveaux modèles économiques adaptés aux attentes des clients (Guineheuc, 2012).

### ***Limites d'une Analyse du Cycle de Vie***

Cette méthode ne peut pas prendre en compte les facteurs sociaux. En effet, « *l'être humain, dans sa complexité, son ingéniosité et sa créativité, fera toujours exploser le cadre trop restrictif d'une LCA sociale, ou socio-économique* » (Vincent-Sweet, 2012).

Ensuite, LCA ne distingue pas les effets secondaires des réponses qu'elle apporte aux questions. Il s'agit d'une photographie de la situation actuelle mais qui ne prend pas en compte la façon dont ça pourrait évoluer. Ainsi, elle permet d'orienter les décisions mais ne résout pas la problématique des effets rebonds<sup>25</sup>, ou des effets secondaires. À titre d'exemple, « *les foyers qui adoptent le compostage domestique ou partagé réduisent la production de leurs autres déchets et trient mieux leurs emballages* » (Vincent-Sweet, 2012).

De plus, une LCA est relativement gourmande en données et l'entièreté de celles-ci n'est pas toujours disponible pour les réalisateurs de LCA. Dès lors, ils se doivent d'estimer au mieux et de manière pertinente les éléments manquants (EpE & INEC, 2018).

Enfin, elle implique des simplifications pour être réalisable et compréhensible, ce qui exclut la plupart des cas particuliers. Pour l'auteur, LCA est : « *un outil intéressant, qui peut*

---

<sup>25</sup> Les gains environnementaux effectués sur l'une ou l'autre action circulaire sont consommés indirectement d'une autre manière.

*donner une indication de l'importance relative des différents impacts et révéler des impacts environnementaux ignorés. [...] L'analyse du cycle de vie restera toujours une approximation et ne devra jamais se substituer à une réflexion large, critique et approfondie » (Vincent-Sweet, 2012).*

Ces différentes critiques viennent nourrir et étayer les arguments avancés par Arnsperger et Bourg. LCA comme outil pertinent, au mieux au niveau *nano* et *micro* (Bourg, 2018), mais qui flanche à considérer les niveaux supérieurs d'un indicateur authentiquement circulaire. De plus, ces nombreuses faiblesses en font un outil manipulable comme a pu le prouver la débâcle des LCA concernant les sacs plastiques ou papiers (Vincent-Sweet, 2012) et qui reflétaient majoritairement les désirs de leurs intéressés.

### ***ACV conséquentielle***

L'ACV conséquentielle intègre une vision plus systémique et plus dynamique que l'ACV décrite ci-avant. Elle inclut idéalement les activités au sein et en dehors du cycle de vie de manière à ce qu'un changement dans ses activités se reflète sur l'ACV du produit étudié (Ekvall & Weidema, 2004). Elle modélise ainsi les effets indirects et les relations de causalités et demande, par conséquent, l'utilisation de données qui reflètent les effets attendus des changements tels que les effets marginaux ou économiques.

On distingue plusieurs différences majeures en termes de méthodologie (Ekvall & Weidema, 2004) :

- *Allocation pour les processus multifonctionnels* : Il est conseillé par l'UNEP d'étendre le système à travers la substitution afin de prendre en compte la demande d'un produit sur la production de l'autre (UNEP, 2011).
- *Allocation pour le recyclage en boucle ouverte* : On étend les limites du système pour inclure les différents procédés touchés ou on construit différents scénarios pour expliquer les relations entre la demande et la production.
- *Usage alternatif des facteurs de production limitée* : La limitation de certains des facteurs de production ouverts à la compétition devrait être reflétée dans l'ACV conséquentielle. On retrouve, dès lors, la distinction entre énergie renouvelable et non renouvelable et la prise en compte de celle-ci. Les énergies non renouvelables étant des produits rivaux, elles sont limitantes aux différents systèmes.

- *Les effets généraux du marché* : On pense notamment durant l'ACV conséquentielle à prendre en compte les effets d'échelle, les effets rebonds ou la sensibilité des demandes en fonction d'une variation des prix.
- *Identification du produit concurrent* : Le modèle conséquentiel devrait idéalement intégrer tous les produits concurrents affectés par un changement de la production.
- *Identification de la technologie marginale* : Elle prend aussi en compte les conséquences d'un changement sur les technologies affectées par celui-ci.

L'ACV conséquentielle représente un outil prometteur aux yeux de l'économie circulaire de par la prise en compte des relations existantes entre les différents systèmes. Le résultat d'une ACV conséquentielle ne traduit pas les impacts environnementaux de l'unité fonctionnelle en soi, mais bien les échanges environnementaux résultant d'une addition ou soustraction de l'unité fonctionnelle par rapport à l'inaction (UNEP, 2011).

### 2.3. The Circular Economy Toolkit [CET]

Il s'agit d'une grille d'analyse qui permet d'évaluer le potentiel d'amélioration d'un produit. Cet indicateur permet de synthétiser les opportunités circulaires d'un produit et aide donc les organisations dans une démarche d'économie circulaire (EpE, 2018).

L'outil détermine ses opportunités à travers 33 sous questions réparties en 7 catégories, présentées ci-dessous. On y retrouve les différents modèles d'affaires de l'économie circulaire (Le Moigne, 2018) et les différentes options créatrices de valeurs de celle-ci. Cet outil accompagne les organisations dans la sélection des opportunités de bénéfices qu'offre l'économie circulaire à travers ses différents modèles d'affaires (CircularEconomyToolkit.org, 2019).



Figure 7. Circular Economy Toolkit (Circulareconomytoolkit.org, 2019)

- **Design, Manufacture & Distribute:** Cette catégorie inclut la minimisation des matériaux utilisés ou le concept de dématérialisation. Cette dématérialisation peut être atteinte à travers la miniaturisation, allègement du poids du produit ou la transition d'un service physique vers le digital (Lennart & Ljunberg, 2007). Elle prend aussi en compte l'optimisation des matériaux utilisés et les efforts entrepris dans le développement d'une symbiose industrielle, à travers la collaboration démontrée et les potentielles synergies dues à la proximité géographique des organisations (Chertow, 2000).
- **Usage:** Cette catégorie a pour objectif d'analyser l'obsolescence du produit et donc de sa fréquence de remplacement. Elle stipule qu'en principe un produit qui a une durée de vie plus longue aura un impact moins fort sur l'environnement (Vannes & Cramer, 2006).
- **Maintain/Repair:** La maintenance des produits permet leur réinsertion et augment leur durée de vie et leur utilisation. Certains auteurs la considèrent comme la plus à même de restaurer un produit à son niveau de performance désiré tout en évitant l'impact d'un achat neuf sur l'environnement (Ajukumar & Gandhi, 2013).
- **Reuse/Redistribute:** Une manière d'allonger la durée de vie d'un produit est de le réutiliser directement. Cette catégorie est à considérer avec la consommation d'énergie tout au long

de la vie d'un produit. À titre d'exemple, les équipements électroniques auront tendance à consommer plus d'énergie et pourraient contrebalancer les bénéfices atteints suite à la réutilisation de ceux-ci (Truttmann & Rechberger, 2006).

- **Refurbish/Remanufacture:** La remise à neuf est un processus industriel de récupération de la valeur ajoutée au matériau lors de la fabrication du produit. Il est aussi possible de reconditionner la fonctionnalité d'origine du produit ou d'une partie de celui-ci comme neuf. Cependant, le processus derrière le reconditionnement n'est pas aussi complet que derrière la remise à neuf. Une amélioration de l'esthétique d'un produit peut être considérée comme un reconditionnement (Gray & Charter, 2007).
- **Product Recycling:** Le recyclage permet de réduire la mise en décharge et l'incinération des déchets et matériaux en fin de vie. Ceux-ci sont, dès lors, utilisés pour fabriquer de nouveaux produits.
- **Product as a Service:** On parle ici d'économie de la fonctionnalité. Au lieu de vendre des produits par transfert du droit de propriété sur l'objet. Le produit est payé par le client pour une certaine période de temps. Le fournisseur peut ainsi gérer le produit via sa conception, utilisation, maintenance, réutilisation et recyclage (Tukker, 2004), ce qui justifie son positionnement central ci-dessus (Ciculareconomytoolkit.org, 2019).

### **Limites du Circular Economy Toolkit**

Ainsi, cet outil représente plus majoritairement une grille d'analyse pour encourager la transition vers une production circulaire, qu'un réel indicateur permettant de comparer les organisations dans leur transition. En effet, cet outil peut être évalué comme superficiel pour englober la complexité de l'économie circulaire. La possibilité de réponse étant seulement triple pour chaque question, l'utilisateur peut avoir l'habitude de déplacer le curseur au milieu, menant à des erreurs d'interprétation (Saidani & al, 2017). Cependant, l'outil démontre une complétude assez large dans les catégories proposées mais ne prend pas en compte les niveaux supérieurs d'un indicateur authentiquement circulaire (Bourg, 2018). Le CET fournit une échelle en de trois couleurs pour identifier les opportunités d'amélioration à chaque étape du cycle de vie d'un produit (Griffiths & Cayzer, 2017).

## 2.4. The Circular Indicator Prototype [CEIP]

On retrouve une approche similaire à l'outil CET, avec une approche « produit ». Il permet de mesurer la circularité d'un produit à travers plusieurs questions sur chaque étape de son cycle de vie (EpE, 2018). Associé à un système de points, on obtient un résultat agrégé de la circularité du produit. Le développement du MCI incluait un projet pilote auprès de Kingfisher, une entreprise de rénovation résidentielle pour tester la méthode sur des produits réels. Le prototype d'indicateur circulaire ou CEIP, est construit sur le prototype qui ressort de ce projet pilote et appelé Kingfisher Circularity Calculator [KCC] (Griffiths & Cayzer, 2017).

Le CEIP a été construit en étendant le KCC à travers les étapes suivantes :

- Chaque question a une réponse idéale pour laquelle un maximum de points est attribué, et par conséquent, a une réponse la moins préférée pour laquelle aucun point n'est attribué.
- Le questionnaire contient 10 questions du KCC et 5 nouvelles en lien avec les principes d'économie circulaire présentés au point précédent 1.1.2.
- Les options de réponse incluent donc une échelle de « Non-circulaire » à « Idéalement circulaire ». Ainsi la définition d'un « Ideal Final Result » des variables est à déterminer. Celles-ci ont été identifiées à travers les interviews, une revue de littérature et le benchmark du KCC (Griffiths & Cayzer, 2017).
- Certaines étapes du cycle de vie sont présentées comme légèrement plus pertinentes que d'autres pour les principes de l'économie circulaire. Dès lors, il est supposé que des actions sur ces étapes entraîneront une plus grande réduction d'impacts sur l'environnement. Ces étapes reçoivent donc un nombre de points maximums disponibles afin de leur donner plus ou moins d'importance.<sup>26</sup>

Le CEIP utilise un questionnaire de 15 questions à points. Elles sont pondérées et divisées en 5 étapes du cycle de vie ; à savoir : la conception ou la refonte, la fabrication, la commercialisation, l'usage et la fin de vie du produit. La sortie est un score global des performances de circularité du produit, ainsi qu'un diagramme de Kiviat<sup>27</sup> montrant les performances de circularité sur les différentes parties du cycle de vie (Saidani & al, 2017).

---

<sup>26</sup> Respectivement; conception 27 points, fabrication, 25 points, commercialisation 30, usage 35 points, fin de vie du produit 35 points.

<sup>27</sup> Voir figure 6

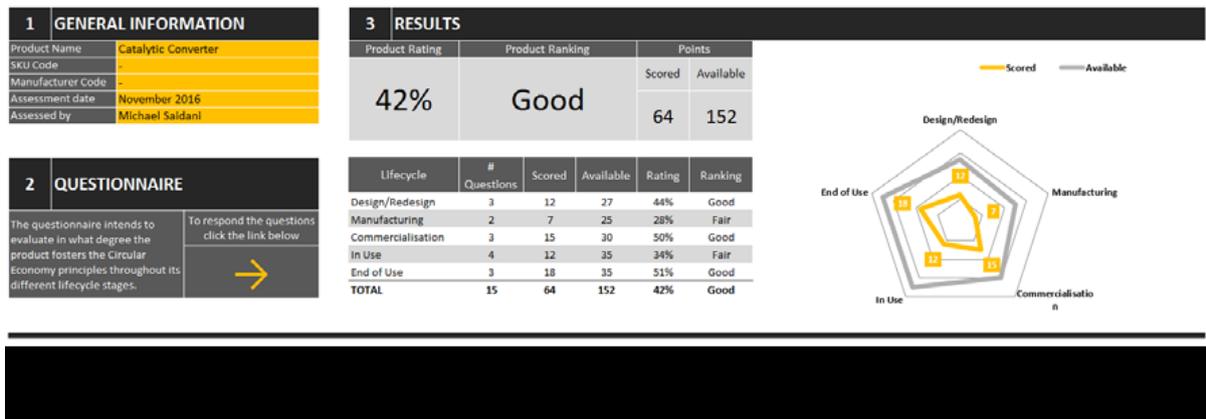


Figure 8. CEIP Output exemple

### Limites du CEIP

Le système de notation binaire utilisé pour certaines questions pourrait être assez réducteur. Les auteurs du CEIP reconnaissent, eux-mêmes, que la fiabilité du questionnaire repose sur le contexte spécifique de l'étude de cas. Dès lors, les 15 questions reposent majoritairement sur les étapes de fabrication et de fin de vie du produit du cycle de vie et par conséquent négligent certains aspects cruciaux de l'économie circulaires comme la modularité, la conception pour le démontage, la mise à niveau, utilisation de nouvelles technologies (Saidani & al, 2017). Les auteurs citent, donc, les limitations suivantes : dissimulation de la complexité, résultats potentiellement trompeurs, engagement superficiel dans la prise de décision, et le recours à des hypothèses spécifiques au contexte (Griffiths and Cayzer, 2017).

### 2.5. Material Flow Analysis [MFA]

L'analyse des flux de matériaux est une évaluation systématique des flux et stocks de matières au sein d'un système défini dans l'espace et dans le temps (Brunner & Rechberger, 2004). La MFA est une méthode qui peut notamment établir un inventaire pour une potentielle future LCA et se caractérise à par plusieurs objectifs (Gregory, 2000) :

- Définir un système de flux de matières et de stocks à l'échelle d'un territoire.
- Réduire la complexité du système tout en maintenant la base pour la prise de décision.
- Évaluer quantitativement les flux et les stocks pertinents, en vérifiant le bilan massique, les sensibilités et les incertitudes.

- Utiliser les résultats comme base pour la gestion des ressources, de l'environnement, et des déchets ;
  - En surveillant l'accumulation ou l'épuisement des stocks et les charges environnementales futures.
  - En concevant des produits, processus et systèmes respectueux de l'environnement.

Les MFA permettent, donc, de mesurer les flux et les stocks de matériaux sur un territoire donné durant une période donnée (EpE, 2018) en recensant, donc, « l'intégralité des flux de matières qui entrent dans le système socio-économique d'un territoire, y sont stockés ou rejetés dans la nature » (Commissariat Général Au Développement Durable [CGDD], 2014).

