

ECONOMIE CIRCULAIRE : CONCEPTS ET METHODES D'EVALUATION

RAPPORT FINAL

Octobre 2015

Responsables Scientifiques :

- **Emmanuelle AOUSTIN, Marcial VARGAS-GONZALEZ**
Quantis, 42, bd de Sébastopol, 75003 PARIS



- **Charlotte THEVENET, Ariane BUSSARD**
Sofies, 171 bis avenue Charles de Gaulle Bâtiment C
92200 Neuilly sur Seine



L'association **SCORELCA** est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORE LCA, Economie Circulaire : Concepts et Méthodes d'évaluation, 2015, 138 pages, n°2014-02.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr
- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Erwan Autret – ADEME, Hélène Bortoli – ADEME, Jean-Paul Cazalets – Total, Daniel Dunet – Veolia R&I, Jade Garcia – SCORE LCA, Oliver Keserue – Veolia R&I, Denis Le Boulch – EDF, Sokha Leang – ENGIE, Stéphane Morel – Renault, Philippe Osset – SCORE LCA, Anne Prieur-Vernat – ENGIE, Céline Verrat – Total, Christèle Wojewodka – Saint Gobain, Sophie Bonnier – Eco Emballages, Mauro Chiappini – ArcelorMittal, Tiphaine Despouy – SNCF, Anne-Laure Hettinger – ArcelorMittal.

RESUME

Le concept **d'économie circulaire** a très récemment pris une place importante en France et en Europe. Communément admis que le principe qu'il sous-tend est bénéfique pour l'environnement, **l'évaluation de ses bienfaits** n'est cependant pas systématique. C'est dans ce cadre que les membres de SCORELCA ont souhaité réaliser une étude sur ce sujet d'actualité, poursuivant l'objectif de clarifier les concepts, enjeux et méthodes à utiliser.

A travers l'état des lieux réalisé, il apparaît que même si un bon nombre d'acteurs, impliqués sur le sujet, ont proposé une définition de l'économie circulaire, cette notion présente, à ce jour, des contours non stabilisés. La plupart des représentations schématiques proposées sont **centrées sur la notion de « boucle »** mais des experts attirent l'attention sur le caractère restrictif de ces systèmes et appellent à une vision élargie qui conserve sa structuration.

Dans ce contexte, quatre objectifs de **l'évaluation des boucles de l'économie circulaire** ont été identifiés, chacun avec ses propres enjeux méthodologiques. Le premier objectif est d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des boucles matière. Le second objectif de l'évaluation est de comparer et prioriser les différentes boucles pour identifier les scénarios les plus pertinents. L'aide à la mise en œuvre de ces scénarios est le troisième objectif de l'évaluation des boucles. Enfin, le dernier objectif consiste à évaluer l'évolution des systèmes et la performance des boucles mises en application.

Cependant, certains des enjeux identifiés ne sont pas exclusifs à l'évaluation environnementale des boucles matière et sont plus largement représentatifs des enjeux connus de l'Analyse du Cycle de Vie. Il a donc été décidé d'étudier en détail uniquement les problématiques liées à l'évaluation des boucles matière. Cette analyse a été menée en suivant la logique portée par le praticien ACV au moment de réaliser son étude afin de lui fournir des **propositions opérationnelles pour l'évaluation des boucles matière** selon 8 différents axes qui sont détaillées dans la dernière partie de ce rapport.

MOTS CLES

Economie Circulaire, boucles matière, fin de vie, recyclage, réutilisation, réemploi

SUMMARY

The **circular economy** concept has become increasingly important in France in the last few years. It has been commonly accepted that the principle it implies is beneficial for the environment, however the **evaluation of its merits** is not systematic. In this context, the members of SCORELCA wished to study this current issue, aiming to clarify the concepts, stakes and methods used to evaluate circular economy.

The state of the art carried out showed that even if a great number of parties had given their own definition of circular economy, the main lines of the concept remain vague. Most representations are **focused on loops** (recycling, reuse, reemployment) but some experts consider these systems to be too restrictive and call for a larger vision that should remain structured.

Within this framework, 4 objectives of the **evaluation of circular economy loops** were identified, each one with its own methodological stakes. The first one is to evaluate the environmental, economic and social impacts of loops. The second objective is to compare and prioritize different types of loops and to identify the most pertinent solution. To help the implementation of the selected solutions is the third objective. Finally, the last objective is to evaluate the evolution of the systems and the performance of the implemented loops.

However, some identified stakes are not exclusive to the evaluation of material loops and are well known by the Life Cycle Assessment community. Therefore, it was decided to focus only on the issues associated to material loops in this study. This analysis was carried out following the logic of the LCA practitioner, the goal being to provide him with a set of **operational recommendations for the evaluation of material loops** according to 8 different axes.

KEY WORDS

Circular Economy, material loops, end-of-life, recycle, reuse

SOMMAIRE (paginé)

Introduction	6
Première partie : Fondements, acteurs et composantes de l'économie circulaire – État de l'art.....	7
1. Les fondements de l'économie circulaire	8
1.1. De l' « économie fermée » à l' « économie en boucle », premières apparitions du terme et des notions d'économie circulaire.....	8
1.2. De la gestion des déchets à la gestion des ressources, l'explication de l'intérêt grandissant pour l'économie circulaire.....	9
1.3. La place de l'économie circulaire dans un foisonnement de concepts.....	10
2. L'appropriation du concept d'économie circulaire	13
2.1. Revue des acteurs de l'économie circulaire	13
2.2. Dynamique des instances européennes	14
2.3. Politiques nationales en matière d'économie circulaire	15
2.4. Dynamique des organisations internationales	17
3. Ce que sous-tend le concept d'économie circulaire	18
3.1. Une notion aux contours non stabilisés.....	18
3.2. Des représentations schématiques diverses du concept.....	19
3.3. Préconisation d'experts vis-à-vis du concept d'économie circulaire.....	22
3.4. Retour sur la définition de l'ADEME.....	25
3.5. Revue synthétique des barrières à la mise en œuvre de l'économie circulaire	31
4. Présentation des principales méthodes d'évaluation des systèmes d'économie circulaire	33
4.1. L'Analyse de Flux de Matières et d'Énergie	33
4.2. L'Analyse du Cycle de Vie	37
4.3. Les indicateurs d'évaluation et de suivi de la performance	39
Seconde partie : Méthodes et enjeux de l'évaluation des boucles d'économie circulaire – État de l'art	42
1. Approches pour évaluer tout ou partie d'une boucle d'économie circulaire... 43	43
1.1. Composantes à évaluer pour une boucle.....	43
1.2. Évaluation des boucles de recyclage.....	44
1.3. Évaluation des boucles d'allongement de la durée de vie.....	53
2. Approche pour prioriser les scénarios des boucles d'économie circulaire 55	55
2.1. La pondération des résultats	55
2.2. L'agrégation des résultats.....	56
2.3. La priorisation des scénarios.....	57
3. Approches pour appliquer les boucles d'économie circulaire	59
3.1. Développer la production propre	59
3.2. Appliquer l'éco-conception	59
4. Approches pour suivre les résultats des boucles d'économie circulaire	59
Troisième Partie : Utiliser l'ACV pour évaluer la performance environnementale des boucles matière dans un cadre d'économie circulaire – méthodologies, enjeux et recommandations opérationnelles.....	66
1. Introduction : De l'état de l'art aux enjeux méthodologiques de l'évaluation des boucles matière.....	66

2. Définitions associées à la boucle matière	67
2.1. Définition de la notion de déchet	67
2.2. Définition des différents types de boucles.....	68
3. Evaluation des boucles matière : Définition des objectifs	71
3.1. Objectifs de l'économie circulaire.....	71
3.2. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire aux objectifs de l'étude ACV de boucles matière	72
4. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire au périmètre de l'étude : ACV déchets/ACV Produit.....	74
4.1. Approche produit - approche déchet en ACV	74
4.2. Approche déchet : Mise en pratique et Enjeux méthodologiques	77
4.3. Focus : Comment l'ACV déchets sert et dessert la hiérarchie européenne des modes de traitement des déchets	81
5. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire au périmètre de l'étude : Périmètre et modélisation des boucles matière en ACV Produit	83
5.1. Définitions	85
5.2. Extension des frontières.....	86
5.3. Méthodes d'allocation	92
6. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire à l'unité fonctionnelle	103
7. Evaluer la qualité de la matière recyclée	104
7.1. Evaluation de la qualité de la matière première secondaire dans les approches 0-100 et 50-50 : Le facteur Q_s/Q_p	104
7.2. Discussion sur l'évaluation de la qualité de la matière première secondaire	106
8. Evaluation des projets futurs d'Economie Circulaire	107
9. Indicateur ressources - Enjeux de l'évaluation environnementale de l'impact sur les ressources en ACV	107
9.1. Les enjeux associés aux indicateurs « ressources » existants et les développements de la méthode ImpactWorld+	108
9.2. Discussion sur l'évaluation de la dissipation des ressources en ACV	111
10. Prioriser les impacts	114
Conclusion	119
Bibliographie de la partie 1	123
Bibliographie de la partie 2	124
Bibliographie de la partie 3	127
Annexe : Cas d'étude	129
Cas d'étude OSILUB.....	129
Cas d'étude NordPackage	132
Cas d'étude Placoplatre.....	134

Introduction

Le concept d'économie circulaire a très récemment pris une place importante en France. Communément admis que le principe qu'il sous-tend est bénéfique pour l'environnement, l'évaluation de ses bienfaits n'est cependant pas systématique. C'est dans ce cadre que les membres de SCORELCA ont souhaité réaliser une étude sur ce sujet d'actualité, poursuivant l'objectif de clarifier les concepts, enjeux et méthodes à utiliser. Plus précisément, les membres ont exprimé des attentes synthétisées parmi les suivantes :

- préciser la définition de l'économie circulaire et ses fondamentaux, en vue de mieux les maîtriser pour les mettre en application et communiquer dessus,
- comprendre les relations entre économie circulaire et d'autres concepts existants, notamment le Cradle to Cradle,
- identifier les méthodes et outils permettant d'évaluer l'impact environnemental des systèmes d'économie circulaire,
- mettre en évidence le potentiel de l'Analyse du Cycle de Vie dans cette perspective d'économie circulaire, et relever les biais ou les points de vigilance de cette méthodologie par rapport aux enjeux apportés par le concept,
- transmettre des recommandations méthodologiques opérationnelles pour l'évaluation environnementale de boucles matière.

Ce rapport débute par la réalisation d'un état de l'art de l'économie circulaire (partie 1) et des méthodes utilisées pour l'évaluation de tout ou partie d'actions ou de systèmes s'inscrivant dans ce concept (partie 2). Il s'agit d'un état des connaissances réalisé à un instant donné. Son contenu est tiré de la documentation existante, française et internationale, présente sous la forme de rapports publics, commandés ou non par des institutions nationales, et sous la forme de papiers scientifiques obtenus par le biais des plateformes classiques d'accès aux publications. Puisque l'économie circulaire n'est pas, à l'heure actuelle, un champ de recherche scientifique à proprement parler, les deux premières parties de ce rapport proposent une synthèse structurée des informations et analyses scientifiques formulées par les auteurs de cette documentation, recherchée parmi la plus diverse possible, sans pouvoir prétendre à une exhaustivité.

Cette phase d'analyse bibliographique a permis d'identifier de nombreux enjeux méthodologiques impactant l'évaluation de la performance environnementale des projets d'économie circulaire et, plus spécifiquement, des boucles matière. Les boucles matière sont des systèmes ou ensemble de systèmes dans lesquels un ou plusieurs flux de matière en fin de vie sont traités et valorisés sans destruction de la matière, afin d'obtenir des matières premières secondaires et de limiter l'utilisation ou la production de matière première vierge. Ces systèmes sont le cœur de l'économie circulaire ; c'est pourquoi il a été décidé la réalisation d'une analyse approfondie de ces différentes problématiques (partie 3) pour détailler au praticien ACV, les méthodes d'évaluation existantes ainsi que des recommandations opérationnelles quant à leur mise en place. Certains des enjeux présentés ne sont pas exclusivement liés à l'évaluation environnementale des boucles matière et sont largement connus de la communauté ACV. Seuls les enjeux propres à l'évaluation environnementale des boucles matière et l'interprétation de ses résultats ont été traités dans ce rapport.

En résumé, ce rapport est structuré de la façon suivante :

- la première partie relate les fondements de l'économie circulaire, l'appropriation de ce concept par les acteurs français et internationaux, et les notions qu'il sous-tend. Cette partie répond notamment à la demande de fixer les termes relatifs à l'économie circulaire et de préciser les interactions avec d'autres concepts.
- la seconde partie consiste en un état des lieux des travaux et méthodes en lien avec l'évaluation de tout ou partie des boucles de l'économie circulaire. Cette partie vise à mettre en évidence les enjeux de ces évaluations.
- La troisième partie analyse la manière dont les enjeux méthodologiques identifiés dans la seconde partie peuvent impacter l'évaluation environnementale des boucles matière. Cette évaluation a permis d'identifier des recommandations qui permettront au praticien ACV d'assurer la robustesse de ses études menées dans le cadre d'une économie circulaire.

Première partie : Fondements, acteurs et composantes de l'économie circulaire – État de l'art

Même si la sphère académique a fait émerger le terme d'« économie circulaire » à la fin des années 80, ce sont finalement les sphères politique et institutionnelle qui s'en sont majoritairement saisies et de façon récente, pour un déploiement au grand public. Cet état de l'art le prouve par l'origine des sources documentaires estampillées du terme économie circulaire (ou *circular economy* en anglais). Cette première partie du rapport revient sur la naissance originale de cette notion, ou concept comme certains l'appellent, d'économie circulaire. La structure de la première partie de ce rapport a été pensée pour refléter cette construction.

Elle aborde dans un premier temps les fondements, ou origines, de l'économie circulaire en pointant les premières apparitions du terme, puis les raisons de sa véritable émergence, récente et brusque, et enfin, la place de ce nouveau concept, qui se veut englobant pour certains ou simultanés pour d'autres à des concepts déjà installés depuis plusieurs années. Ces autres concepts sont abordés de façon synthétique dans cette sous-partie, afin que le lecteur puisse disposer de toutes les cartes et se faire sa propre opinion. Car comme cela est exposé plus loin, l'économie circulaire ne possède pas de définition normalisée.

Après l'explication des fondements de l'économie circulaire, l'appropriation de ce concept, par les acteurs politiques et institutionnels principalement, pour les raisons précédentes, fait l'objet de la seconde sous-partie. Une revue des acteurs est d'abord proposée, en réponse à la demande des membres. Le sujet évoluant de jour en jour, cette revue n'est pas exhaustive et sera surtout amenée à être modifiée si le sujet s'inscrit dans la durée. L'appropriation du concept est ensuite décrite par type d'instance, d'abord l'Union européenne compte tenu du souffle impulsé récemment, mais aussi certains États, dont les politiques en matière d'économie circulaire sont parfois plus anciennes que la prise de conscience des instances européennes et enfin les grandes organisations internationales.

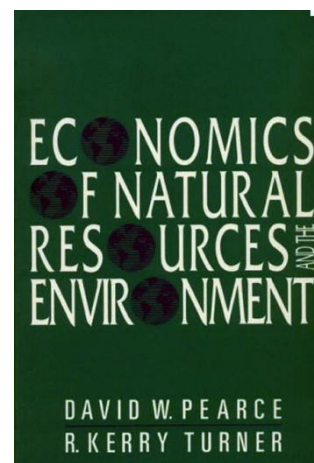
Les notions sous-tendues par le concept d'économie circulaire sont expliquées dans un troisième temps, car elles sont principalement basées sur la formalisation proposée par l'ADEME, et jusqu'à présent, observée uniquement en France. Tandis que les premières parties font le plus souvent référence à des considérations internationales, l'explication des notions sous-tendues est issue de sources principalement françaises. Le début de cette troisième sous-partie met justement l'accent sur l'absence d'une définition normalisée ou plutôt la multitude des appropriations et des représentations du concept. Elle se permet également de mentionner les préconisations de certains experts, cette fois issues du monde académique, assurant le lien avec les parties suivantes du rapport.

La dernière section de cette première partie est consacrée à la présentation des méthodes d'évaluation des systèmes d'économie circulaire et constitue le résultat d'une analyse de publications académiques, contrairement aux sections précédentes résultant de la lecture de rapports, avis, note de synthèse, publiés par des experts non académiques. Cette dernière section est dédiée à introduire la seconde grande partie de ce rapport exclusivement consacré aux méthodes et enjeux de l'évaluation.

1. Les fondements de l'économie circulaire

1.1. De l'« économie fermée » à l'« économie en boucle », premières apparitions du terme et des notions d'économie circulaire

Le terme « économie circulaire » est utilisé pour la première fois par deux professeurs de l'Université du Colorado, David W. Pearce et R. Kerry Turner, en 1989 dans *Economics Of Natural Resources And The Environment*¹. Ils proposent de convertir le système linéaire de l'économie en un système circulaire. Ils s'appuient, à ce titre, sur un autre article, celui de l'économiste Kenneth E. Boulding, de 1966, qui compare la Terre à un vaisseau spatial qui disposerait de ressources limitées. Cet économiste propose de mettre en place une « économie fermée (closed economy), qui pourrait être appelée l'économie du cosmonaute, dans laquelle la Terre est devenue un vaisseau spatial isolé, sans réservoirs illimités de quoi que ce soit [...] »² (Le Moigne, 2014).



C'est en 1976 que la proposition de mettre en place une « économie en boucle » est introduite par Walter R. Stahel et Geneviève Reday dans leur rapport d'étude pour la Commission Européenne intitulé *Jobs for Tomorrow – The Potential for Substituting Manpower for Energy*. Les auteurs avancent les notions de boucles de recyclage (recycling loops) pour les matériaux de base, consommateurs d'énergie et non recyclés, et de boucles de remise en état (reconditioning loops). En 1982, Walter R. Stahel introduit les boucles de réutilisation, réparation, refabrication et recyclage dans *The Product-Life Factor* (Figure 1) (Le Moigne, 2014).

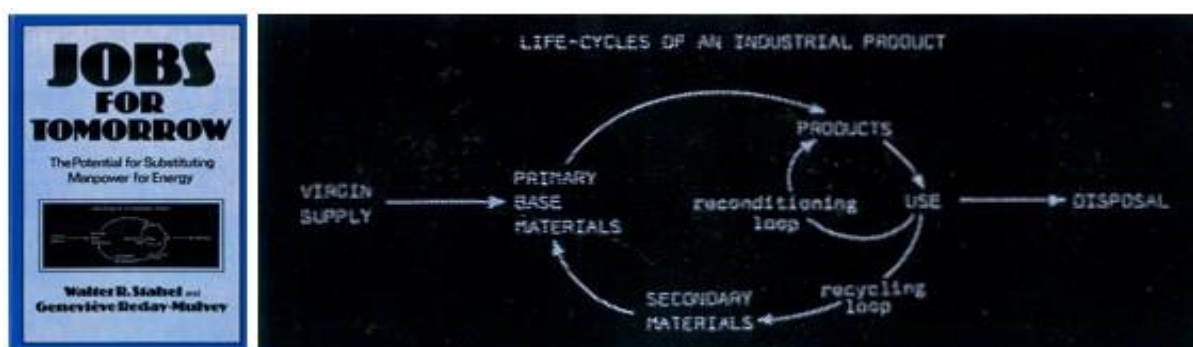


Figure 1 - Economie en boucle

(Source : <http://www.product-life.org/en/cradle-to-cradle> consulté le 8 janvier 2015)

¹ Economics Of Natural Resources And The Environment, David W. Pearce, R. Kerry Turner, The Johns Hopkins University Press (décembre 1989)

² The Economics Of The Coming Spaceship Earth, Kenneth E. Boulding, Environmental Quality In A Growing Economy (1966)

1.2. De la gestion des déchets à la gestion des ressources, l'explication de l'intérêt grandissant pour l'économie circulaire

Le concept d'économie circulaire, ou d'économie en boucle, ne s'est pas pour autant installé tout de suite. Plusieurs sources s'accordent à mettre en évidence le lien entre l'émergence de la notion d'économie circulaire et le basculement de la prise de conscience de la nécessité de gérer les déchets vers une utilisation efficace des ressources (CGEDD, 2014., Greffet et al., 2012., Lehmann et al., 2014.). Les travaux cités dans cette section retracent ce processus historique, détaillé dans les paragraphes qui suivent.

Dans les années 70 et 80, marquées par la simultanéité d'une croissance économique et d'une croissance de la population, la gestion des déchets est une priorité, appelant à la mise en œuvre de politiques publiques. Celles-ci intègrent à cette époque des actions en faveur du recyclage pour faire face au manque de place pour la mise en décharge et apporter un élément de réponse à la prise de conscience grandissante des impacts environnementaux des déchets stockés (Lehmann et al., 2014.).

Pourtant, les premières interrogations sur les liens entre croissance et environnement remontent aux travaux de Malthus, économiste britannique, à la fin du XVIII^e siècle. Dans son *Essai sur les principes de la population* (1798), il considère que la rareté des ressources naturelles conduit à faire décroître le revenu par tête avec la taille de la population. Cependant la très forte croissance économique des XIX^e et XX^e siècles a remis en cause cette représentation et relégué la question des ressources naturelles au second plan, derrière le rôle du travail, l'accumulation du capital matériel et le progrès technique (Greffet et al., 2012.).

Néanmoins, la préoccupation sur les ressources naturelles réapparaît à l'occasion des chocs pétroliers, qui font prendre conscience du caractère épuisable d'une ressource jusque-là bon marché, du risque de pénurie énergétique, mais aussi de la rente que peuvent en retirer les pays qui détiennent cette ressource (Greffet et al., 2012.).

En 1972, le Club de Rome, association privée internationale, publie un rapport alarmiste intitulé *Limits to Growth*, concluant que la poursuite de la croissance économique entraînerait à moyen terme une chute brutale de la population du fait de la pollution, de l'appauvrissement des sols cultivables et de l'épuisement des ressources fossiles. La même année, la conférence de Stockholm sur l'environnement, organisée par les Nations Unies, s'interroge sur les interactions entre écologie et économie et sur les conditions d'un modèle de développement qui pourrait allier protection de l'environnement et équité sociale. Cette conférence est le premier Sommet de la Terre, où apparaît le terme d'éco-développement qui préfigure celui de développement durable. Les années qui suivent sont marquées par la mise en évidence de multiples atteintes portées à l'environnement, qu'il s'agisse du trou de la couche d'ozone, des pluies acides, de la réduction de la biodiversité, et du réchauffement climatique. Diverses pollutions industrielles apparaissent aux yeux du grand public car faisant suite à des catastrophes comme Seveso, Bhopal ou Tchernobyl. Enfin les émissions de CO₂ s'avèrent avoir doublé entre 1960 et 1980 (Greffet et al., 2012.).

C'est dans ce contexte qu'en 1987, la Commission mondiale sur l'environnement et le développement chargée par l'ONU de s'interroger sur la possibilité de trouver des voies de rattrapage des pays du Sud et de protection de l'environnement, rend son rapport final, « *Our Common Future* », plus connu sous le nom de rapport Brundtland (Greffet et al., 2012.).

En 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, plus connu sous le nom de GIEC, est créé. Le sommet de la Terre à Rio en 1992 constitue la première réponse internationale à la question du changement climatique. Il aboutit, entre autres, à la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, qui encourage les 189 pays signataires à stabiliser leurs émissions de gaz à effet de serre (Greffet et al., 2012.).

L'évolution des stocks de ressources naturelles est donc une préoccupation latente depuis le rapport du Club de Rome. Le sujet a pris davantage d'importance depuis la hausse du prix des matières premières au début des années 2000, puis la crise financière et économique de 2008 a occulté les questions environnementales en mettant au premier plan le besoin de restaurer les conditions de la croissance et la soutenabilité des finances publiques (Greffet et al., 2012.).

1.3. La place de l'économie circulaire dans un foisonnement de concepts

L'économie circulaire n'est pas le seul concept de soutenabilité utilisé actuellement. Le schéma ci-dessous (Figure 2) en révèle quelques-uns. On notera la différence de représentation des concepts entre le schéma cité à l'instant et la formalisation du concept proposé par l'ADEME (Figure 12 page 25). Elle révèle une différence d'appropriation entre la proposition d'une nouvelle notion à juxtaposer aux autres concepts et la proposition d'une notion englobante.

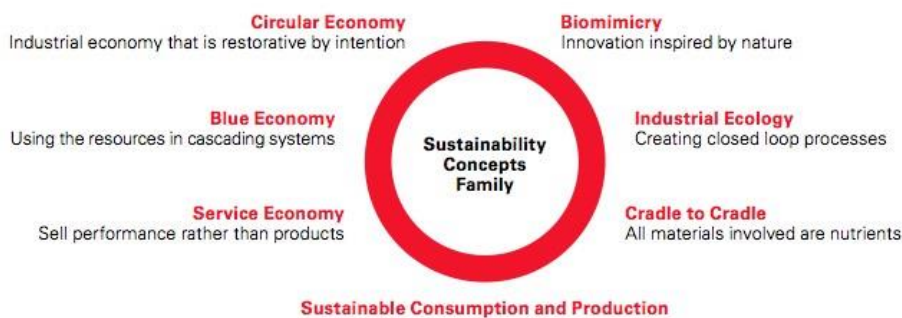


Figure 2 - L'économie circulaire parmi d'autres concepts de soutenabilité (source : Lehmann et al., 2014.)

Le premier rapport de la Fondation Ellen MacArthur, intitulé *Towards the circular economy – Economic and business rationale for an accelerated transition*, exprime également le fait que l'économie circulaire trouve ses racines dans plusieurs « écoles de pensée (schools of thought) ».

Sans prétendre à l'exhaustivité, un éclairage succinct est proposé dans cette partie sur certains d'entre eux. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que plusieurs d'entre eux sont apparus à la même période, entre la fin des années 80 et le début des années 90. Les intitulés sont volontairement indiqués sous leur terminologie anglophone, puisque c'est en anglais que ces idées ont initialement été traduites et que leur traduction francophone amène régulièrement au débat.

1.3.1. Performance economy (nommée aussi Service economy)

Avant d'arriver à formuler ce concept, Walter R. Stahel est passé par divers éléments de terminologie tels que « new service economy » (1989), « Utilization-Focused Service Economy » (1994), « Functional Economy » (1997) et « Functional Service Economy » (2006). Finalement Walter R. Stahel le nommera dans son ouvrage le plus récent, dont la seconde édition a été publiée en 2010, la *Performance economy*. Ce concept se veut englobant et désigne le passage d'un modèle centré autour de la production à un modèle fondé sur la performance. Il se concentre sur trois éléments :

1. la performance de l'utilisation (et non de la production),
2. l'optimisation des stocks existants,
3. la vente de services plutôt que de biens, en respectant le principe que le producteur conserve la responsabilité du bien.

Johan Van Niel conseille de ne pas confondre ce concept avec celui d'économie de fonctionnalité, qui n'y est présenté que comme l'un des rouages de cette « Performance economy », au même titre que les stratégies d'éco-conception (Van Niel, 2014).

1.3.2. Cradle to Cradle

Le concept de Cradle to Cradle (ou C2C) a émergé à la fin des années 80 par les travaux du chimiste allemand Michael Braungart et de l'architecte américain William McDonough. Leur premier ouvrage intitulé *Cradle to Cradle: Remaking The Way We Make Things* a été publié en 2002 (ADEME/ARF, 2014.).

Cette approche vise à développer des produits qui ont un cycle de vie circulaire, du berceau au berceau, afin de pouvoir être récupérés et réutilisés continuellement (Le Moigne, 2014.). Elle

considère que toute matière impliquée dans les cycles industriels et commerciaux constitue des nutriments, que l'on peut distinguer en deux catégories : les nutriments techniques, faisant partie de la technosphère et les nutriments biologiques, appartenant à la biosphère (Ellen MacArthur Foundation, 2012.).

Ce concept de C2C repose sur 3 principes (Bjorn et al., 2012.):

1. les déchets sont équivalents à des ressources. En d'autres termes, il s'agit d'éliminer la notion de déchets et de concevoir des systèmes pour lesquels les émissions, produites à n'importe quels stades, sont absorbables par d'autres procédés. La répartition dans l'une ou l'autre des catégories, techniques ou biologiques, est un élément de réponse à la perte de qualité.
2. l'énergie nécessaire au fonctionnement d'une société C2C doit provenir des apports solaires. Ces apports se traduisent sous la forme d'énergie photovoltaïque, géothermique, éolienne, hydraulique et enfin issue de la biomasse. La contrainte de quantité est levée dès lors que la provenance de l'énergie est celle citée précédemment.
3. la diversité doit être célébrée. L'approche préconise d'abandonner les solutions standardisées et de concevoir des produits qui respectent les environnements, économies et cultures locaux.

Une présentation récente d'E. Allodi auprès des membres de SCORE LCA révèle un 4^{ème} principe, celui de la coopération et de la vision systémique.

Un programme de certification C2C a été mis en place par ses développeurs en 2005 (Le Moigne, 2014.). Autrefois délivrée par EPEA (Europe) et MBDC (Amérique du Nord), cette certification est désormais attribuée par l'intermédiaire d'une organisation à but non lucratif, appelé Cradle to Cradle Products Innovation Institute (Bjorn et al., 2012.). Cinq niveaux de certification ont été définis : basique, bronze, argent, or et platine. L'évaluation du produit, des matériaux et de son procédé de fabrication est réalisée selon 5 critères (Le Moigne, 2014.) :

- le produit utilise des matériaux qui sont sûrs et sans danger pour l'homme et l'environnement
- le produit utilise des matériaux qui peuvent être réutilisés sans danger par la nature ou l'industrie
- le produit est fabriqué et assemblé en utilisant une énergie renouvelable non polluante
- le produit est fabriqué de façon à préserver et enrichir les réserves en eau
- le produit est fabriqué de façon à faire progresser la justice sociale et environnementale.

L'intérêt de la certification C2C pour les entreprises repose, au-delà des bénéfices environnementaux et sociaux générés, sur l'augmentation de parts de marchés. Dans l'une des brochures de communication sur la certification conçues par l'Institut, il est révélé qu'un producteur de verre plat a augmenté ses parts de marché de 21% depuis qu'il est certifié C2C, grâce à de nouveaux clients dans le marché de la construction durable.

1.3.3. Industrial ecology

L'expression *Industrial Ecology* apparaît de manière sporadique dans la littérature scientifique dans les années 60 et 70. Elle est popularisée par la publication d'un article, en 1989, dans le numéro thématique *Managing Planet Earth* du mensuel de vulgarisation *Scientific American*, écrit par Robert Frosch et Nicholas Gallopoulos, respectivement vice-président de la recherche et responsable de la recherche sur les moteurs chez General Motors. Dans cet article, les deux auteurs développent l'idée qu'il devrait être possible de mettre au point des méthodes de production industrielle dont l'impact sur l'environnement serait considérablement réduit. Cette hypothèse les conduit à introduire la notion d'écosystème industriel (Erkman, 1998.).

Son institutionnalisation en tant que champ scientifique date du colloque de Washington en mai 1991 parrainé par la *National Academy of Science*, et de la publication dès 1997 d'une revue spécialisée *The Journal of Industrial Ecology*. Ce concept dispose d'une communauté internationale, réunie en partie dans l'*International Society for Industrial Ecology (ISIE)*, présidée entre autres par le Professeur

Roland Clift de l'Université de Surrey. L'ISIE a pour objectif de promouvoir le développement de la recherche, de la formation, de politique et de pratiques industrielles en lien avec ce concept (ADEME/ARF, 2014.).

L'introduction de ce concept en France a été initiée par les travaux de Suren Erkman, Professeur à l'Université de Lausanne et auteur d'un des premiers ouvrages en français dédiés au sujet³, et Dominique Bourg, également Professeur à l'Université de Lausanne. Tous deux ont co-fondé en 2005 la première chaire d'écologie industrielle au monde, basée à l'Université Technologique de Troyes (UTT) (ADEME/ARF, 2014.).

Les puristes du concept s'attardent toujours à rappeler la signification de cette expression. L'écologie industrielle est *écologique*, en rapport à l'étude des écosystèmes naturels ou « non humains », comme modèle pour les activités économiques, et *industrielle* au sens anglo-saxon du terme, signifiant qu'elle regroupe l'ensemble des activités de production et de consommation de biens et de services.

Au cours des années 2000 émerge en France l'écologie territoriale, sur une proposition initiale de Pierre Calame de la Fondation Charles Léopold Mayer, puis formalisée par deux chercheurs, Sabine Barles de l'Université Paris 1, et Nicolas Buclet, président actuel de la chaire de l'UTT. L'écologie industrielle et territoriale est à la croisée de ces deux champs scientifiques (ADEME/ARF, 2014.).

Certains évoquent l'enracinement de l'économie circulaire dans le concept d'écologie industrielle (Preston, 2012., Lehmann et al., 2014.).

1.3.4. Biomimicry

Le biomimétisme a été rendu populaire par le livre *Biomimicry : Innovation inspired by nature* de Janine Benyus en 1997. Selon la fondation Ellen MacArthur, l'auteur définit cette approche comme une nouvelle discipline qui étudie les meilleures inventions de la nature pour les adapter au service de l'homme. Le biomimétisme repose sur 3 principes (Le Moigne, 2014.) :

1. la nature comme modèle. Il s'agit d'étudier les modèles fournis par la nature et d'imiter ses formes, ses processus, ses systèmes et ses stratégies pour résoudre les problèmes humains.
2. la nature comme mesure. Ce principe préconise d'utiliser une norme écologique pour juger du caractère durable des innovations humaines.
3. la nature comme mentor. L'objectif est de regarder et d'évaluer la nature non pas sur la base de ce que nous pouvons extraire comme ressources, mais plutôt de ce que nous pouvons en apprendre.

1.3.5. Green economy

Ce terme, absent de la Figure 2, est néanmoins intéressant à soulever car l'intérêt pour la *Green economy* est récent, même s'il reste antérieur à celui de l'économie circulaire. Il a été encouragé par la déception généralisée à l'égard du paradigme économique dominant, marqué par la multitude de crises et les dysfonctionnements du marché, en particulier la crise économique de 2008 (PNUE, 2011.). Certains considèrent la *Green economy* comme un concept englobant, créant un débat avec ceux qui considèrent que l'économie circulaire est aussi englobante.

Le caractère plus ou moins « vert » d'une activité peut être défini selon deux approches (Greffet, 2012.):

- l'approche par les impacts. Dans ce cas, c'est une notion relative puisqu'une activité est qualifiée de verte en référence à une activité équivalente qui exerce une pression plus grande sur l'environnement.

³ Erkman S., *Vers une écologie industrielle. Comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle*, Paris, Editions Charles Léopold Mayer, 1998 (2e édition, enrichie et mise à jour, 2004). Ouvrage traduit en chinois et publié en 1999 par l'Economic Daily Press, Pékin (Chine).

- l'approche par la finalité économique. Ici, une activité est dite « verte » si elle consiste à produire des biens ou services dont la finalité est la protection de l'environnement. Selon les définitions statistiques retenues par Eurostat et l'OCDE, ces activités sont regroupées sous le terme d' « éco-activités ». Les emplois qu'elles génèrent sont les emplois verts.

L'économie verte est une économie qui entraîne une amélioration du bien-être humain et de l'équité sociale tout en réduisant de manière significative les risques environnementaux et la pénurie de ressources (PNUE, 2011.). Dans la pratique, cette définition n'est pas arrêtée définitivement. L'Organisation Internationale du Travail a proposé une définition théorique qui inclut à la fois les emplois dont la finalité est la protection de l'environnement, mais aussi ceux qui exercent une pression faible sur l'environnement, et ceux qui exercent une pression forte, mais qui fournissent des secteurs verts (par exemple la production d'aciers utilisés pour la construction d'éoliennes). Le périmètre statistique retenu par la France pour l'économie verte recouvre le « noyau dur » des éco-activités et y adjoint les activités produisant des biens et services dits favorables à la protection de l'environnement qui, même s'ils n'ont pas pour finalité la protection de l'environnement, sont plus respectueux que les autres produits rendant le même service (Greffet, 2012.).

Il est rappelé que le concept d'économie verte ne remplace pas celui de développement durable ; néanmoins il est de plus en plus largement reconnu que la réalisation du développement durable dépend presque entièrement d'une approche économique appropriée à son succès (PNUE, 2011.).