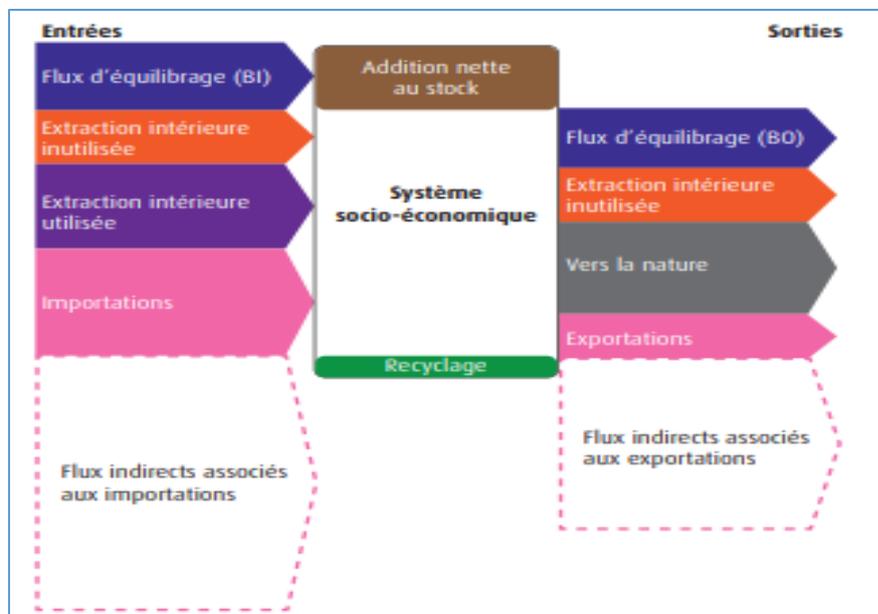


Figure 9. MFA schéma (CGDD, 2014).

Ainsi, on caractérise un métabolisme territorial<sup>28</sup> comme reposant sur la « quantification des flux de matières et d'énergie qu'il engendre » (CGDD, 2014). Il existe plusieurs méthodes en termes de comptabilité matérielle (Barles, 2009) :

- **Méthode « Bottom-up »** : Les flux de matières engendrés par chacune des activités humaines sont quantifiés et agrégés pour refléter le métabolisme territorial. On parle de méthode

<sup>28</sup> « Façon dont les territoires prélèvent, importent, transforment, consomment, rejettent, exportent énergie et matières » (CGDD, 2014).

ascendante, car elle est basée, en effet, sur une agrégation des données élémentaires (Brunner & Rechberger, 2004).

- **Méthode « Top Down »** : L'ensemble des flux entrants et sortants dans/du le système sont comptabilisés. Il n'y a pas d'analyses préalables des processus qui les unissent. On parle, ici, de méthode descendante, car elle est basée sur des données globales. La méthode mise au point par Eurostat pour réaliser les bilans nationaux (EW-MFA)<sup>29</sup> en est un exemple (CGDD, 2014).

Dès lors, la méthode proposée par la CGDD peut être décrite comme une adaptation de la méthode proposée par Eurostat et sert de base aux États membres de l'Union européenne pour fournir leurs comptes de flux de matières, en respect du Règlement 691/2011.<sup>30</sup>

L'objectif de la méthode EW-MFA est de décrire l'interaction physique de l'économie nationale avec l'environnement naturel et le reste de l'économie mondiale en termes de flux de matières. Ainsi les comptes de flux de matériaux dans l'ensemble de l'économie constituent un cadre comptable statistique qui enregistre, en milliers de tonnes par an, les flux de matières entrant et sortant d'une économie (Eurostat, 2018).

Enfin, elle permet de définir des indicateurs de suivi qui s'intéressent à la résilience des territoires comme des indicateurs d'entrée (Domestic Extraction Used [DMI], Direct Material Input [DMI], ...), des indicateurs de sortie (Domesteci Processed Output [DPO], Total Domestic Output [TDO], ...) des indicateurs de consommation, de stock, de balance commerciale physique ou d'efficience<sup>31</sup> (Aurez & Georgeault, 2016).

### **Limites d'une MFA**

Une MFA n'est pas un bilan énergétique et exclut, dès lors, les vecteurs énergétiques comme l'électricité. De plus, elle ne prend pas en compte les quantités d'eau consommées et requiert, donc, de réaliser une étude complémentaire du cycle de l'eau au sein d'un territoire<sup>32</sup>. Cet outil ne prend pas en compte certains enjeux environnementaux liés à des flux de masse très faibles en masses comme les pesticides ou certains métaux stratégiques.

---

<sup>29</sup> Appellation Eurostat (Eurostat, 2018)

<sup>30</sup> Relatif aux comptes économiques européens de l'environnement, annexe III.

<sup>31</sup> Liste complète de ces indicateurs dans « économie circulaire » de Vincent Aurez et Laurent Georgeault.

<sup>32</sup> Les flux d'eau sont trop importants au sein d'un même territoire et ombrageraient les autres flux (CGDD, 2014).

On recommande, généralement, de passer par des outils complémentaires comme une analyse des flux de substances<sup>33</sup> (CGDD, 2014). En effet, les MFA permettent d'identifier les grandes masses mises en jeu au sein des territoires mais certaines substances ne sont pas intégrées comme le carbone, grand contributeur au changement climatique. L'azote, tout aussi important, n'est pas pris en compte à travers cet outil. Celui-ci est pourtant aussi porteur d'enjeux environnementaux majeurs tels que la baisse de teneur en oxygène de l'eau, eutrophisation des milieux aquatiques, risques sanitaires, pollution acide, changement climatique. On parle de cascade de l'azote (Galloway & al, 2003). Cordell, quant à lui, nous informe sur les enjeux environnementaux liés au phosphore, notamment des conséquences en termes d'eutrophisation (CGDD, 2014).

Enfin, un compromis entre précision et charge de travail est nécessaire. Les produits d'importation/exportation manufacturés et donc multicomposites sont généralement classés parmi dans la catégorie de leur principal matériau.

## 2.6. Material Flow Cost Accounting [MFCA]

La méthode d'évaluation financière des pertes matières est une méthode normée<sup>34</sup>. Les flux et les stocks de matières sont, à travers la comptabilité MFCA, quantifiés ainsi que les coûts associés à ces flux de matières (ISO, 2018).

La MFCA est une méthode qui n'est pas exclusive et s'applique à toute organisation qui utilisent des matières et de l'énergie qu'importe sa structure, sa taille, son pays d'établissement ou le système comptable existant. Les informations résultantes d'une telle comptabilité sont une aide à la décision et une motivation à réduire ces flux de matières et par conséquent les coûts qui y sont inhérents. Le principe est simple et « *ne se distingue au final de la comptabilité analytique que par la prise en compte des déchets en tant que « produits négatifs » pour l'imputation des coûts* » (Aurez & Georgeault, 2016).

Elle complète notamment les pratiques de management environnemental déjà en place. Son plus grand avantage est qu'elle représente une méthode normée mais elle ne

---

<sup>33</sup> Elle vise à « *décrire et comprendre la circulation des éléments chimiques simples ou de certaines molécules porteuses d'enjeux* » (CGDD, 2014).

<sup>34</sup> ISO 14051 - 2011

couvre pas les procédures à mettre en place pour assurer une meilleure utilisation des ressources matérielles et énergétiques (ISO, 2018).

### **Limites de la MFCA**

La MFCA remplit sa fonction d'indicateur à titre informationnel en ce qui concerne les mouvements de matières. Cependant, il n'agrège pas les différentes dimensions de l'économie circulaire éclipse donc le concept de circularité presque entièrement.

Il s'agit d'un outil plus que d'un indicateur. Il permet d'assurer le suivi des matières et de sortir des grilles d'analyse mais ne traduit pas la circularité d'une organisation, car il ne se positionne pas quant à la quantité des flux de matières en termes d'impact environnemental.

### 2.7. Conclusion

De nombreux nouveaux indicateurs ont été dénombrés. Plus de 160 indicateurs recensés selon l'étude de l'EPE-INEC qui couvre les différentes dimensions de l'économie circulaire et du cycle de vie d'un produit. Ceux-ci se différencient de par leur portée, leur application, leur niveau de détail et leur complexité. Certains sont aussi spécifiques à certaines industries mais aucun référentiel commun n'est disponible à l'heure d'aujourd'hui. Plusieurs outils ont été décrits au point 2.1 et ont comme point commun d'intégrer la dimension environnementale dans les prises de décision.

Chacun d'entre eux témoigne de la complexité et de la pluridisciplinarité des questions environnementales. Cette complexité se traduit à plusieurs niveaux<sup>35</sup> et dénonce les nombreuses faiblesses de chacun de ces indicateurs.

Enfin, le constat fait à travers cet état des lieux est l'absence des références faites au biomimétisme dans la construction des indicateurs de circularité. La nature étant la représentante le plus expérimentée en termes de circularité, d'optimisation et d'équilibre, les leçons que nous pourrions tirer d'une telle approche sont à analyser.

Dès lors, la troisième partie de ce mémoire s'exercera à mettre en exergue les éléments d'un indicateur biomimétique qui intègre les différentes dimensions de l'économie circulaire afin de tester la circularité authentique et naturelle des approches circulaires.

---

<sup>35</sup> Nano, micro, méso et macro

## Partie III : Contribution du biomimétisme dans la création et la gestion d'indicateurs écocirculaires

### 3.1. Biomimétisme et économie circulaire

Cette troisième partie a pour objectif de mettre en relation les principes de l'économie circulaire aux principes du vivant<sup>36</sup>. Elle permet de témoigner de la forte complémentarité du biomimétisme au concept d'économie circulaire et d'en élargir l'horizon aux limites planétaires. Elle met, à son tour, en évidence les faiblesses actuelles des indicateurs proposés et recentre le débat d'un indicateur écocirculaire autour d'une vision biomimétique.

Elle analyse ainsi à travers les 6 principes du vivant<sup>37</sup> les leçons que nous devrions retenir de la nature dans la définition d'une circularité authentique. Chacun de ces principes nous permet d'entrer en relation avec les principes mêmes de l'économie circulaire. Cette approche s'aligne avec les pratiques de l'économie écologique en recentrant nos pratiques de mesures économiques au sein du système terre et de ses limites naturelles. Cette troisième partie s'intéresse à répondre à la question de recherche initiale en *évaluant le biomimétisme comme une piste potentielle intéressante à investiguer dans la création d'indicateurs de circularité robustes*.

Une approche prise, avec la conviction certaine qu'intégrer les dimensions naturelles et les limites planétaires dans chaque étape de nos recherches, de nos productions et de notre consommation est l'unique approche qui fait sens à l'heure d'aujourd'hui.

Ainsi, là où l'économie circulaire est considérée, à travers la littérature actuelle, comme la promesse d'un avenir meilleur et la solution face au défi climatique de notre ère, elle ne remet que rarement en question l'idée d'une croissance positive et durable. Cette critique de l'économie circulaire est, a priori, la plus aboutie, et questionne notre manière d'incorporer la dimension environnementale dans notre pensée individualiste d'une croissance durable.

Le biomimétisme de Janine Benyus ou l'économie permacirculaire, dont les prémisses ont été développées par Arnsperger et Bourg sont d'autant plus des pistes à suivre. Là où le

---

<sup>36</sup> Hoagland & Dodson – *exploring the way life work* en relation avec les *Life's Principles* développés par Biomimicry 3.8.

<sup>37</sup> Développés par l'organisation de Janine Benyus.

biomimétisme recentre l'être humain et son économie comme partie d'un écosystème beaucoup plus large, l'économie permacirculaire « *s'inscrit délibérément dans la perspective d'une **sobriété volontaire*** »<sup>38</sup> à construire sur la base de la **réduction**. Ces deux notions se rencontrent, ainsi, dans leur volonté de s'insérer au sein d'un écosystème aux ressources finies et dans la remise en question de notre modèle actuel à la source, et donc de la croissance elle-même.

Ainsi cette troisième partie se veut traductrice et transpositrice des concepts du biomimétisme au sein du débat sur la nécessité de nouveaux indicateurs dans une transition vers un modèle économique circulaire. Comme le développement durable et la croissance verte, l'économie circulaire se heurte, aujourd'hui, déjà à ses premières limites. Les indicateurs existant actuellement en démontrent d'ailleurs leurs faiblesses rapidement et à tous les niveaux<sup>39</sup>. Cette partie a pour objectif de compléter la définition de circularité pour pallier à ses premières limites et orienter la construction d'indicateurs circulaires les plus aboutis possible.

Pour ce faire, les 6 principes du vivant et leurs sous-principes viennent éclairer la définition même de circularité afin d'en déterminer les dimensions les plus pertinentes pour dresser des indicateurs appropriés.

### 3.1.1. Évoluer pour survivre

« *Nous devons faire face à l'opposition des intérêts particuliers en place, qui défendent le statu quo et plaident contre le changement* » (Pauli, 2018). Ce principe du vivant s'illustre à travers de nombreux exemples naturels mais aussi dans notre économie. Il stipule que l'innovation et le changement sont des tendances naturelles et de longévité.

Ainsi la mort peut être vue comme un principe du vivant. Par conséquent, « *chaque système auto-organisé, au cours de sa trajectoire cyclique, passe tôt ou tard par le stade de la destruction créatrice* » (Chapelle, 2015). En effet, chaque système est dépendant des autres et la non-synchronisation de celui-ci avec les autres engendre généralement sa destruction.

---

<sup>38</sup> Arnsperger & Bourg, 2016

<sup>39</sup> Nano, micro, méso, macro

Ce principe remet en cause nos modèles de gestion et, par conséquent, promulgue l'innovation et le changement comme source naturelle d'équilibre. Il dénonce l'attitude manichéenne de nos activités et à la source des maux d'aujourd'hui, accentué par notre désir de maximiser toute chose (Pauli, 2018). Attitude qui pousse à la maximisation d'un seul élément et à la concurrence individualiste, en isolant les parties d'un système plus grand.

Ainsi à travers ce principe, l'innovation se traduit comme facteur de notre survie et nous incite à évoluer et à encourager la naissance de solutions qui relèvent les défis actuels. On y retrouve les 3 niveaux du biomimétisme, décrit par Janine Benyus. L'innovation peut s'incarner à travers un biomimétisme des formes, des matériaux et procédés, ainsi que son niveau le moins technique, celui des relations entre les différentes espèces. Ce troisième niveau implique des changements de mentalités importants et donne sa cohérence à l'ensemble (Chapelle, 2015).

Eiji Nakatsu, l'inventeur du nez du Shinkansen<sup>40</sup> en forme du bec d'un martin-pêcheur conclut que « *Ce n'est pas pour conquérir la nature qu'un hibou ou un martin-pêcheur ont acquis leurs plumes ou leur bec. S'ils ont évolué de la sorte, c'est d'abord parce que ces procédés leur ont permis de rester en vie* ».

### ***Reproduire les stratégies qui fonctionnent***

L'innovation comme un paramètre à notre survie semble être une des leçons qui ressort de ce premier principe du vivant. Les trois niveaux du biomimétisme offrent des opportunités d'innovation infinies où les sources de réductions énergétiques, et de matériaux sont à la portée de nos yeux. Dès lors, pourquoi les indicateurs écocirculaires actuels ne mesurent-ils pas les **montants investis en R&D** dans un contexte d'entreprise? Ou le nombre de brevets déposés dans des domaines environnementaux? Et plus particulièrement dans les projets inspirés de la nature et qui ont prouvé leur efficacité à travers les âges. Pourquoi les indicateurs écocirculaires n'intègrent-ils pas les **montants subsidiés aux énergies renouvelables**? En 2010, l'Agence Internationale de l'énergie calculait encore que dans le monde les « *soutiens publics aux combustibles fossiles s'élevaient à 400 milliards de dollars* » (Chapelle, 2015). Soit six fois plus que ceux alloués aux énergies renouvelables.

---

<sup>40</sup> Train à grande vitesse japonais

Celui-ci ne correspond pas à notre volonté d'innover et de se diriger vers une économie plus durable ? Intégrer cette mesure au sein d'un indicateur d'écocircularité permettrait d'encourager ce type d'investissements et traduirait une volonté de sobriété volontaire en allouant des fonds monétaires à des projets pensés et développés à travers leurs écosystèmes.

De plus, les investissements dans des projets de réduction énergétique et de matières devraient en théorie accélérer notre transition vers une économie durable, excluant l'effet rebond. Évaluer les montants investis nous permettrait ainsi d'évaluer indirectement cette volonté de se développer à travers un modèle qui ne maximise plus la croissance mais optimise l'intégration des activités économiques d'origine anthropiques au sein de notre planète.

Une circularité authentique se doit de montrer une capacité d'évolution, à travers la recherche et la découverte constante de modèles qui fonctionnent et qui sont durables. La Terre est actuellement notre source de modèles durables la plus expérimentée.

### ***Intégrer l'inattendu***

Évoluer pour survivre se traduit aussi par la prise en compte de scénarios inattendus. Inattendu se réfère aussi bien aux scénarios peu probables qu'aux scénarios inconnus dus à notre manque d'expertise et de connaissances dans certains domaines, ainsi qu'aux multiples relations systémiques qui peuvent exister. Ce second point implique, non seulement, une remise en question de l'Homme comme technicien contrôlant la nature. En ce sens, que l'homme ne peut pas tout contrôler et que certains scénarios se dérouleront indépendamment de ses décisions. Ensuite, il met en exergue la dimension de ***long terme*** et des conséquences de leurs décisions sur une période de temps plus longue que la vie d'un homme, mais aussi justifie la nécessité d'un caractère circulaire dans chaque processus biologique et économique, car elle permet l'autorégulation et d'« *apprivoiser l'imprévu* » en opérant les ajustements nécessaires tout le long des processus (Hoagland & Dodson, 1998).

En droit international, les principes de prévention et de précaution en démontrent déjà les premiers aboutissants. Les deux principes cités ci-avant ci se différencient quant à l'incertitude scientifique qui peut découler d'une décision. Ainsi, le principe de précaution

sera d'application en cas d'incertitude scientifique, là où les risques sont clairement identifiés dans le principe de prévention.

Cette traduction du premier principe du biomimétisme souligne un trait important dans le débat sur la construction d'un indicateur circulaire pertinent. Tout n'est pas mesurable ni prévisible (UNESCO, 2009). Ainsi un indicateur écocirculaire ne se doit-il pas d'intégrer certaines **dimensions qualitatives** ; là où la littérature actuelle de nous décrit que des indicateurs quantitatifs. Par exemple, un taux de recyclage élevé d'un matériau ne démontre pas une circularité authentique plus élevée si l'effet rebond en consume tous les gains, où que la demande pour celui-ci augmente plus que proportionnellement (Arnsperger, Bourg, 2016).

Dès lors, une intégration d'indicateurs qualitatifs nous permettrait d'évaluer plus distinctement le progrès atteint pour nous ramener au sein des limites de notre planète. Cependant, ces indicateurs qualitatifs demande un domaine de référence, lui-même, établi par exemple à travers **9 limites planétaires** décrites par Rockström (UNESCO, 2009).

Cette approche du premier principe est liée au caractère évolutif de survie en ce sens qu'il recentre nos activités comme dans un domaine de référence « *dont nous n'aurions pas dû sortir* » (Bourg, 2017) et dans l'innovation dont nous devons faire preuve pour nous ramener au sein de ces limites. De plus, il insiste sur la nécessité de mesurer un impact réel à travers des indicateurs qualitatifs. À titre d'exemple, s'assurer que **100% des projets sont soumis aux principes de précaution et de prévention**. Un indicateur à première vue difficile à mettre en place étant donné la longueur des études d'impact actuellement, mais qui permettrait d'assurer un impact réel en termes de circularité.

### **Remanier l'information**

Cette approche-ci remet en question notre manière actuelle de manier l'information. Celle-ci est, généralement, simplifiée à travers des indicateurs économiques mais s'illustre aussi à travers nos systèmes comptables et les obligations légales de divulgation qui en découlent. À titre de réflexion, la taxe sur la valeur ajoutée ne constitue-t-elle pas un non-sens total aux yeux d'une circularité authentique ? Notre comptabilité et donc notre manière d'agencer l'information n'individualise-t-elle pas les sociétés ?

Notre manière de manier l'information n'a-t-elle pas, in fine, un effet pervers sur nos activités ? Est-il possible de remanier l'information de manière à encourager une circularité authentique ? C'est à travers cette question qu'il nous serait possible d'imaginer de nouveaux indicateurs de circularité.

Ainsi, la construction d'un indicateur écocirculaire authentique pourrait aussi profiter de cette leçon de manière intrinsèque et extrinsèque. C'est-à-dire que dans sa propre construction, cet indicateur doit s'affranchir des dictats actuels afin de refléter une réelle mesure de la circularité ; et ce, aux 4 différents niveaux. Mais aussi, en encourageant la transition vers une information remaniée de manière à avoir un impact positif sur nos activités.

Cette approche nous encourage ainsi à remanier l'information de manière constante pour évoluer et justifie le besoin de créer de nouveaux indicateurs comme paramètre de survie. L'information est : « *la clé pour maintenir le vivant ... en vie* » (Chapelle, 2015). En effet, c'est l'information qui organise la vie et il est donc nécessaire de la remanier pour en faire ressortir ses cercles les plus vertueux.

### 3.1.2. Utiliser efficacement les ressources

Il s'agit, ici, certainement d'un des principes du vivant les plus faciles à transcrire dans nos indicateurs économiques, et qui dans bien des situations s'avère être fatal. Principe qui, au jour le jour, devient de plus en plus important pour l'Homme aussi. Ce principe se décline à travers plusieurs sous-principes dont les dérivés sont souvent capturés par les indicateurs de circularité actuels.

#### ***Utiliser des procédés économes en énergie***

Être économe en énergie dépensée est un principe du vivant qui traduit une question de vie ou de mort pour beaucoup d'organismes. Le soleil nous fournit une quantité d'énergie incroyable<sup>41</sup> dont une infime partie est captée et utilisée à travers les activités anthropiques. En effet, la consommation énergétique mondiale est toujours basée à plus de 80% sur les

---

<sup>41</sup> 342,5 w/m<sup>2</sup> (Pattyn, 2019).

énergies fossiles (International Energy Agency [IEA], 2019). Celles-ci étant majoritairement génératrices d'émissions de CO<sub>2</sub> comparé aux énergies renouvelables<sup>42</sup>.

Les trois niveaux du biomimétisme peuvent s'illustrer à travers ce principe. Les formes de la nature sont, généralement, optimisées pour réduire la consommation d'énergie à son minimum. Les processus chimiques se déroulent généralement à température ambiante et les espèces développent des relations de symbiose en vue d'économiser de l'énergie. Cependant, notre consommation croissante d'énergie a des impacts considérables sur l'environnement, d'autant plus si on considère le mix énergétique actuel.

En effet, l'énergie totale moyenne fournie par m<sup>2</sup> est plafonnée et celle-ci doit être partagée équitablement entre les différents organismes terrestres, qui font preuve d'ingéniosité pour en économiser un maximum. Notre consommation actuelle, en tenant compte de son mix énergétique, est aussi limitée par les ressources disponibles sur Terre. Dès lors, une croissance infinie n'est pas possible si un plafond existe. Cette approche dénonce ainsi le manque d'éco-efficience de nos procédés basés sur des ressources dont le plafond s'annonce de plus en plus proche.

Par conséquent, un indicateur écocirculaire devrait être capable d'évaluer l'éco-efficience des procédés en jeu, à travers par exemple, le **pourcentage d'énergie renouvelable consommée** sur le cycle de vie, l'**intensité énergétique d'usage** d'un produit par rapport à ses substituts ou encore le **taux de retour énergétique**<sup>43</sup> (TRE, ou EROI) (Chapelle, 2015).

### ***Utiliser un design multifonctionnel***

La nature optimise, là où l'humanité maximise. La productivité et la performance technologique semblent justifier et dominer le design de nos produits et de nos activités. Cependant, la nature se défend de présenter des structures multifonctionnelles dans un but d'optimisation et non de maximisation.

---

<sup>42</sup> En 2015, les émissions de CO<sub>2</sub> relatives au charbon et au pétrole s'élevaient respectivement à 14.536 Mt et 11.111 Mt.

<sup>43</sup> Rapport entre la quantité d'énergie utilisable et celle dépensée pour l'obtenir (Chapelle, 2015).

L'optimisation est par défaut multifonctionnelle contrairement à la maximisation qui s'intéresse à doper un paramètre au dépit des autres. Dès lors, le biomimétisme nous offre les opportunités d'inspirer nos structures de manière à optimiser.

Ce sous-principe se traduit à travers tous les niveaux, du nano avec le choix d'un matériau rare par exemple pour diminuer le poids général d'un téléphone portable au détriment des coûts d'extraction et de l'épuisement de la ressource jusqu'au niveau macro avec des impacts mondiaux généralisés comme le réchauffement climatique.

Ainsi, au niveau macroéconomique, l'ère industrielle démontre une maximisation de la croissance au détriment complet de l'environnement.

### ***Recycler tous les matériaux***

On retrouve, ici, un des piliers même de l'économie circulaire. La plupart des indicateurs actuels prennent en compte d'une manière ou d'une autre ce principe du vivant. Les échanges de matière sur Terre se déroulent de manière tellement fluide, que la distinction entre déchet et nourriture est parfois complètement désuète. Le recyclage intervient comme processus naturel et assure la circularité complète des matériaux. Intervention largement oubliée depuis notre entrée dans l'ère industrielle (Chapelle, 2015).

Les indicateurs se formulent de manière assez explicite pour intégrer ce principe au sein des mesures de circularité.

### ***Adapter la forme à la fonction***

On identifie rapidement les bénéfices apportés dans le biomimétisme de forme à travers ce principe du vivant. La nature a pour habitude d'optimiser et non de maximiser (Biomimicry 3.8, 2015). Ce sous-principe conduit à une utilisation plus efficace des ressources à travers l'énergie et la matière économisée résultant d'une adaptation de la forme à la fonction.

La nature présente des formes modulées pour servir au mieux les besoins de ses organismes. Ses formes ont des fonctions précises qui permettent à ses besoins d'être assouvis. On peut relier ce sous-principe à la notion d'écoconception souvent cité parmi les modules de l'économie circulaire. En effet, adapter la forme à la fonction tend vers la réduction des mêmes impacts recherchés par l'écoconception.

Ainsi, l'écoconception est une notion beaucoup plus large et s'intéresse aussi à la modularité des produits. Cependant, cette dimension n'a pas été observée parmi les indicateurs actuels. Le Shinkansen est un bel exemple d'adaptation de la forme menant à une utilisation plus économe des ressources énergétiques. Ainsi, la forme d'un produit peut avoir un impact réel sur sa circularité. Dès lors, un indicateur de circularité pourrait bénéficier d'une **métrique rendant compte de la forme la plus adaptée à une fonction bien précise.**

### 3.1.3. S'adapter aux changements de conditions

La nature nous démontre au jour le jour que la faculté de s'adapter est signe de longévité et de durabilité. Seuls les organismes qui ont été capables de faire preuve d'évolution sont encore là pour en témoigner. La circularité est, elle-même, signe de durabilité de par sa dimension cyclique qui lui permet de s'adapter en s'améliorant à chaque itération. Dès lors, cette capacité d'adaptation devrait faire partie intégrante de la définition de circularité et s'en retrouver mesurée par des indicateurs écocirculaires adéquats. Les 3 sous-principes ci-dessous nous permettent d'en délimiter l'horizon.

#### ***Inclure la diversité***

Elle est signe de durabilité, car elle renforce la résilience d'un écosystème aux changements de conditions. Dans le contexte climatique actuel, les risques liés au climat sont de plus en plus pris en considération dans les prises de décision.

Les organisations doivent se diversifier pour faire face à des changements majeurs liés au climat. Les lobbies industriels représentent peut-être le plus gros frein à cette diversité nécessaire en immobilisant des changements radicaux dans la consommation et la production, isolant à l'innovation.

Son inclusion dans une mesure de la circularité peut se traduire de plusieurs manières et à plusieurs niveaux. Des indicateurs quantitatifs comme la diversification d'un portefeuille d'actions, la diversification d'un portefeuille de clients et de fournisseurs ou encore la diversification dans des activités responsables moins sujettes à un changement radical de la consommation. Ensuite, à travers des indicateurs qualitatifs pour mesurer le degré d'évolution des mentalités et des priorités (Aurez & Georgeault, 2016).

### ***Préserver l'équilibre par autorégénération***

On se retrouve à travers ce sous-principe dans une démarche plus qualitative pour évaluer le progrès et l'évolution vers une économie plus symbiotique et régénérative. Il stipule qu'établir des synergies avec la nature, nous permettrait de préserver l'équilibre général et local par autorégénération. On rejoint aussi la notion de soutenabilité forte et des flux de matières qu'elle implique.

Ainsi, l'évaluation de la circularité d'un système implique que le taux de substitution de ressources non renouvelables par des ressources renouvelables augmente proportionnellement plus que la demande pour la ressource non renouvelable. Autrement dit, l'autorégénération n'est pas possible et absorbée par une économie en croissance (Labbé, 2016). Ainsi, un indicateur de circularité devrait être **dynamique** pour intégrer une vision systémique en mesurant le « *potentiel de déstabilisation de la circularité au temps t par la croissance des volumes en t+1, t+2, etc* » (Aurez & Georgeault, 2016).

### ***Renforcer la résilience***

On identifie une structure en pairs pour éviter les défaillances et renforcer la résilience. Les écosystèmes vivants fonctionnent à travers la coopération libre et autonome d'un grand nombre d'espèces (Delannoy, 2017). Il n'y a pas une centralisation de la ressource par un acteur et redistribution vers les autres acteurs.

Renforcer cette résilience signifie aussi diminuer nos dépendances aux énergies fossiles pour lesquelles un basculement est de plus en plus proche. Diversifier notre mix énergétique en favorisant les énergies renouvelables se traduit aussi comme un renforcement de la résilience.

Le ***Resilience Design Toolkit*** [RDT] représente une boîte à outils permettant la co-création de résilience au sein des organisations ; source de circularité (Dartevelle, 2016). Chapelle retire 2 leçons majeures à retenir des écosystèmes résilients :

- Une *diversité fonctionnelle*<sup>44</sup> & une *diversité de réponses élevées*<sup>45</sup>

---

<sup>44</sup> Permettre à chaque fonction d'être assurée par une diversité d'acteurs

<sup>45</sup> Assurer une diversité de réponses aux chocs imprévus des acteurs.