2. L'appropriation du concept d'économie circulaire

2.1. Revue des acteurs de l'économie circulaire

L'identification des acteurs contribuant au concept de l'économie circulaire n'est pas une tâche aisée, puisque ce concept qui n'a pas de définition normalisée, revêt un ensemble de notions larges.

La cartographie, présentée ci-dessous (Figure 3), a donc été construite sur la base :

- d'un panel de structures, souvent institutionnelles, directement impliquées dans le concept d'économie circulaire qui en fait leur raison d'être,
- d'un panel d'organismes identifiés comme des « incontournables » de l'une ou l'autre des notions englobées sous le chapeau de l'économie circulaire,
- et d'un panel d'acteurs appartenant à des structures, dont la mission première n'est pas liée aux notions ou au concept d'économie circulaire, mais qui y contribuent au travers de rapports ou de publications scientifiques.

Trois échelles, française, européenne et internationale ont été distinguées pour cette cartographie.

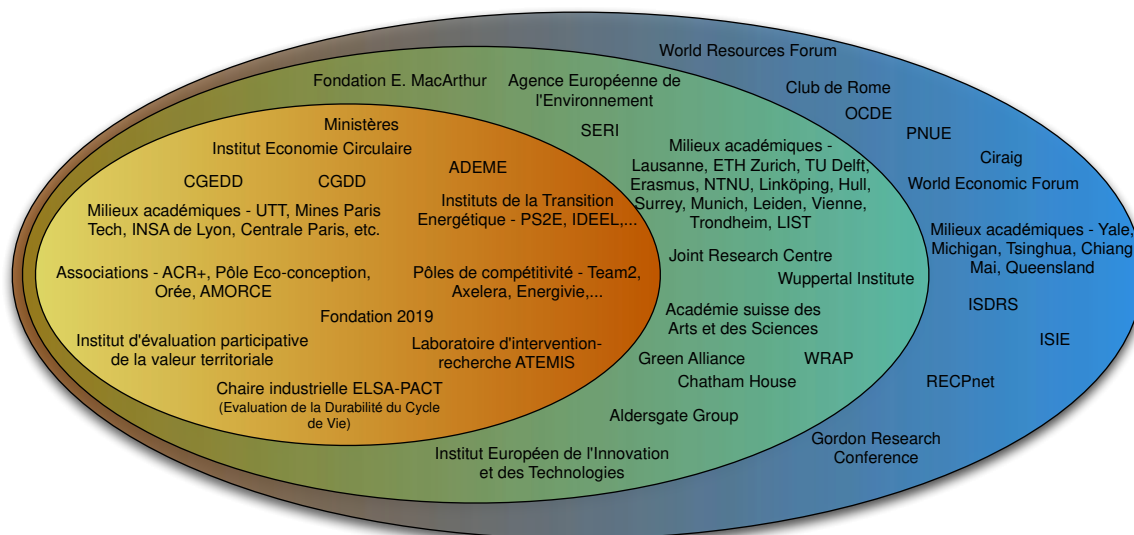


Figure 3 - Cartographie des acteurs de l'économie circulaire (source : Sofies)

2.2. Dynamique des instances européennes

Le terme d'« économie circulaire » est utilisé dans une communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil Economique et Social Européen et au Comité des Régions, rendue publique en 2014 et intitulée « Vers une économie circulaire : programme zéro déchet pour l'Europe ». Il y est affirmé que « le passage à une économie plus circulaire est un élément essentiel de l'initiative sur l'utilisation efficace des ressources établie dans le cadre de la stratégie Europe 2020 pour une croissance intelligente, durable et inclusive ».

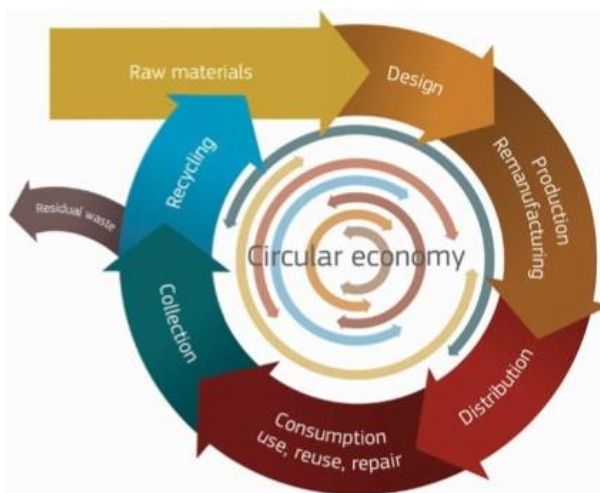


Figure 4 - Schéma conceptuel de l'économie circulaire (source : Commission Européenne)

Cette communication s'inscrit dans les efforts de promotion d'une « Europe efficace dans l'utilisation des ressources » entrepris par la Commission Européenne depuis plusieurs années et qui compte parmi les sept initiatives phares de la stratégie Europe 2020. Il y est mentionné qu'une utilisation plus efficace des ressources assurera l'atteinte des objectifs que l'Europe s'est fixée, notamment en ce qui concerne le changement climatique et la baisse des émissions de gaz à effet de serre en Europe de 80% voire 95% d'ici 2050.

Dès 2008, la Commission lance l'initiative « matières premières » destinée à répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe. Un groupe de travail ad hoc, présidé par la Commission, publie en 2010 un rapport identifiant une liste de 14 matières critiques au sens du risque sur l'approvisionnement et du risque économique. L'Europe s'engage à

reposent sur des engagements volontaires, éventuellement accompagnées d'incitations fiscales et de subventions (CGEDD, 2014.).

2.3.1. Exemple de la Chine

La stratégie de développement de l'économie circulaire a été formellement acceptée par le gouvernement central chinois en 2002. Initialement centrée autour du recyclage de déchets, cette stratégie s'est peu à peu tournée vers un contrôle élargi, orienté vers l'efficacité de chaque étape depuis la production, la distribution et la consommation pour faire du concept de l'économie circulaire, un nouveau modèle de développement (Lehmann et al., 2014.).

Ces dix dernières années, plusieurs experts ont mis en évidence les conséquences d'une politique chinoise centrée exclusivement autour de l'industrie, des infrastructures et des innovations technologiques sur le gaspillage d'énergie et le mauvais usage des ressources. Ces experts ont proposé d'étendre les efforts à deux autres niveaux, méso et macro, qui viennent alors s'ajouter au niveau micro, initialement cœur de cible de la politique chinoise (Figure 6) (Lehmann et al., 2014.).

	Micro (single object)	Meso (symbiosis association)	Macro (city, province, state)
Production area	Cleaner production; Eco-design	Eco-industrial park; Eco-agricultural system	Regional eco-industrial network
Consumption area	Green purchase and consumption	Environmentally friendly park	Renting service
Waste management area	Product recycle system	Waste trade market; Venous industrial park*	Urban symbiosis
Other support	Policies and laws; information platform; capacity-building; NGOs		

*"Venous industries" refers to industries that turn solid industrial waste into reusable resources, which will then be re-used in production (China Daily, 2007)

Figure 6 - Structuration des pratiques en matière d'économie circulaire en Chine (source : Lehmann et al., 2014.)

En 2012, l'un des experts nationaux sur les ressources, Jaikun Song, a présenté le concept de « Township Building » lors du Forum mondial des ressources à Pékin. Ce concept vise à s'écarter du modèle traditionnel d'urbanisation en encourageant les populations rurales à rester dans ces espaces et à contribuer à leur développement. Pour ce faire, la coopération entre villages est promue pour rendre la circulation des ressources et des déchets plus efficace et construire des petites villes à côté des très grandes existantes. Le gouvernement a affirmé en 2012 soutenir ce concept de « Township Building » (Lehmann et al., 2014.).

2.3.2. Cas de la France

La France affirme son soutien institutionnel au développement d'une gestion efficace des ressources à travers l'économie circulaire (ADEME/ARF, 2014.).

Sur ce sujet, la conférence environnementale de septembre 2013 y dédiait une table ronde, permettant de poser les bases des chantiers à mener et d'élaborer la feuille de route gouvernementale. La conférence de mise en œuvre de l'économie circulaire, organisée à Gardanne en décembre 2013, a précisé la mise en œuvre des décisions prises et a mobilisé tous les acteurs de l'économie circulaire : collectivités, entreprises, syndicats, associations environnementales, parlementaires, éco-organismes, services de l'État, etc. Trois actions majeures en sont ressorties :

1. préciser les engagements volontaires que pourraient prendre les entreprises dans le cadre des plans d'action élaborés par les Comités stratégiques de filières. Le Conseil National de l'Industrie est chargé de déterminer les actions à mettre en œuvre selon les spécificités de chaque secteur. Ces contrats de filières comprendront tous un axe économie circulaire.
2. construire des stratégies régionales d'économie circulaire. L'Association de Régions de France et l'ADEME ont publié fin 2014 le « Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France ».
3. ouvrir une réflexion sur la gestion des ressources stratégiques françaises. Les pouvoirs publics n'ont cependant pas attendu les conférences environnementales pour créer un comité

sur le sujet des métaux stratégiques (COMES). Conscient des difficultés que peuvent rencontrer les entreprises en termes d'accès aux matières premières, ce comité, créé en 2011, se veut être un lieu de concertation entre les ministères, organismes publics et fédérations professionnelles représentant l'industrie.

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, promulguée le 17 août 2015, consacre son titre IV à la promotion de l'économie circulaire. Des objectifs structurants y sont intégrés parmi :

- La réduction de 10 % des déchets ménagers et assimilés produits d'ici 2020.
- La valorisation matière de 55 % des déchets non dangereux non inertes en 2020 et 65 % en 2025.
- La valorisation matière de 70 % des déchets du bâtiment et des travaux publics à l'horizon 2020.
- La réduction des quantités de déchets non dangereux non inertes mis en décharge de 30% en 2020 puis 50 % à l'horizon 2025.

En 2015, la France accueillera et présidera la 21^{ème} Conférence des parties de la Convention-cadres des Nations Unies sur les changements climatiques (COP 21). L'échéance est cruciale puisqu'elle doit aboutir à un nouvel accord international sur le climat. Loin de l'idée d'opposer économie circulaire et climat, l'Institut de l'Economie Circulaire a lancé très récemment une enquête destinée à identifier les contributions de l'économie circulaire à la lutte contre le dérèglement climatique.

2.4. Dynamique des organisations internationales

Au niveau international, l'OCDE et le PNUE mènent des travaux en lien avec la gestion efficace des ressources, sans cibler spécifiquement le concept d'économie circulaire.

De son côté, l'OCDE a développé dès 2004 le concept de Gestion Durable des Matières (GDM) intégré dans le programme « Productivité des ressources et déchets ». Cette approche intégrée traite de la gestion des matières sur le plan de l'efficacité économique tout au long de leur cycle de vie. Un Forum mondial ayant pour thème central la GDM s'est tenu en Belgique en 2010 rassemblant des experts éminents des administrations nationales, des ONG et du secteur privé. Les débats qui s'y sont déroulés s'appuyaient sur des études à caractère politique concernant la définition de cibles, les principes d'action et les instruments de l'action publique au service de la GDM, ainsi que des études de cas sur certaines matières : l'aluminium, les métaux critiques, les fibres de bois et les matières plastiques.

Le PNUE s'est attelé en 2012 à la préparation de Rio+20 et est notamment l'auteur de *Towards a Green Economy – Pathways to sustainable development and Poverty Eradication*, publié en 2011. Parmi l'ensemble de ses initiatives en lien avec les objectifs de l'économie circulaire, le PNUE a lancé en 2007 la création d'un groupe d'experts sur la gestion durable des ressources, nommé *l'International Resource Panel (IRP)*. Sa mission est de rassembler et d'évaluer la littérature scientifique, technique et socio-économique sur l'utilisation des ressources naturelles, dans l'objectif de contribuer au découplage absolu entre la croissance économique et les impacts environnementaux (ADEME/ARF, 2014.). L'action de ce groupe d'experts scientifiques indépendants s'apparente à celle du GIEC sur le changement climatique. Après la publication d'un premier rapport en 2011 sur le découplage des ressources (*Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*), l'IRP livre le second en 2014, intitulé *Decoupling 2 – technologies, opportunities and policy options*.

Enfin, la plateforme de connaissances World Resources Forum (WRF) organise presque chaque année depuis 2009 une conférence mondiale, qui attire plusieurs centaines de politiciens, chefs d'entreprises, ONGs et scientifiques, avec l'objectif de promouvoir l'innovation en matière de productivité des ressources. Cette plateforme est une émanation de l'Institut de recherches Empa en Suisse qui organisait lui-même depuis 1995 des conférences internationales sur les sujets du recyclage et de la réutilisation des ressources. Depuis la conférence de Davos (Suisse) en 2009, le WRF a largement orienté ses débats vers le sujet de l'économie circulaire et a poursuivi les discussions dans ses conférences de 2011 et 2013 à Davos et de 2012 à Pékin. Un travail de synthèse de ces échanges a été conduit par le WRF en partenariat avec les Académies suisses de sciences avec l'objectif d'en ressortir les principales étapes pour atteindre un déploiement de

l'économie circulaire au niveau mondial. Ces étapes sont listées dans la publication de Lehmann (Lehmann, 2014.).

3. Ce que sous-tend le concept d'économie circulaire

3.1. Une notion aux contours non stabilisés

Comme l'exprime l'ADEME, il n'existe pas aujourd'hui de définition « normalisée » ni même stabilisée du concept d'économie circulaire. Quelques-unes de ces définitions sont reprises dans les extraits ci-dessous.

*« L'économie circulaire peut se définir comme un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à **augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien-être des individus.** »* ADEME

*« L'économie circulaire désigne l'ensemble des activités de **réduction, de réutilisation et de recyclage menées durant le processus de production, de distribution et de consommation.** »* Extrait de l'art. 2 de la loi sur l'économie circulaire de la République Populaire de Chine

*« La transition vers une économie circulaire appelle une **consommation sobre et responsable** des ressources naturelles et des matières primaires ainsi que, en priorité, un **réemploi** et une **réutilisation** et, à défaut, un **recyclage** des déchets, des matières premières secondaires et des produits. La promotion de **l'écologie industrielle** et de la **conception écologique** des produits, **l'allongement de la durée du cycle de vie** des produits, la **prévention des déchets**, des polluants et des substances toxiques, le traitement des déchets en respectant la **hiérarchie des modes de traitement**, la **coopération entre acteurs économiques** à l'échelle territoriale pertinente, le **développement des valeurs d'usage et de partage** et de l'information sur leurs coûts écologique, économique et social contribuent à cette nouvelle prospérité »*
Loi sur la Transition Énergétique pour une Croissance Verte

*« L'économie circulaire est un terme générique pour une **économie industrielle** qui est à dessein **réparatrice** et dans laquelle les flux de matériaux sont de deux sortes : **les matériaux biologiques**, susceptibles de réintégrer la biosphère, et les **matériaux techniques**, destinés à être revalorisés sans entrer dans la biosphère. »* Fondation Ellen MacArthur

*« L'économie circulaire est un **mode de développement économique** basé sur la prise en considération du flux des matières, qui exige le respect des principes écologiques et une **utilisation rationnelle des ressources naturelles** pour assurer un développement durable. »* Jean-Claude Lévy et Vincent Aurez dans *Economie circulaire, écologie et reconstruction industrielle ?*

Malgré ces définitions distinctes, l'un des principaux mots d'ordre commun est bien celui de l'utilisation efficace des ressources, et ce, en vue du nécessaire découplage entre croissance économique et croissance des besoins en matières premières.

3.2. Des représentations schématiques diverses du concept

L'un des schémas les plus connus et les plus adaptés est sans doute celui fourni par la fondation Ellen MacArthur (Figure 7).

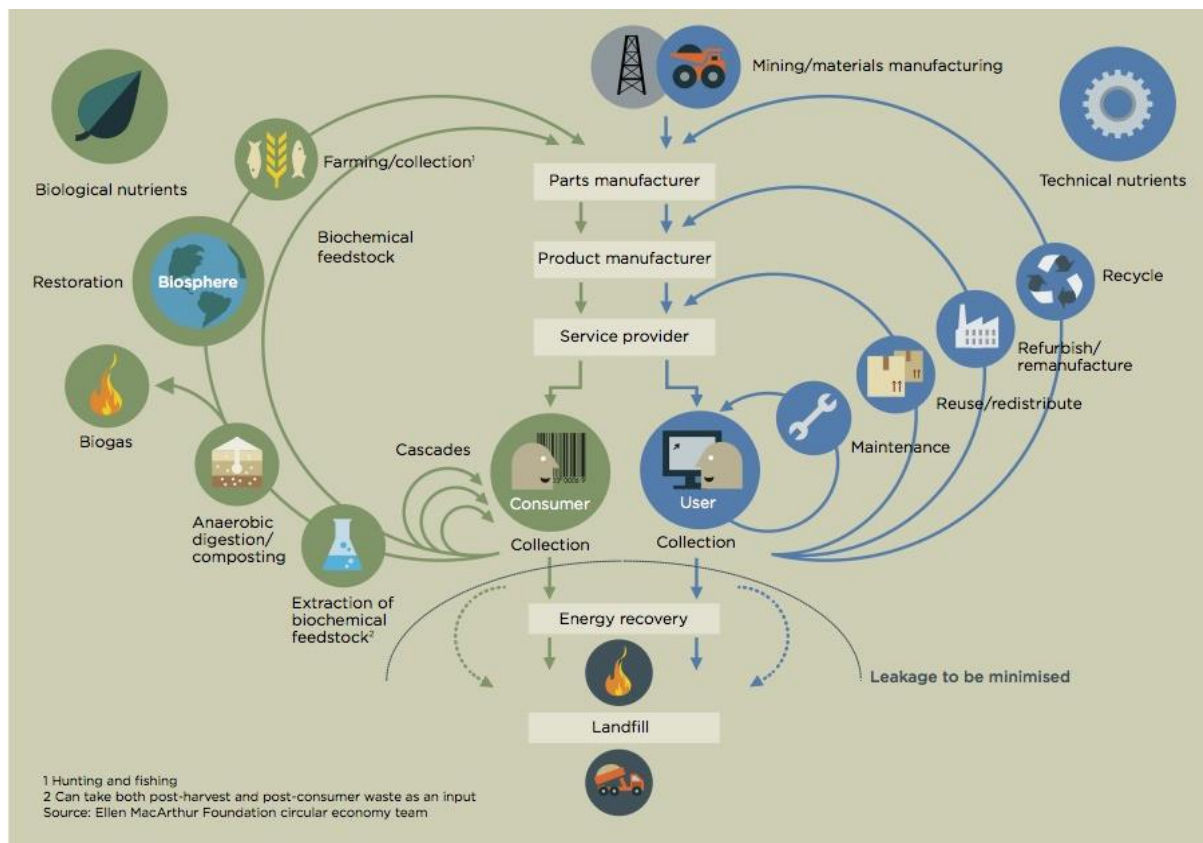
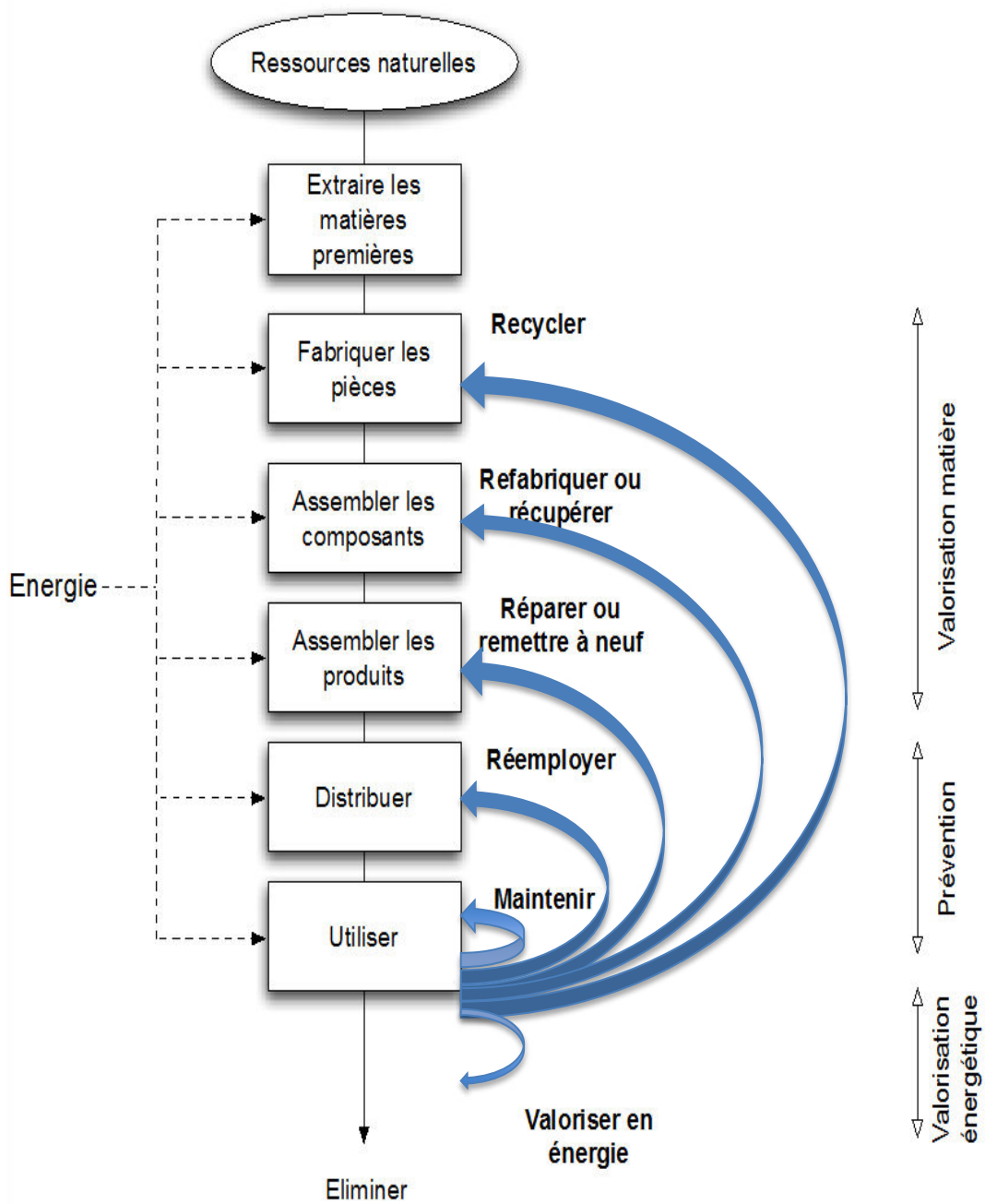


Figure 7 - Représentation du concept d'économie circulaire (source : Ellen MacArthur Foundation, 2012.)

Ce schéma reprend le postulat du concept C2C en considérant que toute matière impliquée est un nutriment que l'on peut distinguer comme technique ou biologique. Rémy Le Moigne précise cette schématisation, en ajoutant l'entrée « énergie », en détaillant les étapes depuis la fabrication jusqu'à l'utilisation, permettant ainsi de distinguer un peu plus les boucles possibles. Ces schémas, tirés de son ouvrage L'Economie circulaire – Comment la mettre en œuvre dans l'entreprise grâce à la reverse supply chain⁴, ont été néanmoins adaptés pour ce rapport afin d'être plus proches de la représentation d'Ellen MacArthur (Figure 8).

⁴ Ed. DUNOD



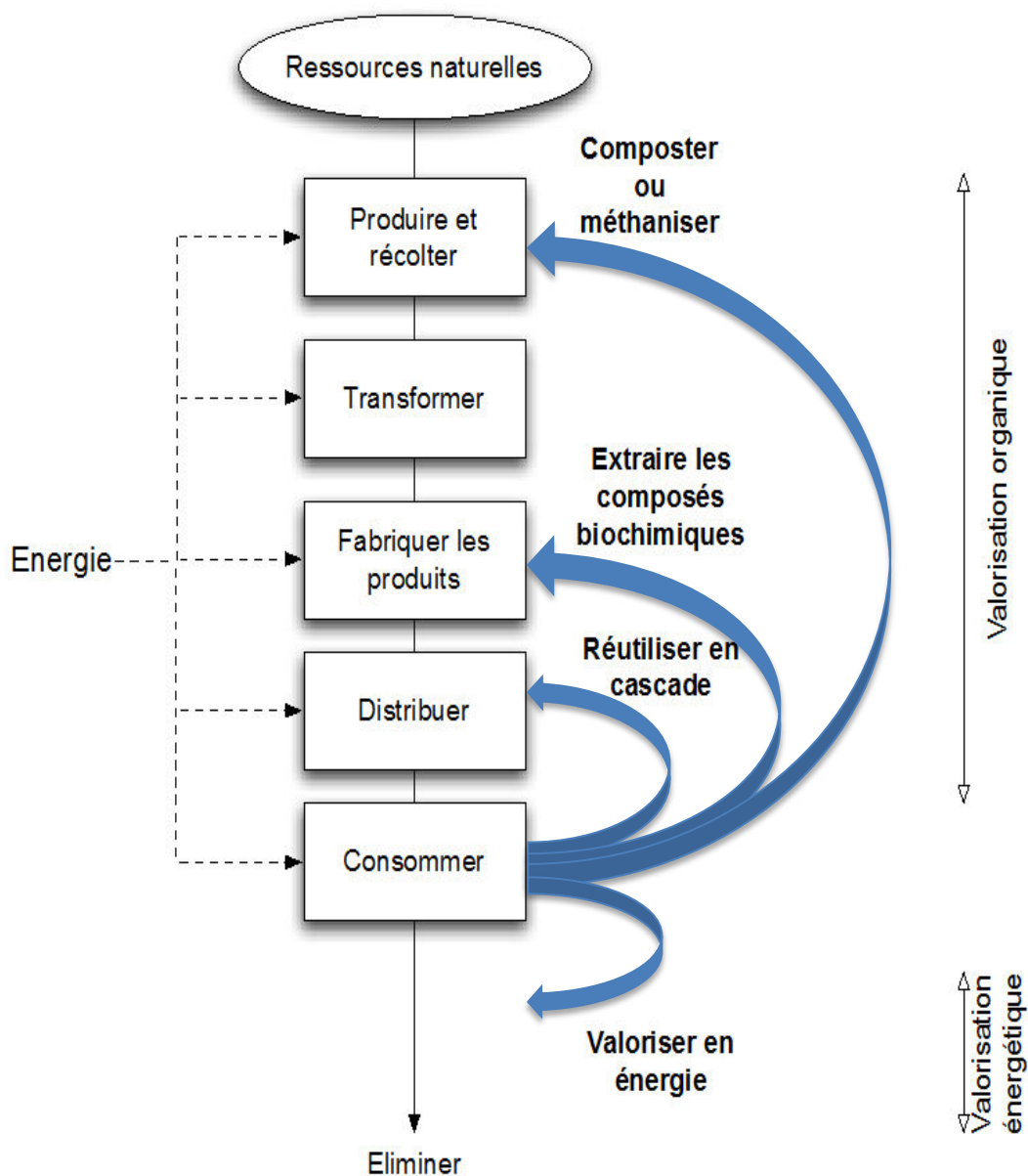


Figure 8 - Représentation du concept d'économie circulaire en haut pour les nutriments techniques, en bas pour les nutriments biologiques (source : Sofies, d'après Le Moigne, 2014.)

3.3. Préconisation d'experts vis-à-vis du concept d'économie circulaire

Le concept d'économie circulaire n'est pas, à l'heure actuelle, un champ de recherche à proprement parler.

Peu de travaux scientifiques s'attardent donc à développer et surtout à structurer cette notion. Sans pour autant remettre en cause l'engouement qu'elle suscite, certains scientifiques en apportent une analyse critique, non pas dans son contenu, mais dans l'utilisation du terme « circulaire » et alertent par rapport à de possibles interprétations trop rapides. Une synthèse des idées clés développées dans un récent article de Paul H. Brunner de l'Université technologique de Vienne est proposée ci-après.

Avant cela, certains experts s'étaient déjà posé la question des stratégies d'action nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle du développement durable. Leur énoncé est partagé ci-dessous.

L'économie circulaire trouve ses racines dans le concept d'écologie industrielle

Décrit à la section 1.3.3, le concept d'écologie industrielle propose d'envisager notre système industriel, défini dans le sens de l'ensemble des activités de production et de consommation de biens et de services, comme un cas particulier d'écosystème naturel. Les méthodologies proposées par ce concept vont dans le sens d'une transformation du système industriel constitué d'une collection de flux linéaires qui s'ignorent entre eux, en un écosystème industriel intégrant des réseaux d'interactions complexes destinés à limiter l'utilisation de ressources et la production de déchets. Cette transformation vise à rendre l'écosystème industriel « mature ».

En 1998, le Professeur Suren Erkman s'est attaché, dans son ouvrage intitulé *Vers une écologie industrielle*⁵, à définir les stratégies de maturation qui, selon lui, reposent sur 4 principes :

1. Boucler (ou fermer les cycles matières)

Ce premier principe renvoie à l'une ou l'autre des boucles présentées dans les schémas de la section précédente (4.2). Cette stratégie n'est cependant pas suffisante à elle-seule selon le Pr. Erkman.

2. Etanchéfier (ou minimiser les pertes dissipatives)

Ce second principe peut s'appliquer à toutes les étapes de la vie d'un produit, depuis la fabrication jusqu'à son utilisation. La réglementation actuelle s'intéresse presque exclusivement à la minimisation des émissions, dans l'eau, l'air et le sol, émis lors des processus de fabrication ; pourtant la consommation et l'utilisation polluent parfois plus. La dissipation est même parfois inhérente au produit et s'effectue lors de son usage normal comme c'est le cas avec les engrais, les pesticides, les solvants, etc. «[...] L'approche préventive devrait prévaloir : la priorité devrait aller au design de produits conçus dès le départ pour être intégralement recyclés, de préférence à l'approche *end-of-pipe*, qui chercherait à résoudre ce problème après coup [...] »

3. Intensifier (ou dématérialiser les produits et les services)

La dématérialisation consiste à minimiser les flux de matière et d'énergie tout en assurant des services au moins équivalents. Le progrès technique permet d'obtenir plus de services avec une quantité moindre de matière, notamment en fabricant des objets plus légers ou en substituant les matériaux. La dématérialisation a toutefois ses revers, car l'utilisation d'une quantité moindre de matière fragilise les produits ; leur durée de vie peut se retrouver réduite, induisant une consommation accrue de ressources et une génération croissante de déchets. L'une des meilleures manières de dématérialiser l'économie consiste à optimiser l'utilisation de certains produits. Une solution intéressante consiste à vendre l'usage au lieu de l'objet.

⁵ Ed. Charles Léopold Mayer

L'illustration de la portée de ce troisième principe (Figure 9), sur les liens cerclés de rouge, en reprenant le schéma précédent, révèle la complémentarité par rapport aux boucles.

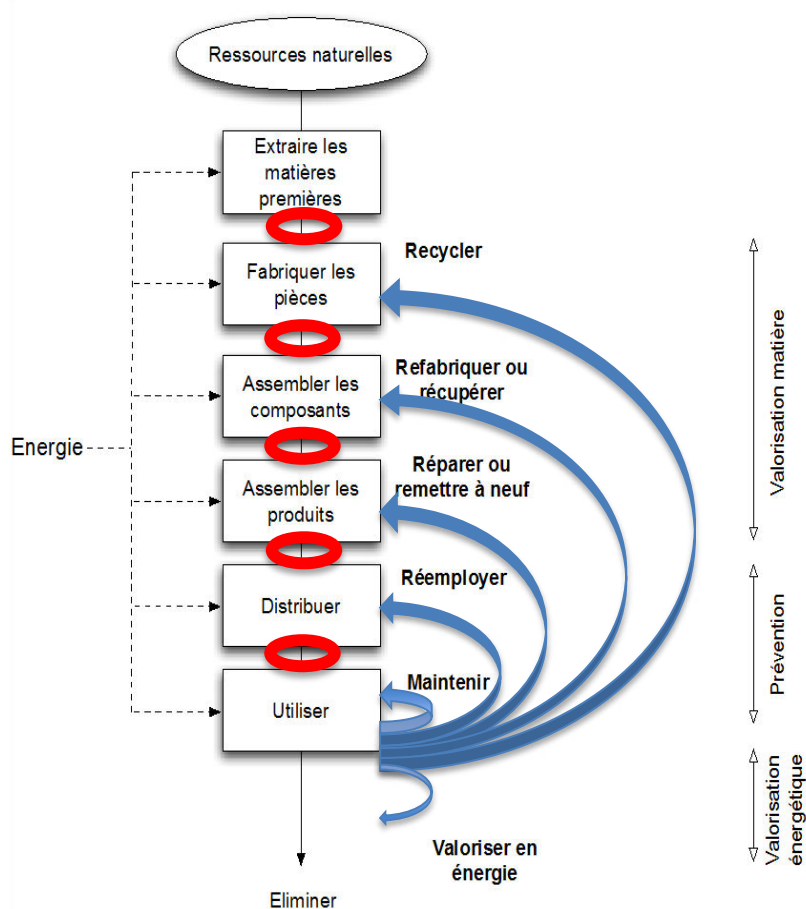


Figure 9 - Illustration de la portée du principe "Intensifier" (source : Sofies, d'après Le Moigne, 2014.)

4. Décarboniser (ou décarboniser la diète énergétique)

Depuis la Révolution industrielle, le carbone est l'élément principal des économies industrielles. Son rejet dans l'atmosphère sous forme de CO₂ lors du processus de combustion conduit à une accumulation et à une modification de l'effet de serre. Rendre la consommation d'hydrocarbures moins dommageable, notamment par la récupération du CO₂, et favoriser la transition vers une diète énergétique, qui plus est moins riche en carbone fossile, constituent les deux voies d'amélioration. L'un des leviers pour favoriser cette diète consiste notamment à réorganiser la circulation des flux « pour rendre le système [...] énergétiquement plus frugal » (Erkman, 1998.).

De la même manière que précédemment, l'illustration de l'action de ce dernier principe par le cercle rouge démontre sa complémentarité par rapport aux boucles (Figure 10).

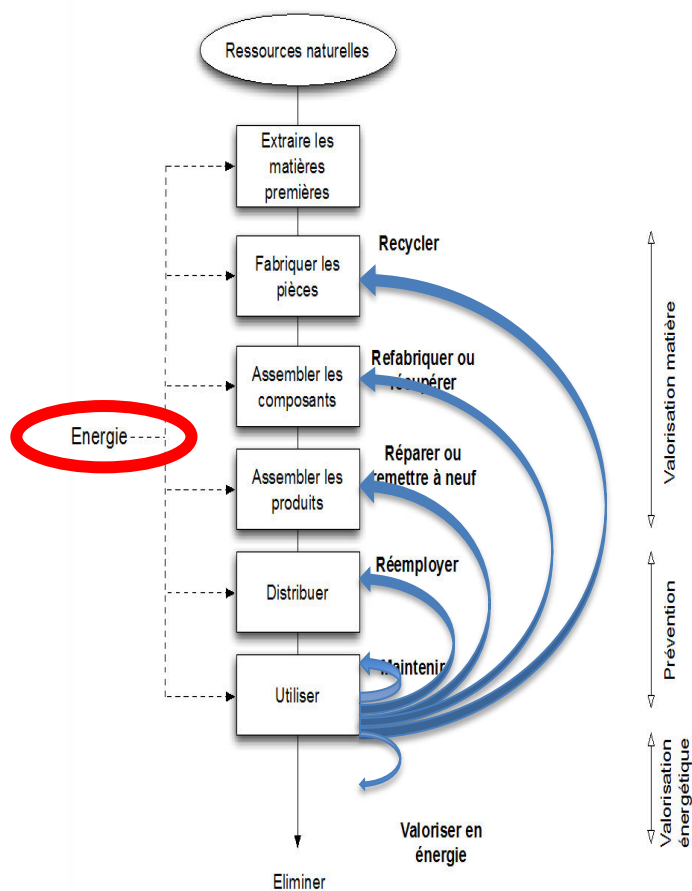


Figure 10 - illustration de la portée du principe "Décarboniser" (source : Sofies, d'après Le Moigne, 2014.)

Analyse critique du terme « circulaire »

En 2013, Paul H. Brunner de l'Université technologique de Vienne a publié un papier dans *Waste Management & Research*, intitulé *Cycles, spirals and linear flows* sur l'analogie entre la circularité souhaitée de notre système économique et une perception cyclique de la biosphère.