- Un *réseau de rétroaction* suffisamment dense<sup>46</sup>

#### 3.1.4. Unir développement et croissance

Le mot « croissance » doit être interprété différemment du sens donné précédemment. Il s'agit d'un principe du vivant qui n'a donc pas de connotation économique à l'origine. La nature fait preuve d'une circularité parfaite<sup>47</sup> en termes de flux de matières et unit croissance et développement à travers 3 sous-principes détaillés ci-après. Cette croissance est définie par l'opportunisme de la nature et sa *diversification verticale*.

#### ***Combiner composants modulaires et emboîtés***

La matière est intégralement recyclée dans les écosystèmes vivants et se résume par la faculté de la biodiversité à développer un moyen de transformer n'importe quel déchet produit par un organisme en une matière première pour un autre organisme (Chapelle, 2015). Cette circularité est entre d'autres assurée par les décomposeurs, qui assurent la décomposition de la matière organique dans les chaînes trophiques. On peut donc identifier un processus de synthétisation/décomposition de la matière dans une boucle infinie.

Cette observation nous permet de questionner nos modes de production actuels. Elle souligne l'importance, pour nos produits, d'être décomposables en sous-produits réutilisables. Ce principe encourage nos modes de production à s'inspirer de la nature pour mettre au point des produits dont le démontage serait facile et dont la matière pourrait être réincorporée dans nos activités de manière presque instantanée.

Ainsi, un indicateur évaluant la circularité d'un produit pourrait envisager d'intégrer des mesures sur les ***coûts d'un démontage complet*** en matériaux vierges, ainsi que la ***proportion de chaque produit réutilisable après démontage***. C'est pourquoi ce sous-principe promeut la combinaison de composants modulaires et emboîtés, afin d'assurer un démontage plus circulaire d'un point de vue énergétique mais surtout afin d'encourager la réutilisation sans avoir besoin d'extraire davantage de ressources sur l'environnement.

#### ***S'organiser de manière ascendante***

---

<sup>46</sup> Assurer une circulation rapide de l'information, pour encourager les boucles de rétroaction

<sup>47</sup> Jusqu'à preuve du contraire.

La vie est créée à partir d'atomes qui s'assemblent pour former des molécules qui, à leurs tours, s'assemblent pour former des cellules, déterminant la vie sur Terre. Cette organisation du bas vers le haut tient son importance et justifie la nécessité de distinguer les indicateurs écocirculaires par niveaux.

Ce sont les innovations et les progrès réalisés sur notre niveau le plus bas qui peuvent initier un changement radical des mentalités sur le niveau sociotechnique. La **perspective multiniveaux** [MLP] en est un exemple. Ainsi on retrouve au premier niveau les niches technologiques, dont les différents éléments se lient graduellement, pour se stabiliser en une structure dominante. Celles-ci percent le régime sociotechnique, second niveau, à travers des fenêtres d'opportunités pour s'implanter et modifier celui-ci. Ce régime qui présente une certaine stabilité dynamique influence le paysage sociotechnique, troisième et dernier niveau.

La circularité associée à chaque niveau pourrait donc bénéficier d'une définition de forme spécifique à chacun d'eux. Cette distinction ne justifie aucunement une indépendance entre les niveaux mais plutôt un mode d'organisation naturel et dont la circularité globale de fond bénéficierait.

Ainsi, ce sous-principe illustre l'importance d'une pensée et de mesures systémiques. Les indicateurs écocirculaires se concentrent majoritairement sur le niveau opérationnel et entrepreneurial comme démontré dans la partie II<sup>48</sup>. Cependant, une circularité authentique, au sens de Bourg et Arnsperger, ne peut se définir seulement sur le premier niveau et ce principe du vivant rejoint ce raisonnement ; le développement par le bas permettant la croissance.

### ***S'auto-organiser***

Cette approche ne défend pas une indépendance des niveaux entre eux ou l'isolement d'un écosystème par rapport à un autre mais témoigne des caractéristiques propres à chaque écosystème et de l'organisation qui se développe autour de celles-ci.

---

<sup>48</sup> Une redéfinition au besoin croissant d'indicateurs adaptés

Elle vient remettre en question notre architecture organisationnelle dont la structure hiérarchique se caractérise par une chaîne de commandement du haut de la pyramide vers le bas (Chapelle, 2015).

Elle conteste la durabilité de ce mode de fonctionnement et par conséquent la circularité même de nos structures les plus fréquentes. Dans les écosystèmes vivants, les décisions sont prises localement, suite à l'ensemble de microdécisions dont des réponses adaptatives peuvent émerger. Chapelle stipule qu'il n'existe pas d'écosystèmes centralisés et s'il y en a eu, ils n'ont pas survécu.

Ainsi, ce critère d'auto-organisation se révèle comme indicateur de durabilité et par conséquent de circularité. À travers un monde à l'instabilité croissante et aux perturbateurs climatiques de plus en plus fréquents, le gigantisme centralisé démontre ses premières faiblesses.

Le ***self-management*** est un exemple d'application d'une structure décentralisée s'inspirant de ce sous-principe. Cependant, il ne sera pas développé en détail mais reste ouvert à de futures recherches quant à sa durabilité.

#### 3.1.5. Être branché sur son milieu et réactif

Ce 5<sup>e</sup> principe découle du sous-principe d'auto-organisation et accentue l'importance d'une gestion locale et dynamique, ou « branchée sur son milieu et réactive ». Cette dimension s'illustre à travers l'émancipation d'une structure non hiérarchisée et d'un développement des économies locales comme source de circularité.

#### ***Utiliser une énergie et des matériaux facilement accessibles***

« *Partout il est possible de (re)découvrir des flux de nutriments, de matières et d'énergies, parce que la nature est partout* » (Pauli, 2018). Inconnues ou connues, les ressources locales existent toujours et fournissent des possibilités de développement remarquables. L'idée est, ici, de changer de paradigme et d'abolir notre conception de nutriments, matière et énergies. Se brancher à son milieu permet la reconnaissance des interrelations qui fournissent de la matière et de l'énergie. Cette vision se lie au prochain sous-principe qui souligne l'intérêt de cultiver les relations de coopération.

Il est important de s'inspirer de la nature afin de trouver les substituts à nos activités de manière locale. Gunter Pauli identifie, à travers cette tendance<sup>49</sup>, une « *logique de regroupement et de la production en cascade selon les lois de la nature* » dont les bénéfices se captent mieux au niveau local. Cette production en cascade se caractérise par une diversification nette des activités de production à travers l'optimisation de l'usage des flux de nutriments et d'énergie. Les bénéfices sont doubles, à travers les possibilités de croissance mais aussi à travers la régénération de la biodiversité, et le renforcement de la résilience économique et sociale dans économies locales (Pauli, 2018).

### ***Cultiver les relations de coopération***

Le principe ci-dessus introduit celui-ci en soulignant l'importance de se fournir en matériaux et énergie faciles d'accès. Cette facilité se caractérise bien sûr aussi à travers la distance qui sépare les activités des ressources.

Ainsi, on retrouve la notion de symbiose industrielle, bien connue de l'économie circulaire où la notion de déchets est transposée vers la notion de ressources. Cependant, cette notion est complétée par l'importance de l'origine des intrants, qui se veut locale à travers ce principe du vivant.

Ce principe nous pousse ainsi à mesurer le degré de dépendance locale des intrants de nos activités en opposition au degré de dépendance internationale de ceux-ci ; se justifiant à travers une résilience plus élevée.

### ***Investir dans les processus cycliques***

Ce principe dont la connotation est auto-explicite permet de mettre en contraste l'importance donnée à la circularité même des processus dans une évaluation de la circularité elle-même. Là où l'économie circulaire en fait son cheval de Troie, le biomimétisme cite celui-ci comme un principe parmi d'autres. Il permet ainsi de distinguer cette notion de circularité de celle offerte par le concept d'économie circulaire dont l'objectif principal, entendu par la commission européenne, est de « *stimuler sa compétitivité au niveau mondial, promouvoir une croissance économique durable et créer de nouveaux emplois* » (Commission Européenne, 2015).

---

<sup>49</sup> Qu'il nomme « De « utilisez ce que vous pouvez avoir... à « utilisez ce que vous avez » » (Pauli, 2018).

Investir dans les processus cycliques est un principe dont la prise en compte est nécessaire dans l'évaluation de la circularité entendue par le biomimétisme au même titre que les autres principes.

### ***Utiliser les boucles de rétroaction***

Ces boucles de rétroaction ont déjà été identifiées à travers le développement ascendant du 4<sup>e</sup> principe. Celui-ci souligne l'importance des agents locaux, dans l'émergence d'un système écosystémique global. Ce principe nous encourage à bénéficier de ces boucles afin de former et d'interagir avec notre environnement.

Il permet donc de sensibiliser nos activités anthropiques à s'inclure dans un système plus large. Ces boucles traduisent l'impact que nos activités même individuelles peuvent provoquer sur de notre environnement. Il illustre aussi, par la même occasion, le pouvoir multiplicateur impressionnant dont peuvent bénéficier ces innovations.

#### 3.1.6. Utiliser une chimie respectueuse du vivant

Le biomimétisme se présente, à nouveau, comme une inspiration pour résoudre la pression croissante de notre manière de produire nos matériaux, ainsi que les défis qui s'offrent à nous : recyclabilité, biodégradabilité, coût énergétique, rareté ou toxicité. Le vivant illustre à travers les matériaux qu'il synthétise tous les jours qu'il est possible de couvrir ses propres besoins à travers des matériaux biodégradables, au coût énergétique faible et à la toxicité nulle, ou absorbable par l'environnement.

Anastas et Warner<sup>50</sup> ont, d'ailleurs, posé dès 1998 les bases d'une chimie « verte » bien avant l'avènement du biomimétisme. Ils ont établi une liste de 12 principes, devenue une référence mondiale aujourd'hui et dont les liens avec les 3 sous-principes ci-dessous sont évidents. Seulement combien de ces principes sont inclus dans le cahier des charges des ingénieurs ? Si la chimie verte est caractéristique de la circularité des organismes vivants, en mesurer ses applications dans nos activités semble, à première vue, pertinent.

### ***Construire à bon escient en utilisant peu d'éléments***

---

<sup>50</sup> Professeurs émérites, respectivement à l'université de Yale et du Massachusetts.

Plus de 96% de la matière vivante est constituée de 6 atomes, à savoir le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le soufre et le phosphore. Ce constat illustre le principe ci-dessus ; le vivant construit à partir d'une sélection réduite d'éléments.

La nature démontre ainsi une association sans fin de ces atomes pour créer des matériaux dont les propriétés surpassent souvent nos matériaux de synthèse mais surtout respectent l'environnement.

On retrouve sous le 7<sup>e</sup> principe l'importance d'utiliser des ressources renouvelables plutôt que des produits fossiles et sous le 8<sup>e</sup>, l'importance de réduire le nombre de dérivés, car ils produisent des déchets.

Cette approche de la chimie verte démontre ainsi des premières pistes d'amélioration dans l'utilisation accrue des matériaux rares ou de la toxicité ; le mercure, l'uranium ou le plomb<sup>51</sup> ne faisant pas partie des 6 atomes précédemment cités.

Ainsi, l'innovation est, à nouveau encouragée à travers la recherche d'une chimie plus « verte » et les possibilités presque infinies que nous proposent ces 6 atomes de base.

### ***Décomposer les produits en éléments inoffensifs***

Le vivant synthétise ces propres matériaux en respectant les 12 principes de la chimie verte et dont les propriétés n'ont généralement rien à envier aux matériaux synthétisés par la chimie chaude anthropique. Le 10<sup>e</sup> principe stipule que « *les produits chimiques doivent être conçus de telle sorte qu'en fin d'utilisation ils se décomposent en déchets inoffensifs biodégradables* » (UNESCO, 2015).

On retrouve ce principe reflété dans un indicateur de circularité : le CET, avec une mesure sur la biodégradabilité du produit ou la toxicité des matériaux utilisés. Cependant, celles-ci restent majoritairement absentes des autres indicateurs de circularité.

---

<sup>51</sup> La liste des atomes les plus nocifs pour les êtres humains n'étant bien sûr pas exhaustive.

## ***Pratiquer la chimie dans l'eau***

La pétrochimie dont sont issus la plupart de nos matériaux est opposable presque en tous points à la chimie du vivant. Ces organismes synthétisent « *leurs matériaux dans ou à la surface de leurs cellules* » (Chapelle, 2015). Ce qui implique une chimie à 3 principes :

- Température ambiante ;
- Pression ambiante ;
- Solvants entièrement compatibles avec le reste de leur chimie ;

Le 5<sup>e</sup> principe de la liste d'Anastas & Warner stipule d'ailleurs qu'il est nécessaire de choisir des solvants et auxiliaires moins polluants (UNESCO, 2015). L'eau représente le solvant le plus naturel et le plus utilisé par les organismes vivants.

Cependant, pratiquer la chimie dans l'eau n'est réalisable qu'à raison d'investir dans les autres principes de la chimie verte aux risques de continuer à polluer notre stock d'eau douce.

### 3.2. Vers une circularité biomimétique ?

#### 3.2.1. Une notion de circularité redéfinie

Les indicateurs présentés dans la partie II sont les indicateurs de circularité les plus cités dans littérature actuelle et propose chacun une méthode de mesure pour évaluer la circularité d'un produit, d'une organisation ou même d'une région ou d'un pays. Cependant, à travers cette diversité de méthodes, la définition même de circularité devient floue.

Correspond-elle à uniquement à la dynamique des flux d'une zone délimitée comme la MFA le laisse entendre ? Peut-on dire d'une organisation qu'elle est circulaire si tous ses produits sont collectés en fin de vie, entièrement recyclables et remanufacturés sans matière vierge ; vision du MCI ? La LCA peut évaluer précisément l'impact environnemental d'un produit et permet la comparaison de produit entre eux, mais la circularité d'un produit peut-elle se résumer à son impact direct sur l'environnement ?

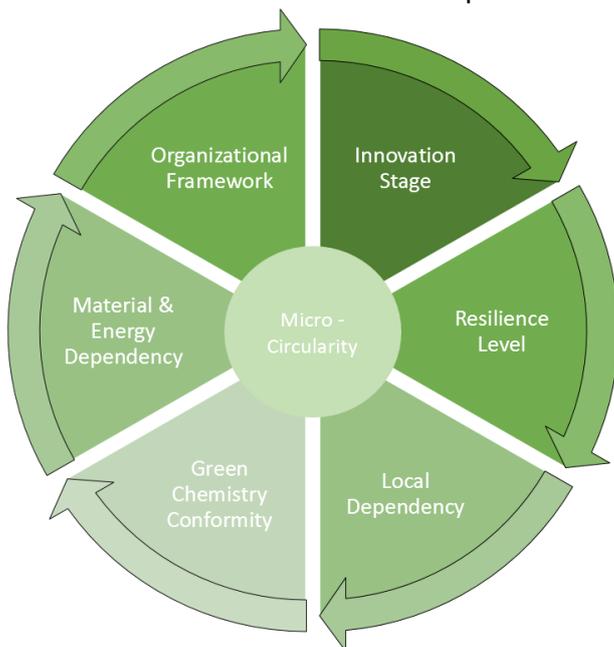
Chacun de ces indicateurs ne s'estime qu'à hauteur des paramètres qu'ils mesurent, des pondérations qu'ils appliquent, et de la forme même de leur résultat. Comme mentionné dans la partie II, les indicateurs sont une source d'information et d'aide à la prise de décision mais ne doivent jamais supplanter une logique plus large ou prendre la place de la décision elle-même.

La définition de circularité demeure ainsi multiple à travers les différents indicateurs de circularité qui existent. Il n'est pas question, ici, d'évaluer la pertinence de ces indicateurs mais de les comparer à une définition de la circularité à travers un nouveau principe d'organisation au même titre que l'économie circulaire : le biomimétisme. Le biomimétisme nous encourage à suivre les principes du vivant pour nous organiser et interagir avec notre planète de manière durable. Cette durabilité caractérise précisément cette nouvelle approche de la circularité.

On retrouve les différentes composantes de cette définition à travers les 6 principes du vivant développés dans cette troisième partie. Le troisième niveau du biomimétisme s'inspire des relations entre les espèces en complément des principes relatifs à la matière et à l'énergie (Chapelle, 2015). Ce troisième niveau donne sa cohérence à l'ensemble mais surtout introduit une circularité de second niveau, témoignant d'une durabilité possible à travers une vision systémique. C'est ce troisième niveau qui inscrit le biomimétisme comme source d'inspiration pour la création d'indicateurs de circularité évaluant celle-ci au second niveau : micro et méso. Pour rappel, il s'agit du niveau qui relie les organisations et les secteurs entre eux.

Les indicateurs évaluant la circularité se situent majoritairement au premier niveau ; nano et micro et constituent une mesure au niveau opérationnel, au niveau des biens produits et des entreprises. Ainsi, le biomimétisme nous fournit un support théorique sur lequel il est proposé de s'appuyer pour construire des indicateurs écocirculaires de second niveau. En effet, cette dimension systémique prise en compte par le biomimétisme semble inadéquate à une approche quantitativiste mais les objectifs traduits par le biomimétisme semblent ouvrir une voie à travers une évaluation plus qualitative d'une transition vers un système circulaire.

Cette micro-circularité biomimétique se caractérise, ainsi, par :



- Le degré d'innovation ;
- La mesure de la résilience ;
- La dépendance locale ;
- La conformité aux principes de la chimie verte ;
- La dépendance énergétique et en matériaux ;
- L'analyse de la structure organisationnelle.

Figure 10. Micro-circularité et biomimétisme

Cette distinction dans la notion de circularité biomimétique ne forme qu'un support théorique construit sur base d'un état de l'art et sa transposition dans le débat des indicateurs écocirculaires prend source à travers la critique d'Arnsperger & Bourg mais aussi dans le constat clair d'un manque criant d'indicateurs dans les niveaux supérieurs. Ainsi cette nouvelle définition offre une alternative au développement de nouveaux indicateurs mais ne se défend pas de remplacer les indicateurs existants au niveau nano, micro, méso ou macro. Le second point décrit les convergences et divergences des approches actuelles dans l'évaluation de la circularité avec l'approche biomimétique développée dans cette troisième partie.

### 3.2.2. Approches actuelles : convergences et divergences

Cette redéfinition de la *circularité* à travers les principes du vivant se distingue des différentes définitions existantes à travers ses différentes composantes, car elle englobe des dimensions qui ne se retrouvent pas toujours valorisées dans l'économie circulaire. Cependant elle partage de nombreux points communs dont l'importance d'une pensée systémique dans l'organisation de nos modes de production. Ces convergences et divergences sont reprises à travers les 3 sous-points suivants.

L'objectif de la question de recherche initiale est bien *d'évaluer si le biomimétisme représente une opportunité intéressante de recherche dans la construction d'indicateurs de circularité robustes et pertinents*. C'est à travers cette 3<sup>e</sup> partie que ce mémoire tente d'y répondre en identifiant les différentes dimensions de la définition même de circularité à travers les yeux du biomimétisme.

On retrouve ainsi de nombreuses *convergences* entre la notion de biomimétisme et la notion d'économie circulaire<sup>52</sup>:

### ***Niveaux de mesure de la circularité***

L'économie circulaire admet 3 à 4 différents niveaux de mesure de la circularité, à savoir le niveau « *nano* », qu'on retrouve pour évaluer le niveau de circularité des produits et services ; le niveau « *micro* » qui évalue la circularité au niveau d'une organisation ; le niveau « *méso* » qui agrège la circularité d'un secteur ou d'une industrie, ou la circularité d'une symbiose industrielle ; et enfin le niveau « *macro* » qui évalue le niveau de circularité d'une ville, d'une région ou même d'un pays (Balanay & Halog, 2016).

Les travaux d'Arnsperger et Bourg contribuent en identifiant 3 niveaux de mesure dans l'évaluation de la circularité. Respectivement, le niveau « -1 » qui comprend les mesures sur les produits et les entreprises sans prises en compte des flux totaux ; le niveau « 0 » de la circularité authentique qui implique un taux de croissance faible, voire décroissant ; et enfin le niveau « 1 » de l'économie permacirculaire avec un retour à une empreinte écologique d'une planète (Arnsperger & Bourg, 2016). Ces niveaux s'apparentent aux 3 niveaux précédemment cités de l'économie circulaire auquel vient s'ajouter le niveau « *culturel et politique* » à travers 3 trajectoires possibles, celle du *High Tech*, celle de l'*économie sociale et solidaire* et celle de la *permaculture*. (Bourg, 2018).

Le biomimétisme, quant à lui, présente 3 niveaux comme développés ci-avant<sup>53</sup>. On retrouve le 1<sup>er</sup> niveau du biomimétisme avec le « *biomimétisme de forme* » qui s'apparente au niveau « *nano* » par l'amélioration des performances environnementales d'une technologie. Le 2<sup>d</sup> niveau est le « *biomimétisme des procédés et matériaux* » qui chevauche le niveau *nano et micro* dû à des innovations de rupture, entraînant souvent le

---

<sup>52</sup> À travers ces différentes définitions (CIRAIG, 2015)

<sup>53</sup> Voir chapitre 1.3.

renouvellement des infrastructures industrielles (Chapelle, 2015). Enfin, le 3<sup>e</sup> niveau ou « *biomimétisme écosystémique* » s’inspire des relations entre les espèces et s’immisce dans sa vision système au niveau du niveau 1 de l’économie permacirculaire. Ce niveau ne s’observe pas, à travers, les niveaux de mesure de l’économie circulaire.

Le biomimétisme semble ainsi présenter à travers une structure différente les différents niveaux de l’économie circulaire mais aussi le niveau supplémentaire de l’économie permacirculaire, contribution des travaux d’Arnsperger et Bourg.

### ***Notion de circularité***

Cette notion de circularité se traduit notamment à travers les différents niveaux de mesure mais aussi à travers les indicateurs qui se défendent de la mesurer. Ainsi, on retrouve des indicateurs *nano* et *micro* issus directement des dimensions de l’économie circulaire comme en témoignent CET ou le CEIP.

D’autres se défendent de mesurer des flux de matières pour évaluer cette circularité à différents niveaux comme le MCI, la MFA ou la MFCA. L’analyse du cycle de vie ou, LCA, mesure quant à elle l’impact environnemental d’un produit. L’horizon de cette circularité varie ainsi d’un indicateur à l’autre et offre une information simplifiée par la définition d’origine. Ainsi, le CET ou le CEIP semble être des indicateurs pertinents, car ils englobent les différentes dimensions de l’économie circulaire à travers les différents *business models* qu’elle représente.

Le biomimétisme prend une approche légèrement différente en proposant une définition basée sur les principes du vivant. On retrouve ainsi une définition de la circularité qui s’apparente rapidement à une définition de la durabilité. Cette circularité n’est ainsi authentique que dans sa longévité. Cette distinction est relativement importante, car elle dynamise la vision de la circularité comme les travaux de Labbé ou de Grosse le laissaient déjà deviner. Ce dynamisme ne semble pas encore être intégré dans les indicateurs de l’économie circulaire, notamment à travers les mesures relatives au recyclage.

L’économie circulaire, permacirculaire et le biomimétisme s’inscrivent tous les trois dans le courant de l’économie écologique et de la soutenabilité forte. Cependant, le biomimétisme se distingue de l’économie permacirculaire et de l’économie circulaire dans le

débat sur la croissance. Elle s'oppose paradoxalement à l'argumentation d'Arnsperger et Bourg en démontrant que la croissance est possible mais qu'elle doit se diversifier et se détache de la vision de l'économie circulaire pour la même raison. La critique d'Arnsperger et Bourg semble, cependant, justifiée mais n'intègre pas les opportunités encore inconnues de notre technologie. Le biomimétisme permet d'intégrer le potentiel régénératif de nos écosystèmes et supporte ainsi l'innovation comme un paramètre inévitable à une circularité durable.

### ***Construction d'indicateurs de circularité***

La critique d'Arnsperger et Bourg vient majoritairement affecter la dynamique des indicateurs sans proposer de transposition opérationnelle à l'heure actuelle. Le biomimétisme semble fournir une nouvelle structure de par la diversité de ces composantes. Il se distingue, ainsi, dans la structure des indicateurs de circularité actuels à travers des dimensions construites sur des principes naturels et systémiques. Il est, certes, relativement facile de lier ces principes du vivant au *business models* de l'économie circulaire et particulièrement le modèle de la fondation Ellen MacArthur. Cependant, cette approche insiste sur des dimensions qui ne sont pas identifiées pour le moment par les différents modèles de circularité.

Le biomimétisme intègre ainsi l'*innovation* comme une dimension de circularité durable importante. Cette notion permet de recentrer la circularité sur son vrai potentiel qui est de profiter du caractère vertueux de cette circularité non pour s'améliorer à chaque itération pas uniquement dans le but de revenir à son état initial. Ce dynamisme se traduit à travers une nature qui apprend et s'autorégule. Ainsi, malgré ses ajustements structurels dont l'identification est naturellement nécessaire pour comparer des indicateurs entre eux, le biomimétisme rejoint l'idée d'une permacircularité en remettant en question le caractère durable d'une circularité non dynamique.

Le second paramètre est une mesure de la *résilience* et, par conséquent, une mesure de la diversité. Le biomimétisme semble illustrer de manière plus explicite l'importance d'une croissance horizontale plutôt que verticale. Cette conception de la croissance vient s'opposer à la vision de l'économie circulaire et notamment du recyclage lui-même. Son efficacité se voit déjà remise en question à travers les travaux de Grosse ou d'Arnsperger et Bourg qui

plaident pour une décroissance. Le biomimétisme offre une la possibilité d'une croissance continue à condition que sa conception soit verticale (Pauli, 2018).

La *dépendance locale* vient s'ajouter à cette circularité biomimétique et se lie des deux premiers critères. On retrouve ici une forte convergence avec le principe de *symbiose industrielle* développée par l'économie circulaire mais aussi l'opportunisme naturel dont font preuve les espèces à travers leur manière de se fournir en matériaux et énergies faciles d'accès.

Le 4<sup>e</sup> paramètre s'intéresse de près aux principes de la *chimie verte*. Les indicateurs de l'économie circulaire, eux aussi, intègrent certains de ces principes de manière qualitative. En faire une dimension à part entière dans la mesure de la circularité est par contre propre à l'approche biomimétique.

La *dépendance énergétique et en matériaux* démontre aussi une forte convergence avec les principes de l'économie circulaire. On vise bien une réduction de cette consommation énergétique et matérielle à travers une amélioration de la performance énergétique ou un meilleur recyclage des matériaux. Cependant, on retrouve une divergence entre les deux approches. Le contexte semble favorable à la vision de l'économie circulaire qu'il est maintenant nécessaire de minimiser notre consommation d'énergie et de matériaux. Le biomimétisme, quant à lui, nous avertit sur notre mode de fonctionnement actuel et la notion même de maximisation/minimisation. Ainsi il contraste cette nécessité de réduire notre consommation par la nécessité de l'optimiser et encourage par la même occasion l'idée de diversifier notre mix énergétique.

Le dernier paramètre est celui de la *structure organisationnelle*. Ce paramètre vient chaperonner les autres et se défend de mesurer un degré de décentralisation des décisions au sein d'un écosystème défini. Il représente cette vision systémique permettant d'optimiser indirectement chacun des autres paramètres. On retrouve cette notion d'optimisation et d'équilibre entre les différentes dimensions grâce à ce dernier paramètre.

### 3.3. Limites et futures recherches

Cette dernière section présente les limites identifiées dans l'écriture de ce mémoire ainsi que les questions qui restent en suspens et donc les potentielles pistes de continuation et de recherches à investir.

La question de recherche initiale se construit sur le constat partagé de la nécessité de développer des méthodes et indicateurs pour mesurer et quantifier notre progrès à travers une économie circulaire (Geng & al, 2012 ; Griffiths & al, 2016). Cependant, il n'existe pas de définition unique de la circularité, bien qu'elle tende majoritairement vers le même paradigme (Carencotte & al, 2012). Il est possible de consulter la revue de littérature déployée par le CIRAIG et qui rassemble les différentes définitions qu'a connues l'économie circulaire (CIRAIG, 2015).

La pluralité des définitions de l'économie circulaire érige la première limite de cette recherche. Pour simplifier la comparaison avec la vision biomimétique, une généralisation a été opérée et c'est la définition la plus largement acceptée qui a été retenue (Lieder & al, 2016) ; à savoir le modèle et, par conséquent, la définition de la fondation Ellen MacArthur.

Afin de comparer les dimensions d'un indicateur de circularité biomimétique, plusieurs indicateurs de circularité ont été présentés dans la seconde partie de ce mémoire. Ces indicateurs ont été sélectionnés de manière à représenter les différents niveaux de mesure de circularité mais la liste est loin d'être exhaustive. Ainsi, certains autres indicateurs comme le modèle de *Ressource Duration*, le *Circle Assesment* [CA], le *Material Reutilization Score* [MRS], la *Matrice des comptes nationaux incluant des comptes environnementaux* [NAMEA], ... n'ont pas été pris en compte dans la rédaction des conclusions. Cependant, ceux-ci représentent des outils intéressants dont les approches pourraient servir à compléter, supporter ou contredire les présentes conclusions.

Une limite peut être rédigée aussi en vertu du manque total d'applications pratiques aux conclusions dressées. De plus, cette *circularité biomimétique* intègre des dimensions dont les instruments de mesure sont globalement moins standardisés que ceux de l'économie circulaire et de ses différents business models ; notamment en termes de mesures de la résilience ou de l'innovation. Elle se profile ainsi comme hautement théorique et aux

applications difficiles ; traduction de complexité et de la pluridisciplinarité et de la transversalité des dimensions naturelles.

Ensuite, la comparaison entre biomimétisme et économie circulaire ouvre le questionnement général d'une relation de cause à effet qui mériterait d'être investiguée plus profondément. Le biomimétisme et les principes qu'il défend permettent-ils une circularité durable ? Ou, inversement, une économie circulaire entraîne-t-elle des écosystèmes plus résilients, un niveau d'innovation accrue et des économies locales plus autonomes et moins dépendantes ? De plus, cette redéfinition de la circularité pourrait avoir l'effet inverse de l'effet recherché et conduire à une confusion renforcée dans la vision d'une circularité standardisée.