Son écrit souhaite attirer l'attention sur une représentation partielle du fonctionnement de la nature. En effet certains phénomènes naturels observés sur une courte échelle de temps sont bien cycliques, à l'image des saisons, du cycle de l'eau, du carbone ou encore de l'azote. En revanche sur des échelles de temps plus longues, la majorité des cycles naturels n'est pas fermée et la nature ne revient pas exactement à son point de départ. L'accumulation de l'oxygène, initialement considéré comme un résidu, au début de la période de la photosynthèse en est un exemple. Comme les systèmes naturels, les systèmes humains produisent parfois des résidus qui n'ont pas d'utilité immédiate, ne favorisant pas leur recyclage, ou qui nécessiteraient trop d'énergie et de ressources financières pour être recyclés.

L'une des clés évoquées pour résoudre ce dilemme serait de lier de façon plus systématique la production de biens avec la gestion des déchets. Néanmoins, l'auteur reconnaît que, si cette idée paraît relativement aisée à mettre en place pour des produits à courte durée de vie, elle est sensiblement plus difficile pour ceux de longue durée.

Dans cet article, l'auteur revient également sur la stratégie dite « Zéro déchets ». Même s'il approuve le fait que la meilleure solution au problème est de ne pas produire de déchets, il démontre que ce n'est pas une stratégie réaliste, d'abord d'un point de vue thermodynamique et ensuite pour des raisons économiques.

Enfin l'auteur conclut son article en rappelant que les deux principaux objectifs de la gestion des déchets sont la protection des humains et de l'environnement ainsi que la conservation des ressources. L'attitude qui consisterait à formuler rapidement les principes « cycles = bon » et « linéaires = mauvais » n'est pas bénéfique pour la société, en particulier du point de vue de la santé humaine. Sa recommandation finale vise plutôt à fixer des objectifs, trouver les moyens pour y répondre, et choisir parmi ces moyens ceux à moindre coût pour les citoyens.

Jean-Claude Lévy et Vincent Aurez reviennent également sur cette image de circularité dans leur document de synthèse *Economie circulaire, écologie et reconstruction industrielle ?* Ils proposent une analogie avec le cercle de calligraphie zen, connu sous le nom de « Enso » (Figure 11), qui représente un cercle fait d'un seul trait. « Ce trait de pinceau n'est pas tout à fait fermé, on y trouve presque une légère ouverture laissée par le coup de pinceau » (Aurez, 2013.)



Figure 11 - Cercle de calligraphie zen (source : Aurez et al., 2013.)

3.4. Retour sur la définition de l'ADEME

En octobre 2013, l'ADEME publiait une fiche technique, intitulée *Economie circulaire : notions*, dans laquelle les composantes de ce concept, au nombre de sept, sont réparties dans trois domaines d'action : l'offre des acteurs économiques, la gestion des déchets et la demande et le comportement des consommateurs. Cette structuration, dans sa version la plus récente, est représentée schématiquement par la figure ci-dessous (Figure 12).

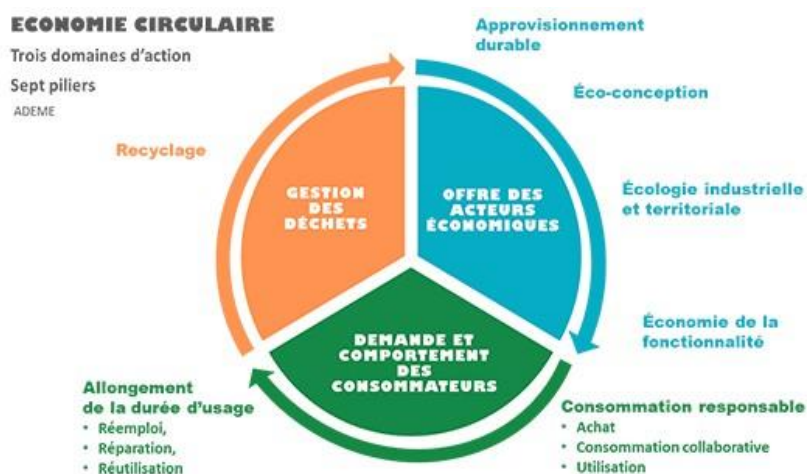


Figure 12 - Schématisation des composantes de l'économie circulaire (source : ADEME)

Le CGEDD aborde en détail certaines de ces composantes dans son rapport intitulé *L'économie circulaire, état des lieux et perspectives*, à quelques différences près, notamment en ajoutant le domaine de l'économie biosourcée. Ce domaine recouvre les concepts de bio-raffineries et de chimie du végétal, qui est d'ailleurs l'une des sept ambitions retenues pour la France par la commission Innovation 2030. Il est cité le fait que le Centre Européen de la Normalisation s'est vu remettre un mandat par la Commission européenne pour développer une normalisation des produits biosourcés

dans l'objectif de développer la production européenne. Par ailleurs, le Conseil de l'UE a adopté un paquet « innovation – investissements » de 22 milliards d'euros, dans le cadre de la stratégie Horizon 2020, dont une partie est consacrée aux industries faisant appel aux matériaux biosourcés (*Bio Based Industries*).

On notera que la structuration proposée par l'ADEME associe des enjeux comme l'approvisionnement durable, la consommation responsable (achat et utilisation), des moyens d'action comme le recyclage ou le réemploi et des méthodologies (ou concepts) pour y parvenir, l'éco-conception, l'écologie industrielle et territoriale et l'économie de fonctionnalité.

Il est proposé dans les parties suivantes de ce rapport de mettre en évidence les points saillants de certaines composantes de l'économie circulaire, selon l'ADEME, extraits principalement du rapport du CGEDD, complétés par des cas concrets tirés de la revue bibliographique.

3.4.1. Recyclage

L'article L541-1-1 du Code de l'Environnement, précise ce que l'on entend par recyclage : « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opération de recyclage. »

En France, les performances en matière d'incorporation de matières recyclées sont contrastées selon les secteurs. Selon l'ADEME, l'acier, le papier-carton et le verre affichent les meilleures performances, puisque respectivement 40%, 60% et 49% de la production est réalisée à partir de matières recyclées en 2010. A noter toutefois que ce taux pour le papier-carton chute à 49% en 2013 si l'on se concentre seulement sur le papier. Le secteur des plastiques, enfin, affiche un taux d'incorporation très faible avec 5.2% en 2010.

Cas concret n° 1 - Les déchets de films plastiques souples étirables et rétractables comme les films qui emballent les palettes sont collectés dans certains magasins d'un groupe de la grande distribution puis transformés par une société externe en sacs de caisse (Le Moigne, 2014.).

Le procédé de recyclage se déroule généralement en cinq étapes : le contrôle des déchets, leur démantèlement et broyage, le tri des déchets, le lavage et la transformation (mécanique et/ou chimique et/ou thermique).

3.4.2. Allongement de la durée d'usage (Réemploi, Réparation, Réutilisation)

La réglementation française distingue le terme « réemploi », utilisé pour des produits, du terme « réutilisation », utilisé pour des déchets. Plus exactement le Code de l'Environnement propose les définitions suivantes :

- le réemploi désigne toute « opération par laquelle un bien usagé, conçu et fabriqué pour un usage particulier, est utilisé pour le même usage ou un usage différent ». Le réemploi ne suppose pas le passage par le statut de déchet.
- la réutilisation désigne « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau ». Le produit devient alors déchet et passe par une phase de préparation en vue de sa réutilisation.

En France, le réemploi est principalement développé pour des produits comme les vêtements, l'équipement électroménager et les meubles, ainsi que les équipements de loisir, les livres et CD. Les acteurs du réemploi relèvent du secteur de l'économie sociale et solidaire (Emmaüs, entreprises d'insertion,...) et du secteur de l'occasion (sites d'annonce, ...).

Cas concret n° 2 – Un fabricant de vêtements *outdoor* propose de réparer tout dommage de ses produits dû à l'usure ou accroc pour une somme modique. Le client doit alors renvoyer son vêtement de la marque au centre de réparation (Le Moigne, 2014.).

Sur le plan environnemental, une étude de la Région wallonne conclut aux bienfaits globalement positifs du réemploi et de la réparation. « Globalement » car l'avantage environnemental du réemploi peut être réduit par l'amélioration des performances énergétiques de certains produits. C'est particulièrement le cas des déchets d'équipements électriques et électroniques.

Certains font une distinction plus fine que le schéma de l'ADEME entre la maintenance, le réemploi, la réparation, la remise à neuf (remis en état d'un produit usagé à un niveau de qualité donné), la refabrication (remise en état d'un produit usagé à un niveau de qualité identique à celui d'un produit neuf) et la récupération des produits (récupération d'un nombre limité de pièces sur des produits usagés).

Cas concret n° 3 – La Deutsche Bundesbahn a remis à neuf plus d'une cinquantaine de trains en 2010. La remise à neuf incluait la mise à jour technologique, l'amélioration du confort passager et l'augmentation du nombre de sièges. L'économie de l'opération s'est montée à 22 millions d'euros par rapport à l'achat d'un nouveau train et à 80% de matériaux (Le Moigne, 2014.).

Cas concret n° 4 – Un fabricant d'équipements industriels refabrique des pièces de rechange, telles que des moteurs, des pompes à eau ou des alternateurs. Les produits sont vendus à un prix inférieur à celui des produits neufs tout en bénéficiant d'une garantie de constructeur. (Le Moigne, 2014.).

3.4.3. Eco-conception

L'éco-conception poursuit plusieurs objectifs, parmi lesquels : la sélection de matériaux de moindre impact, la réduction de la quantité de matière, l'optimisation des techniques de production, l'optimisation du système d'emballage et de distribution du produit, la réduction des impacts pendant l'utilisation des produits, l'optimisation de la durée de vie et de la fin de vie du produit.

Une enquête BVA réalisée pour le compte de l'ADEME en 2010 révélait que 20% du panel d'entreprises françaises interrogées (375 au total) développent systématiquement une démarche d'éco-conception. Un rapport du Sénat publié en 2013 conclut que les résultats obtenus dans ce domaine sont insuffisants. La loi sur l'économie sociale et solidaire du 31 juillet 2014 poursuit cet enjeu à travers le renforcement des objectifs environnementaux fixés aux éco-organismes à l'occasion des procédures d'agrément.

Les démarches d'éco-conception sont encadrées par une norme internationale (ISO 14 062), qui stipule que les méthodes d'analyse du cycle de vie font partie intégrante du processus.

Cas concret n° 5 – Un fabricant de mobilier de bureau a conçu plusieurs produits certifiés C2C. L'un de ses produits phares est un fauteuil composé à 99% en poids par des matières recyclables. L'opération de désassemblage pour le recyclage ne prend que 5 minutes en utilisant des outils ordinaires (Le Moigne, 2014.).

3.4.4. Ecologie industrielle et territoriale

Ce domaine, très francophone, introduit en section 1.3.3, est à la frontière entre l'écologie industrielle, domaine scientifique reconnu à l'échelle internationale⁶, et l'écologie territoriale. La définition proposée par l'ADEME « réduit » ce domaine à la mise en place de symbioses, terme emprunté à la terminologie de la biologie, décrivant les interactions étroites entre des espèces vivantes différentes. Les symbioses regroupent quatre types d'action (Figure 13) :

- l'échange d'informations et d'expériences sur les bonnes pratiques
- la création de réseaux d'échanges de matières premières secondaires (matières, eau, énergie)
- la mutualisation de services comme l'approvisionnement en matières premières, produits manufacturés et la collecte des déchets
- le partage d'infrastructures pour l'exploitation de certaines ressources ou la gestion / transformation partagée de certains flux de matière et d'énergie, comme la production de chaleur.

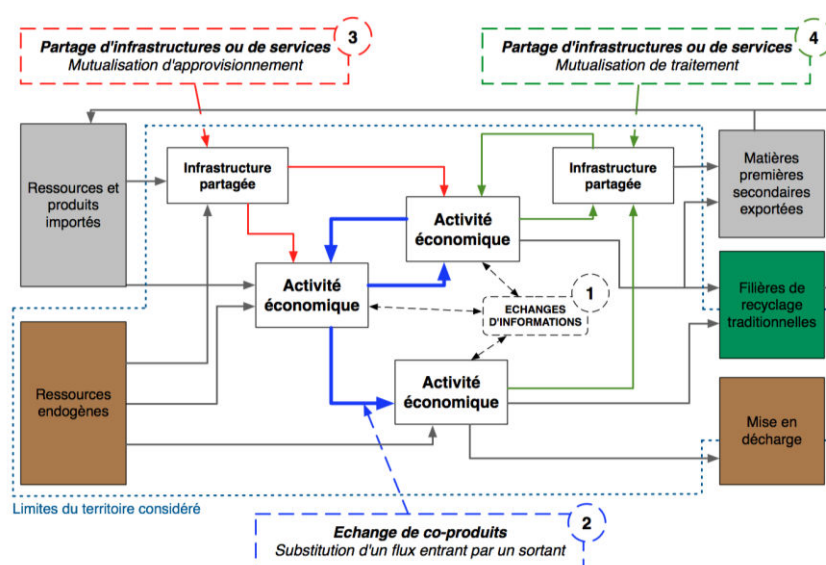


Figure 13 - Représentation des différentes catégories de symbioses industrielles (source : Massard, 2011.)

Ce domaine fait l'objet de plusieurs programmes de soutien depuis quelques années en France, tels que le projet COMETHE (2008-2011) financé par l'ANR, le Comité d'animation territoires durables et écologie industrielle (CATEI) coordonné par le MEDDE et des initiatives territoriales diverses portées par des régions ou des intercommunalités.

La proximité géographique des activités économiques étant un facteur favorable à la mise en œuvre de telles démarches, les approches d'écologie industrielle et territoriale concernent souvent des zones d'activités ou parcs industriels, le site le plus connu étant celui de Kalundborg, mis en avant dans les années 70 (Figure 14).

⁶ Voir le lien suivant : <http://www.is4ie.org/sections> pour découvrir les thématiques abordées par la communauté internationale de l'écologie industrielle

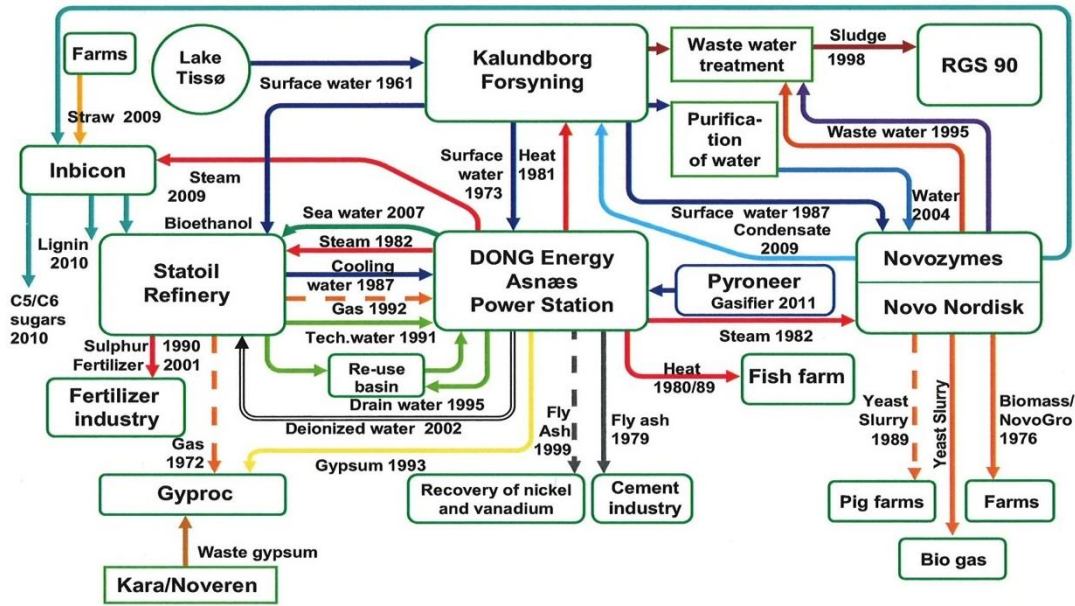


Figure 14 - Etat des symbioses en 2011 à Kalundborg - symbioses à l'arrêt en pointillé et symbiose toujours en cours en trait plein (source : Symbiosis Center)

Une étude internationale sur les parcs d'éco-innovation, pilotée par l'Office fédéral de l'environnement en Suisse dans le cadre d'un projet européen ERA-NET ECO-INNOVERA, montre que les expériences, aussi diverses soient-elles, sont riches dans de nombreux pays. Quelques exemples viennent compléter le cas de Kalundborg par les figures ci-dessous (Figure 15, Figure 16).

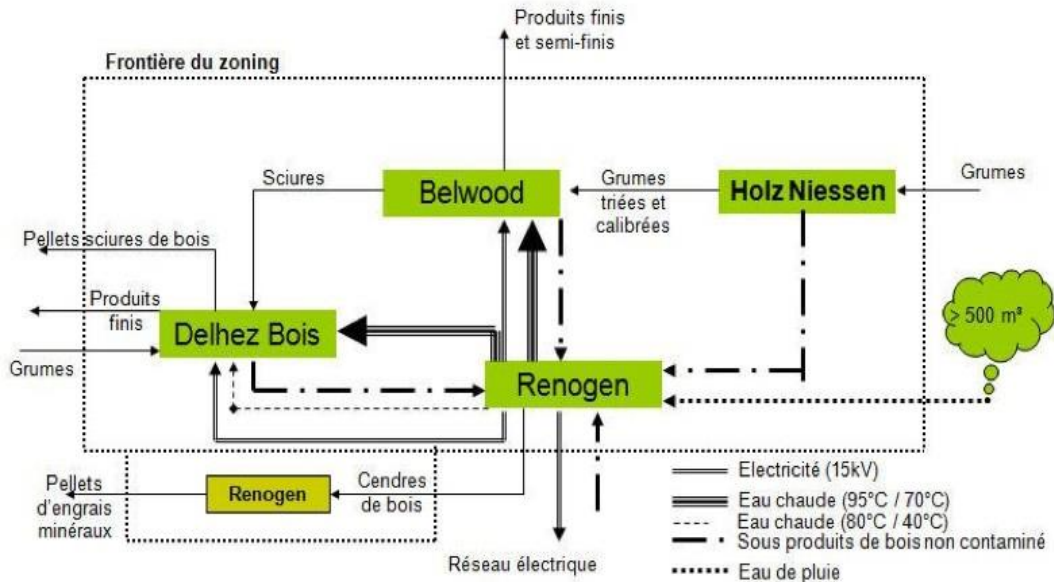


Figure 15 - Symbioses industrielles sur le parc de Kaiserbaracke (Belgique) (source : OFEV, 2013, d'après Bory et al., 2010)

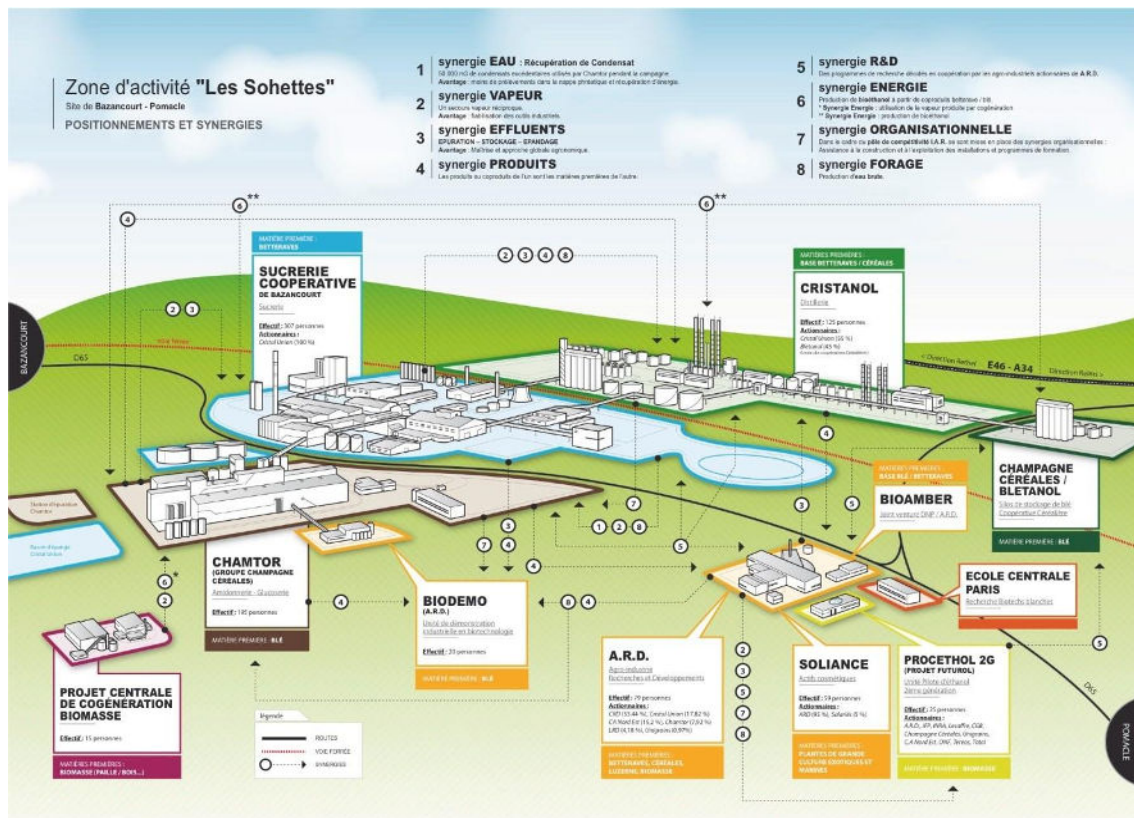


Figure 16 - Symbioses industrielles sur le complexe agro-industriel des Sohettes (France) (source : OFEV, 2013, d'après Les Sohettes, 2013)

L'Institut Chatham House évoque, dans un document publié en 2012, que l'une des trois composantes de l'économie circulaire, en plus de l'éco-conception et du changement des habitudes de consommation, consiste à reconcevoir les systèmes industriels. « Pour atteindre des niveaux plus élevés de productivité des ressources, le déploiement de la technologie aura besoin d'être complété par des changements systémiques et structurels de l'industrie ». Les symbioses en sont un élément ; elles sont d'ailleurs déjà largement appliquées dans certaines filières comme la pétrochimie, la transformation du fer et de l'acier, mais aussi la fabrication du ciment. L'efficacité énergétique et l'économie de ressources sont les deux paramètres les plus travaillés dans ces parcs éco-industriels ; l'auteur met cependant en avant le fait que peu de parcs ont challengé les modèles traditionnels de la production et de la consommation. Il en conclut que les « prochaines générations de parcs éco-industriels pourraient aller au-delà de la symbiose pour chercher une vision élargie mettant en réseau ces zones industrielles. »

3.4.5. Economie de la fonctionnalité et consommation (économie) collaborative

Il s'agit de deux domaines distincts avec un point commun, celui de donner lieu à diverses formes de mutualisation de biens ou d'infrastructure matérielles. Leur principale différence réside dans le type de dynamique socio-économique qui les porte. L'économie collaborative, de son côté, émerge des comportements d'auto-organisation des consommateurs, ou des associations. De l'autre, l'économie de fonctionnalité se développe à l'initiative des entreprises et des pouvoirs publics (CGEDD, 2014.).

Les origines du concept d'économie de la fonctionnalité remontent aux années 1980. Certains le considèrent comme l'un des nouveaux modèles d'affaires de l'économie circulaire (Le Moigne, 2014.). Selon l'un des pères de ce concept, Walter Stahel, le modèle économique le mieux adapté pour passer d'un système linéaire à une économie circulaire est celui où c'est l'usage du produit qui est vendu, et non le produit lui-même. Dans ce cas, l'objet de la transaction n'est plus le transfert de la propriété d'un bien matériel, mais la fonction qu'il remplit. La valeur économique ne réside plus dans la valeur d'échange, mais dans la valeur d'usage. Cela implique de s'intéresser non seulement au prix de revient, mais aussi au coût global du service rendu, tenant compte des phases de fonctionnement,

de maintenance ou encore de traitement en fin de vie. Aussi comme le producteur conserve la propriété du bien, il a tout intérêt à gérer cette forme de capital de façon sérieuse et efficace. Les intérêts des partenaires de l'échange se retrouvent alors à converger (Van Niel, 2014.).

Le concept d'économie de la fonctionnalité est souvent apparenté à celui de *Product-Service Systems* (PSS), bien qu'ils ne soient pas totalement identiques. En effet, les typologies de PSS dénombrent trois catégories (Van Niel, 2014.) :

1. PSS orientés produit qui fournissent un service additionnel au produit vendu.
2. PSS orientés usage pour lesquels l'usage du produit est vendu et non le produit lui-même
3. PSS orientés résultats pour lesquels le producteur garantit la satisfaction des besoins du consommateur, quelle que soit la combinaison de produits et services utilisée.

Le mode de transaction étant inchangé pour cette première catégorie, celle-ci ne relève pas du principe de l'économie de fonctionnalité (Van Niel, 2014.).

Le nombre d'entreprises engagées dans l'économie de la fonctionnalité n'est pas connu ; certains soulignent que, pour la plupart des entreprises connues pour être engagées dans ce concept, cela ne couvre qu'une partie des activités et du chiffre d'affaires (CGEDD, 2014.). La majorité des exemples existants dans ce domaine concerne des produits ayant des durées de vie courte.

Cas concret n° 6 – Un grand groupe a fait l'essai d'un système d'éclairage à la carte baptisé *Pay per lux*. Ce système consiste à ne payer que pour la quantité de lumière réellement consommée plutôt que pour la propriété du dispositif d'éclairage en soi (Le Moigne, 2014.).

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication représentent un support important de l'économie de fonctionnalité, mais aussi de l'économie collaborative (CGEDD, 2014.).

La consommation collaborative regroupe les offres de biens et services qui sont utilisés successivement par plusieurs clients. Certains la range dans la catégorie des offres de solutions « orientées usage », selon les typologies de PSS présentées précédemment. (Van Niel, 2014.).

Une récente étude de l'Idrri souligne toutefois que ces avantages environnementaux sont sans doute très variables et dépendants des caractéristiques des biens mutualisés. L'autopartage est certainement un exemple emblématique grâce au fort report modal qui se traduirait par une baisse allant jusqu'à 50% de la distance parcourue en automobile, ayant un impact de facto sur la quantité d'émissions de CO₂. Cependant, les auteurs de l'étude font valoir que ces chiffres ne tiennent pas compte de la concurrence avec le train (CGEDD, 2014.).

3.5. Revue synthétique des barrières à la mise en œuvre de l'économie circulaire

Plusieurs sources documentaires, majoritairement non scientifiques, exposent les barrières qui freinent la mise en œuvre de ce concept. Ces barrières peuvent être classées en quatre catégories : les barrières liées au marché, celles liées aux produits, les barrières de nature politique et enfin les barrières liées au manque de connaissances environnementales.

Les barrières liées au marché relèvent pour beaucoup de la nécessité d'une prise de risque élevée pour les entreprises à transformer un modèle traditionnellement construit autour d'une croissance industrielle consommatrice de ressources. La difficulté de la transition s'inscrit qui plus est dans un ensemble de *supply chains*, qui se sont internationalisées, et sont devenues, par la même occasion, très complexes. Dans ce cadre, l'innovation technologique, mais surtout organisationnelle (coopération entre activités), telle que promue par l'économie circulaire, constitue un véritable challenge avec des coûts de transaction et des délais de négociation élevés. La majorité des modèles économiques mis en œuvre actuellement ne permet pas de réattribuer les bénéfices d'une meilleure conception d'un produit à celui qui la crée et la met en pratique. Aussi la restriction des évaluations économiques actuelles sur la base de critères monétaires ne permet pas de prendre en compte des interactions plus complexes notamment avec l'environnement.

En ce qui concerne les barrières liées aux produits, un groupe d'experts réunis autour de l'économie circulaire au sein de Green Alliance, actif au Royaume-Uni, a tiré de l'analyse de cas d'études, une caractérisation des matériaux ou des produits permettant de lever ou d'accroître les barrières liées au marché. La qualification de ces caractéristiques facilite ou non la circularité (Figure 17). A titre d'exemple, une valeur élevée de la matière favorise sa circularité.

Characteristic	Circular use likely	↔	Circular use unlikely
Value: products or materials with high value or high end-of-life harm justify investment in recovery	high	medium	low
Control, collection and communication: the ability to control or reliably collect a known quantity of materials or products enables circular models	single owner	two owners	many owners
Ease of recycling, remanufacturing and reuse: circular systems are more likely where the physical characteristics of products or materials make them easy to transform	easy	moderate	difficult
Pace of change: If product or material function changes too rapidly, investment in recovery may not occur. This is especially an issue where material substitution, technological development, or fashion changes demand rapidly	slow	medium	fast
Concentration / contamination: Where materials are dissipated or contaminated, recovery is either more expensive or impossible	pure / concentrated	moderate	contaminated / dispersed

Figure 17 - Critères favorables ou non à une augmentation de la circularité
(source : Green Alliance, 2013.)

Aussi la mise en place de boucles, autres que les filières classiques de recyclage, dépend de divers facteurs, à la fois techniques (qualité et composition du flux, cahier des charges du partenaire potentiel), économiques, réglementaires, organisationnels. La combinaison de ces différents facteurs rend difficile la reproduction systématique d'une boucle vertueuse sur les plans économique, environnemental et social.

Les obstacles d'ordre politique sont majoritairement en lien avec le marché, en raison de la nécessité de formuler des incitations qui doivent permettre aux acteurs économiques de se tourner vers les nouveaux schémas de bouclage plutôt que vers une utilisation intensive des ressources naturelles. Les problématiques de gouvernance peuvent aussi freiner la transition, et ce, en lien avec la « difficulté d'articuler les échelles géographiques du développement en accord avec le couplage entre, d'une part, les politiques macro-économiques ou sectorielles décidées au plan central et d'autre part les politiques territoriales relevant des pouvoirs locaux, des administrateurs de l'État ou de celles des régions ou provinces, métropoles ou municipalités, sous la contrainte générale des engagements financiers publics et privés » (Aurez, 2013.).

Enfin la difficulté à qualifier et quantifier la durabilité dans des termes absolus est une contrainte qui rend difficile le travail de prise de décision d'objectifs à atteindre. Ce constat se traduit dans l'une des principales méthodes d'évaluation environnementale, qu'est l'ACV, dans l'état actuel de son développement, pour laquelle les résultats s'expriment par comparaison de scénario, dans l'objectif d'identifier celui qui aura le moins d'impact (Bjorn, 2012.).

4. Présentation des principales méthodes d'évaluation des systèmes d'économie circulaire

Cette section, qui vient clore la première partie de ce rapport, a pour objectif de poser les bases de la compréhension de la seconde partie, destinée notamment à réaliser l'état des lieux des travaux et méthodes en lien avec l'évaluation de tout ou partie des boucles de l'économie circulaire. Contrairement au premier état des lieux, le second est exclusivement réalisé à partir d'une revue de la littérature scientifique.

Cette revue a permis d'identifier trois grandes catégories de méthodes d'évaluation, dont les principes sont présentés succinctement ci-après.

4.1. L'Analyse de Flux de Matières et d'Énergie

L'analyse de flux de matières et d'énergie est une méthodologie analytique et descriptive qui vise à comprendre la dynamique des flux et des stocks de matière et d'énergie liés aux activités humaines. En anglais, elle porte le plus souvent le nom de *Material Flow Analysis (MFA)*.

En pratique, ce type d'analyse consiste à établir des bilans de masse et d'énergie, en mesurant les flux et les stocks de matière et d'énergie sur un système défini spatialement et temporellement. La pertinence scientifique de cette méthodologie repose sur son fondement dans le principe de conservation de la masse (défini par Lavoisier) (Figure 18) concluant sur l'équation suivante :

$$\text{flux entrant} = \text{flux sortant} + \text{variation de stock.}$$

Les bilans de masse et d'énergie sont alors validés seulement si cette équation est respectée.

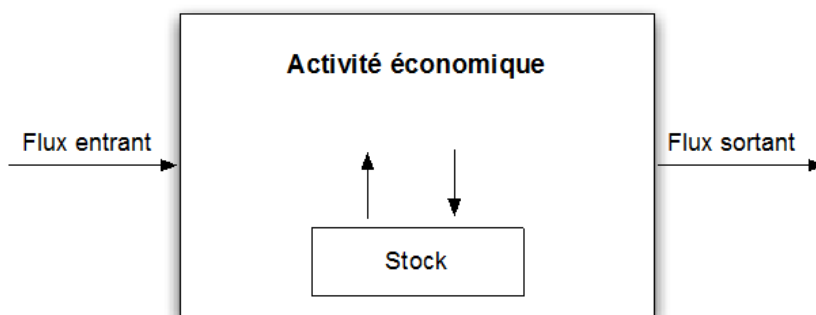


Figure 18 - Illustration du principe de conservation de la masse (source : Sofies)

Différents niveaux d'analyse peuvent être entrepris à partir de cette méthodologie. Deux grandes catégories peuvent être distinguées, à partir desquelles différents outils peuvent être utilisés. Une synthèse de ceux-ci est proposée ci-dessous (Figure 19) (OECD, 2008).

Issue of concern	Specific concerns related to environmental impacts, supply security, technology development within certain businesses, economic activities, countries, regions associated with			General environmental and economic concerns related to the throughput of substances, materials, manufactured goods at the level of		
	Substances chemical elements or compounds	Materials raw materials, semi-finished goods	Products (manufactured goods) batteries, cars, computers, textiles	Businesses establishments, enterprises	Economic activities mining, construction, chemical industry, iron & steel industry	Countries, regions total materials groups of materials, particular materials
Object of interest						
Type of analysis	Substance Flow Analysis ⇕	Material System Analysis ⇕	Life Cycle Assessment ⇕	Business level MF Analysis ⇕	Input-Output Analysis ⇕	Economy-wide MF Analysis ⇕
Type of measurement tool	Substance Flow Accounts	Individual Material Flow Accounts	Life Cycle Inventories	Business Material flow accounts	Physical Input-Output Tables, NAMEA-type approaches	Economy-wide Material Flow Accounts
<p>Substance flow analysis Substance flow analysis and accounts (SFA) monitor flows of specific substances (e.g. Cd, Pb, Zn, Hg, N, P, CO₂, CFC) that are known for raising particular concerns as regards the environmental and health risks associated with their production and consumption.</p> <p>Material system analysis Material system analysis (MSA) is based on material specific flow accounts. It focuses on selected raw materials or semi-finished products at various levels of detail and application (e.g. cement, paper, iron and steel, copper, plastics, timber, water) and considers life-cycle-wide inputs and outputs. It applies to materials that raise particular concerns as to the sustainability of their use, the security of their supply to the economy, and/or the environmental consequences of their production and consumption.</p> <p>Life cycle assessments Life cycle assessments (LCA) are based on life cycle inventories. They focus on materials connected to the production and use of specific products (e.g. batteries, cars, computers, textiles), and analyse the material requirements and potential environmental pressures along the full life cycle of the products. LCA can equally be applied to services, and are standardised in ISO 14010.</p> <p>Business level MFA Business level material flow analysis and accounts monitor material flows at various levels of detail for a company, a firm or a plant.</p> <p>Input-Output analysis Input-Output analysis (IOA) is based on physical input-output tables (PIOTs) that record material flows at various levels of detail to, from and through the economy, and by economic activity and final demand category. It can also make use of NAMEA-type tables or of hybrid flow accounts.</p> <p>Economy-wide material flow analysis Economy-wide material flow analysis (EW-MFA) is based on national economy-wide material flow accounts (EW-MFAcc) that record all materials entering or leaving the boundary of the national economy. Data from these accounts can easily be aggregated for communication purposes and serve as a basis for deriving aggregated MF and RP indicators. EW-MFAcc build on a fairly detailed data basis that, if well structured, can be used for many other purposes (e.g. in-depth analysis; material specific indicators).</p> <p>Source: OECD, based on Bringezu and Moriguchi (2002).</p>						

Figure 19 - Synthèse des niveaux et outils d'analyse MFA (source : OECD, 2008)

Selon le niveau d'analyse, deux méthodes, parmi les plus abouties à ce stade, peuvent être utilisées :

- l'analyse de flux de matières développée par les professeurs P. Baccini et P. H. Brunner⁷,
- la méthode mise au point par le service européen de statistique, Eurostat⁸.