## Conclusion

« Le biomimétisme offre-t-il une alternative à l'évaluation de la circularité dans une transition vers une économie circulaire ? ». La notion de biomimétisme partage énormément de traits communs avec l'économie circulaire ; notamment la notion de réfléchir en termes de systèmes, centrale à la logique circulaire.

Cette question de recherche se justifie sur le constat qu'il y a un manque significatif d'indicateurs de circularité à tous les niveaux de mesure (Geng & al, 2012 ; Griffiths & al, 2016 ; EASAC, 2016). La multitude des définitions qui caractérise l'économie circulaire est un des défis à relever et une uniformisation de celle-ci est critique dans l'établissement d'indicateurs de circularité standardisés (WBCSD, 2018).

Ainsi, le biomimétisme semble répondre à cette question de manière positive en développant un schéma en 6 composantes, fournissant une définition renouvelée de la notion de circularité sur laquelle des indicateurs pourraient se développer, et prétendre capter une circularité biomimétique. Elle se compose ainsi des six composantes suivantes :



- Le degré d'innovation ;
- La mesure de la résilience ;
- La dépendance locale ;
- La conformité aux principes de la chimie verte ;
- La dépendance énergétique et en matériaux ;
- L'analyse de la structure organisationnelle.

Cette définition s'inspire des principes du vivant pour conclure à une *circularité biomimétique* dont chaque composante nécessiterait davantage de recherche afin d'être transposée en indicateur de circularité robuste. Cependant, elle illustre des composantes de circularité qui ne sont pas prises en compte dans les indicateurs actuels et dont l'apport en termes de circularité authentique est ouvert à de futures recherches.

Malgré une approche entièrement théorique, on distingue des pistes de solutions pour répondre aux premières faiblesses des indicateurs de circularité actuels.

Premièrement, les niveaux de mesure d'une *circularité biomimétique* présentent une structure qui se distingue des 4 niveaux originellement présentés par l'économie circulaire. C'est le troisième niveau, ou « *biomimétisme écosystémique* » qui rejoint la critique d'Arnsperger et Bourg sur le caractère authentiquement circulaire des indicateurs actuels. Il est a priori nécessaire de prendre en compte les flux globaux par matériau pour refléter une circularité authentique.

Deuxièmement, le biomimétisme défend la notion de *croissance* contrairement aux travaux d'Arnsperger et Bourg. Cependant, celle-ci doit se définir de manière *horizontale* plutôt que *verticale*. Ainsi elle intègre une composante sur *l'innovation* comme *paramètre* nécessaire à une *circularité biomimétique* mais aussi sur la *résilience* et l'intérêt parfois oublié dans l'économie circulaire de se *diversifier* ; à nouveau de manière *verticale*. Elle se distingue ainsi de la vision véhiculée par l'économie permacirculaire et de la *réduction*. Mais aussi de la logique circulaire, qui soutient l'idée d'une *croissance* possible à travers un recyclage efficace, une économie de la fonctionnalité ou encore le maintien des matériaux le plus longtemps possible dans les marchés.

Enfin, le biomimétisme introduit la notion d'*auto organisation* transposée ici par un renforcement des *économies locales* et une tendance de *démondialisation encouragée*. Elle s'apparente à la notion de *symbiose industrielle* déjà défendue par l'économie circulaire.

En conclusion, le biomimétisme vient suggérer, à son tour, une redéfinition du concept de *circularité* et introduit des composantes nouvelles dont le développement de nouveaux indicateurs devrait se proposer de prendre en compte. Cette approche s'inscrit dans le débat sur la robustesse et le développement de nouveaux indicateurs de circularité en offrant un nouveau cadre d'analyse. Celui-ci reste ouvert à de nombreuses futures contributions et analyses qui viendraient enrichir l'approche, de manière empirique et théorique.

## Bibliographie

Ajukumar, V.N & Gandhi, O.P. (2013). *Evaluation of green maintenance activities in design and development of mechanical systems using an integrated approach*. Journal of Cleaner Production. Vol 51. Pg 34-46.

Anastas, P & Warner, J. (1998). *Green Chemistry : Theory and Practice*. Oxford University Press, New-York

Antal, M & Van Den Bergh, J. (2016). *Challenges in Assessing Public Opinion on Economic Growth Versus Environment: Considering European and US Data*. En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180091730472X#bb0015>

Arnsperger, C & Bourg, D. (2016). *Vers une économie authentiquement circulaire. Réflexions sur les fondements d'un indicateur de circularité*. Revue de l'OFCE 2016/1. N°145. Pg. 91-125. En ligne : <https://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/revue/6-145.pdf>

Aurez, V & Georgeault, L. (2016). *Économie circulaire – Système économique et finitude des ressources*. DeBoeck.

Aydiushchenko, A, Kulczycka, J & Smol, M. (2017). *Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions*. Clean Techn Environ Policy. DOI: 10.2017/s10098-016-1323-8.

Balanay, R & Halog, A. (2016). *A charting Policy Directions for Mining's Sustainability with Circular Economy: Recycling*. MDPI. En ligne : <https://www.mdpi.com/2313-4321/1/2/219/>

Barles, S. (2009). *Urban Metabolism of Paris and Its region*. Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines. En ligne : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x>

Bekkers, E & al. (2017). *Local Food Prices and International Price Transmission*. World Development. 96. 216-230.

Benyus. (2011). *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables*. Les éditions Rue de l'échiquier.

Beratan, K, Stanley K, Loveless, M, Martin P & Nancy, S. (2004). *Sustainability Indicators as a Communicative Tool: Building Bridges in Pennsylvania*. Environmental Monitoring and Assessment. 94. Pg 179-191.

Biomimicry 3.8. (2015). *What is biomimicry ?*. En ligne : <https://biomimicry.net/what-is-biomimicry/>

Biomimicry Institute. (2015). *Biomimicry Toolbox*. En ligne : <https://toolbox.biomimicry.org/introduction/>

Bonet Fernandez, I & Petit Lancini, A. (2014). *L'économie circulaire : quelles mesures de la performance économique, environnementale et sociale ?*. Revue Française de Gestion Industrielle, Vol 33, n°4.

Boulding E, K. (1966). *The Economics of The Coming Spaceship Earth*. Environmental Quality In A Growing Economy.

Bourg, D. (2017). *Vers une économie perma-circulaire ?*. Institut Hydro-Québec en environnement, développement et société. En ligne : <https://www.youtube.com/watch?v=U-ZjDXhIgaY/>

Bourg, D. (2018). *De l'économie circulaire à l'économie permacirculaire*. Responsabilité et environnement. Paris. N°89.

Bourg, D. (2018). *De l'économie circulaire à l'économie permacirculaire*. Les possibilités techniques

Braungart, M & McDonough, W. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the way we make things*. New York North Point Press.

Brears C. R. (2018). *Natural Resource Management And The Circular Economy*. Palgrave Macmillan.

Bringezu, S & al. (1997). *Regional and national material flow accounting : From practice to paradigm of sustainability*. Proceedings of the ConAccount Workshop, Leiden.

Browaey, D. (2015). *Le vivant comme source d'inspiration pour refonder l'innovation, l'économie et la cohérence démocratique*. SHS Web of Conferences 21. En ligne : <https://www.shs-conferences.org>.

Brunner, P & Rechberger, H. (2004). *Practical Handbook of material flow analysis*. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol 9.

Carencotte, F, Geldron, A, Villeneuve, J & Gaboriau, H. (2012). *Économie circulaire et recyclage des métaux*. Geosciences. 64-71.

Centre Européen d'Excellence en Biomimétisme de Senlis. (2017). *Biomimétisme – définition*. En ligne : <https://ceebios.com/biomimetisme/>

Chapelle, G. (2015). *Le vivant comme modèle – La voie du biomimétisme*. Albin Michel.

Chertow. (2000). *Industrial Symbiosis : Literature and Taxonomy*. Annual Review of Energy & The Environment. Vol 25. 1. Pg 313.

Church, C & Rogers, M. (2006). *Designing for Results: Integrating Monitoring and Evaluation in Conflict Transformation Programs*. Search For Common Ground. P.228.

CIRAIG. (2015). *Circular Economy: A Critical Literature Review of Concepts*. Bibliothèque et Archives Nationales du Québec. En ligne : [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Circular+Economy:+A+Critical+Literature+Review+of+Concepts&author=CIRAIG&publication\\_year=2015/](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Circular+Economy:+A+Critical+Literature+Review+of+Concepts&author=CIRAIG&publication_year=2015/)

Circular Economy Toolkit. (2013). *Toolkit*. En ligne : <http://circulareconomytoolkit.org/Toolkit.html/>

Commissariat Général Au Développement Durable. (2014). *Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements – Guide méthodologique*. En ligne : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/EIT%20-%20comptabilite%20des%20flux%20de%20matieres.pdf>

Commission Européenne. (2015). *Boucler la boucle – Un plan d’action de l’Union Européenne en faveur de l’économie circulaire*. COM(2015) 614. En ligne : [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF)

Conseil économique social et environnemental. (2015). *Le biomimétisme : s’inspirer de la nature pour innover durablement*. Les éditions des journaux officiels. En ligne : <https://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/154000667.pdf/>

Cramer, J & Vannes, N. (2006). *Product lifetime optimization: a challenging strategy towards more sustainable consumption patterns*. Journal of Cleaner Production. Vol 14. 15/16. Pg 1307-1318.

De Fries, R, Pagiola, S, & al. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment, Current State & Trends Assessment*. En ligne: <http://millenniumassessment.org/en/Condition.html>

Delannoy, I. (2017). *L’économie symbiotique : Régénérer la planète, l’économie et la société*. Arles. Actes Sud.

Didenko, N, Klochkov, Y & Skripnuk, D. (2018). *Ecological Criteria for Comparing Linear and Circular Economies*. Resources. DOI: 10.3390/resources7030048.

Dron, D. (2013). *Les contours d’une bioéconomie soutenable*. Réalités industrielles. En ligne : <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles1-2013-1-page-71.htm>

Ekvall, T & Weidema, P. (2004). *System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis*. Chalmers University of Technology.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy – Economic and business rationale for an accelerated transition*. En ligne :

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>

Ellen MacArthur, Granita Design & Life. (2015). *Circularity Indicators: An approach to Measuring Circularity – Project Overview*. En ligne: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators-Project-Overview-May2015.pdf>

Entreprises Pour l'Environnement & Institut National de l'Économie Circulaire. (2018). *Les indicateurs de l'économie circulaire pour les entreprises*.

Erkman, S. (2001). *L'écologie industrielle, une stratégie de développement*. Le Débat. N°113.

European Academies Sciences Advisory Council. (2016). *Indicators for a circular economy*. En ligne: [https://www.easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Circular\\_Economy/EASAC\\_Indicators\\_web\\_complete.pdf/](https://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Circular_Economy/EASAC_Indicators_web_complete.pdf/)

European Commission. (2011). *Roadmap to a resource efficient Europe*. En ligne: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN/>

European Commission. (2015). *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. En ligne: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF)

European Commission. (2015). *Monitoring Framework on progress towards circular economy*. En ligne: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0029&from=EN>

European Innovation Partnership on Raw Materials (EIPRM). (2016). *Raw Materials Scoreboard*. En ligne : <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1ee65e21-9ac4-11e6-868c-01aa75ed71a1/language-en>

Eurostat. (2018). *Economy-wide material flow accounts – Handbook*. En ligne: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9117556/KS-GQ-18-006-EN-N.pdf/b621b8ce-2792-47ff-9d10-067d2b8aac4b>

EUROSTAT. *What are economy-wide material flow account (EW-MFA) and what are they for?* En ligne: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/material-flows-and-resource-productivity>

Hoagland, M & Dodson, B. (1998). *The way life works – The science lover's illustrated guide to how life grows, Develops, Reproduces, and gets along*.

Galloway, J, Dentener, F & al. (2003). *Nitrogen cycles: Past, Present, and Future*. Biogeochemistry. 70(2). Pg 153-206.

Generowicz, A, Henclik, A, Kulczycka, J & Kowalski, Z. (2015). *Evaluation of technology solutions for municipal waste incineration using LCA results and multi-criteria analysis*. Journal of Environmental Accounting Management. 3. Pg 169-180.

Geoffrey, L & Todd, C. (2001). *Defining Thresholds for Freshwater Sustainability Indicators Within the Context of South African Water Resource Management*. 2<sup>nd</sup> WARFSA/WaterNet Symposium.

Geng, Y, Fu, J, Sarkis, j & Xue, B. (2012). *Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis*. Journal of Cleaner Production. En ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611002460>

Giurco, D. & al. (2014). *Circular Economy : Questions for Responsible Minerals, Additive Manufacturing and Recycling of Metals*. Resources. 3(3). Pg 432- 453.

Global Reporting Initiative. (2019). *Reporting Tools*. En ligne : <https://www.globalreporting.org/services/reporting-tools/Pages/default.aspx>

Gray, C & Charter, M. (2007). *Remanufacturing and Product Design – Designing for the 7<sup>th</sup> generation*. University College for the Creative Arts. UK. En ligne: <http://cfsd.org.uk/Remanufacturing%20and%20Product%20Design.pdf>

Gregory, J. (2000). *Material flow Analysis*. Massachusetts Institute of Technology Department of Materials Science & engineering. En ligne: <https://ocw.mit.edu/courses/engineering-systems-division/esd-123j-systems-perspectives-on-industrial-ecology-spring-2006/lecture-notes/lec14.pdf/>

Griffiths, P & Cayzer, S. (2017). *Design of indicators for measuring product performance in the circular economy*. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sustainable Design and Manufacturing. Springer Sciences and Business Media Deutschland GmbH. En ligne: [https://www.researchgate.net/profile/Valentina\\_Beghetto2/publication/317904359\\_Design\\_of\\_indicators\\_for\\_measuring\\_product\\_performance\\_in\\_the\\_circular\\_economy/links/59dde36daca272b698fc8e6f/Design-of-indicators-for-measuring-product-performance-in-the-circular-economy.pdf?origin=publication\\_detail/](https://www.researchgate.net/profile/Valentina_Beghetto2/publication/317904359_Design_of_indicators_for_measuring_product_performance_in_the_circular_economy/links/59dde36daca272b698fc8e6f/Design-of-indicators-for-measuring-product-performance-in-the-circular-economy.pdf?origin=publication_detail/)

Grosse, F. (2010). *Économie circulaire*. Dictionnaire de la pensée écologique. Pg 349-352.

Guénaire, M. (2016). *Les sommets du climat doivent devenir les sommets de la population*. Le Débat 2016/2. N° 189. Pg 10-22.

Hsu, A. & al. (2014). *The 2014 Environmental Performance Index*. Yale Center for Environmental Law and Policy. New Haven.