Ces deux méthodes comptabilisent les flux entrants, sortants et les stocks d'un système défini dans le temps et dans l'espace.

La méthode « Baccini » permet d'établir une analyse pour un certain type de matière, comme l'eau aussi bien que le cadmium. Elle est notamment utilisée pour la *Substance Flow Analysis* (SFA), à l'image du cadmium, illustré ci-dessous (Figure 20). L'une des caractéristiques qui distinguent cette méthode de celle d'Eurostat est la représentation et la quantification du cheminement des ressources à l'intérieur du système étudié.

L'exemple ci-dessous traite du métabolisme du cadmium dans le bassin du Rhin, réalisé à la demande du gouvernement hollandais dans les années 1990. Cette demande s'inscrivait dans un cadre plus large, destinée à étudier les origines et la nature de la pollution diffuse qui s'accumule tout au long du cour du Rhin, avec l'espoir qu'une bonne compréhension de ce processus pourrait

⁷BACCINI, BRUNNER, op. cit. Un ouvrage très pédagogique, publié récemment, reprend et précise la méthode : BRUNNER, H. RECHBERGER, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Boca Raton : Lewis Publishers, 2004

⁸ <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

permettre de réduire le problème à la source. Les résultats de cette vaste étude, qui s'intéressait à toute une série de métaux lourds, ont été transmis en 1993 par l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

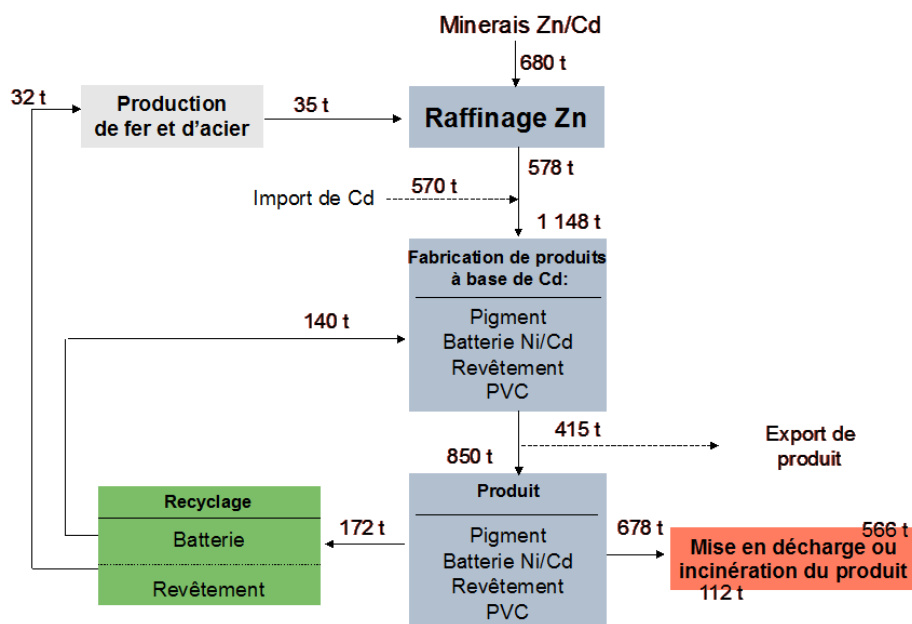


Figure 20 - MFA du cadmium dans le bassin du Rhin dans les années 90 (source : IIASA)

La méthode Eurostat se concentre, quant à elle, sur des catégories de flux identiques à toutes les études. Sa vocation initiale consiste en la réalisation de bilans nationaux, ou de plus en plus régionaux, destinés à quantifier des flux de matières brutes et déterminer des indicateurs physiques complémentaires des indicateurs économiques usuels. Contrairement à la méthode « Baccini », les échanges de matières à l'intérieur du système ne sont pas considérés, l'intérieur du système étant considéré comme une « boîte noire ». Les flux de matières et d'énergie générés à l'extérieur du système, comme l'énergie grise pour la fabrication de produits importés, sont par contre étudiés.

Un récent guide, élaboré sous le pilotage du CGDD en France, a permis de transposer la méthodologie utilisant initialement des bases de données européennes au contexte français. Certaines régions françaises l'ont déjà mise en application, comme illustré ci-dessous (Figure 21), ou sont en train de l'appliquer à leur territoire. Cette méthode consiste à quantifier tous les flux de matière entrants et sortants du territoire. A titre d'exemple, du côté des entrants, on décompte les matières extraites localement parmi la biomasse, les minéraux et minerais et les combustibles fossiles ainsi que les importations de matières premières, produits semi-finis et finis.

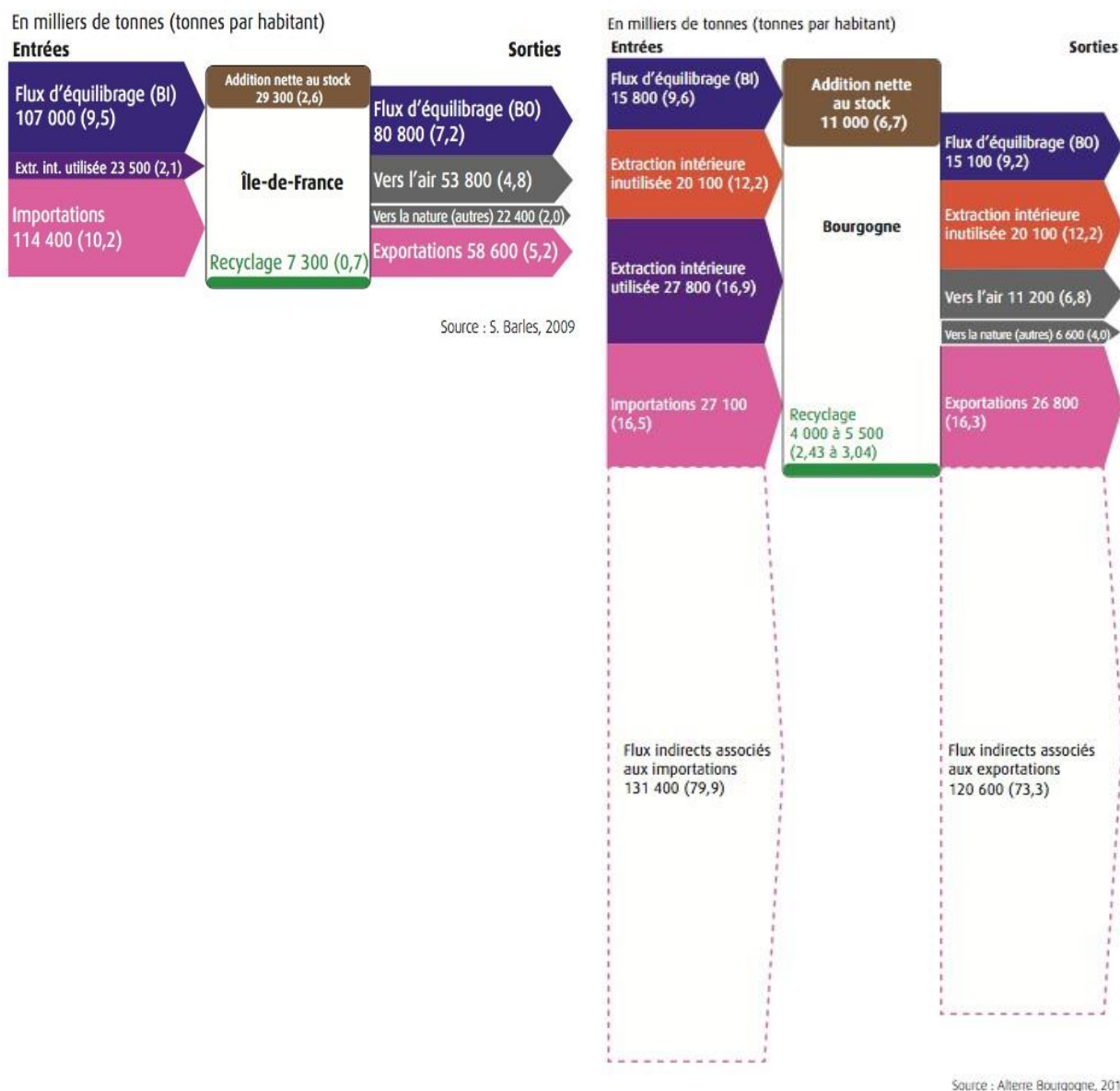


Figure 21 - MFA de la Région Ile-de-France (source : CGDD, d'après S. Barles, 2009) et de la région bourguignonne (source : CGDD, d'après Alterre Bourgogne)

Dérivée de cette méthodologie, le *Material Flow Cost Accounting* (MFCA), en français méthode de comptabilité des flux de matières, permet d'identifier et quantifier les flux et stocks de matières ainsi que les coûts associés (Figure 22). Cette méthode est essentiellement appliquée, à l'heure actuelle, pour quantifier les flux circulant au sein d'une entreprise avec l'objectif de réduire simultanément leur impact environnemental et leurs coûts.

La méthode cible tous les flux qui ne contribuent pas à la réalisation du produit final. Elle impute à ces flux tous les coûts s'y rapportant. De cette façon, la méthode MFCA permet de calculer avec précision et fiabilité la répartition des coûts de production entre produits et déchets. Développée en Allemagne en 2000, la méthode est aujourd'hui largement répandue au Japon, qui en a proposé la normalisation en 2008. Une nouvelle norme ISO fut publiée en septembre 2011 (ISO / EN 14051).

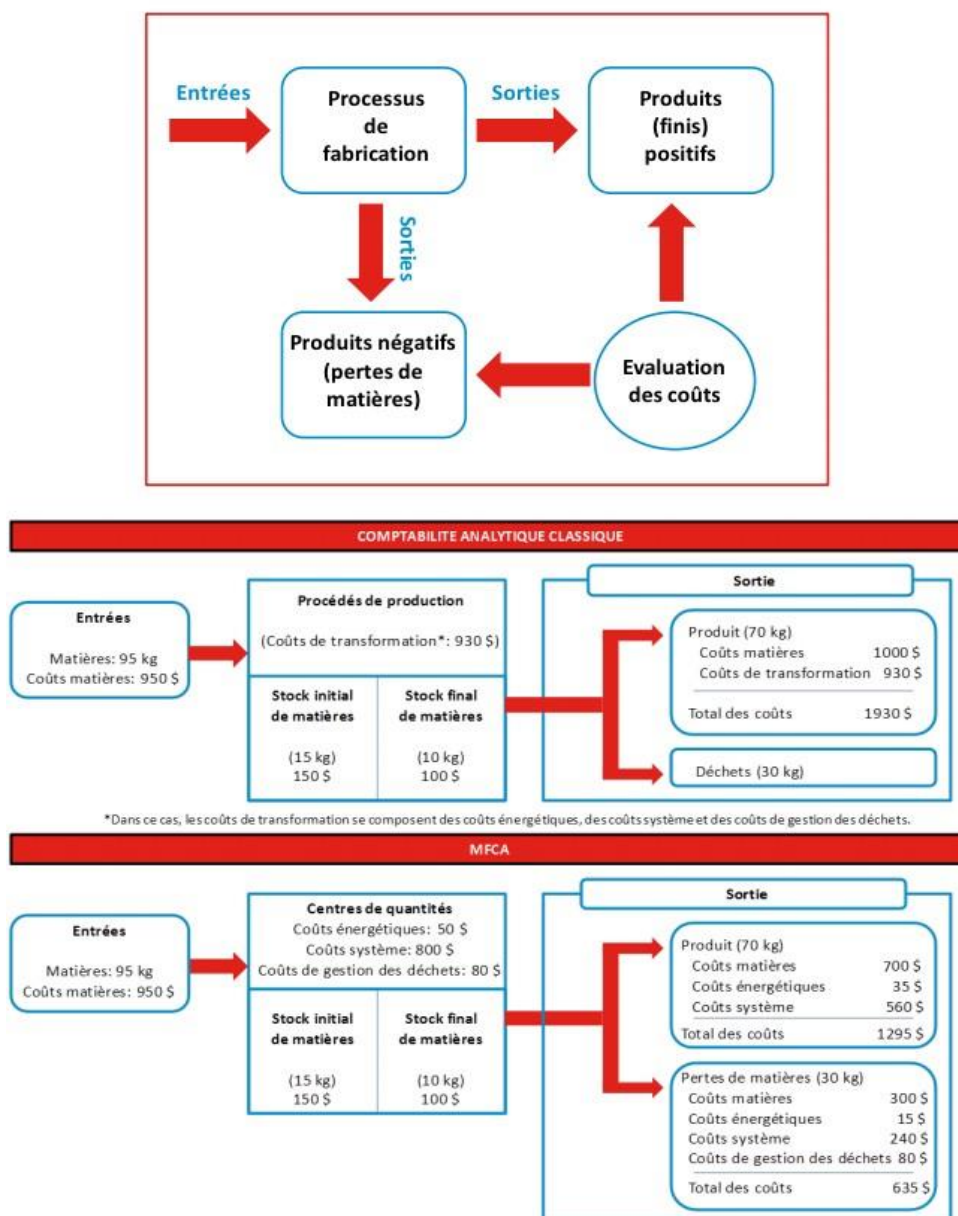


Figure 22 - Comparaison de la comptabilité analytique classique avec une analyse de type MFCA (source : ADEME)

4.2. L'Analyse du Cycle de Vie

L'ACV est une approche multicritère internationalement reconnue permettant d'évaluer les impacts potentiels sur la santé humaine et sur l'environnement, associés aux produits et services tout au long de leur cycle de vie, de l'extraction des matières premières à leur gestion en fin de vie, incluant notamment les transports, la production et l'utilisation. Entre autres applications, l'ACV permet d'identifier les possibilités d'amélioration de la performance environnementale des produits et services aux diverses étapes de leur cycle de vie, facilite la prise de décisions et sert de support au marketing et à la communication.

L'approche Cycle de Vie peut être appliquée sous différents angles, ainsi plusieurs déclinaisons de l'ACV existent aujourd'hui.

4.2.1. ACV attributionnelle

L'approche attributionnelle en ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un système à un moment donné. L'objectif de cette approche est de décrire les interactions d'un système avec l'environnement pendant son cycle de vie ; afin d'identifier ses enjeux environnementaux.

4.2.2. ACV conséquentielle

L'ILCD handbook⁹ publié par la Commission Européenne précise que l'approche conséquentielle vise à « *identifier les conséquences d'une décision [...] sur les autres systèmes de l'économie. [...] Le modèle ne reflète pas une situation réelle ou prévue, mais un système hypothétique modélisé et pronostiqué en prenant en compte des mécanismes de marché* ». Cela nécessite donc d'avoir une connaissance fine des phénomènes de marché potentiellement engendrés par la mise en place de la solution à l'étude, et en particulier des processus marginaux affectés par la décision.

L'étude SCORELCA N° 2012-01 porte particulièrement sur ce sujet.

4.2.3. ACV Sociale

L'ACV Sociale est une approche permettant d'évaluer les impacts sociaux et sociétaux d'un produit ou d'un service qu'ils soient positifs ou négatifs. Cette méthode permet ainsi d'étudier l'impact d'un produit sur les travailleurs, les consommateurs, la communauté et tous les autres acteurs de la chaîne de valeur.

4.2.4. TCO – Total Cost of Ownership

Le TCO (encore appelé Coût Global de Possession – CGP) recense l'ensemble des dépenses qu'un acteur devra supporter durant toute la durée de vie de son produit ou de sa matière. Il s'agit d'un outil purement économique, mené selon une vision cycle de vie, qui a la capacité de se combiner, en utilisant des hypothèses méthodologiques équivalentes, à une ACV environnementale pour aboutir à des conclusions complémentaires.

4.2.5. LCC – Life Cycle Cost

Les enjeux du LCC sont similaires à ceux du TCO, mais l'approche mise en œuvre est différente, notamment vis à vis des flux à prendre en compte et de la modélisation effectuée.

4.2.6. Monétarisation

La monétarisation consiste à combiner des résultats issus de modèle I/O ou d'ACV avec des valeurs monétaires, permettant de calculer les externalités environnementales associées au cycle de vie d'un produit. Cette méthode possède l'avantage de pouvoir combiner différents enjeux (environnementaux, sociaux, sociétaux, par exemple).

L'étude SCORELCA N° 2012-03 porte particulièrement sur ce sujet.

4.2.7. Input/Output

Cette approche vise à utiliser des données de flux monétaires sur l'ensemble d'une économie, pour construire ou assister la construction d'une ACV. L'avantage principal est de pouvoir exprimer des

⁹ ILCD handbook General guide, 2010, doi: 10.2788/38479 European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010

² http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_Bardy_p1-228.pdf. Voir l'annexe 11 ici : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_Bardy_annexes_p229-354.pdf

impacts par unité monétaire, particulièrement utile dans le cas de la modélisation de services par exemple.

Pour cette méthode spécifiquement, l'étude SCORELCA N° 2014-04 est en cours.

4.3. Les indicateurs d'évaluation et de suivi de la performance

Pour s'affranchir de méthodes jugées trop complexes ou pour évaluer des critères pour lesquels des méthodes ne sont pas ou peu développées, plusieurs scientifiques ou entreprises ont développé des indicateurs permettant d'évaluer les impacts environnementaux, sociaux ou économiques. Ces indicateurs sont choisis pour être représentatifs des impacts étudiés, mais ils se distinguent des indicateurs d'impacts utilisés dans l'ACV car ils n'ont pas vocation à servir d'unité de mesure d'un impact.

Pour illustrer ce propos, il peut être intéressant de rapprocher des exemples d'indicateurs comme le MWh consommé ou les kilogrammes de matières utilisées d'indicateurs d'impacts classiques comme l'équivalent de kg PO₄. Les premiers traduisent des flux de matières ou des consommations et permettent de représenter simplement une pression environnementale. Les flux représentatifs sont choisis parmi ceux dont les impacts sont reconnus, comme la consommation d'énergie, et permettent de positionner plusieurs situations les unes par rapport aux autres. Le second est plus complexe, mais permet de représenter les impacts des différentes consommations et rejets avec une même unité.

Pour évaluer les impacts sociaux, l'accès à l'éducation, à l'emploi et à la santé sont typiquement des indicateurs qui peuvent être observés. Les impacts économiques sont généralement représentés par des indicateurs de finance classique comme le montant des investissements, les pertes ou les revenus.

L'objectif de ces indicateurs est variable, il peut être :

- de représenter des pressions environnementales, des impacts sociaux ou économiques
- d'identifier des points clés à améliorer dans un système ou un produit en mettant l'accent sur les consommations les plus importantes ou bien les performances médiocres par rapport à un objectif
- de suivre dans le temps l'évolution et la performance de scénarios.

Ces indicateurs peuvent être regroupés dans des grilles d'évaluation (Figure 23) qui abordent plusieurs aspects.

Economique	Investissement initial	Coût du capital
		Coût de la R&D
		Formation des employés
	Coûts directs et indirects	Coût du travail
		Coût des matières
		Coût de l'énergie
		Coût de la logistique
		Coût opérationnel du produit
		Coûts réglementaires
	Pertes et bénéfices	Valeur marchande
		Perte de qualités

Environnement	Matière	Contenu en matière du produit
		Matière utilisée
		Réglementations et certifications
	Energie	Energie renouvelable
		Energie non renouvelable
		Réglementations et certification de l'énergie
		Efficacité énergétique
	Autres ressources	Eau utilisée
		Eau recyclée utilisée
		Autres ressources naturelles
	Déchets et émissions	Emissions gazeuses
		Déchets solides
		Déchets liquides
		Autres déchets et émissions
		Management des déchets, réglementations et certification.
	Fin de vie du produit	Récupération du produit et des matériaux en fin de vie
		Réutilisation du produit en fin de vie
		Réparation du produit en fin de vie
		Recyclage du produit en fin de vie
Réglementations et certification du produit en fin de vie		
Société	Qualité du produit et durabilité	Réparation du produit et maintenance
		Fiabilité du produit
		Renvoi et rappel
	Performance fonctionnelle	Spécificités principales du produit
		Potentiel de customisation du produit
		Effectivité de la fonction du produit
		Facilité opérationnelle
	Management de la fin de vie du produit	Facilité des activités de la fin de vie
		Impact social du produit en fin de vie

Figure 23 - Grille d'évaluation de la méthode ProdSI (Source: Shuaib et al., 2014)

Ils peuvent également être présentés et utilisés individuellement. Par exemple, l'indicateur de consommation directe d'énergie est régulièrement utilisé seul pour le monitoring et la communication.

La fondation Ellen MacArthur a communiqué, en mai 2015, sur un indicateur, nommé *Material Circularity Indicator* (MCI), développé en partenariat avec Granta Material Intelligence. Cet indicateur

permet d'évaluer la performance de circularité d'un produit ou d'une entreprise, en utilisant une approche de type flux de matières. Le calcul de l'indicateur est construit sur la combinaison de 3 caractéristiques d'un produit, à savoir la masse de matières vierges utilisées pour sa fabrication, la masse de déchets ultimes attribués au produit et un facteur d'utilité qui tient compte de la durée et de l'intensité de l'utilisation du produit. Le résultat du MCI est un niveau de circularité compris entre 0 et 1. Le niveau 0 correspond au cas d'un produit fabriqué uniquement à partir de matières vierges et complètement enfoui à la fin de son utilisation. Le niveau 1 représente un produit fabriqué à partir de matières recyclées ou de composants réutilisés, sans ajout de matière vierge, pour lequel le recyclage est considéré comme 100% efficace.

Dans le cas d'un produit, l'évaluation du MCI nécessite de connaître :

- la part de matière vierge utilisée en intrant,
- la part de matière recyclée utilisée en intrant,
- la part de composants réutilisés utilisés en intrant,
- la durée de vie du produit,
- la répartition massique en fin de vie du produit entre réutilisation, recyclage et enfouissement/valorisation énergétique,
- l'efficacité du recyclage.

Pour une entreprise, le MCI est calculé à partir d'une moyenne des indicateurs MCI de ses propres produits, qui est ensuite pondérée par rapport à l'importance en masse ou en chiffre d'affaires liée à ces produits.

La fondation précise qu'il est pertinent d'associer au MCI d'autres indicateurs, tels que des indicateurs de risque (variation du prix des matières, sécurité de l'approvisionnement en matière, criticité des stocks de ressources, etc.) et des indicateurs d'impacts environnementaux (consommation d'énergie, émissions de gaz à effet de serre, etc.).

Enfin l'évaluation des indicateurs est également variable. Elle peut être qualitative et laissée à l'appréciation des exécutants qui sont alors amenés à noter chacun d'entre eux selon un barème. C'est le cas de l'approche présentée par le *Handbook for Product Social Impact Assessment* qui propose une notation sur 5 échelons qualitatifs allant de -2 pour une performance non acceptable, à +2 pour une performance idéale. La notation peut également être quantitative et nécessite alors de collecter des données sur le terrain.

Différents travaux et cas d'études d'évaluation d'un système relevant de l'économie circulaire mettant en jeu de tels indicateurs seront présentés dans la suite de ce rapport.

Seconde partie : Méthodes et enjeux de l'évaluation des boucles d'économie circulaire – État de l'art

Cette seconde partie de l'état de l'art a pour objectif de réaliser un état des lieux des travaux et méthodes en lien avec l'évaluation de tout ou partie des boucles de l'économie circulaire et de mettre en évidence les enjeux de ces évaluations, sur la base d'une revue de littérature scientifique. Les enjeux identifiés seront approfondis dans la troisième partie de l'étude et illustrés par des cas d'étude.

La revue de littérature permet de mettre en évidence les objectifs poursuivis par l'évaluation des boucles d'économie circulaire qui sont les suivants :



- L'évaluation des boucles d'économie circulaire peut permettre d'obtenir, pour un scénario de boucle, des résultats d'impacts selon différents critères.
- Elle peut permettre de prioriser les scénarios entre eux afin d'identifier les boucles les plus pertinentes pour une matière ou un produit.
- Elle peut également permettre d'accompagner la mise en œuvre de stratégies d'économie circulaire.
- Enfin elle peut permettre de suivre l'évolution et la performance d'une boucle d'économie circulaire mise en œuvre.

La suite de ce rapport vise à présenter les méthodes et approches identifiées pour chacun de ces quatre objectifs. Les enjeux de l'évaluation en lien avec ces objectifs et ces méthodes sont par ailleurs mis en évidence par des encadrés.

1. Approches pour évaluer tout ou partie d'une boucle d'économie circulaire

Les questions spécifiques de méthodologies propres aux méthodes étudiées, comme la définition des frontières du système ou de l'allocation des bénéfices du recyclage dans le cas de l'analyse du cycle de vie notamment, sont abordées dans les parties suivantes lorsque les choix de réponses révèlent un enjeu de l'évaluation de l'économie circulaire. Ces points seront également abordés plus en détail dans la troisième partie du rapport.

1.1. Composantes à évaluer pour une boucle

Les boucles d'économie circulaire sont caractérisées par différents aspects et les méthodes d'évaluation relevées dans la littérature permettent d'en évaluer tout ou partie. Les aspects relevés ayant fait l'objet d'une évaluation sont la **faisabilité** d'une boucle, ses **impacts environnementaux**, ses **impacts sociaux** et ses **impacts économiques** (Figure 24).

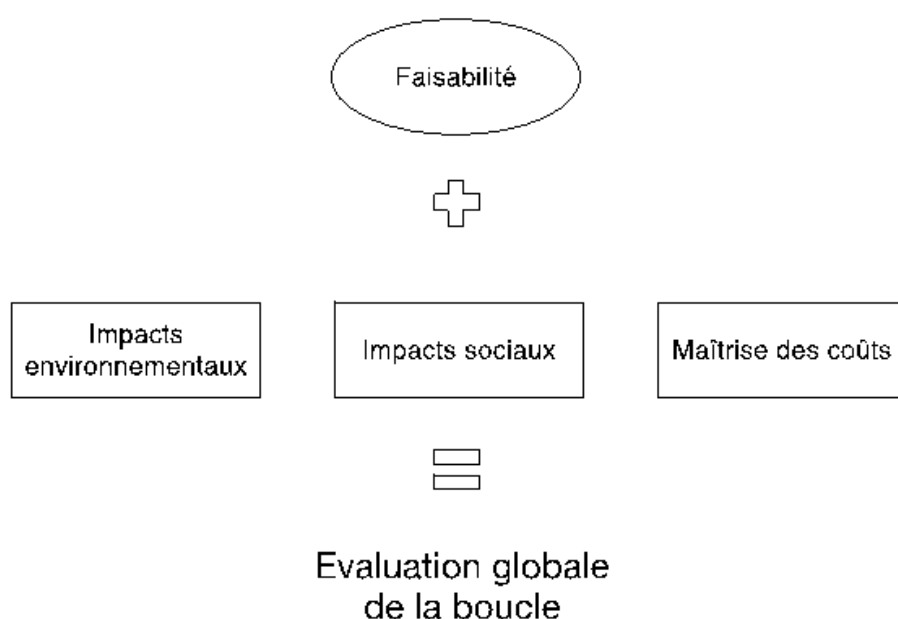


Figure 24 - Représentation des aspects à évaluer d'une boucle d'économie circulaire. Source : Sofies.

Pour être considérée comme complète l'évaluation d'une boucle devrait prendre en compte l'ensemble de ces aspects. En particulier les conclusions sur la faisabilité d'une boucle devraient être traduites en impacts environnementaux, sociaux ou économiques.

Enjeux de l'évaluation d'une boucle d'économie circulaire:

**Disposer de méthodes spécifiques à l'évaluation de chacun des aspects de la boucle.
Traduire la faisabilité d'une boucle dans les impacts environnementaux, sociaux et économiques.**

Les exemples de méthodes d'évaluation des aspects environnementaux, économiques et sociaux des boucles de l'économie circulaire relevés au cours de cet état de l'art ont généralement été présentés pour une application aux boucles de recyclage ou aux boucles d'allongement de la durée de vie. Il a été choisi de conserver la même distinction dans cette partie en présentant en premier lieu les méthodes d'évaluation appliquées aux boucles de recyclage puis les exemples de méthodes appliquées aux boucles d'allongement de la durée de vie. Ces méthodes pourraient être appliquées à

d'autres systèmes ne relevant pas de l'économie circulaire, par exemple l'analyse du cycle de vie Cradle-to-grave. Ces autres applications se trouvent en dehors du champ de l'étude et ne seront pas présentées dans ce rapport.

1.2. Evaluation des boucles de recyclage

1.2.1. Evaluation de la faisabilité

Parce que l'économie circulaire ambitionne le développement d'un nouveau modèle de l'utilisation des ressources, la faisabilité d'une boucle doit prendre en compte sa pérennité selon des critères aussi bien quantitatifs que qualitatifs.

En 2013, des chercheurs ont réalisé une revue de littérature afin de relever les taux de dispersion évalués pour 14 matériaux parmi ceux identifiés comme critiques par l'Union Européenne (Zimmermann & Gößling-reisemann, 2013). Ils ont mis en évidence des taux de dispersion importants, au moins supérieurs à 25% et pouvant atteindre des taux supérieurs à 90%. En plus de la **localisation des stocks de matières** à recycler, la **maîtrise de la dispersion des ressources** est un enjeu majeur des boucles de recyclage en ce que les gisements de la ressource doivent suffisamment être concentrés pour permettre de capter la matière et de la recycler.

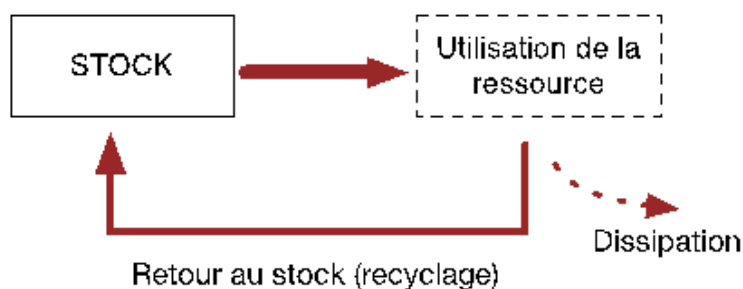


Figure 25 - Influence de la dissipation des ressources sur le stock ressource à recycler (Source: Sofies)

La **présence d'impuretés** dans les flux de matière à recycler peut perturber le bon déroulement technique du recyclage. Ainsi la dissipation des ressources a d'autres effets que la dilution du stock car ces éléments dissipés peuvent être retrouvés dans les flux d'autres matières et limiter leur recyclage.

Enfin certaines caractéristiques intrinsèques de la matière peuvent être modifiées suite au recyclage et mener à des **pertes de qualité**. Les fibres de papier, par exemple, si elles sont trop courtes n'assureront plus les propriétés mécaniques attendues.

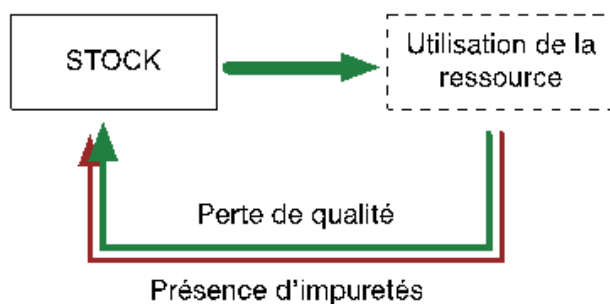


Figure 26 - Influence de la perte de qualité et de la présence d'impuretés sur le stock de ressource à recycler (Source: Sofies)

Les méthodes d'évaluation relevées dans la littérature scientifique en réponse à ces problématiques de localisation et de suivi du stock sont construites sur une analyse de flux de matière et d'énergie

(AFME ou MFA¹⁰ en anglais). **L'AFME permet de cartographier le parcours d'une ressource au sein des différents compartiments de l'anthroposphère.** Dans son utilisation statique l'AFME étudie le devenir de la ressource dans un laps de temps donné, dans son utilisation dynamique l'AFME dynamique (ou dmFA en anglais) permet de suivre l'évolution du parcours de la ressource dans le temps. Ainsi une revue de littérature de près de soixante études d'AFME dynamiques révèle que depuis une quinzaine d'années la méthode a permis de préciser les connaissances liées aux quantités, à la qualité et au devenir des matériaux, notamment les métaux tels que le fer, l'aluminium ou le cuivre (Hilty, Widmer, Schluep, & Faulstich, 2014).

Localiser un stock de ressource

Un exemple de réalisation d'AFME statique réalisé par Ziemann et al. selon la méthode de Baccini a permis de cartographier les flux de lithium à l'échelle mondiale (Ziemann, Weil, & Schebek, 2012). A partir de différentes bases de données nationales et de communications personnelles les auteurs ont calculé les quantités de lithium extraites et transformées mondialement ainsi que les origines et secteurs d'applications de la matière, enfin ils ont estimé le devenir du lithium en fin de vie en fonction de son application. Selon la nature des produits dans lesquels est utilisé le lithium, les auteurs ont distingué deux classes de recyclage permettant d'isoler le lithium ou non. Ils ont également identifié les applications du lithium entraînant un usage dissipatif telles que les applications pharmaceutiques et évalué les pertes à chaque étape du cycle de vie entraînant une émission du flux de lithium dans l'environnement. Ces travaux ont ainsi permis **d'évaluer les stocks de lithium dans l'anthroposphère** à l'échelle mondiale et d'identifier les secteurs d'applications avec le plus grand potentiel de recyclage de la matière. La Figure 27 représente une modélisation des flux de lithium de son extraction à sa fin de vie à l'échelle mondiale pour l'année 2007 et tenant compte des secteurs d'applications où la ressource est utilisée.

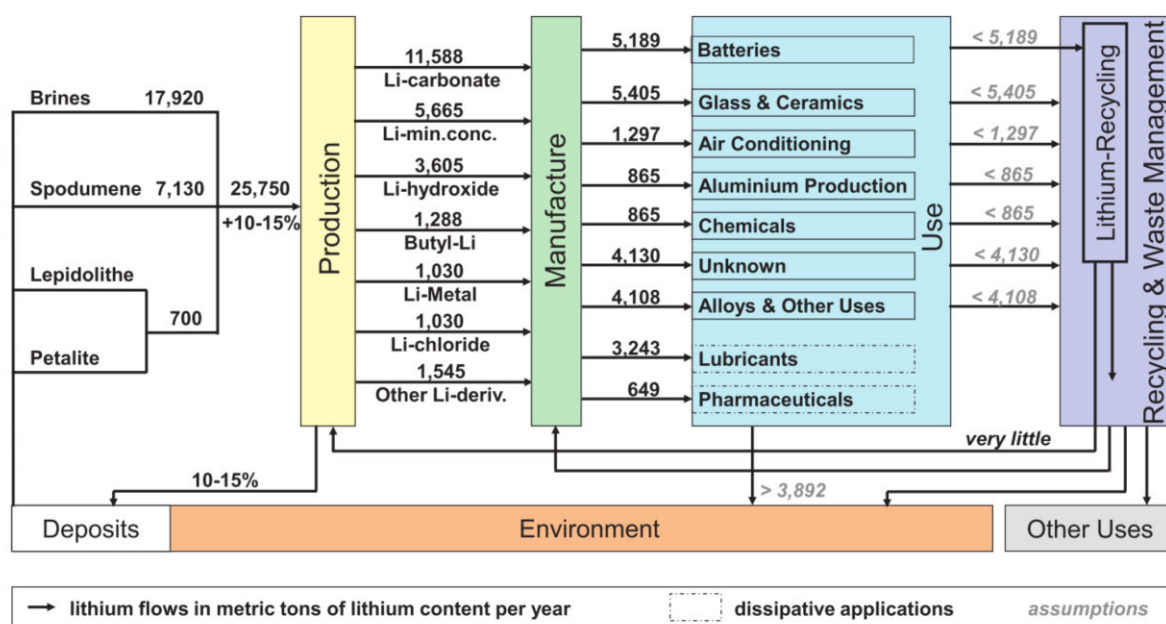


Figure 27 - Modélisation des flux de lithium à l'échelle mondiale pour l'année 2007
(Source: Ziemann et al.)

En exploitant les tables de données Input-Output japonaises et la méthodologie de l'AFME dynamique, Nakamura et al. ont mis au point le modèle MaTrace permettant d'identifier le devenir de l'acier utilisé initialement dans les véhicules (Nakamura et al., 2014). Leur modèle comprend deux matrices, une caractérisant les contraintes techniques du raffinage de la matière, la seconde représentative des comportements des consommateurs et du marché. Les différents rendements des étapes du cycle de vie de la matière sont pris en compte par un jeu de paramètres. Les auteurs ont ainsi montré que l'acier initialement utilisé dans les véhicules était principalement recyclé en boucle

¹⁰ Material Flow Analysis

ouverte et qu'à un horizon de 50 ans, 80% du flux étudié seulement serait valorisé. Leur étude permet également de mettre en avant les **secteurs concentrant la matière** année après année.