IIRC. (2018). *Get to the grips with the six capitals*. En ligne: <https://integratedreporting.org/what-the-tool-for-better-reporting/get-to-grips-with-the-six-capitals/>

Institut National de l'Économie Circulaire [INEC]. (2018). *L'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la réutilisation des eaux usées traitées*. En ligne : <https://institut-economie-circulaire.fr/wp-content/uploads/2018/05/etude-leconomie-circulaire-dans-le-petit-cycle-de-leau-reut-inec.pdf>

International Energy Agency [IEA]. (2019). *Key World Energy Statistic*. En ligne: <https://www.iea.org/statistics/kwes/consumption/>

International Resource Panel & UN Environment. (2017). *Assessing Global Resource Use : A system approach to resource efficiency and pollution reduction*. En ligne : <http://www.resourcepanel.org/reports/assessing-global-resource-use>

Investopedia. (2019). *Key Performance Indicators (KPI)*. Consulté en ligne le 18 Avril 2019. En ligne : <https://www.investopedia.com/terms/k/kpi.asp>

ISO. (2018). *ISO 14051 : 2011 Management environnementale – Comptabilité des flux matières – Cadre général*. En ligne : <https://www.iso.org/fr/standard/50986.html>

Jackson, T. (2010). *Prospérité sans croissance : la transition vers une économie durable*. De Boeck-Etopia.

Kampelmann, S. (2016). *Mesure l'économie circulaire à l'échelle territoriale. Une analyse systémique de la gestion des matières organiques à Bruxelles*. Revue de l'OCDE. 145. Pg 161 – 184.

Kulczycka, J & Smol, M. (2015). *Environmentally friendly pathways for the evaluation of investment projects using life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA)*. Clean Technol Environ Policy 18 (3). Pg 829 – 842.

Labbé, J-F. (2016). *Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux*. Responsabilité et environnement. N°82.

Le Moigne, R. (2018). *L'économie circulaire – Stratégie pour un monde durable*. Dunod. 2<sup>de</sup> édition.

Lederer, J, Laner, D, Fellner, J. (2014). *A framework for the evaluation of anthropogenic resources: the case study of phosphorus stocks in Austria*. J Clean Prod 84. 368-381.

Lennart, Y & Ljungberg. (2007). *Material selection and design for development of sustainable products*. Material and Design. Vol 28. Pg 466-479.

Lieder, M & Rashid, A. (2016). *Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing*. Journal of Cleaner Production. En ligne: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615018661/>

Lilja, R. (2015). *Policy instruments for promoting material efficiency : case of Finland*. Clean Technol Environ Policy. 17(7). Pg 2029-2040.

Linder, S, Sarasini, P & Van Loon, PP. (2017). *Circular Economy: The concept and its limitations*. Ecol Econ. 143. Pg 37-46. En ligne: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800916300325/>

MaterialFlow.net. (2019). *Circular Economy: A Smart Way of Using Materials*. En ligne: <http://www.materialflows.net/circular-economy/>

Mc Kinsey and Company. (2011). *Transforming the Water Economy – Seven Ways to Ensure Resources for Growth*. En ligne: [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/client\\_service/Sustainability/PDFs/Mck%20on%20SRP/SRP\\_09\\_Water.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/client_service/Sustainability/PDFs/Mck%20on%20SRP/SRP_09_Water.ashx)

Mc Kinsey Global Institute. (2011). *Resource Revolution : Meeting the world's energy, materials, food, and water needs*. En ligne: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/resource-revolution>

Meadows, D & al. (1972). *The limits to Growth*. En ligne : <http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf/>

Meadows, D. (2008). *Thinking in Systems : A Primer*. Business Development.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystem and human well-being: Synthesis*. En ligne: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf/>

Mistral, J. (2015). *Le climat va-t-il changer le capitalisme ? La grande mutation du XXIe siècle*. EYROLLES. Paris.

Norton, B. (2005). *Sustainability: A Philosophy Of Adaptive Ecosystem Management*. University of Chicago Press.

OECD. (2012). *Environmental outlook to 2050 : The Consequences of inaction – Key findings of water*. En ligne: <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/49928853.pdf/>

Pauli, G. (2018). *Soyons aussi intelligents que la nature – 12 tendances révolutionnaires pour sauver notre consommation... et notre planète*. Editions de l'Observatoire. Paris

Pitt, J & Heinemeyer. (2015). *Introducing ideas of circular economy*. Stabeles K & Keirl, S (eds) Environment, ethics and cultures: design and technology education's contribution to sustainable global futures. London.

Ramanan, R. (2018). *Introduction to Sustainability Analytics*. Taylor & Francis Group. CRC Press. New York.

Rockström K & al. (2009). *A Safe operating space for humanity*". In Nature, Vol 461. En ligne: <https://www.nature.com/articles/461472a>

Saidani, M & al. (2017). *How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework*. MDPI. En ligne: <https://www.mdpi.com/2313-4321/2/1/6/htm>

Sleeswijk, AW. (2011). *Regional LCA in a global perspective. A basis for spatially differentiated environmental life cycle assessment*. International Journal Life Cycle Assessment. 16. Pg 106-112. En ligne : <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11367-010-0247-5.pdf>

Stahel, W. (2012). *Towards the Circular Economy*. Interviewed by Ellen MacArthur Foundation. En ligne: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>

Steffen, W & al. (2011). *The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship*. US National Library of Medicine National Institute of Health. En ligne: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3357752/>

Steffen, W & al. (2015). *Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet*. Sciences. En ligne: <https://www.nature.com/articles/461472a>

Stockholm Resilience Centre. (2019). *The nine planetary boundaries*. En ligne: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries/planetary-boundaries/about-the-research/the-nine-planetary-boundaries.html>

TEEB. (2010). *The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. En ligne: <http://www.teebweb.org/our-publications/teeb-study-reports/synthesis-report/>

Truttmann, N. & Rechberger, H. (2006): *Contribution to resource conservation by reuse of electrical and electronic household appliances*. Resources, Conservation and Recycling. 48 (3): 249-262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.003>

Tukker, A. (2004). *Eight types of product-service system: eight ways to sustainability ?*. Business Strategy and the Environment. En ligne: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bse.414/>

UN environment & International Resource Panel. (2017). *Assessing Global Resource Use – A system approach to resource efficiency and pollution reduction*. En ligne: <http://www.resourcepanel.org/reports/assessing-global-resource-use>

UN environnement. (2019). *Circular economy indicators: what do they measure ?*. En ligne: <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/blogpost/circular-economy-indicators-what-do-they-measure/>

UNEP. (2011). *Global Guidance Principles for life cycle assessment databases – A Basis for Greener Processes and Products*. En ligne : <http://unep.fr/shared/publications/pdf/dtix1410xpa-globalguidanceprinciplesforlca.pdf>

UNEP. (2016). *Resource Efficiency: Potential and economic implications*. En ligne: <http://www.env.go.jp/press/files/jp/102839.pdf/>

UNESCO. (2015). *Water for a sustainable world: Facts and figures*. En ligne: [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts\\_Figures\\_EN\\_G\\_web.pdf/](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_EN_G_web.pdf/)

UNESCO. (2015). *Les douze principes de la chimie verte*. En ligne : <http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/science-technology/basic-sciences/chemistry/green-chemistry-for-life/twelve-principles-of-green-chemistry/>

United Nations (UN). (2012). *Back to Our Common Future: Sustainable Development in the 21<sup>st</sup> century (SD21) project – Summary for policymakers*. En ligne: [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/UN-DESA\\_Back\\_Common\\_Future\\_En.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/UN-DESA_Back_Common_Future_En.pdf)

United Nations Population Division (UNPD). (2017). *World Population Prospects : 2017 Revision*. En ligne : [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_KeyFindings.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf).

United States Environmental Agency (EPA). (2009). *Buildings and their impact on the Environment: A statistical Summary*. Journal of Environmental Engineering. En ligne: <https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/pdf/gbstats.pdf>

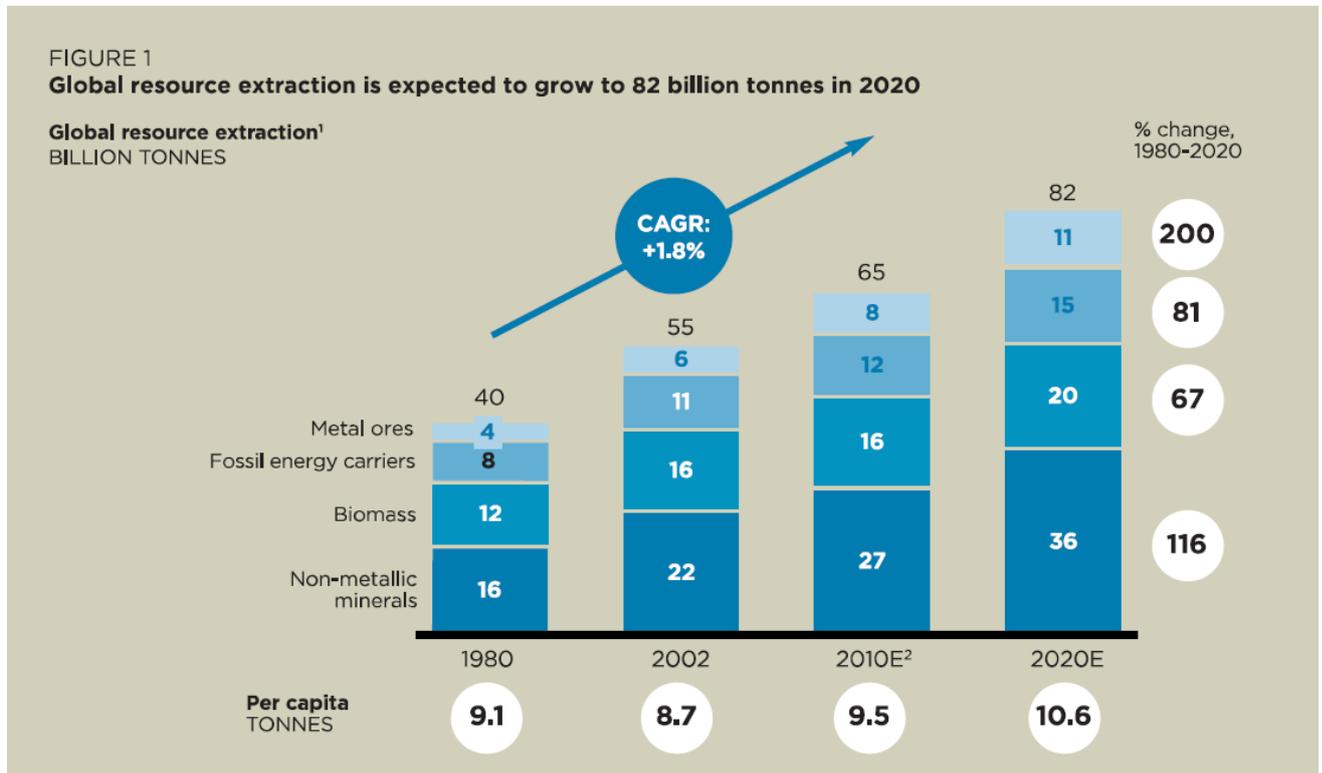
- UN-WATER. (2017). *Wastewater : The untapped resource*. En ligne : <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2017/>
- Valipour, M. (2015). *A Comprehensive study on irrigation management in Asia and Oceania*. Arch Agron Soil Sci. 61 (9). Pg 1247 – 1271.
- Varbanov, PS & Seferlis, P. (2014). *Process Innovation through Integration approaches at multiple scales : a perspective*. Clean Technol Environ Policy. 16(7). Pg 1229-1234.
- Vincent-Sweet, P. (2012). *Analyse du cycle de vie et protection de l'environnement : pertinence et limites de l'outil*. Annales des Mines – Responsabilité et environnement. 66. Pg 84-88.
- Vivien, F-D. (2009). *Les modèles économiques de soutenabilité et le changement climatique*. Regards croisés sur l'économie. N°6. Pg 75-83.
- Von Weizsäcker E, Lovins, A & Hunter Lovins, L. (1998). *Factor Four: Doubling Wealth – Halving Resource Use*. London : Earthscan.
- WBCSD & BCG. (2018). *The New Big Circle : Achieving growth and business model innovation through circular economy implementation*. En ligne: [https://docs.wbcsd.org/2018/01/The\\_new\\_big\\_circle.pdf/](https://docs.wbcsd.org/2018/01/The_new_big_circle.pdf/)
- WBCSD. (2018). *Circular Metrics Landscape Analysis*. En ligne : [https://docs.wbcsd.org/2018/06/Circular\\_Metrics-Landscape\\_analysis.pdf](https://docs.wbcsd.org/2018/06/Circular_Metrics-Landscape_analysis.pdf)
- WHO. (2017). *Global and regional food consumption patterns and trends*. En ligne: [http://www.who.int/nutrition/topics/3\\_foodconsumption/en/index4.html/](http://www.who.int/nutrition/topics/3_foodconsumption/en/index4.html/)
- Wijkman, A & Rockström, J. (2012). *Bankrupting Nature : Denying our Planetary Boundaries*. Routledge.
- World Bank. (2017). *What a waste : a global review of solid waste management*. En ligne: [https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What\\_a\\_Waste2012\\_Final.pdf/](https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf/)
- World Economic Forum [WEF]. (2014). *Towards the Circular Economy : Accelerating the scale-up across global supply chains*. En ligne: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_ENV\\_TowardsCircularEconomy\\_Report\\_2014.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf)
- Yale University. (2005). *The 2005 Environmental Sustainability Index*. En ligne : <https://epi.envirocenter.yale.edu/>

Zhao, X & Huang, R. (2017). *The impact of climate change on developed economies*. Economics Letters. 153. Pg 43-46.