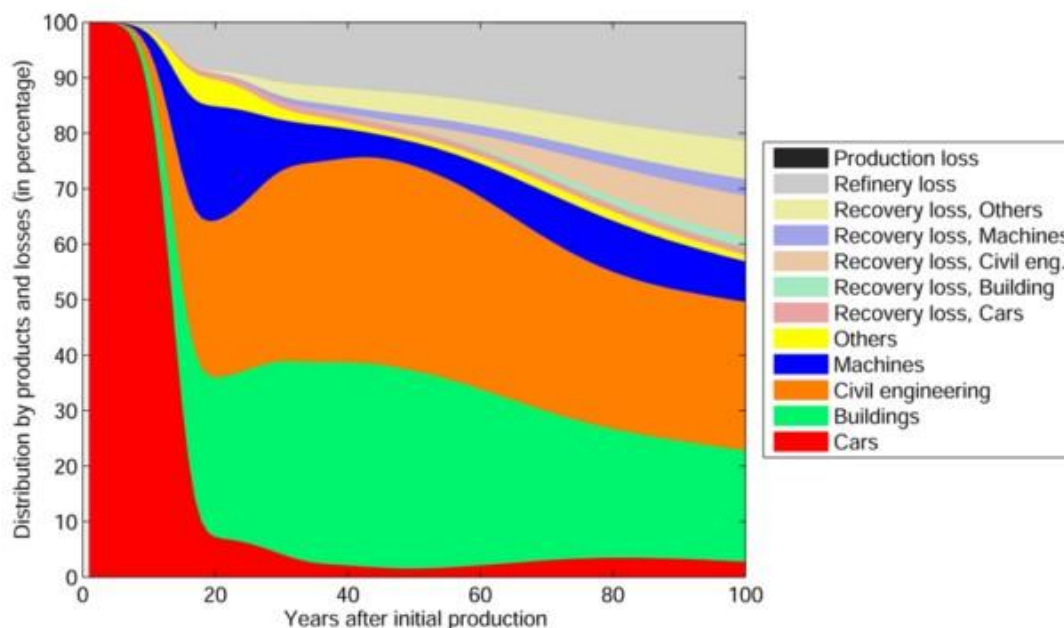


Figure 28 - Distribution du devenir de l'acier initialement présent dans les véhicules
(Source: Nakamura et al., 2014)

Identifier la présence d'impuretés

Au Japon une cartographie des flux d'acier issus des VHU selon la méthodologie AFME construite avec l'aide de données provenant des tables économiques Input-Output montre que ces ferrailles sont principalement recyclées dans des fours à arcs électriques (Ohno, Matsubae, Nakajima, & Nakamura, 2014). Compte tenu des caractéristiques des aciers étudiés, les auteurs ont estimé les quantités en entrée de four de chrome (16 583 t), nickel (3 621 t) et molybdène (534 t) qui sont des éléments d'alliages classiques. Ces éléments pourraient être valorisés si les ferrailles issues des VHU étaient recyclées en des alliages à base d'acier. Mais les auteurs ont montré que compte tenu des marchés visés par les fours électriques recevant la ferraille, ces éléments n'étaient pas valorisés, mais devenaient des contaminants dissous dans une production massive d'acier ordinaire requérant peu d'éléments d'alliage.

Une approche permettant de prendre en compte les impuretés dans les scénarios prospectifs du bouclage de la matière consiste à associer une analyse du flux de matière dynamique à une analyse *pinch*. L'analyse *pinch* est une modélisation qui repose sur les principes de la thermodynamique et qui permet d'identifier la solution la plus efficace au regard de la consommation d'énergie. L'association de ces deux méthodes permet d'estimer les quantités de matières qui pourront être intégrées à une boucle de recyclage fermée en prenant en compte des impuretés et des contraintes techniques.

Dans leurs travaux, Hatayma et al. ont étudié le potentiel de recyclage de l'aluminium d'ici 2050. Ils se sont intéressés à la demande en aluminium des Etats-Unis, de l'Europe, de la Chine et du Japon ainsi qu'aux déchets d'aluminium produits par ces zones géographiques (Hatayama, Daigo, Matsuno, & Adachi, 2012). Les chercheurs ont également prêté attention aux niveaux de qualité de la matière et en particulier des concentrations en éléments d'alliage présent dans les flux de ferraille. En combinant une approche d'AFME dynamique et une analyse *pinch*, ils ont montré que l'introduction sur le marché de nouveaux véhicules électriques modifierait la demande en aluminium puisque des qualités d'alliages différentes seraient alors nécessaires. Par ailleurs, la quantité ainsi que la qualité des déchets d'aluminium produit à terme seraient amenées à évoluer. Compte tenu d'une trop haute concentration en éléments d'alliage, 6.1 Mt de déchets d'aluminium ne trouveraient pas de débouché de recyclage à l'horizon 2030.

La même approche leur a ensuite permis d'évaluer quelle part des déchets de tôles d'acier des VHU pourrait être recyclée en boucle fermée. Les chercheurs ont montré qu'à l'horizon 2050 plus de la moitié du gisement devrait être redirigé vers du sous-cyclage en raison d'une trop forte contamination au cuivre (Hatayama, Daigo, & Tahara, 2014).

En Allemagne, une étude portant sur un système symbiotique entre une unité de recyclage du zinc accueillant les boues d'un four à arc électrique de refonte de l'acier a cherché à définir et évaluer des variantes des symbioses existantes (Fröhling, Schwaderer, Bartusch, & Schultmann, 2012) :

- mise en place d'une boucle de recyclage des boues du four à arc électrique en interne conduisant à l'obtention de boues finales enrichies en zinc,
- mise en place d'une boucle de recyclage renvoyant les scories de l'industrie du zinc dans le four à arc électrique.

Les auteurs ont développé un modèle mathématique construit à partir des schémas de procédés et permettant d'exprimer les relations entre les intrants et les sortants du système et les taux de recyclage mis en jeu. Le modèle est calibré par des mesures sur les sites ou des données de la littérature. La résolution de ces équations a permis de comparer des scénarios combinant les deux boucles avec des taux de recyclage différents dans l'objectif de définir le scénario offrant le taux de recyclage le plus important tout en garantissant le respect des fortes contraintes techniques propres aux deux industries.

Perte de qualité

Enfin la perte de qualité de la matière à recycler peut être prise en compte en considérant dans le scénario évalué, l'ajout d'un certain pourcentage de matière vierge pour atteindre les performances techniques attendues. Par exemple, Ardente et Mathieux estiment dans leur modélisation qu'environ 20% de matière vierge est ajoutée aux déchets de plastiques pour leur recyclage (Ardente & Mathieux, 2014).

Enjeux de l'évaluation de la faisabilité des boucles de recyclage:

- **Identifier les "mines urbaines" (stock de ressource).**
- **Suivre l'évolution de ces stocks de ressource, notamment la dispersion des ressources entraînant une dilution du stock.**
- **Evaluer la quantité d'impuretés accumulées dans les flux de matières.**
- **Prendre en compte la perte de qualité de la matière collectée pour être recyclée.**
- **Evaluer la part de déchets qui bénéficiera d'un débouché en recyclage en boucle fermée.**

La revue de plusieurs études d'AFME dynamiques par Hilty et al. a montré que si les méthodes employées reposent sur les mêmes principes de base, les choix varient dans la sélection de l'approche permettant d'extrapoler les flux et les stocks de matières dans le cas de données manquantes (Hilty et al., 2014). Guyonnet et al. proposent de comparer deux approches : Une première approche consiste à utiliser une loi normale de probabilité pour modéliser les données manquantes et de réconcilier ces données par la méthode des moindres carrés. Une deuxième approche repose sur une loi continue conduisant à une distribution triangulaire des possibles et sur un rapprochement flou des données. La Figure 29 représente les résultats de ces différentes modélisations (Guyonnet et al., 2013).

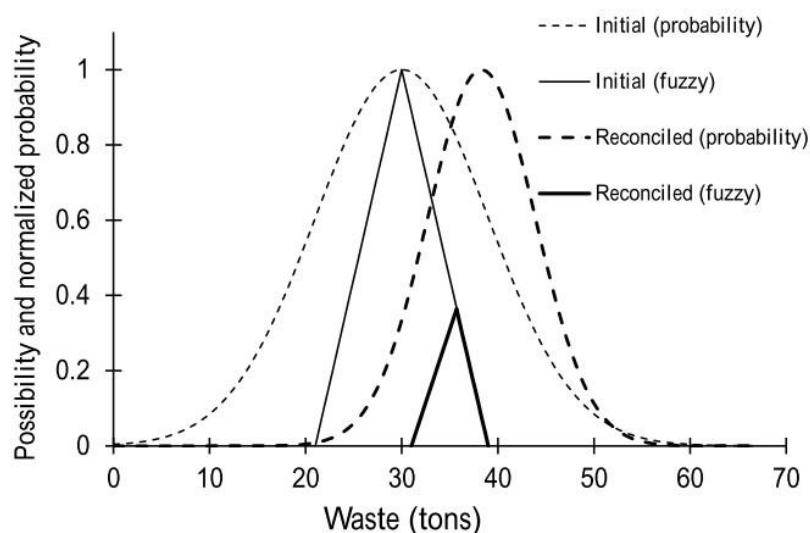


Figure 29 - Comparaison des données initiales et après réconciliation selon deux approches
(Source : Guyonnet et al., 2013)

Enjeu méthodologique de l'AFME :

- Justifier un choix de méthode statistique pour modéliser les données manquantes.

1.2.2. Evaluation des performances environnementales

1.2.2.1. Approche basée sur l'Analyse du Cycle de Vie

La méthode la plus fréquemment rencontrée pour évaluer la performance environnementale d'un scénario de recyclage est celle de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Les exemples sont ainsi nombreux de l'utilisation de cette méthode pour évaluer les boucles de recyclage de la matière. Certaines matières ont été fréquemment rencontrées au cours de notre revue de littérature à l'image des métaux (Johnson, Mcmillan, & Keoleian, 2013) (Paraskevas, Kellens, Dewulf, & Duflou, 2014), (Sevigné-Itoiz, Gasol, Rieradevall, & Gabarrell, 2014a), des DEEE¹¹ (Nelen et al., 2014), (Nakamura & Kondo, 2006) et des bois et papiers (Knauf, 2014), (Sevigné-Itoiz, Gasol, Rieradevall, & Gabarrell, 2014b).

L'ACV a également été appliquée pour évaluer les impacts des symbioses industrielles qui permettent la valorisation par recyclage des coproduits et déchets d'une entreprise par une autre (Pakarinen & Sokka, 2010), (Sokka, Lehtoranta, Nissinen, & Melanen, 2011), (Martin, Svensson, & Eklund, 2013).

1.2.2.2. Approche basée sur des indicateurs

D'autres approches mentionnées dans la littérature se concentrent sur les résultats de l'inventaire du cycle de vie et choisissent d'évaluer des indicateurs construits à partir des émissions et des consommations connues pour leur poids environnemental.

C'est le cas de Fröhling et al. (cf. partie 1.2.1) qui dénoncent les méthodes d'évaluation classiques comme l'ACV et l'AFME, les jugeant trop loin des réalités techniques et préfèrent travailler pour leur évaluation à partir des schémas de procédés (Fröhling et al., 2012). Ils ont ainsi choisi d'utiliser des indicateurs exprimés en CO₂ émis et MWh consommés dont les valeurs sont issues de ces schémas

¹¹ Déchets électriques et électroniques

et ont appliqué ces évaluations aux différentes boucles de recyclage identifiées entre une aciérie et une unité de production de zinc.

1.2.2.3. Enjeux méthodologiques relevés dans la littérature

Bien que la force de l'analyse du cycle de vie pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes étudiés ne soit pas remise en cause, un certain nombre d'enjeux méthodologiques a pu être relevé dans la littérature.

La première difficulté dans la réalisation d'une analyse du cycle de vie réside peut-être dans la capacité à **collecter les données adéquates**. Une approche relevée dans la littérature pour surmonter cette difficulté consiste à exploiter les tables nationales de données économiques Input-Output (Mongelli, Suh, & Huppel, 2005), (Nakamura & Kondo, 2006), (Sokka et al., 2011) et (Hou, Al-Tabbaa, Guthrie, Hellings, & Gu, 2014).

Plusieurs auteurs se sont par ailleurs intéressés à la construction de l'inventaire du Cycle de vie en mettant à profit la méthodologie AFME. Les travaux de Rochat et al., Starr et al. ou Seigné et al. utilisent cette méthodologie pour définir des scénarios propres aux territoires qu'ils étudient (Rochat, Binder, Diaz, & Jolliet, 2013), (Starr, Villalba, & Gabarrell, 2015), (Seigné-Itoiz et al., 2014b). Dans le cas d'étude de Rochat et al., la méthodologie AFME permet ainsi aux auteurs de calculer les quantités de PET concernées par le recyclage en boucle fermée, en boucle ouverte ou par la mise en décharge et ce sur le territoire propre à leur étude.

Le CE Delft cherche à combiner l'approche AFME avec l'approche ACV pour la construction de l'indicateur *Environmentally weighted Material Consumption EMC*. Cet indicateur a pour but d'évaluer le découplage de nos systèmes, mais le rapprochement entre la nomenclature des flux étudiés dans le cadre de l'AFME et les facteurs de caractérisation utilisés dans les méthodes d'évaluation des impacts ne semble pas aisé. Cependant, dans certains cas où l'AFME est utilisée pour suivre des substances caractérisées dans ces méthodes d'évaluation, la combinaison des deux méthodes est facilitée, à l'exemple des travaux de Starr et al. dont les impacts sur le réchauffement climatique de différents scénarios de production de biogaz modélisés par AFME ont pu être évalués (Starr et al., 2015).

La **qualité des jeux de données** disponibles est également un enjeu important qui a été discuté dans une étude de Brogaard et al. (Brogaard, Damgaard, Jensen, Barlaz, & Christensen, 2014). Dans cette étude les auteurs ont comparé les impacts sur le réchauffement climatique de différents jeux de données traduisant la production de matière première primaire ou secondaire. Une variabilité importante a été relevée par les auteurs entre les différents jeux de données, montrant par exemple des valeurs d'empreinte carbone pour la production d'acier et d'aluminium fabriqués à partir de matières vierges allant respectivement de 0,4 à 7,03 kg CO₂ eq./kg de matière et de 9,67 à 22,68 kg CO₂ eq./kg de matière.

La question de la **robustesse des résultats** a également été soulevée notamment par l'obtention de conclusions différentes selon l'approche choisie, qu'elle soit attributionnelle ou conséquentielle. L'étude de Knauf montre ainsi dans un premier temps que la valorisation matière du bois déchet en panneaux de particules est intéressante, notamment grâce aux économies d'énergies réalisées pour le séchage de la matière (Knauf, 2014). Mais en considérant que ce bois déchet est ainsi détourné de son utilisation en chaufferie et en choisissant un scénario marginal qui tient compte des objectifs européens de production d'énergie renouvelable, les auteurs montrent que les bénéfices sont perdus par l'utilisation comme combustible de bois frais au plus faible PCI.

Dans une étude sur le recyclage du papier et de l'aluminium (Seigné-Itoiz et al., 2014a, 2014b), les auteurs montrent également l'importance du **choix du scénario marginal**. Selon le scénario choisi, la production de matière vierge n'est pas évitée dans la même zone géographique. Compte tenu de la différence des mix énergétiques en présence, les résultats des impacts varient. Par exemple, si le scénario choisi considère que la production primaire d'aluminium prend place en Espagne et en Asie, le recyclage d'une tonne d'aluminium permet d'éviter l'émission de 8 t de CO₂ eq. Dans l'hypothèse où la production primaire d'aluminium est considérée comme étant uniquement en Asie, le recyclage d'une tonne d'aluminium permet d'éviter la production de 18 t de CO₂ eq.

Une particularité des systèmes de recyclage est que la matière va être utilisée par différents acteurs les uns après les autres. Dans ce contexte la question de la **répartition des impacts entre les**

différents acteurs a soulevé une réflexion de la communauté scientifique qui propose différentes approches méthodologiques.

Dans leurs travaux sur les impacts des symbioses industrielles, Martin et al. présentent l'allocation physique, l'expansion du système et la méthode 50/50 (Martin et al., 2013). L'allocation physique est réalisée en considérant des paramètres correspondant aux caractéristiques physiques de la matière étudiée, l'expansion du système est une approche conséquentielle qui permet de s'affranchir de la question de l'allocation et la méthode 50/50 est une distribution des crédits environnementaux de façon égale entre les acteurs. Les auteurs recommandent de choisir les deux premières méthodes et de comparer les résultats pour montrer l'influence du choix de l'allocation.

Liu et al. présentent également différentes approches d'allocation des impacts environnementaux en distinguant les approches attributionnelles des approches conséquentielles (Liu & Müller, 2012). Dans les premières on retrouve l'allocation physique, mais également l'allocation économique qui considère la valeur de la matière. Dans les secondes, l'approche par extension du système côtoie une approche dite *market-based* qui prend en compte les modifications du marché suite à l'introduction d'une boucle de recyclage, par exemple la diminution de production de matière vierge.

Enfin dans un état des lieux des méthodes d'affectation des impacts environnementaux entre plusieurs cycles de vie qui se succèdent, Osset et al. présentent la méthode des stocks pour laquelle aucun impact environnemental n'est associé à la production de matières en aval du système et la méthode par extension des frontières du système (Osset, Clauzade, Hugrel, & Palluau, 2012). Ils concluent que l'approche par extension des frontières semble apporter une réponse plus adaptée et que si les règles d'affectation restent aujourd'hui ouvertes, des règles méthodologiques se construisent peu à peu au sein de la communauté ACV.

Enfin il semble important de réussir à préciser la prise en compte dans les évaluations de type analyse du cycle de vie des **usages dispersifs de la matière** et de la **perte de qualité de la matière** après plusieurs boucles de recyclage.

Enjeux méthodologiques de l'ACV :

- **Exploiter les données accessibles telles que les données statistiques ou économiques pour réaliser l'évaluation environnementale.**
- **Construire un inventaire du cycle de vie spécifique à un territoire.**
- **Allouer les impacts entre les différents acteurs d'une même boucle.**
- **Obtenir des résultats robustes, notamment en élargissant le périmètre.**
- **Choisir le scénario marginal pour une application de l'approche conséquentielle.**
- **Prendre en compte l'impact des pertes dissipatives.**
- **Prendre en compte la qualité de la matière recyclée après plusieurs boucles.**

1.2.3. Evaluation de la maîtrise des coûts

En ce qui concerne l'évaluation de la maîtrise des coûts des boucles de recyclage, deux approches ont été identifiées dans la littérature selon que les auteurs aient cherché à évaluer le coût du procédé de recyclage ou bien la valeur créée par la boucle.

1.2.3.1. Evaluation des coûts des procédés

Pour l'évaluation des coûts des procédés la méthode qui semble favorite est le coût du cycle de vie ou *life cycle costing (LCC)* en anglais. Par cette approche les auteurs peuvent associer à chacune des étapes du cycle de vie le coût relatif à l'unité fonctionnelle choisie.

Dans leur évaluation économique des scénarios de recyclage des boues d'aciérie et des scories issues du recyclage du zinc (cf. partie 1.2.1), Fröhling et al. intègrent les coûts des différentes phases (achats, vente, utilisation, transport, etc.) en associant un coût ou un bénéfice à chaque flux selon une approche LCC (Fröhling et al., 2012).

Au Japon, Nakamura et Kondo proposent également une approche LCC pour modéliser les coûts du cycle de vie d'un produit (Nakamura & Kondo, 2006). Leur particularité est d'appliquer cette approche LCC aux résultats d'une ACV hybride construite à partir des tables Input-Output. Leur modélisation leur permet d'évaluer ainsi l'impact économique de la mise en place d'une démarche d'éco-conception et d'une taxe carbone.

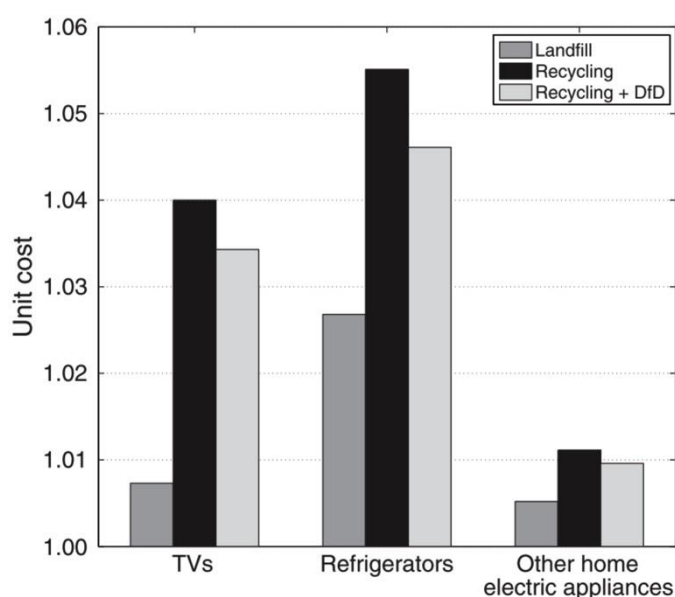


Figure 30 - Représentation graphique des coûts évalués pour différents produits et scénarios de fin de vie. (Source : Nakamura & Kondo, 2006).

Dans les travaux de Kim et al. un score économique traduisant le potentiel de recyclabilité des composants des ordures ménagères est construit en prenant en compte les coûts de collecte, de désassemblage, de mise en décharge des résidus et de revente de la matière isolée (Kim, Hwang, & Park, 2009). Ce score se traduit par la formule suivante :

$$Seco = Cf - Cd - Cm - Cr + Ps$$

Avec :

Seco : score économique du potentiel de recyclabilité

Cf : prix payé pour la collecte des générateurs

Cd : coût du démantèlement

Cm : coûts de maintenance

Cr : coût de mise en décharge

Ps : prix de vente de la matière extraite

1.2.3.2. Evaluation de la valeur créée par la boucle

Pour évaluer la valeur créée par la boucle de recyclage, les auteurs étudiés font appel à des indicateurs dépendant du prix de vente de la matière recyclée. Ainsi Rochat et al. proposent de considérer la valeur ajoutée au PET recyclé, à savoir la différence entre les coûts assumés pour traiter le PET et le prix de vente du PET recyclé (Rochat et al., 2013). Cette même approche a été utilisée dans les travaux de Hou et al. pour construire un indicateur d'impact économique sur la base de la valeur ajoutée à une propriété, une fois des travaux de remédiation des sols réalisés (Hou et al., 2014).

Dans ces exemples l'évaluation de la valeur de la matière recyclée est liée au marché et ne dépend pas seulement des qualités intrinsèques de la matière. Dans leurs travaux, Nelen et al. estiment que plusieurs facteurs peuvent ainsi influencer le prix de la matière secondaire tels que la perte de qualité, mais aussi la saturation d'un marché ou la complexité du recyclage (Nelen et al., 2014). Cependant les auteurs choisissent de travailler à partir des prix du marché pour s'affranchir d'une collecte de données fastidieuse.

Ainsi même lorsqu'une matière est de très bonne qualité, elle peut peiner à être vendue au même prix qu'une matière similaire, mais vierge. Un enjeu de l'évaluation économique des boucles de recyclage serait ainsi de définir et d'évaluer la valeur réelle de la matière secondaire.

Enjeu de l'évaluation économique d'une boucle de recyclage:

- **Définir la valeur « réelle » d'une matière et la manière de l'évaluer.**

1.2.4. Evaluation des impacts sociaux

La difficulté de l'évaluation des impacts sociaux réside dans la dimension subjective du bien-être. Néanmoins plusieurs scientifiques proposent des approches pour évaluer les impacts et bénéfices d'un système sur la qualité de vie et du travail. Ces approches sont principalement fondées sur des listes d'indicateurs à l'image de ceux proposés par Weidema, (Weidema, 2009). Sur une trentaine d'indicateurs sociaux identifiés, il propose de retenir ceux qui peuvent être influencés par les activités industrielles :

- Santé au travail
- Opportunités inégales
- Pertes de productivité associées au manque d'éducation
- Mauvais accès aux services de la santé
- Pertes de productivité associées à la corruption
- Chômage et sous-emploi
- Effet des barrières commerciales
- Mauvais accès aux pensions et à la sécurité sociale
- Violations des droits du travail
- Conditions de travail stressantes
- Perte de productivité associée à un manque d'infrastructures
- Pauvreté
- Travail excessif
- Appropriation de ressources indigènes

Dans la littérature étudiée, plusieurs auteurs ont intégré la dimension sociale dans leur évaluation en construisant un indicateur sur la base des données disponibles. C'est le cas de Rochat et al. qui ont évalué cet aspect en considérant le nombre de personnes travaillant mensuellement pour recycler le PET (Rochat et al., 2013). Dans l'étude de Hou et al. sur les impacts de la remédiation d'un sol, les cinq critères observés pour la prise en compte de cette dimension sociale sont l'impact sur l'emploi,

l'indemnisation des employés, le nombre d'accidents et d'incidents liés à l'activité étudiée ainsi que son impact sur le trafic routier (Hou et al., 2014).

Enfin il est à noter que des travaux sur l'ACV sociale pour intégrer les impacts sociaux dans une vision cycle de vie sont en cours et ont mené à la publication du guide *Life cycle initiative: Guidelines for Social LCA* par l'UNEP-SETAC.

Enjeux de l'évaluation sociale d'une boucle de recyclage:

- **Identifier des indicateurs représentatifs du bien-être de la société.**

1.3. Evaluation des boucles d'allongement de la durée de vie

L'allongement de la durée de vie est défini par l'Ademe comme le recours à la réparation, à la vente d'occasion ou au don, à l'achat d'occasion dans le cadre du réemploi ou de la réutilisation qui conduisent à augmenter la durée d'usage. L'allongement de la durée de vie fait partie des boucles qu'il est possible de mettre en place dans le cadre d'une stratégie d'économie circulaire. Dans cette partie, les méthodes relevées pour évaluer les impacts de différents produits et pour différentes durées de vie sont présentées.¹²

1.3.1. Evaluation de la faisabilité

Nous n'avons pas relevé d'étude portant spécifiquement sur l'évaluation de la faisabilité des boucles d'allongement de la durée de vie. Toutefois, il semble qu'à l'image des boucles de recyclage ces boucles nécessitent une bonne maîtrise des aspects quantitatifs et qualitatifs des produits et de leurs gisements.

Les aspects quantitatifs se traduiront notamment par la capacité de collecter les produits en fin de vie et la limitation des produits à usage dispersifs tels que les cosmétiques. Les aspects qualitatifs sont liés à la fonctionnalité du produit dont le maintien ou l'amélioration est une condition de l'allongement de la durée de vie.

Un autre paramètre influençant la faisabilité des boucles d'allongement de la durée de vie des produits est le comportement du consommateur. Les études en lien avec ce sujet ont été écartées de cet état de l'art.

1.3.2. Evaluation de la performance environnementale

L'évaluation de la performance environnementale des boucles d'allongement de la durée de vie est possible avec la méthodologie de l'analyse du cycle de vie. C'est cette méthode qui a été appliquée par le bureau belge RDC à des scénarios de réutilisation des textiles, DEEE et autres objets valorisables mettant en jeu des acteurs de collecte différents (RDC Brussels, 2008).

C'est également l'analyse du cycle de vie qui a permis à Bakker et al. d'évaluer les impacts environnementaux d'un réfrigérateur et d'un ordinateur portable pour différentes durées de vie (Bakker, Wang, Huisman, & den Hollander, 2014).

L'enjeu principal de l'évaluation des performances environnementales de ces produits dont la durée de vie est allongée consiste à intégrer les étapes intermédiaires éventuelles telles que la collecte, la réparation ou la remise en état et à calculer les impacts du produit sur la base de sa nouvelle durée de vie. Les principales difficultés ont trait à la collecte des données notamment en lien avec les phases d'utilisation et les durées de vie effectives des produits étudiés (Bakker et al., 2014).

Les autres enjeux de l'évaluation des performances environnementales d'une boucle d'allongement de la durée de vie sont également liés aux méthodes employées, ainsi les enjeux spécifiques à l'analyse du cycle de vie présentés en partie 1.2.2 peuvent également être rencontrés.

¹² Ademe, Octobre 2013, Economie Circulaire : Notions

D'autres approches multicritères considèrent les impacts environnementaux dans leur évaluation, ces approches sont présentées dans la partie 1.3.5.

1.3.3. Evaluation de la maîtrise des coûts

Les approches permettant d'évaluer la maîtrise des coûts des boucles d'allongement de la durée de vie prennent place dans les évaluations multi aspects, traitées au point 1.3.5.

1.3.4. Evaluation des impacts sociaux

De la même manière que pour les boucles de recyclage, l'évaluation des impacts sociaux est rendue difficile par son caractère parfois subjectif.

Plusieurs entreprises¹³ réunies en un groupe de travail ont contribué à l'élaboration d'un guide le *Handbook for Product Social Impact Assessment*. Ce guide propose une méthodologie d'évaluation des impacts sociaux d'un produit, construite sur une grille d'indicateurs qui couvrent tout le cycle de vie du produit. Ils sont notés de -2 à 2 et permettent d'identifier les points faibles et les points forts du produit selon un axe social.

D'autres approches multicritères considèrent les impacts sociaux dans leur évaluation, ces approches sont présentées dans la partie suivante.

1.3.5. Evaluation multi aspects

Dans la littérature étudiée, de nombreuses approches d'évaluation des boucles d'allongement de la durée de vie reposent sur des grilles d'analyse multi aspects qui abordent la question des impacts environnementaux, économiques et sociaux.

La méthode *Product Sustainability Index (ProdSI)*, soumise par Shuaib et al., est proposée pour l'évaluation multicritère d'un produit selon une approche voulue plus simple que l'analyse du cycle de vie (Shuaib et al., 2014b). L'identification des forces et faiblesses du produit se fait par l'évaluation d'un set d'indicateurs selon une nomenclature à trois niveaux détaillant les indicateurs économiques, environnementaux et sociaux. Le détail de ces indicateurs a déjà été présenté dans la partie 4.3.

Pour Chou et al. la question du *product-service system*, proche de l'économie de la fonctionnalité en français, n'est plus seulement motivée par des considérations environnementales, mais est une réponse aux problématiques socio-économiques actuelles (Chou, Chen, & Conley, 2015). Ainsi la seule approche d'évaluation de la performance de ces systèmes ne peut plus être l'analyse du cycle de vie. Les auteurs proposent une approche multi aspects selon trois axes : la qualité du service, la satisfaction du client et la durabilité du service. 74 critères selon ces 3 thématiques sont à noter selon une échelle qui reste à la discrétion de l'utilisateur de la méthode.

Tableau 1 - Familles de critères évalués. Source : (Chou et al., 2015)

Perception du client	Impact sur la durabilité
Apparence et facilité d'utilisation	Coûts pour le client
Interaction avec l'entreprise	Consommation en phase d'usage
Durabilité du service	Impacts sur la qualité de vie du client
Acceptabilité du prix	Coûts pour l'entreprise
Perception des employés	Consommation de l'entreprise
Engagement	Conditions de travail en entreprise

¹³ Ahold, BASF, BMW Group, DSM, Goodyear, Philips, RB, AkzoNobel, L'Oréal, Marks & Spencer, Steelcase.

Finalement, pour comparer plusieurs scénarios selon leur efficacité, les auteurs proposent de calculer un indicateur sur la base d'un ratio entre les scores liés aux perceptions du client et des employés et le score rationnel des coûts économiques, sociaux et environnementaux.

Enfin, parce que les boucles d'allongement de la durée de vie concernent principalement des produits et non des matières comme dans le cas des boucles de recyclage et compte tenu de l'évolution des produits proposés aujourd'hui sur le marché, il semble pertinent de se poser la question de la prise en compte de la multifonctionnalité des produits dans les évaluations, notamment en ce qui concerne la répartition des impacts.

Enjeu méthodologique de l'évaluation des boucles d'allongement de la durée de vie:

- **Prendre en compte la multifonctionnalité des produits dans les évaluations.**

2. Approche pour prioriser les scénarios des boucles d'économie circulaire

L'évaluation de tout ou partie des boucles d'économie circulaire permet d'obtenir des résultats pour différents impacts. Un second objectif de l'évaluation des boucles de l'économie circulaire est de pouvoir conclure sur le meilleur scénario à envisager pour un produit ou une matière, notamment en ce qui concerne sa fin de vie. Ainsi différents scénarios de boucles d'économie circulaire sont envisageables pour appliquer l'économie circulaire à un système à travers notamment des projets de recyclage ou d'allongement de la durée de vie. Etre capable de prioriser ces scénarios en fonction des différents impacts permet de choisir le plus pertinent.

Cependant les impacts qui auront été évalués ne sont pas toujours exprimés dans la même unité. Par ailleurs certaines catégories d'impact pourraient être jugées plus importantes que d'autres.

Dans cette partie sont présentées différentes approches pour comparer et prioriser les scénarios d'économie circulaire ainsi que les outils qui peuvent être utilisés pour construire cette comparaison : la pondération et l'agrégation des résultats.

Il est cependant à noter que dans le cadre de la norme ISO 14044 les étapes de regroupement et de pondération des résultats sont facultatives, laissant le choix au praticien d'exécuter ces étapes ou non pour l'analyse d'une ACV. Ce positionnement reflète le manque de consensus au sein de la communauté scientifique, notamment en raison de la subjectivité qui accompagne ces étapes et de la perte d'information qui en résulte.

2.1. La pondération des résultats

Un score unique peut être obtenu pour une boucle par agrégation des résultats de l'évaluation des différents impacts. Certains auteurs ont souhaité dans leur méthodologie d'évaluation pondérer les résultats avant de les agréger.

Dans l'ensemble des publications étudiées dans le cadre de cette étude, l'approche présentée pour établir les facteurs de pondération est semblable, les auteurs faisant appel à un panel d'acteurs, partie prenantes ou experts, qui ont la charge de définir ces facteurs.

C'est le cas de RoCHAT et al. qui permettent à l'ensemble des parties prenantes de pondérer les résultats de l'évaluation multicritère de différents scénarios de recyclage du PET (RoCHAT et al., 2013). Cette pondération permet de mettre en avant les problématiques perçues comme urgentes par les participants en comparant les résultats du score unique pondéré au score unique moyen.

Dans les travaux de Kim et al., un panel d'experts a la charge d'établir les facteurs de pondération des différentes parties du calcul des scores environnementaux (cf. 1.2.2) et économiques (cf. 1.2.3) du potentiel de recyclabilité des ordures ménagères (Kim et al., 2009). Pour structurer leur prise de décision, ces experts ont utilisé la méthode *Analytic Hierarchy Process (AHP)*. Par cette approche les facteurs de pondérations sont comparés deux à deux jusqu'à ce qu'un classement final soit adopté.

Finalement ils concluent que le cuivre présente le plus haut potentiel de recyclabilité, suivi de l'acier, du verre, des cartes électroniques, de l'aluminium et du plastique.

Dans le cadre de la méthode ProdSI présentée par Shuaib et al., le choix d'une pondération est laissé à la discrétion de l'utilisateur (Shuaib et al., 2014b). Le choix de facteurs tous égaux, revenant à calculer une moyenne, est jugé plus transparent, mais pouvant être insatisfaisant. Les auteurs proposent alors de faire appel à différents experts et de réaliser, au choix, une moyenne des différents facteurs proposés pour une catégorie d'impacts ou bien de suivre la méthodologie *AHP* précédemment citée.

Enjeu de la pondération des résultats de l'évaluation :

- **Etablir des facteurs de pondération pour les différentes catégories d'impacts évaluées pour une boucle.**

2.2. L'agrégation des résultats

Plusieurs publications abordent le cas du score unique comme résultat de l'évaluation d'un scénario de boucle. En l'absence de consensus dans la communauté ACV, les auteurs présentent différentes approches pour agréger les impacts environnementaux, économiques et sociaux évalués d'une boucle.

Dans les cas les plus simples, l'ensemble des résultats à agréger est évalué dans la même unité et les chercheurs calculent une simple moyenne. C'est le cas des évaluations qui s'appuient sur des grilles d'indicateurs, évalués chacun par une note sans unité, à l'image des travaux de Chou et al. (Chou et al., 2015).