## Annexes

Ci-après vous retrouverez les différentes annexes mentionnées à travers l'entièreté de cette thèse :

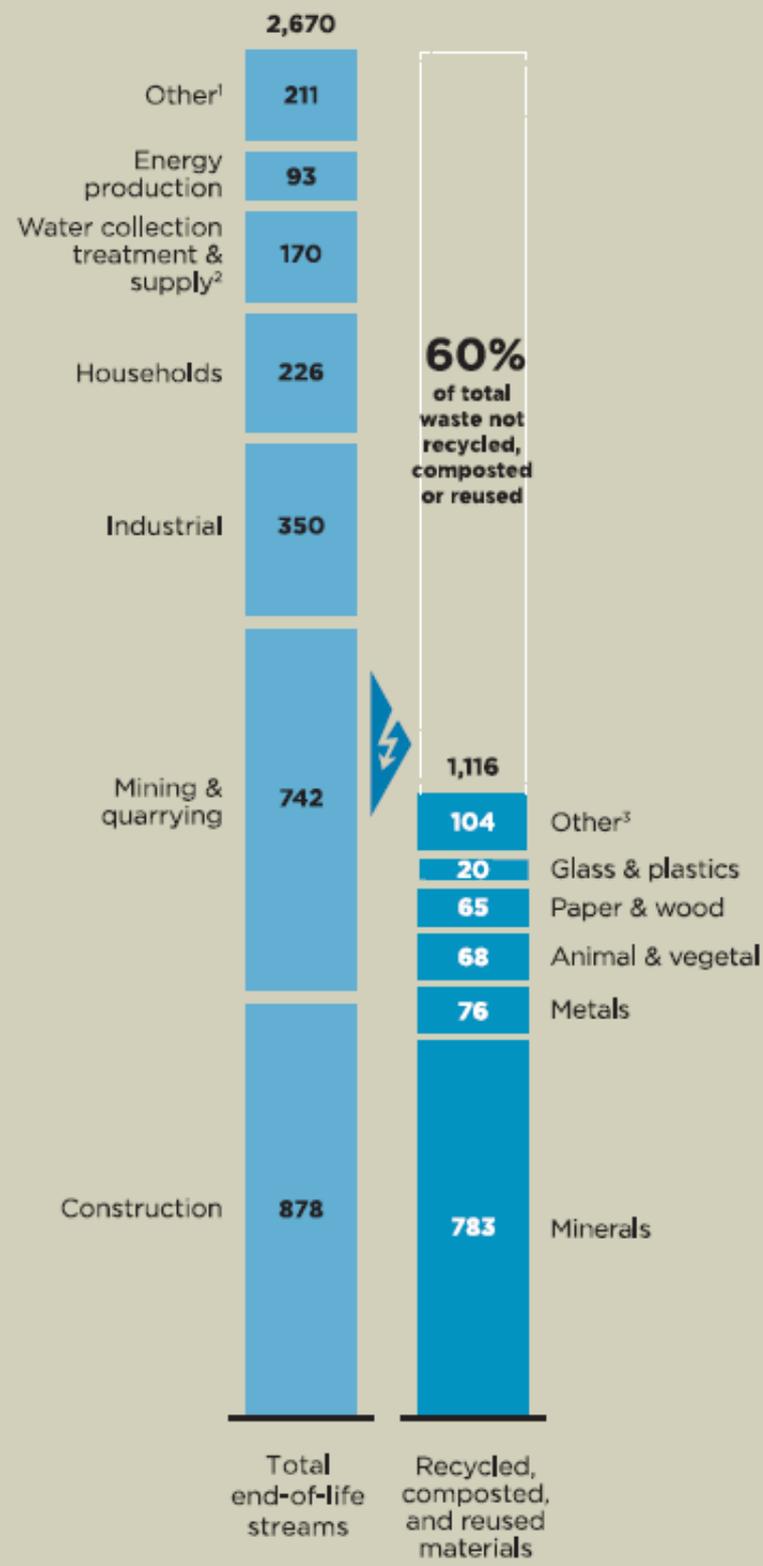
### 1. Extraction mondiale de matériaux et ressources naturelles de 1980 à 2020.



Annexe 1. Global Resource Extraction (Ellen MacArthur, 2013)

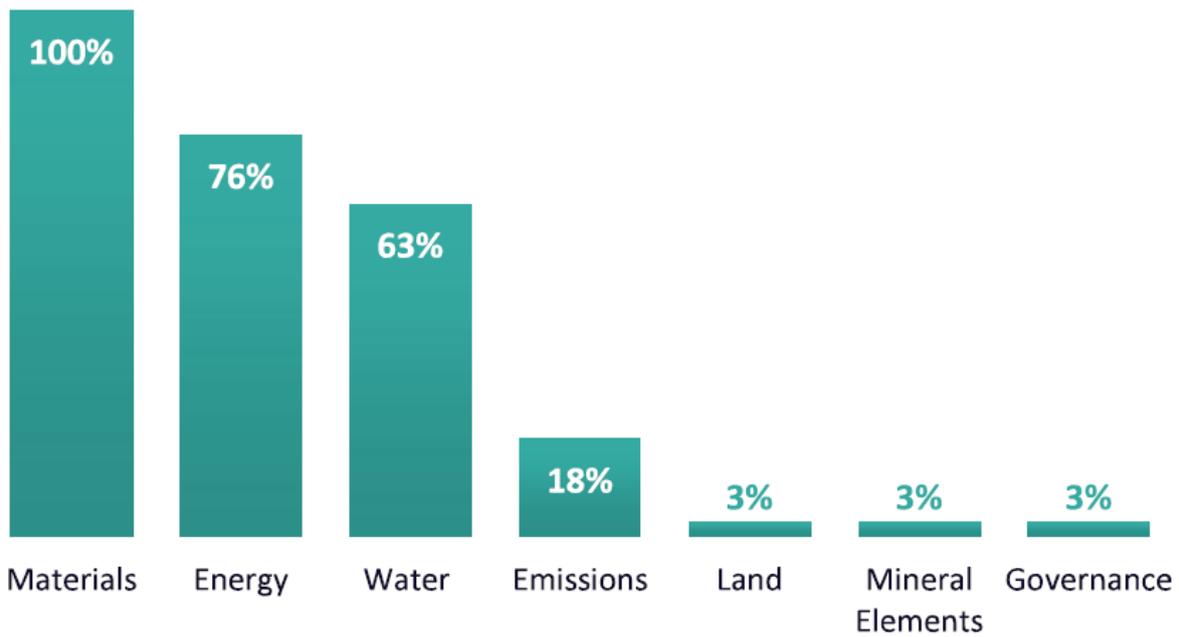
### 2. Déchets émis en Europe – Préviation pour l'année 2010 (Tonnes).

**FIGURE 2**  
**We are still losing enormous tonnages of material**  
 Million tonnes, EU27, 2010E



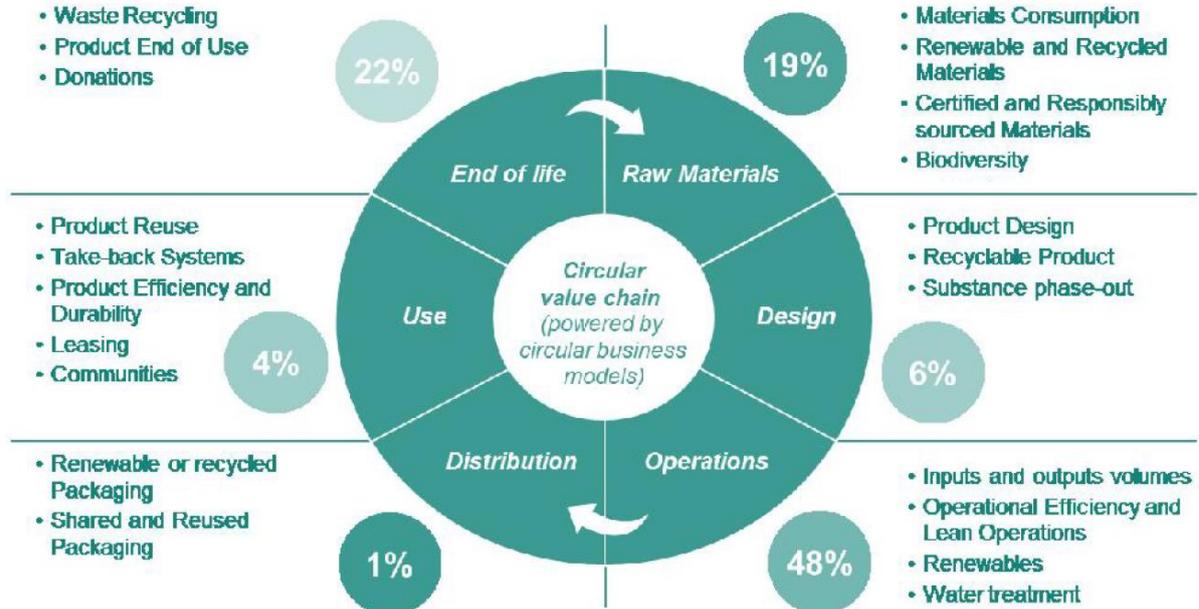
Annexe 2. Tonnages of material lost (2010) in Europe (Eurostat, 2011).

### 3. Éléments mesurables – % des éléments cités



Annexe 3. Éléments circulaires mesurables (WBCSD, 2018)

### 4. Indicateurs et Cycle de vie

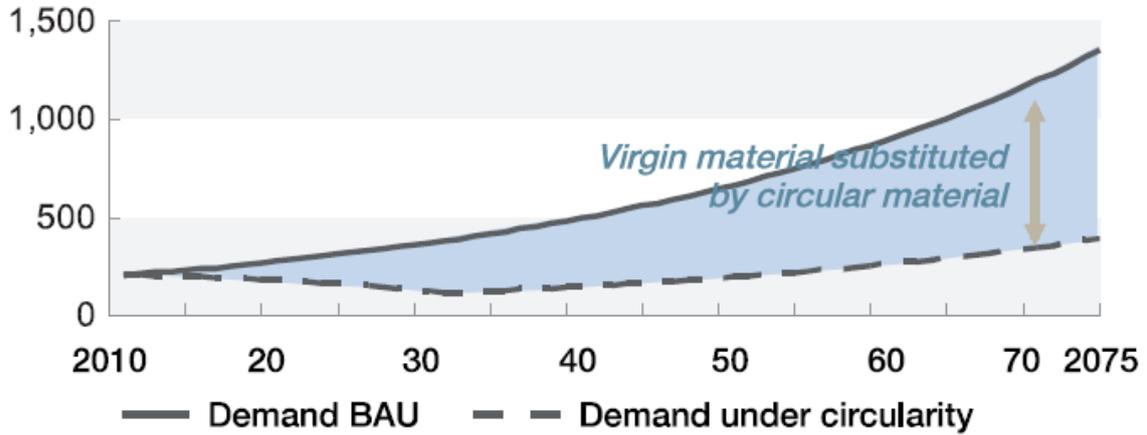


Annexe 4. Indicateur le long de la chaîne de valeur (WBCSD, 2018)

5. Business-as-usual et scénario avec introduction des leviers de l'économie circulaire

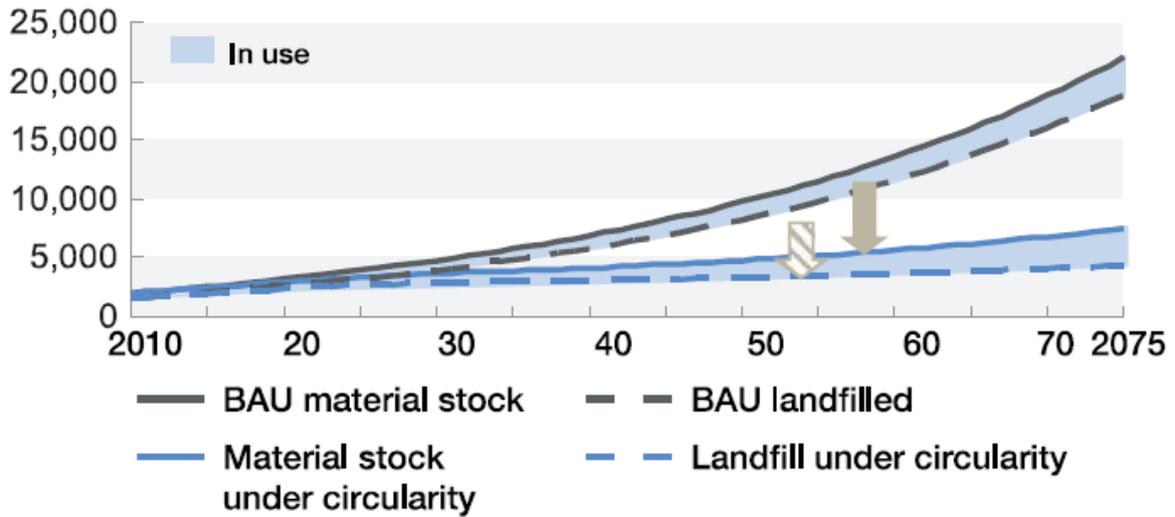
**Effect of circular system on primary material demand in widget market**

Volume of annual material input required



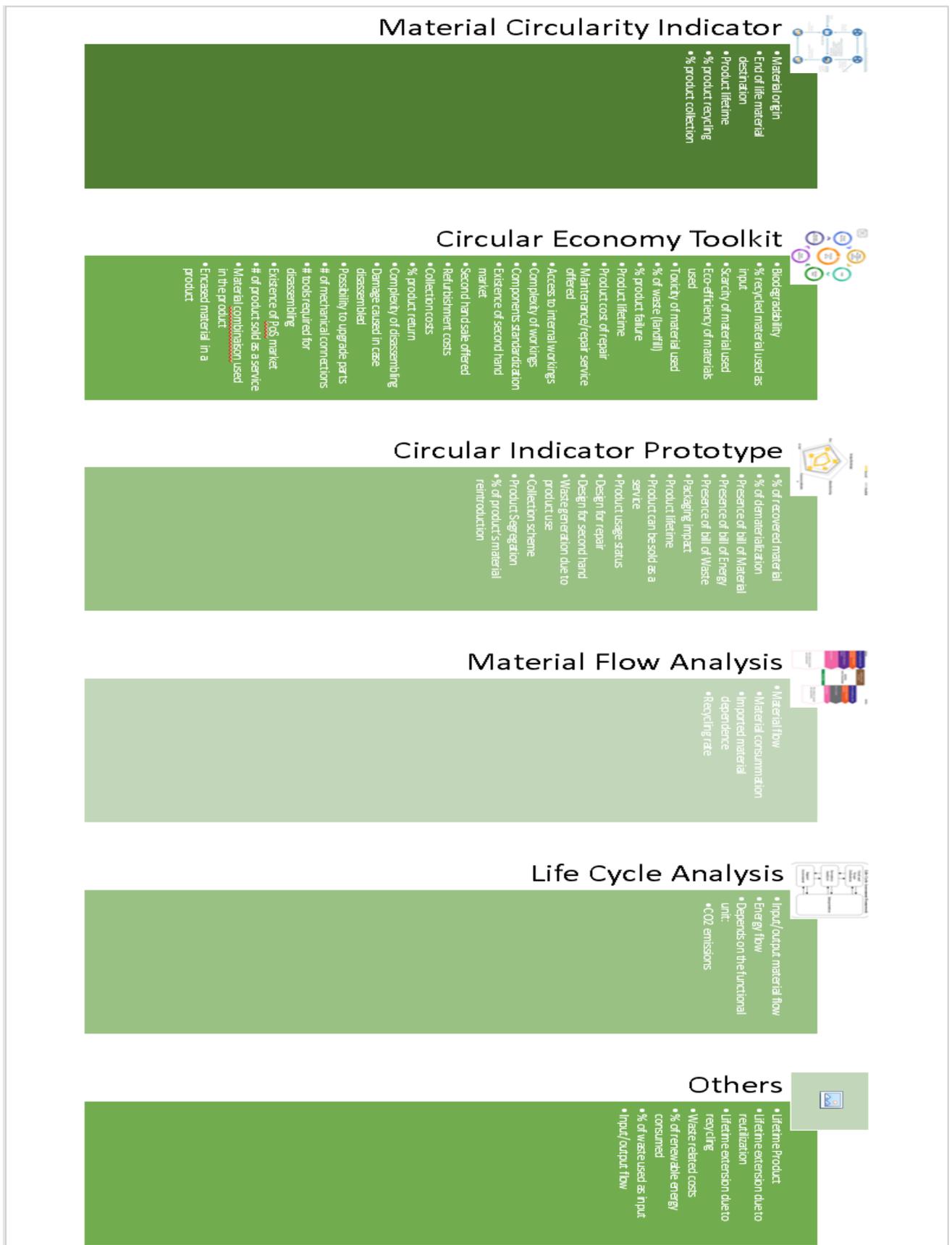
**Effect of circular system on material stock and landfills**

Cumulative volume of material used



Annexe 5. Comparaison Scénario économie circulaire VS BAU (Ellen MacArthur, 2013).

## 6. Composants des différents indicateurs identifiés





Avenue Antoine Depage, 30, bâtiment D, 1050 Bruxelles, Belgique <http://igeat.ulb.ac.be/>