Dans les cas plus complexes, chacun des impacts évalués est obtenu dans une unité différente.

L'agrégation des impacts environnementaux calculés avec l'analyse du cycle de vie est rendue possible par certaines méthodes d'évaluation qui intègrent déjà une formule d'agrégation. Cette fonctionnalité a été utilisée par plusieurs auteurs qui obtiennent par ce biais un score unique pour l'impact environnemental de la boucle.

Pour agréger les impacts environnementaux et économiques (Lim, Kim, Woo, Park, & Park, 2013) proposent de monétariser les impacts environnementaux avec la méthode *Willingness to pay (WTP) - based Environmental Priority Strategies (EPS)*. Cette méthode permet de réaliser une analyse du cycle de vie où les impacts sont exprimés en unité monétaire sous la forme d'externalités. Le choix de cette méthode parmi d'autres est justifié par les auteurs par la variété des externalités recensées en euros dans la base de données associée.

La conversion de l'ensemble des impacts environnementaux en unités monétaires est également l'approche choisie par Silvestre et al. (Silvestre, de Brito, & Pinheiro, 2013) pour additionner les résultats des évaluations environnementales et économiques. Pour les auteurs, l'intérêt du calcul d'un résultat unique est de justifier une conclusion unique et d'éviter de devoir trancher entre des conclusions contradictoires obtenues par l'analyse de chacun des aspects pris indépendamment les uns des autres.

Silvestre et al. (Silvestre et al., 2013) rappellent en outre dans leurs travaux quelques précautions méthodologiques à prendre pour renforcer la robustesse des résultats :

- Les unités fonctionnelles et périmètres des systèmes faisant l'objet de l'évaluation environnementale et de l'évaluation économique devraient être identiques ou au moins équivalents.
- Les évaluations doivent considérer l'ensemble du cycle de vie.
- L'évaluation économique du cycle de vie ne doit pas prendre en compte les externalités liées aux impacts environnementaux au risque d'effectuer un double comptage.

Les différents domaines d'impacts peuvent se recouvrir, par exemple la remédiation d'un impact environnemental peut être considérée comme un impact économique. Ainsi, éviter les doubles comptages d'impacts est une problématique importante de l'agrégation des résultats qui réunit dans un même score des impacts de domaine différents.

Enjeux de l'agrégation des résultats de l'évaluation:

- **Agréger les résultats de l'évaluation des impacts exprimés dans des unités différentes.**
- **Eviter le double comptage des impacts.**

2.3. La priorisation des scénarios

Un des objectifs finaux de l'évaluation des boucles de l'économie circulaire est de pouvoir comparer et prioriser entre eux plusieurs scénarios de l'utilisation des ressources. La difficulté étant de réussir à conclure en considérant l'ensemble des aspects environnementaux, économiques et sociaux qui entrent en jeu dans l'évaluation des scénarios concernés. Il ne semble pas exister aujourd'hui de positionnement consensuel de la communauté scientifique.

Les exemples relevés dans cet état l'art consistent en une discussion de la hiérarchie des modes de traitement des déchets proposée par l'Union Européenne. Cette hiérarchie propose de toujours préférer la réutilisation à la valorisation matière puis à la valorisation énergétique lorsque cela est possible. Plusieurs articles proposent une évaluation et une comparaison des impacts environnementaux de différents débouchés de valorisation pour des produits et matières données. Ces comparaisons sont effectuées grâce à un score unique qui permet de réunir l'ensemble des catégories d'impacts représentées dans les évaluations environnementales, en discutant de la pertinence de la hiérarchie des modes de traitement des déchets pour ces cas précis. Pour identifier le scénario le plus favorable pour une boucle, certains auteurs analysent la tendance générale des résultats de l'ACV en distinguant chacun des indicateurs évalués. D'autres comparaisons sont effectuées grâce à un score unique qui permet de réunir l'ensemble des catégories d'impacts représentées dans les évaluations environnementales.

2.3.1. Conclure à partir des tendances

Dans une étude sur les bassins d'hôpitaux, Sorensen et al. comparent ainsi quatre scénarios mettant en jeu deux bassins réutilisables en acier ou en polyéthylène et deux bassins à usage unique en carton ou en polyéthylène (Sørensen & Wenzel, 2014). La comparaison des résultats de l'évaluation environnementale sur sept indicateurs est favorable au scénario du bassin à usage unique en polyéthylène. Ce résultat s'explique en partie par les contraintes d'hygiène importantes liées au produit entraînant une étape de nettoyage et de désinfection coûteuse en énergie pour réutiliser le produit. Une autre raison est que les produits à usage unique peuvent être valorisés énergétiquement et bénéficient de crédits environnementaux en évitant la production d'électricité et de chaleur. Dans ce cas le bassin en polyéthylène qui présente le plus haut PCI¹⁴ obtient les meilleurs résultats.

Enjeu de la priorisation des boucles d'économie circulaire:

- **Hiérarchiser les boucles sans agréger les résultats des évaluations de leurs différents impacts.**

2.3.2. Conclure à partir d'un score unique

Le calcul d'un score unique issu de l'évaluation d'une boucle d'économie circulaire est une approche qui a été relevée au cours de cet état de l'art. Cette approche est utilisée par les auteurs dans le souci de prioriser des scénarios entre eux tout en considérant les différents impacts.

Pour comparer les scénarios d'allongement de la durée de vie et de recyclage d'appareils électriques, Bakker et al. exploitent les résultats en points obtenus avec la méthode ReCiPe (Bakker et al., 2014). Les auteurs déterminent ainsi la durée de vie optimale d'un réfrigérateur et d'un ordinateur portable.

¹⁴ Pouvoir calorifique inférieur

Ils prennent en compte les phases de production, de transport et d'usage tout en considérant les améliorations techniques conduisant à la mise sur le marché d'appareils consommant moins d'énergie. La phase de fin de vie est estimée être négligeable par rapport à celle de l'utilisation et est négligée. Ils concluent ainsi par exemple qu'un réfrigérateur acheté en 2001 aurait dû être remplacé au bout de 10 ans.

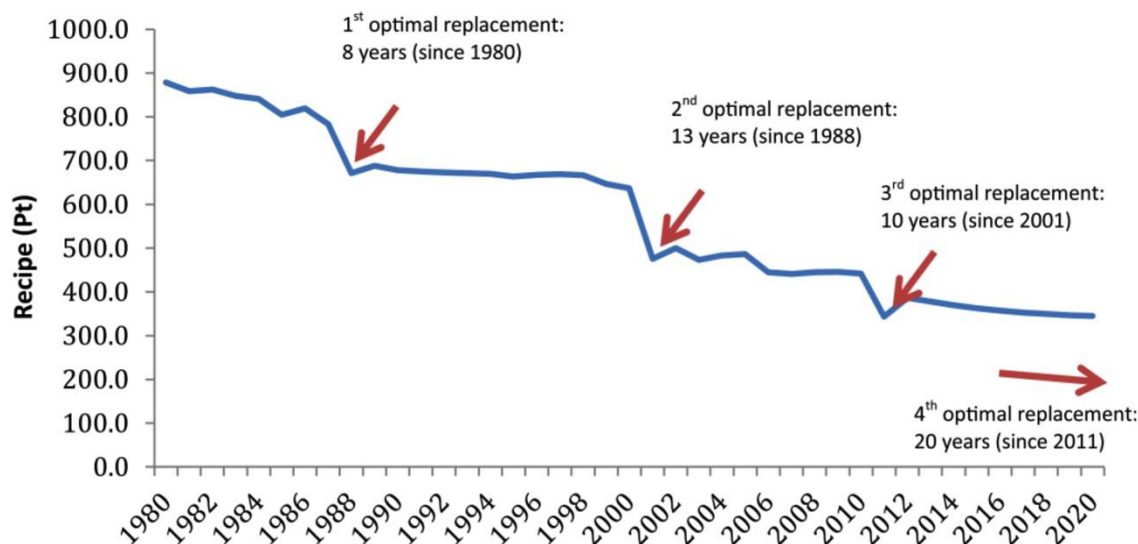


Figure 31 - Durées de vie optimales du point de vue des impacts environnementaux pour un réfrigérateur.
(Source: Bakker et al., 2014)

Pour conclure, les auteurs proposent un agenda de recherche sur l'allongement de la durée de vie et le recyclage des produits. En premier lieu la durée de vie optimale d'un produit doit être évaluée. Une fois que le scénario le plus approprié a été identifié, le business model adéquat doit être établi. Enfin la performance environnementale du scénario doit être affinée en prenant en compte les étapes de reconditionnement notamment.

Les études choisies pour illustrer la question de la priorisation des boucles de l'économie circulaire montrent que les résultats de l'évaluation environnementale selon la méthode classique de l'analyse du cycle de vie ne sont pas toujours favorables à la hiérarchie des modes de traitement des déchets. Dans une logique d'utilisation efficace des ressources portée par le concept de l'économie circulaire, l'accent est en effet mis sur la circularité des usages et de la matière alors que dans certaines conditions les consommations énergétiques pour mettre en place et maintenir ces boucles sont très importantes et ce dans des mix énergétiques actuels qui sont parfois loin du 100% renouvelable.

Une question de fond soulevée par les problématiques de ces articles est celle de la comparaison des catégories d'impacts entre elles et du poids que chacun de ces impacts doit prendre dans une évaluation globale.

Enjeu de la priorisation des boucles d'économie circulaire:

- **Définir le meilleur compromis pour la société en considérant les résultats de l'évaluation des aspects environnementaux, économiques et sociaux.**
- **Comparer les impacts liés à la consommation de ressources, à la consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre.**

3. Approches pour appliquer les boucles d'économie circulaire

L'économie circulaire propose de mettre en place des boucles de différents types pour augmenter l'efficacité des ressources. La définition retenue par l'Ademe souligne également l'importance de réduire l'empreinte environnementale tout au long de ces boucles en intégrant par exemple l'éco-conception comme un des piliers du concept.

L'évaluation des boucles d'économie circulaire peut ainsi avoir pour objectif d'améliorer sa performance. Deux méthodes d'évaluation en lien avec l'amélioration des performances environnementales de boucles sont présentées dans la partie suivante.

3.1. Développer la production propre

La méthode de comptabilité en flux matière (*Material Flow Cost Accounting, MFCA* en anglais) a été appliquée pour évaluer le coût de production des déchets dans différentes usines. C'est une évaluation qui fait le lien entre les impacts économiques et environnementaux en divergeant des approches classiques de comptabilité et qui s'intéresse aux coûts que représente le traitement des déchets.

Associée à une approche méthodologique Plan Do Check Act et à de l'éco-conception, cette évaluation permet de développer la production propre au sein d'une usine, à l'image de l'approche développée par (Chompu-inwai, Jaimjit, & Premsurianunt, 2014) dans une industrie de transformation du bois. Une approche similaire menée dans une usine de textile par Kasemset et al. a conduit à une révision de l'agencement des pièces dans le tissu qui a permis de réduire les coûts associés à la production de déchets de près de 12% (Kasemset, Chernsupornchai, & Pala-ud, 2014).

3.2. Appliquer l'éco-conception

L'analyse du cycle de vie est une méthode fréquemment utilisée pour développer l'éco-conception en entreprise. La méthode REApro a été développée par Ardente et Mathieux pour favoriser l'éco-conception des produits consommateurs d'énergie. Elle est basée sur une approche cycle de vie, mais propose plusieurs indicateurs pour identifier les points clés d'amélioration du produit sans réaliser une ACV complète (Ardente & Mathieux, 2014).

Ces indicateurs sont le contenu en matière recyclée exprimé en pourcentage de masse ou d'impacts environnementaux et la réutilisabilité, la recyclabilité et la recouvrabilité d'énergie exprimées en masse et en score d'impacts environnementaux. Ces indicateurs sont calculés pour différents scénarios de fin de vie et permettent d'identifier les composants du produit qui ne sont pas réutilisés ou recyclés à des taux jugés satisfaisants. Ces composants devront faire l'objet d'une démarche d'éco-conception.

Une analyse de l'utilisation de substances dangereuses pour chacune des pièces du produit complète le calcul de ces indicateurs et permet d'identifier les composants qui devront être retravaillés.

Enjeu de l'évaluation pour la mise en œuvre d'une boucle:

- Identifier des indicateurs représentatifs des objectifs de l'économie circulaire.

4. Approches pour suivre les résultats des boucles d'économie circulaire

L'évaluation des boucles d'économie circulaire peut enfin permettre de suivre les résultats des boucles d'économie circulaire, à savoir observer l'évolution et la performance des boucles mises en place. Les méthodes d'évaluation relevées en lien avec le suivi des boucles d'économie circulaire sont présentées dans la partie suivante.

Pour évaluer la performance du recyclage des déchets électroniques, Nelen et al. proposent une série de quatre indicateurs pour identifier les opportunités d'améliorations des scénarios de fin de vie de

produits et évaluer les résultats des stratégies mises en œuvre (Nelen et al., 2014). Ces indicateurs expriment aussi bien la performance à travers le taux massique de matière recyclée, le taux massique de matières critiques recyclées et la qualité de la matière recyclée que la pertinence environnementale à travers les impacts environnementaux évités.

Le taux massique de matière recyclée permet d'évaluer la qualité du tri, du démantèlement et du recyclage des matières composant un produit (Figure 32).

Indicator I_W	Recycled material weight
Equation	$I_W = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i}{\sum_{j=1}^n W_j}$
m : number of output fractions from the recycling process, destined for material recovery	
n : number of materials present in the input of the recycling process	
W'_i : weight of target material(s) in output fraction i	
W_j : weight of material j present in the input of the recycling process	
Numerator	Total weight of recycled target materials
Denominator	Total weight of the input of the recycling process
Rationale	The indicator equals 1 in the hypothetical situation that over the complete recycling chain all input materials are completely recovered in output fractions composed of only target materials and desired impurities.

Figure 32 - Indicateur du poids de matière recyclée (Source : Nelen et al., 2014)

Les matières critiques ciblées par l'article sont celles définies comme telles par le groupe de travail de l'Union Européenne (Figure 33).

Indicator I_S	Recycled material criticality
Equation	$I_S = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i * E_i * SR_i}{\sum_{j=1}^n W_j * E_j * SR_j}$
m : number of output fractions from the recycling process, destined for material recovery	
n : number of materials present in the input of the recycling process	
W'_i : weight of target material in output fraction i	
W_j : weight of material j present in the input of the recycling process	
E_i : economic importance of the material (as identified by the Ad-hoc Working Group)	
SR_i : supply risk of the material (as identified by the Ad-hoc Working Group)	
Numerator	Total criticality of recycled target materials
Denominator	Total criticality of materials present in the input of the recycling process
Rationale	The indicator equals 1 in the hypothetical situation that all materials present in the input of the recycling process of which the supply is of concern to the EU, are completely recovered as target material(s) and desired impurities in output fractions.

Figure 33 - Indicateur du poids de matières critiques recyclées (Source : Nelen et al., 2014)

La qualité du recyclage est jugée à partir des prix de marché de la matière vierge et secondaire (Figure 34).

Indicator I_C	Degree of material cycle closure
Equation	$I_C = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i * V'_i}{\sum_{j=1}^n W_j * V_j}$
m :	number of output fractions from the recycling process, destined for material recovery
n :	number of materials present in input of the recycling process
W'_i :	weight of the output fraction that contains material i
W_j :	weight of material i present in the input of the recycling process
V'_i :	current market price of output fraction i
V_j :	current market price of the material j , present in the EEE
Numerator	Current market price of the recycled output fractions
Denominator	Current market price of the materials present in the EEE
Rationale	The indicator equals 1 in the ideal situation that all materials are recovered and the market price that can be obtained for the recycled materials, products or substances equals the current market price of the materials in the original device.

Figure 34 - Indicateur de la fermeture de la boucle de recyclage (Source : Nelen et al., 2014)

Enfin la pertinence environnementale est évaluée en comparant les impacts évités et générés par le recyclage. Toutes les catégories d'impacts peuvent être représentées en choisissant de calculer cet indicateur avec le score unique d'une évaluation ACV, mais une catégorie d'impact spécifique peut-être choisie pour cet indicateur (Figure 35).

Indicator I_E	Avoided environmental burdens
Equation	$I_E = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i * B'_i}{\sum_{j=1}^n W_j * B_j}$
m :	number of output fractions from the recycling process, destined for material recovery
n :	number of materials present in the input of the recycling process
W'_i :	weight of target material(s) in the output fraction i
W_j :	weight of material i present in the input of the recycling process
B'_i :	environmental burden associated with the production of the material that is avoided by the recycled output fraction
B_j :	environmental burden associated with the production of the material present in the EEE
Numerator	Environmental burden that is avoided by the recycling of the materials
Denominator	Total environmental burden generated by the production of the materials in the EEE
Rationale	The indicator equals 1 in the ideal situation of closed-loop recycling of all input materials. Its value decreases with reduced material weight recovery or when the output fraction substitutes a resource with a lower production burden than that of the production of the materials that compose the fraction. If desired, specific environmental impact categories can be accounted for (e.g. climate change or eco-toxicity).

Figure 35 - Indicateur des impacts environnementaux évités (Source : Nelen et al., 2014)

Dans le cadre d'un accroissement des objectifs de recyclage, Kovanda exploite les résultats d'une étude MFA selon la méthodologie Eurostat pour évaluer le taux d'utilisation cyclique de la matière, développé par le *Japanese Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society* (Kovanda, 2014). L'auteur met en avant l'intérêt de cet indicateur qui peut être réalisé pour différentes

classes de matières (biomasse, métaux, etc.) et propose une adaptation de la formule pour mieux distinguer les consommations de matières vierges et recyclées. Il présente ensuite un exemple d'application de cet indicateur à l'échelle de la République Tchèque et montre que l'économie du pays est loin de reposer principalement sur la circularité de la matière.

$$\text{Taux de circularité} = \frac{Uc + IMr}{DMI + Uc}$$

Avec :

Uc : Masse de matière concernée par un usage cyclique, recyclage ou réutilisation.

IMr : import de déchets recyclés sur le territoire

DMI : Masse de matière entrante dans le système, imports et extractions locales.

Pour évaluer la performance de différents projets de recyclage au Japon, Chen et al. proposent deux indicateurs (Chen, Fujita, Ohnishi, Fujii, & Geng, 2012). Le premier, exprimé en tonnes de matière par an, représente la quantité de matière vierge préservée et exprime les bénéfices environnementaux. Le second, exprimé en pourcent, représente la part de déchets traités par rapport aux quantités prévues et exprime la performance.

$$VMS = VME - C$$

VMS : matière vierge évitée

VME : quantité de matière vierge équivalente à la matière recyclée ou à l'énergie récupérée

C : matière vierge consommée par le procédé de recyclage

L'ensemble de ces indicateurs permet d'assurer le suivi de l'évolution d'un système et le positionnement de la performance par rapport à des objectifs préalablement fixés.

Un exemple d'ampleur de l'application de tels indicateurs sur un territoire est celui de la Chine qui s'est munie d'un cadre législatif pour mettre en place l'économie circulaire sur son territoire. Dans l'objectif d'évaluer la performance des projets la SEPA, *State Environmental Protection Administration*, s'est doté d'un ensemble d'indicateurs dont le suivi doit être assuré régulièrement et auxquels sont associés des objectifs spécifiques. La Figure 36 liste des indicateurs classiques pour les parcs éco-industriels.

Table I Indicator standards for sector-integrated eco-industrial parks (EIPs) in China

Item	No.	Indicator	Unit	Value
Economic development	1	Added industrial value per capita	10,000 ¥/p	≥15
	2	Growth rate of added industrial value	%	≥25%
Material reduction and recycling	3	Energy consumption per added industrial value	SCE/10,000 ¥	≤0.5
	4	Fresh water consumption per added industrial value	m ³ /10,000 ¥	≤9
	5	Industrial wastewater generation per added industrial value	t/10,000 ¥	≤8
	6	Solid waste generation per added industrial value	t/10,000 ¥	≤0.1
	7	Industrial water reuse ratio	%	≥75%
	8	Solid waste reuse ratio ^a	%	≥85%
Pollution control	9	Middle water reuse ratio ^b	%	≥40%
	10	COD loading per added industrial value	kg/10,000 ¥	≤1
	11	SO ₂ emission per added industrial value	kg/10,000 ¥	≤1
	12	Disposal rate of dangerous solid waste	%	100%
	13	Centrally provided treatment rate of domestic wastewater	%	≥70%
	14	Safe treatment rate of domestic rubbish	%	100%
	15	Waste collection system	Yes/no	Available
	16	Centrally provided facilities for waste treatment and disposal	Yes/no	Available
	17	Environmental management systems	Yes/no	Established, certified according to ISO 14001
Administration and management	18	Extent of establishment of information platform	%	100%
	19	Environmental report release	Yes/no	1 issue/year
	20	Extent of public satisfaction with local environmental quality	%	≥90%
	21	Extent of public awareness degree with eco-industrial development	%	≥90%

Note: One cubic meter (m³, SI) ≈ 1.31 cubic yards (yd³). One metric ton (t) = 10³ kilograms (kg, SI) ≈ 1.102 short tons. SCE = standard coal equivalent energy ¥ is the symbol of Chinese currency, RMB. As of 21 July 2008, US\$1 equals 6.83 RMB, and one Euro equals 10.83 RMB. COD = chemical oxygen demand; SO₂ = sulfur dioxide.

^aReuse in this context means direct reuse of discarded products, such as printing on the reverse of once-printed paper and reuse of some solid wastes (with basic treatment), such as cleaning polyethylene terephthalate (PET) bottles and glass containers for refilling.

^bMiddle water is a Chinese term for the recyclable treated wastewater from wastewater treatment plants. This indicator does not need to be assessed if there is no water treatment plant in the industrial park.

Figure 36 - Liste d'indicateurs standards pour les parcs éco-industriels en Chine (Source : Geng et al., 2008)

En France, l'Ademe et l'ARF ont récemment publié le guide *Cadre méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France* dans lequel des indicateurs spécifiques à chaque pilier de l'économie circulaire sont proposés pour suivre les stratégies d'économie circulaire développées par les territoires.

Le Tableau 2 présente quelques-uns des indicateurs quantifiables proposés dans ce guide méthodologique :

Tableau 2 - Indicateurs spécifiques de suivi des stratégies territoriales d'économie circulaire proposés par l'Ademe et l'ARF

Eco-conception	<p>Nombre d'opérateurs économiques régionaux intégrant une démarche d'éco-conception ;</p> <p>Nombres de biens et services éco-conçus fabriqués en région ;</p> <p>Chiffres d'affaires des produits éco-conçus en région ;</p> <p>Nombre de personnes sensibilisées et/ou formées à l'éco-conception en région</p> <p>Sur l'emballage, les indicateurs de prévention sur la production d'emballage du CNE peuvent être mobilisés, par exemple :</p> <p>Le rapport volumique contenu /contenant : il traduit l'aptitude de l'emballage à contenir de manière optimisée le produit,</p> <p>Le ratio d'utilisation de matière recyclée.</p>
Ecologie industrielle	<p>Nombre de coopérations et de synergies</p> <p>Nombre d'emplois générés</p> <p>Nombre de nouvelles activités créées</p>
Allongement de la durée d'usage	<p>Pour les secteurs du réemploi, de la réutilisation, de la réparation en région :</p> <p>Nombre d'établissements et chiffres d'affaires générés</p> <p>Nombre d'emplois du secteur (en distinguant les emplois aidés dans l'insertion des autres emplois)</p> <p>Quantité / tonnage d'objets collectés</p> <p>Quantité / tonnage d'objets réemployés, réparés, réutilisés</p> <p>Nombre de bénéficiaires (acheteurs ou receveurs) de biens réemployés, réutilisés, réparés</p> <p>Taux moyens de réemploi, réutilisation, réparation dans les structures</p>
Recyclage	<p>Tonne de matières premières de recyclage (MPR) collectées</p> <p>Tonnage et taux d'utilisation de MPR utilisé dans la production industrielle régionale</p> <p>Tonnage de déchets collectés par filières REP (Responsabilité étendue des producteurs)</p> <p>Taux de recyclage des déchets en région par rapport aux flux de matière mis en jeu par l'économie régionale</p> <p>Répartition du recyclage par matériaux</p> <p>Evolution du parc régional de centres de tri (nombre d'installations et tonnage reçu)</p>

L'enjeu principal de l'évaluation de la performance d'une boucle d'économie circulaire consiste à identifier les indicateurs les plus représentatifs des différents scénarios de boucles possibles. Le choix

des indicateurs suivis est alors motivé par les résultats de la priorisation des différents scénarios possibles.

Enjeu de l'évaluation de la performance:

- **Identifier les indicateurs les plus représentatifs des différents scénarios de boucles d'économie circulaire.**

Troisième Partie : Utiliser l'ACV pour évaluer la performance environnementale des boucles matière dans un cadre d'économie circulaire – méthodologies, enjeux et recommandations opérationnelles

1. Introduction : De l'état de l'art aux enjeux méthodologiques de l'évaluation des boucles matière

A l'issue de l'état de l'art, l'ACV apparaît comme la méthode la plus couramment utilisée pour évaluer l'intérêt et la performance environnementale des boucles matière. Cependant, de nombreux enjeux méthodologiques associés à son utilisation ont été identifiés et présentés dans les sections précédentes. Ces enjeux peuvent être regroupés en 7 catégories :

- **Les enjeux associés à l'évaluation des ressources**
 - *Evolution des stocks de ressources, dispersion et dilution du stock*
 - *Impacts des pertes dissipatives*
- **Les enjeux associés à l'évaluation des boucles**
 - *Allocation des impacts entre les différents acteurs d'une même boucle*
 - *Prise en compte de la multifonctionnalité des produits dans l'évaluation*
- **Les enjeux associés à la qualité des matières**
 - *Evaluation de la quantité d'impuretés accumulées dans les flux de matière*
 - *Prise en compte de la perte de qualité de la matière collectée*
 - *Prise en compte de la qualité de la matière recyclée après plusieurs boucles*
- **Les enjeux associés à l'évaluation du futur**
 - *Choix du scénario marginal pour appliquer l'approche conséquentielle*
 - *Evaluation de scénarios inexistantes ou non optimisés*
- **Les enjeux associés à la hiérarchisation des impacts**
 - *Agrégation des résultats de l'évaluation des impacts*
 - *Hiérarchisation des boucles sans agréger les résultats*
 - *Positionnement des impacts*
- **Les enjeux de l'ACV non spécifiques à l'Economie Circulaire et à l'évaluation des boucles**
 - *Obtention de résultats robustes*
 - *Exploitation des données accessibles pour évaluer les impacts*
 - *Construction d'un inventaire spécifique*
- **Les enjeux non propres à l'ACV**
 - *Enjeux économiques*
 - *Enjeux liés aux MFA*

Cette partie de l'étude vise à présenter les différents choix méthodologiques qui s'offrent au praticien ACV au moment de réaliser l'évaluation de boucles matière. La démarche proposée consiste à accompagner le praticien ACV à chaque étape de son travail d'évaluation.

Certains des enjeux présentés ne sont pourtant pas liés exclusivement à l'évaluation environnementale des boucles matière et sont largement connus de la communauté ACV. D'ailleurs, certains enjeux comme l'agrégation des résultats, les méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources et l'ACV conséquentielle ont déjà fait le sujet d'études portées par SCORELCA. Seuls les enjeux propres à l'évaluation des boucles matière et l'interprétation de ses résultats seront donc traités dans cette partie.

Cette section guidera le praticien ACV à travers chaque étape de la construction d'une évaluation environnementale, depuis la définition des objectifs et du périmètre de l'étude, jusqu'à l'analyse, l'interprétation et l'exploitation des résultats, dans l'objectif d'évaluer la performance environnementale des projets d'économie circulaire.

Nous allons aborder les différents points avec la logique du praticien ACV, l'objectif étant de répondre aux questions qu'il pourrait se poser au moment d'évaluer une boucle matière :

- Comment définit-on une boucle matière ?
- Comment les objectifs de l'économie circulaire peuvent-ils être intégrés aux objectifs de l'étude ?
- Quels sont les différentes approches permettant d'évaluer les boucles matière ?
- Comment utilise-t-on l'extension de frontières pour intégrer les boucles matière au système ?
- Comment peut-on allouer les impacts et bénéfices des boucles matières aux différents systèmes ?
- Comment faut-il définir l'unité fonctionnelle pour prendre en compte les objectifs de l'économie circulaire ?
- Comment peut-on évaluer les différences de qualité entre la matière première vierge et la matière première secondaire en ACV ?
- Comment peut-on évaluer les projets futurs ?
- Comment les indicateurs ressources prennent-ils en compte les enjeux de l'économie circulaire ?
- Quels sont les derniers développements en termes de priorisation des impacts ?

2. Définitions associées à la boucle matière

Une grande partie des projets d'Economie Circulaire se caractérise par la création d'une ou de plusieurs boucles matière visant à réduire la consommation de ressources vierges et à limiter la quantité de déchets produits. Dans le cadre de tels projets d'économie circulaire, l'ACV réalisée doit inclure dans son périmètre les boucles identifiées ou, a minima, les impacts et bénéfices de la matière recyclée et du recyclage en fin de vie.

Dans le cadre de ce rapport, une **boucle matière** sera définie comme tout système ou ensemble de systèmes dans lequel un ou plusieurs flux de matière en fin de vie sont traités et **valorisés sans destruction¹⁵ de la matière**, afin d'obtenir des **matières premières secondaires** et de limiter l'utilisation ou la production de matière première vierge. Les flux ainsi valorisés peuvent être des matériaux (ex. l'acier), des composants (ex. pièce de moteur) ou des produits en fin de vie. Les boucles matière intègrent donc le recyclage, la réutilisation et le réemploi, mais également la valorisation des déchets agrosourcés.

La valorisation énergétique entraîne une « destruction » de la matière, ne fait donc pas partie de cette définition et ne sera pas traitée en détail dans la suite de l'étude. Les enjeux méthodologiques associés à l'évaluation des boucles énergétiques sont cependant similaires à ceux des boucles matière.

2.1. Définition de la notion de déchet

La définition de boucle matière proposée dans ce rapport parle de « flux de matière en fin de vie », elle rappelle ainsi la notion de « déchet » largement traitée en ACV. La norme ISO 14 040, document de référence en ACV, propose les définitions suivantes :

- **Produit** : tout bien ou service
- **Co-produit** : l'un quelconque de deux produits ou plus issus d'un processus élémentaire ou système de produits
- **Processus** : ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des intrants en extrants
- **Déchet** : substances ou objets que le détenteur a l'intention d'éliminer ou qu'il est tenu d'éliminer

¹⁵ Le terme destruction ne fait pas référence ici au sens physique du terme. La matière (quantité d'atomes) est en effet conservée, cependant elle est rendue indisponible pour son utilisation future.

Traditionnellement, les différents flux et les impacts qui leurs sont associés sont alloués aux produits en appliquant les règles établies par l'ISO. Ainsi, les impacts (et bénéfiques) du traitement des déchets sont répartis entre les différents produits et co-produits.

La distinction entre co-produit et déchet peut cependant être difficile à faire lorsqu'une boucle matière est impliquée. La valorisation matière (recyclage, réutilisation ou réemploi) donne une fonction et une valeur aux « déchets ». Ces flux ne sont plus « éliminés » comme dans la définition de norme ISO 14 040, mais leur valeur n'est peut-être pas assez importante pour les considérer comme un « Co-produit » du système.

La notion « d'importance » est ici déterminante pour choisir la nature de flux évalué. Celle-ci est définie comme l'intérêt de l'existence du procédé étudié. Souvent c'est la valeur économique qui est utilisée (à travers, par exemple, la définition d'un ratio valeur produit/ valeur coproduit défini arbitrairement), mais cela peut également être le fruit d'un choix politique. Par exemple, la norme EN 15 804 indique qu'une différence des revenus associés aux produits/coproduits supérieure à 25 % est très élevée et sous-entend donc qu'une telle différence permet de différencier déchet et coproduit.

Dans tous les cas, le choix de la méthode utilisée pour faire la distinction contient nécessairement une part de subjectivité. A noter que sur ce point, il n'existe pas dans la plupart des cas de cadre normatif pour statuer de manière générique et les filières ont du mal à obtenir un consensus sur ces sujets. Le choix reste à la discrétion du praticien ACV et doit reposer sur les objectifs du système étudié.

2.2. Définition des différents types de boucles

La norme ISO 14044 ne donne pas une définition précise des boucles matière, elle établit cependant l'existence de deux types de boucles :

- **Boucle fermée** : Une boucle fermée est un système dans lequel les matériaux ou composants d'un produit sont recyclés dans le même système. Par extension, il y a une boucle fermée lorsque des matériaux, des composants ou des produits finis sont réinjectés dans une des étapes amont du système. Cette définition prend en compte le recyclage en boucle fermée, mais également le réemploi et la remise à neuf. L'ensemble des types de boucles fermées est représenté par la Fondation Ellen MacArthur dans la figure 7 (p19). Dans ce type de boucle, l'utilisation donnée au bien recyclé est similaire ou identique à son utilisation initiale, il n'y a donc pas de problème de multifonctionnalité.

Exemple : Cas d'étude OSILUB

- **Contexte** : Dans le cadre de l'économie circulaire et de la hiérarchie des déchets, la société OSILUB (filiale de Veolia et Total) a construit une usine de recyclage des huiles usagées afin de les valoriser.
- **Objectif de l'étude** : Evaluer la performance environnementale des huiles usagées et notamment de leur régénération.

Le procédé développé par OSILUB permet d'utiliser les huiles usagées noires pour la production de VGO (Vacuum Gas Oil). Ce produit possède une couleur caractéristique qui le différencie des huiles issues des matières premières vierges. Cependant, il répond aux critères de définition d'une huile et peut être vendu directement sur le marché. Ce produit a donc la même fonction après son recyclage. **Il s'agit d'une boucle fermée.**

- **Boucle ouverte** : Par opposition aux boucles fermées, la norme ISO définit les boucles ouvertes comme un système dans lequel les matériaux sont recyclés dans un autre système. Cette définition sous-entend une multifonctionnalité des flux étudiés, c'est-à-dire que leur utilisation (fonction) dans le deuxième système est différente en termes d'usage ou de qualité de leur utilisation originale, une même matière, matériau ou composant possède ainsi deux fonctions. La définition est cependant plus large, il est possible de considérer qu'il s'agit d'une

boucle ouverte lorsque les deux systèmes étudiés sont différents géographiquement, temporellement ou technologiquement. Par exemple, si le système étudié est celui des bouteilles PET en France, le recyclage des bouteilles en Chine fait partie d'une boucle ouverte.

Exemple : Etude Osset et al. (Osset, Clauzade, Hugrel, & Palluau, 2012)

- **Contexte** : Depuis juillet 2002, la valorisation des pneumatiques en fin de vie est devenue une obligation réglementaire. Dans ce cadre, la société Aliapur a été fondée en 2003 pour assurer la collecte, le regroupement, le tri et la valorisation des pneus en fin de vie.
- **Objectif de l'étude** : Quantifier les impacts et bénéfices environnementaux associés à la valorisation des pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR).

Les PUNR peuvent être transformés en granulats. Ces granulats sont ensuite utilisés pour fabriquer le matériau de remplissage (lestage et amortissement) des sols sportifs. Les PUNR sont ainsi valorisés sous la forme de nouveaux produits qui ont une fonction complètement différente. Il s'agit d'une **boucle ouverte de recyclage**.

En réalité, très peu de boucles ouvertes concernent uniquement deux systèmes et plusieurs boucles ouvertes peuvent se succéder. A ces deux définitions, il est donc possible de rajouter la notion de « cascade de recyclage » ou « recyclage en cascade » :

- **Recyclage en cascade** : Forme de boucle ouverte dans laquelle un matériau subit plusieurs utilisations successives jusqu'à atteindre un niveau de qualité insuffisant ou jusqu'à une dissipation trop importante de la matière (la quantité de matière est trop faible pour être utilisée).

Exemple : Le recyclage du papier

- **Contexte** : Le papier est un des déchets les plus recyclés dans le monde

Le broyage des déchets de papier est nécessaire pour la fabrication de nouveaux produits. Ce processus mène à la production de fibres de papier de plus en plus courtes et leur résistance diminue. Ces fibres ne pourront pas être utilisées pour la production du même type de produit. A la fin de chaque cycle de vie, la fibre de papier aura donc une nouvelle fonction (allant du papier au déchet ultime en passant par le carton). Dans ce cas, on parle alors de **cascade de recyclage**.

Une représentation schématique des différents types de boucles matière est présentée dans la figure suivante :

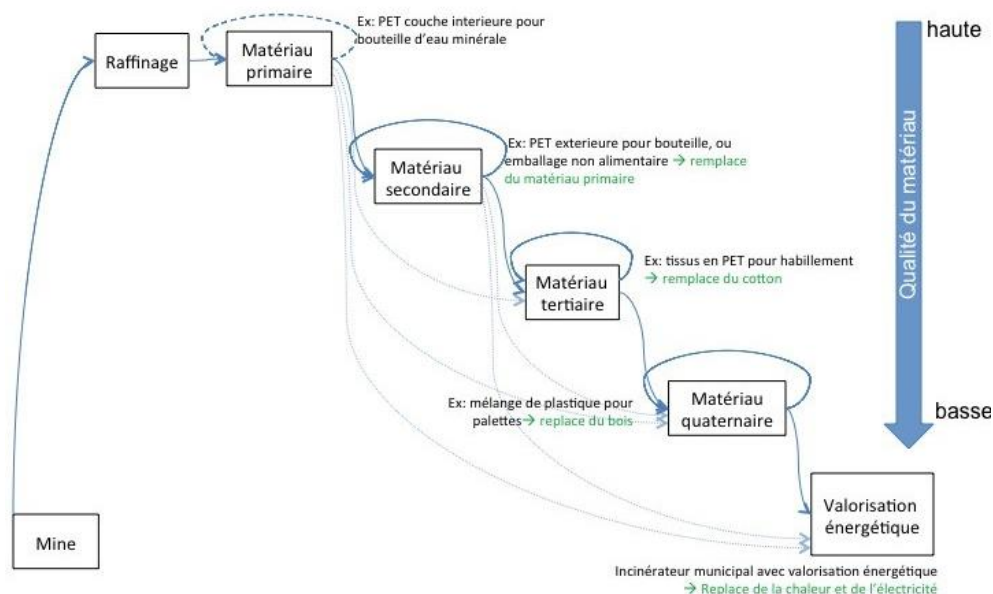


Figure 37 - Représentation schématique des différents types de boucles (Source : Quantis)

Cette figure introduit également les notions suivantes :

- **Boucle précédente** : Système utilisant la matière, composant ou produit avant le système à l'étude.
- **Boucle future** : Système utilisant la matière, composant ou produit après le système à l'étude

Ces deux définitions impliquent une notion de temporalité, le temps entre une boucle et l'utilisation de la matière dans la boucle suivante peut être de quelques semaines (recyclage des emballages) ou de plusieurs décennies (recyclage des éléments de construction). Il existe donc un enjeu de temporalité associé à l'évaluation du devenir des marchés économiques et du scénario marginal futur. Deux choix s'offrent ainsi au praticien ACV, il peut étudier en détail l'évolution des marchés économiques lorsque les boucles se situent dans des périodes de temps éloignées ou il peut considérer que la valorisation ultérieure sera quoi qu'il en soit « meilleure » qu'aujourd'hui (le « progrès »), et il choisit d'adopter un choix conservatif en modélisant la valorisation future comme identique à l'actuelle. C'est ce dernier choix qui est encouragé par la norme EN 15 804.

Les notions présentées jusqu'à présent permettent de caractériser les types de relations physiques qui peuvent exister entre les différents systèmes étudiés, mais ne définissent pas les échanges entre les parties prenantes. Les boucles matière présentées précédemment peuvent donc être classées en deux catégories :

- **Boucles locales** : Les boucles locales se caractérisent par des échanges directs entre un ou plusieurs acteurs. Il s'agit de systèmes clairement délimités dans l'espace (au sein d'une usine ou d'un parc industriel).
- **Boucles globales** : Les boucles globales se caractérisent par des échanges qui peuvent avoir lieu entre un nombre important d'acteurs et intégrant l'ensemble des phases du cycle de vie du produit. Les matériaux transitent généralement par des intermédiaires de collecte et de tri avant de subir quelques traitements primaires. Il s'agit de systèmes plus complexes avec des périmètres beaucoup moins clairs. Cependant, en fonction de l'angle choisi, il est possible de définir trois types de boucles globales:
 - Une zone géographique
 - Une filière (en général nationale, parfois régionale)
 - Un produit

3. Evaluation des boucles matière : Définition des objectifs

Le praticien ACV peut être confronté à l'évaluation de boucles matières qui peuvent être associées à un contexte d'économie circulaire dans plusieurs situations, par exemple :

- Evaluer la performance environnementale de la mise en place d'une boucle matière. Dans ce cas, l'objectif de la mise en place de la boucle matière correspondrait à l'objectif Economie Circulaire de mieux respecter la hiérarchie de traitement des déchets.
- Evaluer la performance environnementale de l'intégration de matière recyclée dans des produits. Dans ce cas, il s'agit de répondre à l'objectif Economie Circulaire de réduction de consommation de matière vierge.
- Evaluer la performance du recyclage par rapport à d'autres alternatives de gestion de déchets. Dans ce cas, il s'agit de vérifier que la hiérarchie des modes de traitement des déchets génère des bénéfices.

Dans tous les cas, il s'agit d'évaluer la performance environnementale en lien avec des boucles matière. L'évaluation environnementale doit permettre par exemple :

- De quantifier les bénéfices attendus.
- D'identifier des pistes d'amélioration de cette performance.

On peut donc distinguer i) les objectifs d'Economie Circulaire, ii) les solutions de boucles matières pour y répondre, et iii) les performances environnementales de ces solutions. Lors de l'évaluation environnementale des boucles matière dans un cadre d'économie circulaire, il est donc important de prendre en compte les objectifs de l'économie circulaire et leurs implications sur les moyens méthodologiques à mettre œuvre dans la suite de l'étude.

3.1. Objectifs de l'économie circulaire

L'économie circulaire est un sujet vaste et interdisciplinaire, comme démontré en partie 1. Ce concept inclut pourtant la définition d'un ou de plusieurs objectifs communs, de manière plus ou moins explicite :

Réduire la consommation de ressources globalement

- Consommer moins de ressources pour un même objectif (ex : ADEME : « augmenter l'efficacité des ressources », « découpler la consommation des ressources de la croissance du PIB », Chine « Réduction », Loi de transition Energétique « Consommation sobre » , Lévy & Auzan « Utilisation rationnelle des ressources »)

Prévention des déchets et pertes

- Prévention des déchets
- Etanchéfier (ou minimiser les pertes dissipatives)

Gestion des déchets

- Respecter la hiérarchie des modes de traitement (ex : Loi de transition Energétique), Eviter la mise en décharge, matériaux techniques destinés à être revalorisés sans entrer dans la biosphère (Ellen MacArthur)
- Augmenter les taux de recyclage (ex : Chine, Loi de transition Energétique)

Réduire les impacts environnementaux

- Diminuer les impacts sur l'environnement (ex : ADEME) : tous enjeux environnementaux confondus
- Prévention des polluants et des substances toxiques (ex : Loi de transition Energétique)
- Contribuer à la réduction du changement climatique

Promouvoir et favoriser les « efforts »

- Contribuer à augmenter la durée de vie des produits (ex : Loi de transition Energétique)
- Favoriser le réemploi et la réutilisation (ex : Loi de transition Energétique, Chine)
- Développer les valeurs d'usage et de partage, et promouvoir l'information environnementale (ex : Loi de transition Energétique)

- Promouvoir l'utilisation des principes d'écoconception des produits
- Promouvoir les principes de l'Ecologie industrielle, et de la coopération entre acteurs économiques à l'échelle territoriale (ex : Loi de transition Energétique)
- Favoriser le marché des matières recyclées

3.2. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire aux objectifs de l'étude ACV de boucles matière

Comme le concept d'économie circulaire, une ACV inclut l'explicitation d'un ou de plusieurs objectifs. D'après la norme ISO 14044 (ISO, ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and Guidelines, 2006), la définition des objectifs de l'étude, la première étape au moment de réaliser une évaluation environnementale, doit permettre de définir sans ambiguïté :

- L'application qui sera donnée à l'étude
- Les raisons qui ont mené à réaliser l'étude
- Le public visé
- La présentation ou non de résultats comparatifs au public

Cette première étape permet non seulement de définir l'intérêt de l'étude, mais également de la cadrer. Définir de façon précise les objectifs est le moyen d'identifier les choix méthodologiques à réaliser pour assurer la satisfaction des objectifs de l'évaluation. Ainsi, la mise en œuvre des méthodes d'évaluation de type ACV pour évaluer les projets d'économie circulaire et les boucles matière présuppose d'inclure dans les objectifs de l'étude les objectifs de l'économie circulaire qui sont évalués. Ceux-ci peuvent notamment influencer :

- Le choix du périmètre de l'étude

Exemple N°1 :

- **Objectif de l'étude** : Evaluer la performance environnementale de l'augmentation du réemploi et de la réutilisation
- **Moyen méthodologique à mettre en œuvre** : Extension des frontières
- **Explication** : Si l'objectif de l'étude est d'évaluer la performance environnementale du réemploi ou la réutilisation d'un produit, il peut être pertinent de réaliser une extension des frontières permettant de prendre en compte la deuxième vie du produit. Utiliser une règle de type *cut-off* ne permettrait pas en effet de quantifier entièrement les bénéfices environnementaux associés au réemploi et à la réutilisation.

- Le choix des fonctions de référence

Exemple N°2 :

- **Objectif de l'étude** : Evaluer la performance environnementale de l'augmentation de la durée de vie des produits
- **Moyen à mettre en œuvre** : Prendre en compte la durée de vie dans la définition de l'unité fonctionnelle
- **Explication** : La prise en compte de la durée de vie d'un produit dans l'unité fonctionnelle est une pratique souvent laissée de côté, mais qui peut être un facteur différenciant au moment de comparer deux produits avec des fonctions similaires

- Les choix de modélisation des systèmes

Exemple N°3 :

- **Objectif de l'étude** : Evaluer la performance environnementale de l'encouragement de l'utilisation des matières premières recyclées
- **Moyen à mettre en œuvre** : Appliquer la bonne approche pour l'allocation des impacts en fin de vie
- **Explication** : Les approches utilisées pour l'allocation des impacts et bénéfiques en fin de vie peuvent valoriser la mise à disposition ou l'utilisation de matière recyclée. Dans un marché où la matière première secondaire trouve difficilement preneur, l'utilisation de la bonne approche peut encourager son utilisation

- Les choix des méthodologies et des indicateurs d'évaluation des systèmes

Exemple N°4 :

- **Objectif de l'étude** : Evaluer la performance environnementale de la prévention de la production de déchets
- **Moyen à mettre en œuvre** : Prendre en compte un indicateur de suivi des quantités de déchets
- **Explication** : La production de déchets n'est pas un enjeu environnemental en soi. Les indicateurs utilisés en ACV prennent en compte uniquement les impacts potentiels des déchets générés et de leur traitement. Certains indicateurs de flux peuvent pourtant être utilisés pour quantifier les déchets générés.
Le praticien ACV peut cependant se trouver face à des problèmes d'interprétations si seuls les indicateurs de production de déchets sont étudiés. C'est notamment le cas lorsque la nature ou la toxicité des déchets est modifiée par le changement de procédé.

Cependant, l'ACV n'est pas capable de prendre en compte et d'évaluer tous les objectifs de l'économie circulaire. Un des objectifs de l'économie circulaire est, par exemple, de maintenir les ressources à disposition dans les flux économiques. Il semble pourtant complexe d'évaluer les impacts ou bénéfiques environnementaux de cette action. De même, les choix méthodologiques permettant d'encourager la mise à disposition des ressources par rapport à leur réintroduction dans le milieu naturel semblent difficilement identifiables.

Dans ces cas-là, l'évaluation devra intégrer des indicateurs autres que des indicateurs d'impacts environnementaux que sont ceux de l'ACV. Il pourrait s'agir par exemple :

- d'un indicateur de quantité de matière vierge (impact négatif), ou de quantité de matière vierge évitée (bénéfice positif), en masse, ou en masse pondérée par un indicateur de criticité de cette matière ;
- un indicateur de production de déchet (impact négatif), ou de quantité de déchet évitée (bénéfice positif), en masse, ou en masse pondérée par un indicateur de non-conformité à la hiérarchie de traitement des déchets ;
- un indicateur de matière première secondaire ou matière issue du recyclage, en masse ou en proportion par rapport au total, et possiblement pondéré par un indicateur de criticité de cette matière ;
- un indicateur d'efficacité de la ressource, en quantité de matière pour une fonction rendue, et possiblement pondéré par un indicateur de criticité de cette matière ;

La norme EN 15804 utilise des indicateurs de ce type, par exemple :

- Utilisation de combustibles secondaires renouvelables
- Utilisation de matière secondaire
- Matériaux destinés au recyclage

Dans certains cas, l'ACV peut être même en contradiction avec les objectifs de l'Economie Circulaire. La hiérarchie des déchets est un des objectifs le plus souvent remis en cause. Par exemple, en ACV, la valorisation énergétique en fin de vie est souvent modélisée à travers la substitution. Les déchets remplacent ainsi des ressources fossiles pour la production d'énergie. Ce choix méthodologique peut rendre la valorisation énergétique de certains matériaux (certains plastiques, le bois, ...) plus intéressante que leur valorisation matière.

Les sections suivantes présenteront comment chaque étape de l'ACV peut répondre aux objectifs de l'économie circulaire et comment l'ACV peut servir à encourager la mise en place de boucles matière.

Points clés:

- **Les objectifs de l'ACV doivent intégrer les objectifs de l'économie circulaire que l'on souhaite évaluer**
- **Les objectifs de l'économie circulaire ne peuvent pas être évalués intégralement par l'ACV et certains devront être évalués à travers d'autres indicateurs**

4. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire au périmètre de l'étude : ACV déchets/ACV Produit

Le premier choix qu'un praticien ACV doit réaliser au moment de définir le périmètre de l'étude est celui du **type d'ACV**.

4.1. Approche produit – approche déchet en ACV

L'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un système donné en relation avec une fonction. La fonction évaluée lorsque l'on s'intéresse aux projets d'économie circulaire est souvent centrée autour de produits intégrés dans des boucles matières ou sur la valorisation des produits en fin de vie. La fin de vie et l'utilisation de matière recyclée sont ainsi au cœur des ACV de ce type de projets.

Deux approches complémentaires ont été développées pour gérer la question de la fin de vie en ACV :

- **ACV Produit** : ACV portant **sur toutes les étapes composant le cycle de vie d'un produit**. Ainsi, le traitement des déchets générés lors de la fin de vie du produit, mais également à chaque étape (déchets d'extraction, chutes lors de la fabrication, déchets d'emballage, ...) est pris en compte et les impacts associés sont évalués comme une part intégrante des impacts du produit.
- **ACV Déchets** : **étude spécifique sur le périmètre de la fin de vie** avec pour objectif de déterminer le traitement le moins impactant ou avec les bénéfices les plus intéressants. Le gisement évalué peut être un mélange de divers matériaux (ex. ordures ménagères) ou un gisement uniforme (ex. déchets issus du tri sélectif). Dans un cadre d'économie circulaire, l'ACV déchets s'applique principalement à l'évaluation des filières de gestion de flux de déchets.

Moins pratiquée au sein de la communauté ACV, l'approche déchets permet d'étudier en détail une étape qui est souvent délaissée au moment de réaliser l'évaluation environnementale d'un produit. Ces deux types d'ACV sont complémentaires et permettent de répondre à des questions différentes comme le met en évidence la figure suivante.

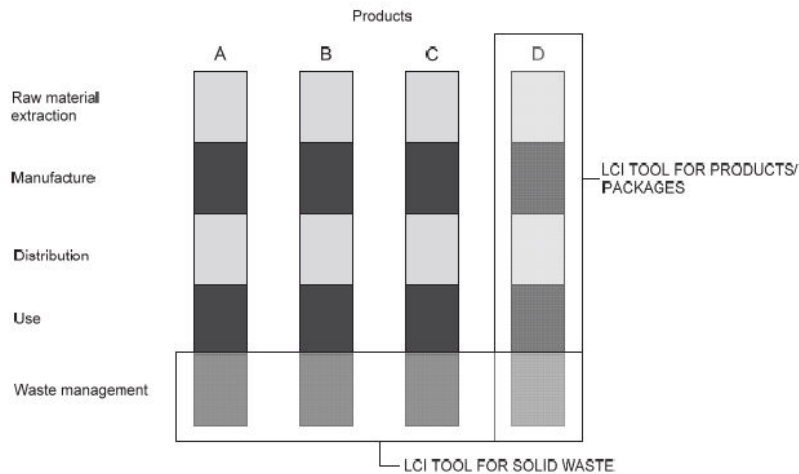


Figure 38 - Approche ACV Déchets vs. Approche ACV Produits (Colemant, Masoni, Dryer, & McDougall, 2003)

Le choix d'un type d'ACV par rapport à un autre dépendra fortement du gisement des déchets évalué, du champ d'action du porteur de l'étude et des objectifs initialement définis. Ainsi, si l'objectif de l'étude est d'évaluer les impacts de la gestion d'un gisement des déchets d'origine ou de nature diverse (ex. ordures ménagères), l'approche produit semble difficilement applicable. Les informations nécessaires pour cette évaluation seraient trop importantes et difficilement accessibles pour le praticien ACV ou le gestionnaire des déchets. Le diagramme suivant permet de définir l'applicabilité de l'approche déchet pour une évaluation environnementale :

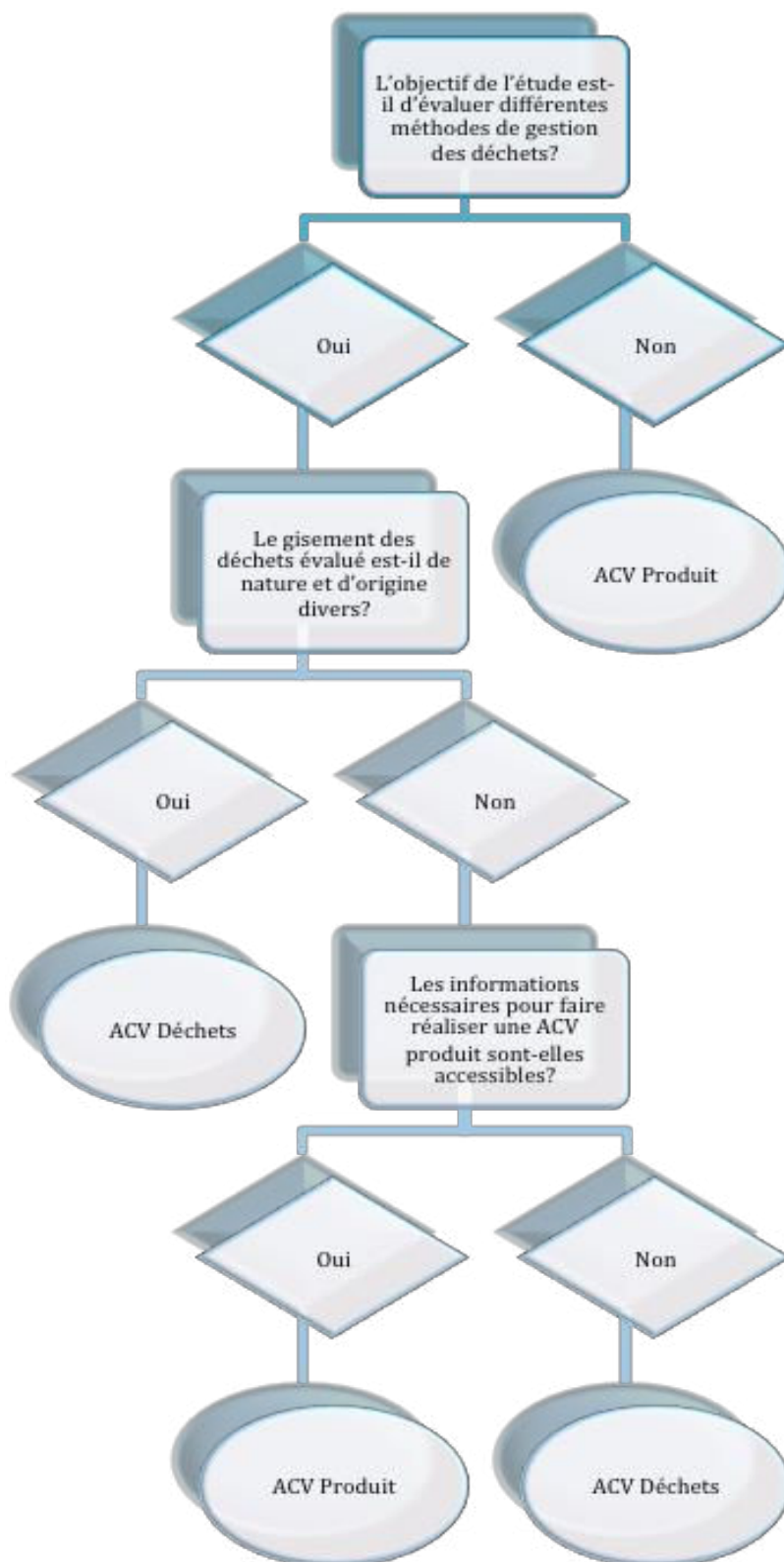


Figure 39 - Choix du type d'ACV à réaliser en fonction des objectifs de l'étude et des données à disposition (Quantis)

Exemple : Cas d'étude Placoplatre

- **Contexte** : Lors de la fabrication de certains de ses produits, Placoplatre intègre une partie de plâtre recyclé issu des déchets de construction. Placoplatre gère ainsi toute la chaîne de valeur depuis l'extraction des matières premières (réalisée à proximité du site de production) jusqu'à la collecte et la valorisation matière de la matière recyclée.
- **Objectif de l'étude** : Evaluer les impacts et bénéfices environnementaux des produits fabriqués à partir de matière première recyclée
- **Choix méthodologique** : Réaliser une ACV produit

Au moment de réaliser son évaluation environnementale, l'objectif du projet de Placoplatre n'était pas de comparer les différents exutoires possibles pour les déchets de plâtre issu de la construction, mais d'identifier les enjeux environnementaux de leur produit. De plus, le gisement de déchets géré par Placoplatre est homogène, l'utilisation d'une ACV produit est donc entièrement adaptée.

Exemple : Etude NordPackage

- **Contexte** : L'industrie papetière en Nord-Pas de Calais connaît une situation difficile, du fait notamment de la concurrence étrangère asiatique sur les approvisionnements en vieux papiers. Le besoin est fort de rendre environnementalement, socialement et économiquement intéressants les circuits locaux de production, d'utilisation, de récupération et de recyclage des papiers-cartons.
- **Objectif de l'étude** :
 - Evaluer l'empreinte environnementale de la filière
 - Comparer l'empreinte de la filière NordPackage par rapport au traitement des déchets de papier en Chine
- **Choix méthodologique** : Réaliser une ACV déchet

L'étude Nord Package visait à évaluer deux exutoires différents (Recyclage en France ou en Chine) pour un gisement de déchets hétérogène (différents types de papier et cartons) et d'origine variable. L'approche déchet était globalement mieux adaptée pour répondre aux objectifs fixés.

En plus des enjeux environnementaux, le développement des projets d'économie circulaire peut engendrer des enjeux économiques et logistiques importants, la mise en place de filières de recyclage de flux dédiés (comprenant également des collectes et des tris dédiés) étant parfois peu rentable. Ceci est notamment vrai pour les filières complexes comme celle des plastiques biosourcés. **L'évaluation de la rentabilité de ces filières est donc un sujet essentiel et si les méthodes classiques d'ACV ne peuvent pas répondre à cette question, les méthodes complémentaires comme le TCO et le LCC peuvent apporter un regard pertinent à l'évaluation.**

4.2. Approche déchet : Mise en pratique et Enjeux méthodologiques

4.2.1. Périmètre de l'étude

Comme son nom l'indique, l'approche déchet s'intéresse particulièrement à la fin de vie d'un produit. Bien que le Code de l'Environnement définisse le déchet comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon », la définition du déchet, et donc le périmètre d'action de cette approche, reste problématique.

La définition du périmètre est donc davantage cruciale en ACV déchets, la notion du « cycle de vie » d'un déchet étant à questionner. La fin de vie ne représente pas un « cycle » à proprement parler, mais bien un maillon de la chaîne. Il ne s'agit donc que d'une approche partielle du cycle de vie qui, par opposition à l'approche du berceau au tombeau, pourrait être définie de la porte au tombeau (*Gate-to-grave*).

Cette problématique peut cependant être résolue si on considère qu'il s'agit bien d'une ACV complète où le déchet en entrée du système est simplement sans impact, l'impact des étapes en amont de la collecte étant alloués à la fonction primaire de la matière. Le traitement du déchet est ainsi considéré comme une étape fatale, une conséquence nécessaire de sa première fonction. Cette approche est appelée dans la littérature **waste = zero burden**.

Or, dans le cadre des projets d'Economie Circulaire, la notion de déchets (et leur fatalité) pourrait être remise en question. Par exemple, certaines filières comme la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle, modifient leurs procédés de fabrication afin de produire leur produit principal tout en optimisant la quantité ou la qualité de « déchets » produits. Dans ces circonstances, le déchet acquiert une valeur économique, il n'est plus « destiné à l'abandon » et ne doit plus être considéré comme un déchet. La première étape avant de définir le périmètre de l'ACV déchets est donc de déterminer si le flux évalué correspond effectivement à un déchet selon les définitions présentées dans la section 2.1. Dans le cas contraire, l'approche utilisée est à revoir, la notion de « Zero Burden » n'étant pas applicable aux co-produits.

Une fois le flux de déchets à évaluer identifié, le périmètre de l'étude doit être défini. Traditionnellement, le périmètre de l'approche déchet commence à la collecte et se finit par le traitement et la valorisation des déchets. La figure suivante présente les frontières classiques d'une ACV déchet.

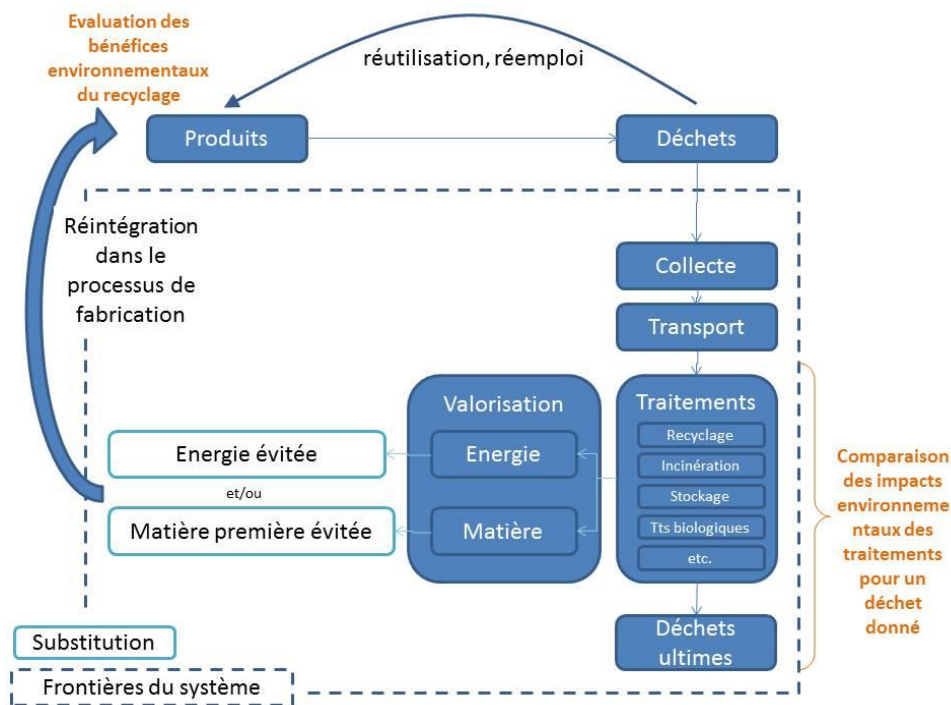


Figure 40 - Représentation du périmètre évalué par l'ACV déchets (Source : Quantis)

Dans le cas des boucles matière, l'enjeu est de définir convenablement la dernière étape à prendre en compte. La limite entre la valorisation matière (étape de recyclage ou de remise à neuf) et le début du nouveau cycle de vie est parfois floue rendant ainsi la définition du périmètre complexe. Le rôle du praticien ACV est dans ces circonstances de définir les étapes nécessaires pour transformer un déchet en matière première secondaire.

4.2.2. Unité Fonctionnelle

Lorsque le périmètre de l'étude a été clairement identifié, le praticien ACV doit évaluer les fonctions de son produit ou service afin de définir l'**unité fonctionnelle (UF)** du système évalué.

Illustration : Le Recyclage du bois

- **Contexte** : Les meubles en bois en fin de vie peuvent être recyclés pour produire des panneaux de particules
- **Périmètre** : Les fabricants de panneaux reprennent les broyats issus des centres de tri directement pour la fabrication de leurs produits. Les déchets de bois entrant chez le fabricant sont ainsi de la matière première secondaire prête à être utilisée. Le périmètre de l'ACV déchet s'arrête donc à l'entrée de l'usine de panneaux.

En ACV Produit, l'unité fonctionnelle doit permettre de traduire la fonction et les caractéristiques du produit étudié. L'approche déchet ne s'intéresse pas à la fonctionnalité du produit, mais à celle d'un système. Il s'agit d'une activité, plus particulièrement, la gestion d'un déchet et ces interactions avec d'autres composés. L'unité fonctionnelle se traduit donc par des actions, par exemple :

« **Collecter et traiter 1 kg de déchets** »

Et même si le traitement des déchets est vu comme une activité permettant juste la gestion des produits en fin de vie, les projets associés aux boucles matières dans le cadre de l'économie circulaire visent à valoriser et à économiser les ressources. L'unité fonctionnelle doit donc traduire, en plus, cette caractéristique. La définition de l'unité fonctionnelle en ACV déchets devient ainsi un point clé fortement dépendant des objectifs de l'étude et des caractéristiques du procédé de traitement qui doit quantifier la valeur ajoutée par la filière.

De façon générique, l'unité fonctionnelle des projets intégrant des boucles matières dans un cadre d'économie circulaire peut se traduire par :

« **Gérer et valoriser 1 kg de déchets** »

Cette unité fonctionnelle doit cependant être adaptée au cas par cas pour prendre en compte les spécificités de chaque filière et le type de valorisation.

Illustration : Etude NordPackage

- **Explication** : Le traitement des déchets papier-carton dans le Nord-Pas-de-Calais permet non seulement de gérer ces déchets mais également de fabriquer des nouveaux produits. La valorisation de ces déchets a donc une double fonctionnalité qui doit être évaluée et prise en compte dans l'unité fonctionnelle
- **Unité fonctionnelle** : Gérer et traiter une tonne de déchets de papier-carton générés dans la région Nord-Pas-de-Calais en 2013 et fournir une quantité de papier-cartons recyclés à la demande mondiale

4.2.3. Evaluation des bénéfices de la valorisation matière en ACV déchets

Il est important de considérer les effets de la double fonctionnalité des boucles matière sur la façon dont l'ACV est menée. Les boucles matière ont notamment des bénéfices environnementaux qui doivent être évalués. Ce point est particulièrement délicat au moment de comparer différentes filières de traitement des déchets qui n'ont pas nécessairement les mêmes fonctions.

Traditionnellement, l'approche déchets évalue les bénéfices de la fin de vie à travers la méthode dite de *substitution* (Cf. section 5.3.7). La valorisation matière permet, selon cette méthode, d'éviter des impacts liés à la production d'une matière première vierge. La particularité de l'approche déchet est qu'elle attribue les bénéfices et les impacts de la fin de vie entièrement au procédé de traitement des déchets. Il n'est pas question d'allouer les impacts et les bénéfices aux différentes parties prenantes, mais d'identifier la pratique la plus intéressante environnementalement.

Cette pratique implique de bénéficier d'une connaissance précise des matériaux substitués et des implications de la production de matière recyclée sur le marché, le choix de la matière substituée pouvant influencer considérablement les résultats de l'évaluation environnementale.

Illustration : Le recyclage du Polyuréthane

- **Contexte** : La mousse de polyuréthane en fin de vie peut être recyclée. La matière première secondaire ainsi produite peut être utilisée pour fabriquer des nouveaux produits rembourrés (fauteuils, canapés) ou des tapis de sol.
- **Choix d'impact évité** : Lorsque la mousse de polyuréthane est utilisée pour fabriquer des nouveaux produits rembourrés, elle remplace (ou se substitue à) de la mousse de polyuréthane vierge. Par contre, lorsqu'elle est utilisée pour fabriquer des tapis des sols, elle évite la production de textile. Au moment de réaliser l'évaluation environnementale de la filière de recyclage du polyuréthane, le choix de substitution peut influencer les résultats considérablement.

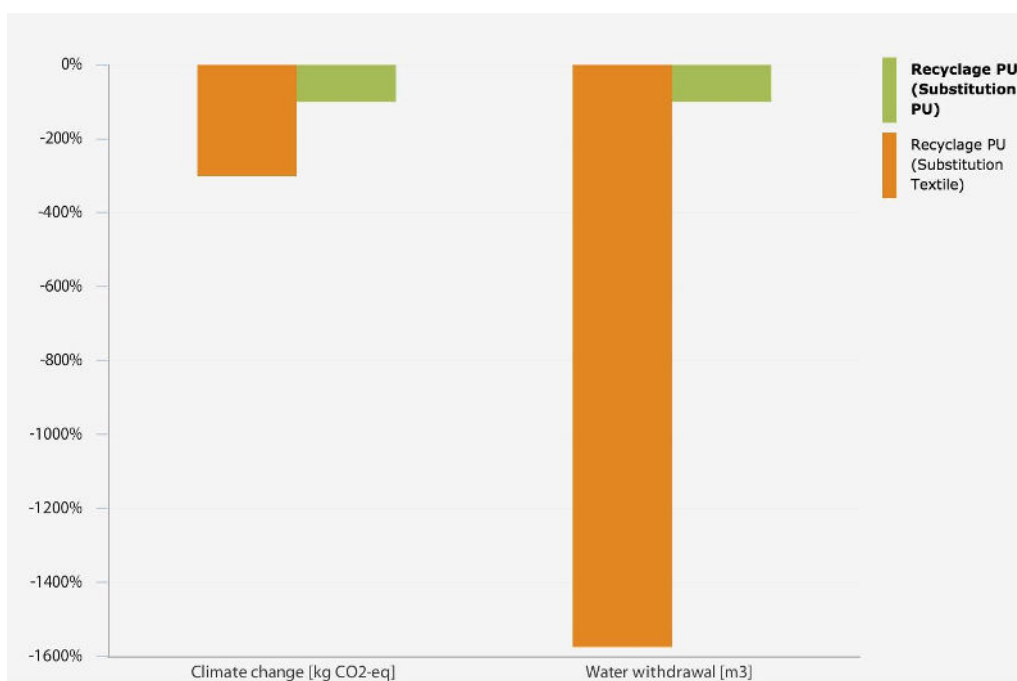


Figure 41 - Impacts et bénéfices du recyclage de PU en fonction du choix de substitution (source : Quantis)

La prise en compte des bénéfices environnementaux de la valorisation de la fin de vie peut cependant desservir la hiérarchie européenne des modes de traitement des déchets et donc aller contre un des objectifs de l'économie circulaire. Notamment, lorsque la valorisation énergétique permet d'éviter la combustion de ressources fossiles, la valorisation énergétique peut être plus intéressante que la mise en place d'une boucle matière du point de vue de l'ACV.

4.3.Focus : Comment l'ACV déchets sert et dessert la hiérarchie européenne des modes de traitement des déchets

La directive européenne n°2008/98/CE relative aux traitements des déchets (Commission Européenne) a défini une hiérarchie des modes de traitement des déchets permettant de renforcer le recours à certains types de valorisation de produits en fin de vie. La figure suivante présente la hiérarchie telle qu'elle a été définie par l'Europe.

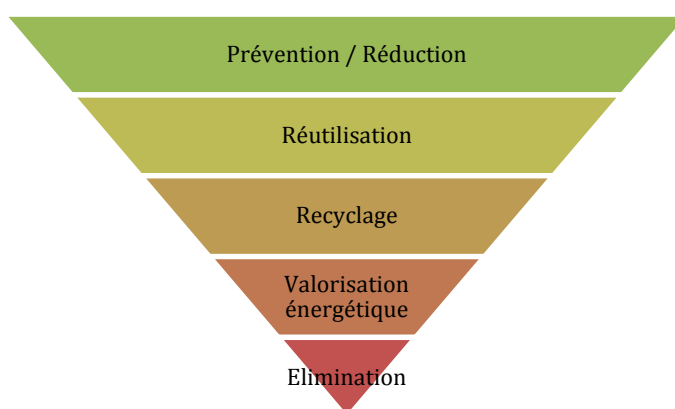


Figure 42 - Hiérarchie des déchets définie dans la directive-cadre déchets (Commission Européenne)

L'objectif de cette structuration est de faciliter la stabilité des filières de gestion des déchets, tout en assurant les objectifs de l'économie circulaire et la réduction des impacts sur l'environnement. Cependant, l'évaluation environnementale des impacts associés à la fin de vie à travers l'ACV montre, dans certains cas, une inversion de cette hiérarchie. D'ailleurs, la Directive indique qu'il s'agit d'un ordre général de priorité qui peut être inversé pour des raisons de viabilité économique, de faisabilité technique et protection de l'environnement.

Illustration : Cas d'étude Placoplatre

Les gisements des ressources nécessaires à la production du plâtre se situent aujourd'hui à proximité des usines fabriquant ce produit. Il s'agit d'une activité globalement peu impactante. Au contraire, la matière première secondaire peut provenir de régions éloignées entraînant l'augmentation des distances des transports et des impacts globaux du procédé de fabrication.

Face à cette contrainte, l'enfouissement des déchets de plâtre apparaît aujourd'hui à la lumière de l'ACV telle que pratiquée selon les normes d'ACV pour le secteur des produits de construction comme la pratique la moins impactante.

Dans ce contexte, l'ACV déchets doit être utilisée pour déterminer les enjeux majeurs de la gestion de la fin de vie, que ce soit au niveau des matériaux les plus problématiques, ou des technologies contribuant le plus aux impacts environnementaux de la filière.

L'identification de ces enjeux sera ensuite la clé pour contribuer à la « société européenne du recyclage » (COM, 2005) à travers l'intégration de la notion d'écoconception dans les filières problématiques. Une amélioration des techniques de recyclage permettrait en effet de les rendre environnementalement plus intéressantes, assurant l'ordre proposé par la hiérarchie des déchets. La figure suivante montre comment l'ACV (et la pensée cycle de vie en général) peut alimenter la **hiérarchie des déchets** selon différents angles, en amont et en aval.

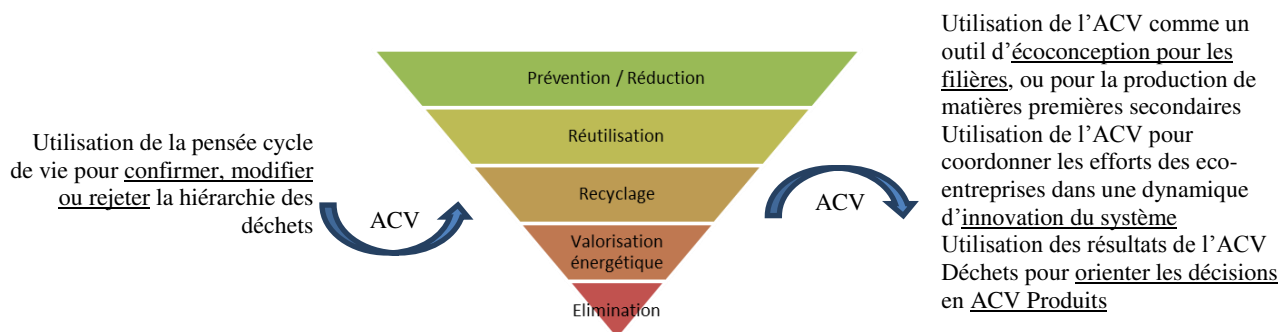


Figure 43 - L'utilisation de l'ACV dans la hiérarchie des déchets (adapté de Lazarevic, Buclet, & Brandt, 2010)

Les enjeux associés à la prévention des déchets sont, quant à eux, plus difficilement quantifiable par l'approche déchet, une conséquence directe des règles méthodologiques définies traditionnellement. Comme mentionné précédemment, le déchet est considéré comme un **produit fatal** d'une activité donnée. L'objectif de l'étude est d'optimiser la gestion de celui-ci, rendant a priori impossible l'évaluation des bénéfices de la réduction de la quantité de déchets à traiter.

Pire encore, dans certaines conditions, et notamment dans le cadre des projets d'économie circulaire, l'approche déchets peut impliquer des « bénéfices nets » sur l'environnement. Le traitement en fin de vie pouvant éviter des procédés d'extraction ou de fabrication polluants. Ces résultats laissent supposer que la production de certains déchets est avantageuse et devrait être encouragée, oubliant la nécessité de produire de la matière première vierge pour avoir plus de déchets.

Cette problématique pourrait remettre en question la pertinence de l'approche déchet. Cependant, il est important de noter le caractère complémentaire des approches produit et déchets. Si l'approche déchet ne peut pas évaluer l'intérêt environnemental de la réduction des déchets, l'approche produit permet de considérer toutes les conséquences d'une telle évolution. La réduction des déchets étant habituellement une conséquence de la réduction des quantités de matières premières nécessaires à la fabrication ou liée à une optimisation des procédés.

De plus, certains choix méthodologiques peuvent permettre la comparaison de scénarios avec ou sans une prévention des déchets. Ceci peut être fait en adaptant le périmètre de l'étude et l'unité fonctionnelle afin d'incorporer, de façon judicieuse, certaines étapes en amont du cycle. Un exemple de cette approche est présenté par Nessi et al. (Nessi & Rigamonti, 2012) En adaptant l'unité fonctionnelle de leur étude, ces chercheurs ont réussi à intégrer la prévention des déchets. La figure suivante présente leurs choix méthodologiques.

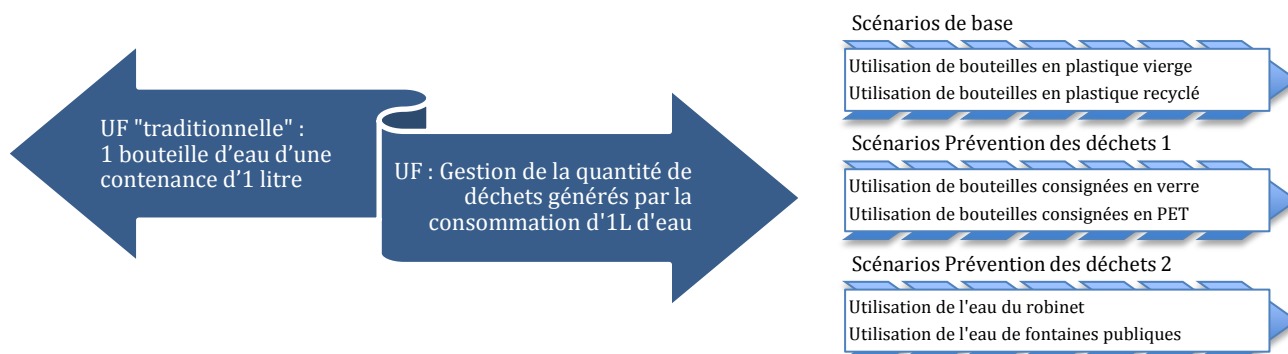


Figure 44 - Exemple de changement d'Unité Fonctionnelle permettant de prendre en compte l'étape de prévention des déchets (exemple tiré de [Nessi, 2012])

L'ACV déchets se dessine ainsi comme une approche pertinente pour l'évaluation des boucles matières et notamment des filières de traitement et valorisation des déchets. Elle nécessite cependant une bonne connaissance de la fin de vie et doit être menée en ayant conscience des limites de l'approche. Dans cette section, les enjeux méthodologiques associés à l'utilisation de l'ACV déchets pour l'évaluation environnementale des boucles matière ont été présentés en détail. La suite de l'étude sera focalisée sur l'approche produit, plus largement utilisée dans la communauté scientifique aujourd'hui.

Points clés:

- **Le choix de l'approche produit ou de l'approche déchet en ACV doit être réalisé en fonction des objectifs de l'étude et des données à disposition**
- **Le périmètre et l'unité fonctionnelle d'une ACV déchets doivent prendre en compte les objectifs de valorisation des boucles matière**
- **L'ACV déchets peut desservir la hiérarchie européenne des déchets. Il est cependant possible d'adapter l'approche afin de mieux intégrer les objectifs de l'économie circulaire et notamment la prévention des déchets**

5. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire au périmètre de l'étude : Périmètre et modélisation des boucles matière en ACV Produit

Une fois les boucles matière identifiées, il est important de définir la méthodologie utilisée pour les évaluer. Le choix de méthodologie dépendra largement des informations disponibles pour réaliser cette évaluation et du type de boucle étudié.

Dans certains cas, il est possible d'évaluer la réutilisation cyclique de la matière de façon pragmatique en ajustant le périmètre de l'étude. Cependant, cette approche n'est pas toujours applicable. L'extension des frontières de l'étude peut être une tâche complexe ou impossible à appliquer. Elle nécessite des connaissances spécifiques sur les boucles précédentes et futures qui ne sont pas toujours accessibles au praticien ACV.

De plus, lorsque les fonctionnalités des produits évalués sont très différentes (cas des boucles ouvertes), les résultats obtenus sont difficilement exploitables et le besoin d'allouer les impacts entre les différents procédés ou cycles persiste.

Comme souligné par OSSET et al. (Osset, Clauzade, Hugrel, & Palluau, 2012), les règles de comptabilisation des opérations de valorisation des matériaux restent totalement « ouvertes » dans le cadre des normes ISO 14040/44. Il faut par exemple noter que la norme ISO 14 040 ne prévoit pas de prise en compte d'approche de substitution couramment utilisée en ACV. Cette pratique est en effet sous-entendue par la notion d'extension des frontières mais elle n'est pas explicitée.

Que ce soit au niveau français, européen ou sectoriel, des référentiels méthodologiques viennent cependant préciser les normes ISO 14040/44 sur ces questions, facilitant ainsi la tâche des praticiens ACV. Même si, en effet, chaque boucle est unique, il est possible de trouver des points communs entre les différentes boucles. Le schéma ci-dessous explicite les flux et impacts associés aux matériaux utilisés par un système faisant l'objet d'une ACV, tels qu'ils sont définis par le PEF (JRC, 2012).

Cette section vise à définir les différentes approches qui peuvent être utilisées pour évaluer les boucles matières et les moyens à mettre en œuvre pour l'application de chacune d'entre elles.

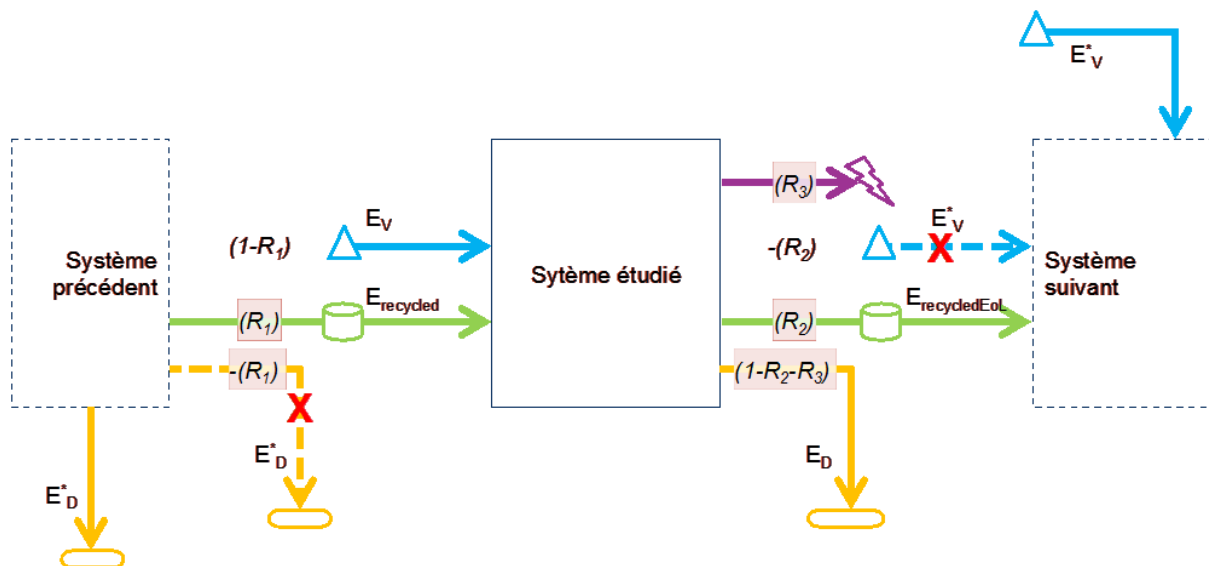
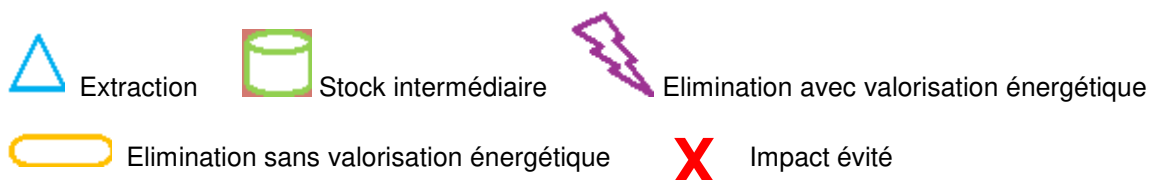


Figure 45 - Flux et impacts associés aux systèmes incorporant des matières recyclées (boucles matière)
(Source : Quantis)



Dans ce schéma, les termes utilisés représentent ;

- Ratios (R)
 - R_1 = taux de matière secondaire en entrée
 - R_2 = taux de recyclage en fin de vie
 - R_3 = taux de valorisation énergétique en fin de vie
- Emissions et ressources (E)
 - EF = Emissions et ressources du matériau étudié (Impacts et bénéfices associés au produit)
 - E_v = émissions et ressources liées à l'acquisition et au prétraitement de la matière vierge
 - E^*_v = émissions et ressources liées à l'acquisition et au prétraitement de la matière vierge censée avoir été remplacée par des matières recyclables
 - E^*_D = Emissions spécifiques et ressources consommées du fait de l'élimination des déchets de matière (par ex. mise en décharge, incinération, pyrolyse) à la fin de la vie de la matière dont est extrait le contenu recyclé
 - E_D = Emissions spécifiques et ressources consommées du fait de l'élimination des

déchets de matière à la fin de la vie du produit analysé (par ex. mise en décharge, incinération, pyrolyse)

- $E_{\text{recyclé}}$ = Emissions spécifiques et ressources consommées du fait du recyclage de la matière recyclée (ou réutilisée), y compris les processus de collecte, de tri et de transport
- $E_{\text{recycléEoL}}$ = Emissions spécifiques et ressources consommées du fait du recyclage de la matière recyclée en fin de vie du système étudié (ou réutilisée), y compris les processus de collecte, de tri et de transport

5.1. Définitions

Plusieurs approches existent pour calculer les impacts et bénéfices de l'utilisation de matière recyclée ou la mise à disposition de matière pouvant être recyclée en fin de vie du système étudié. La norme ISO 14040 établit une hiérarchie quant à la méthode qui doit être appliquée pour gérer les enjeux de multifonctionnalité en fin de vie.

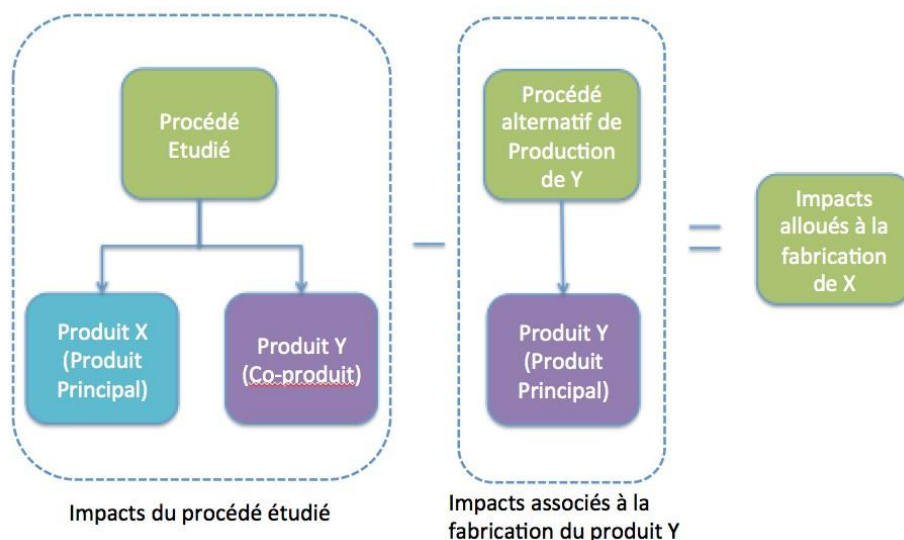
Cette hiérarchie, basée sur les règles définies pour gérer la multifonctionnalité d'un procédé, favorise l'évitement des méthodes d'allocation. Elle encourage donc l'utilisation de l'extension des frontières pour prendre en compte toutes les fonctions de la matière. Comme mentionné précédemment, cette approche peut être pourtant difficile à appliquer ou peu pertinente pour l'exploitation des résultats. Plusieurs méthodes d'évaluation ont donc été développées :

- **Extension des frontières** : les différents cycles de vie du produit sont intégrés dans le périmètre d'étude et les différentes fonctions intégrées à la définition de l'unité fonctionnelle. *Cette approche est favorisée par la norme ISO 14 044*
- **100 – 0** : l'ensemble des impacts et bénéfices du recyclage est associé à l'utilisation de matière recyclée comme matière première. *Cette approche se justifie si l'offre de matière première secondaire est supérieure à la demande : la matière recyclée en fin de vie du système précédent ne trouve pas preneur. On cherche ici à « encourager » l'utilisation de matière recyclée en en allouant les bénéfices au système étudié. Si le système étudié produit de la matière recyclée, il ne se verra pas allouer de bénéfices.*
- **0 – 100** : l'ensemble des impacts et bénéfices du recyclage est associé au recyclage de la matière en fin de vie. *Cette approche se justifie si la demande en matière première secondaire est supérieure à l'offre : la matière recyclée utilisée comme matière première du système étudié trouve très facilement preneur. Si le système étudié intègre de la matière recyclée, il ne se verra pas allouer de bénéfices à utiliser de la matière recyclée (car les bénéfices sont alloués au système amont) car on cherche ici à « encourager » le recyclage. Si le système étudié produit des matières recyclées, il se verra allouer l'ensemble des bénéfices de cette matière.*
- **50 – 50** : les bénéfices sont répartis équitablement entre l'utilisation de matière recyclée comme matière première et le recyclage de la matière en fin de vie. *Cette approche se justifie en absence de tendance claire, lorsqu'il y a un certain équilibre entre offre et demande.*
- **Cut-off** (coupure) : aucun impact n'est associé à la matière qui est recyclée en fin de vie. Les impacts de la matière secondaire en entrée se limitent au processus de recyclage.

On notera que le choix de l'application de l'une de ces règles pour un matériau donné contient une part de subjectivité. Pour les approches 0-100, 100-0 et 50-50, ce choix est lié à une analyse de l'offre et de la demande concernant les matières secondaires. Le choix d'allocation est fait en fonction de l'encouragement que l'on souhaite donner à l'utilisation de matière secondaire pour orienter les pratiques actuelles du marché vers une utilisation renforcée de matières secondaires. Ce choix est donc fortement lié aux objectifs de l'étude définis initialement.

Afin de comprendre les bases des méthodes présentées ci-dessus, il est important de définir la notion suivante :

- **Substitution** : approche qui consiste à évaluer les bénéfices associés à la valorisation en supposant qu'elle évite la production d'énergie ou de matière par un moyen représentatif des technologies courantes. Cette notion, utilisée par les formules d'allocation des impacts en fin de vie, est présentée ci-dessous.



Le Produit Y fabriqué par le procédé étudié **se substitue** au produit Y fabriqué par le procédé alternatif. **Les impacts du procédé alternatif sont évités.**

Figure 46 - Schéma représentant la notion de substitution (Source : Quantis)

5.2. Extension des frontières

Les boucles fermées (et les boucles de réemploi) se caractérisent par la valorisation d'un matériau ou d'un produit dans un nouveau système en gardant les mêmes propriétés et fonctionnalités. Cette caractéristique implique une bonne connaissance des processus de valorisation des déchets et d'intégration de matière première secondaire dans le système.

Intégrer la valorisation dans le périmètre de l'étude est dans ce cas, une solution pertinente. Ceci implique de réaliser une extension de frontières pour intégrer les cycles de vie successifs de la matière dans le périmètre de l'étude.

Sur la figure suivante, un schéma générique d'un système avec une boucle fermée est présenté:

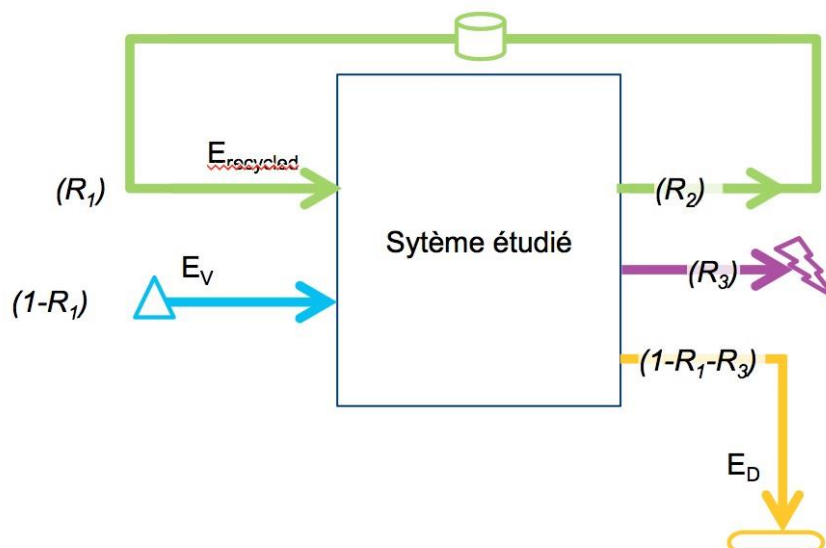


Figure 47- Schéma représentant le périmètre d'évaluation d'une boucle fermée (Source : Quantis)

Dans ces circonstances les bénéfices associés à la réutilisation de matière première secondaire sont directement pris en compte par l'utilisation d'une quantité moins importante de matière première vierge. **Il n'est donc pas nécessaire d'appliquer une substitution.** En supposant un taux de recyclage constant et un procédé de recyclage hermétique ($R_1 = R_2$), nous obtenons la formule suivante :

$$EF = (1 - R_2) \times E_V + R_2 \times E_{recycled} + R_3(-) + (1 - R_2 - R_3) \times E_D$$

Avec $(-) = (E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec})$

En réalité, très peu de procédés de recyclage permettent de valoriser la totalité de la matière recyclée. Dans ce cas, R_1 est différent de R_2 et l'équation s'écrit :

$$EF = (1 - R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_3(\dots) + (1 - R_2 - R_3) \times E_D$$

Cette équation reste vraie tant que les impacts $E_{recycled}$ sont calculés par rapport à la quantité de matière sortante. Si les impacts sont calculés par rapport à la quantité de matière entrant dans le procédé de valorisation, c'est le terme R_2 qui doit être utilisé.

Exemple : Cas d'étude OSILUB

Comme nous l'avons vu précédemment, le procédé de régénération OSILUB permet la valorisation des huiles usagées pour la fabrication de nouvelles huiles. Lors de cette régénération, pour 1t d'huile usagée collectée, 0,79t d'huiles peuvent être remises sur le marché. Si on considère que toutes les huiles usagées sont régénérées par le procédé OSILUB, le périmètre évalué est :

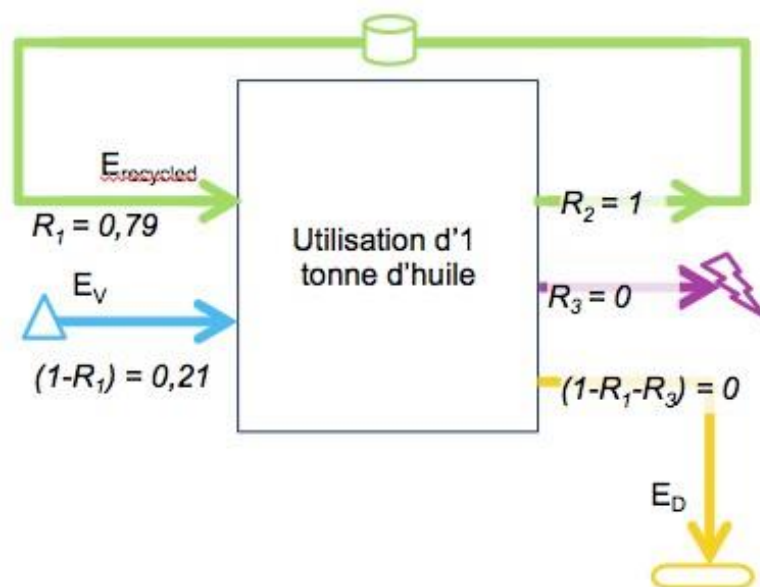


Figure 48 - Frontières du système pour l'évaluation environnementale du projet OSILUB (Source : Quantis)

Si E_{Recycled} représente les impacts de la valorisation d'une tonne d'huile usagée, alors les impacts environnementaux associés à ce système s'écrivent :

$$EF = 0,21 \times E_V + E_{\text{recycled}}$$

En réalité, très peu de systèmes peuvent être correctement modélisés par des boucles fermées. De nombreux paramètres limitent la recyclabilité ou la réutilisation infinie des matériaux, notamment la perte de qualité. Ceci entraîne l'apparition de *boucles fermées partielles* qui au bout d'un certain nombre de boucles se rapprochent des systèmes ouverts ou des cascades de recyclage. Dans tous ces cas, il est possible d'appliquer l'extension des frontières en intégrant les différentes fonctionnalités ou le nombre de boucles au périmètre de l'étude. Ainsi, le périmètre d'un système pouvant être recyclé une fois avant d'être éliminé peut être représenté ainsi :

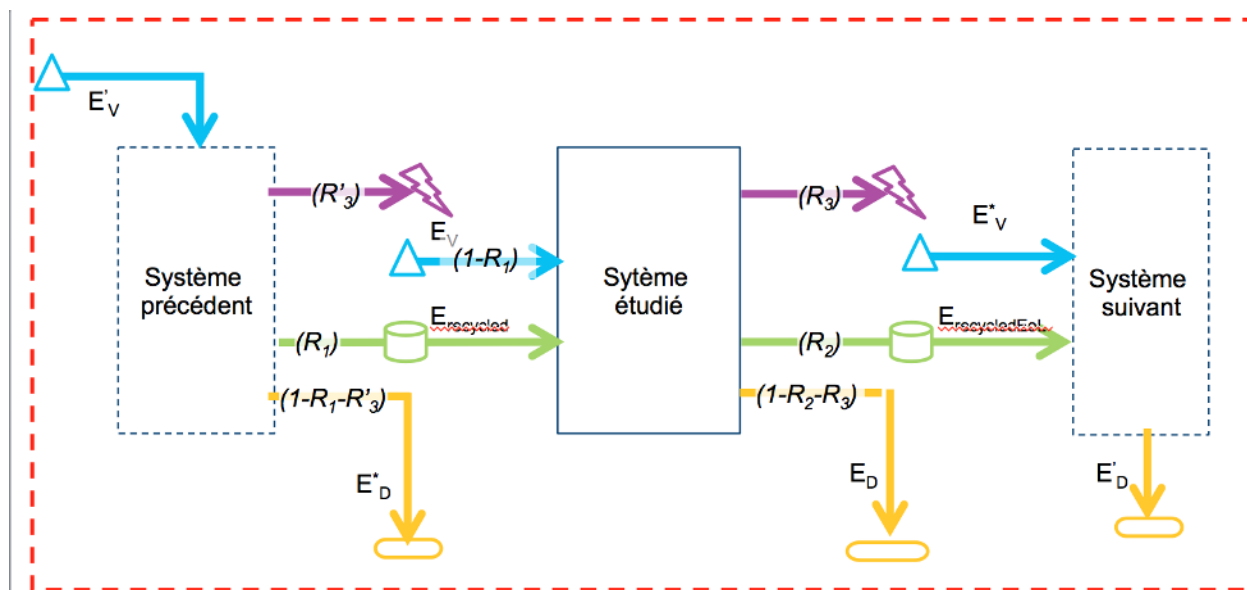


Figure 49 - Schéma représentant le périmètre d'évaluation d'une boucle ouverte (en appliquant l'extension de frontières) (Source : Quantis)

Comme pour une boucle fermée, l'évaluation des impacts environnementaux passe par la prise en compte de l'ensemble des flux entrants et sortants. L'équation permettant de faire une telle évaluation est donc :

$$EF = E'_v + (R_1 \times E_{recycled} + R'_3(\dots) + (1 - R_1 - R'_3) \times E'_D) + (E'_v + R_2 \times E_{recycled} + R_3(\dots) + (1 - R_2 - R_3) \times E'_D) + E'_D$$

De façon plus générique, cette équation peut être adaptée à un système avec N boucles de recyclage. Un exemple de cette approche est présenté ci-dessous.

Exemple : Cas d'étude OSILUB

Il est possible d'imaginer qu'au bout d'un certain nombre de boucles de recyclage, la qualité de l'huile soit insuffisante pour être recyclée. Dans ce scénario, l'huile ne pouvant plus être recyclée est valorisé énergétiquement. En supposant 2 recyclages avec les mêmes rendements, avant l'élimination de l'huile usagée, le périmètre suivant est obtenu :

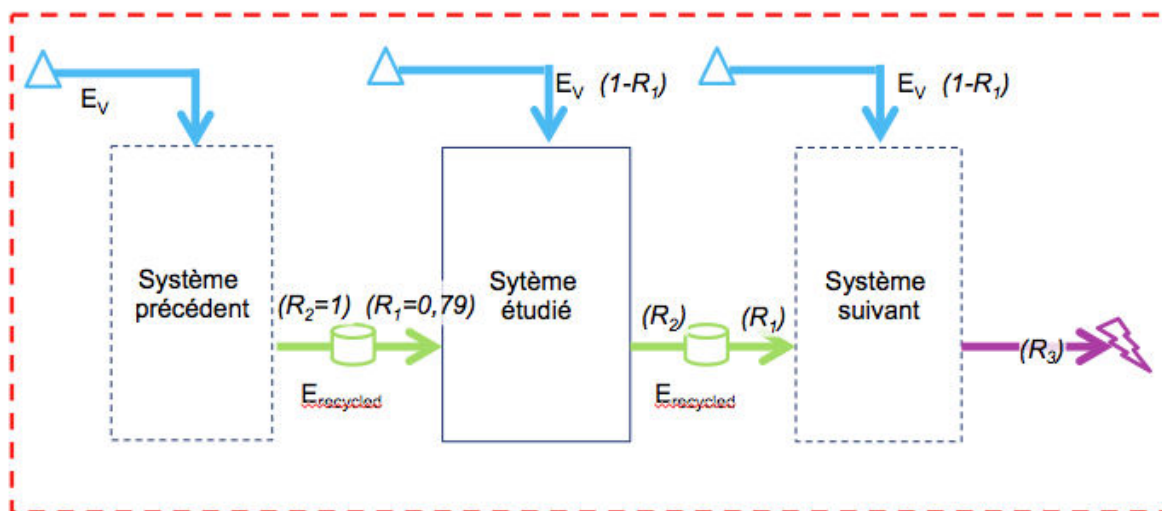


Figure 50 - Frontières du système pour l'évaluation du projet OSILUB si les huiles sont régénérées 2 fois (Source : Quantis)

Dans ces conditions, la formule permettant d'évaluer les impacts environnementaux du système est :

$$EF = (1 + 2 \times 0,21) \times E_v + 2 \times 1 \times E_{recycled} + 1 \times (...)$$

Avec $(...) = (E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec})$

Dans cette formule, les impacts sont par contre évalués pour 3 cycles de vie du produit, en d'autres termes, nous avons 3 fois l'unité fonctionnelle. Les impacts pour une unité fonctionnelle deviennent donc :

$$EF = \frac{(1 + 2 \times 0,21) \times E_v + 2 \times 1 \times E_{recycled} + 1 \times (...)}{3}$$

De façon plus générique, l'huile produite pourrait être utilisée N fois et son évaluation pourrait être réalisée selon le même principe. Prenons en compte le tableau suivant :

Exemple : Cas d'étude OSILUB (Suite)

Utilisation	Impacts de l'huile vierge	Impacts de l'huile régénérée	Impacts de l'incinération
1^{ère} utilisation	E_V	0	0
2^{ème} utilisation	$(1-R_1)*E_V$	$R_2*E_{Recycled}$	0
3^{ème} utilisation	$(1-R_1)*E_V$	$R_2*E_{Recycled}$	0
...
N^{ème} utilisation	$(1-R_1)*E_V$	$R_2*E_{Recycled}$	$R_3*(...)$

Au total, l'impact de N cycles est donné par :

$$EF = (1 + (N - 1) * (1 - R_1)) \times E_V + ((N - 1) \times R_2 \times E_{recycled}) + R_3 \times (...)$$

Soit, pour un seul cycle :

$$EF = \frac{(1 + (N - 1) * (1 - R_1)) \times E_V + (N - 1) \times R_2 \times E_{recycled} + R_3 \times (...)}{N}$$

Il est intéressant de noter que lorsque N tend vers l'infini, la formule permettant de calculer les impacts est : $EF = (1 - R_1) \times E_V + R_2 \times E_{recycled}$

Il s'agit donc de la même formule que celle qui a été utilisée pour calculer les impacts du projet OSILUB en boucle fermée, démontrant ainsi sa pertinence pour l'évaluation.

A travers le cas d'étude OSILUB, nous avons déterminé la façon d'appliquer l'extension des frontières pour l'évaluation des boucles fermées et partiellement fermées. En réalité, le nombre de boucles de recyclages est limité par la qualité de la matière recyclée ; si la qualité après recyclage reste constante, le nombre de boucles de recyclage pourra être considéré comme infini. Si, au contraire, il y a une perte de qualité après chaque boucle, alors la quantité de matière recyclée en entrée (R_2) sera plus faible après chaque boucle rendant le calcul plus complexe.

L'évaluation des boucles ouvertes à travers l'extension de frontières apparaît ainsi comme une possibilité nécessitant des connaissances précises et difficile à mettre en place mais qui peut être particulièrement intéressante pour les boucles fermées et les boucles partiellement fermées, telles que les boucles de réutilisation ou de réemploi, où les boucles successives se ressemblent.

Points clés:

- **L'extension des frontières est une méthode facilement applicable pour l'évaluation des boucles matière fermées ou partiellement fermées**
- **Cette approche est difficilement applicable dans le cadre de systèmes ouverts ne permettant pas de répondre à la question de l'allocation des impacts**

5.3. Méthodes d'allocation

Dans une boucle ouverte, les fonctions accomplies par la matière première secondaire sont différentes de ses fonctions originelles. Bien que méthodologiquement possible, l'extension de frontières est, dans ces circonstances, plus complexe à réaliser. Elle présuppose en effet d'une connaissance précise des futures utilisations de la matière recyclée. Le cas contraire, l'extension de frontière d'un système ouvert, entraîne une incertitude supplémentaire des résultats, limitant ainsi l'intérêt de l'approche.

De plus, les boucles ouvertes mettent souvent en jeu des acteurs offrant des services différents qui souhaitent connaître les impacts associés à leurs activités. Inclure les fonctions successives d'un matériau ou d'un produit dans son unité fonctionnelle ne répond pas à cet objectif et l'allocation des impacts devient une obligation.

Dans ces circonstances, il est nécessaire de déterminer la méthode pour répartir les impacts et bénéfices de la valorisation entre les différents acteurs. Les **méthodes d'allocation** permettant d'allouer les **impacts et bénéfices** de la fin de vie entre les différents systèmes ont été développées par les standards et référentiels.

Comme vu précédemment, le choix d'une approche par rapport à une autre dépend fortement des objectifs de l'étude et du marché économique. La figure suivante est un guide permettant au praticien ACV de déterminer la méthode à appliquer.

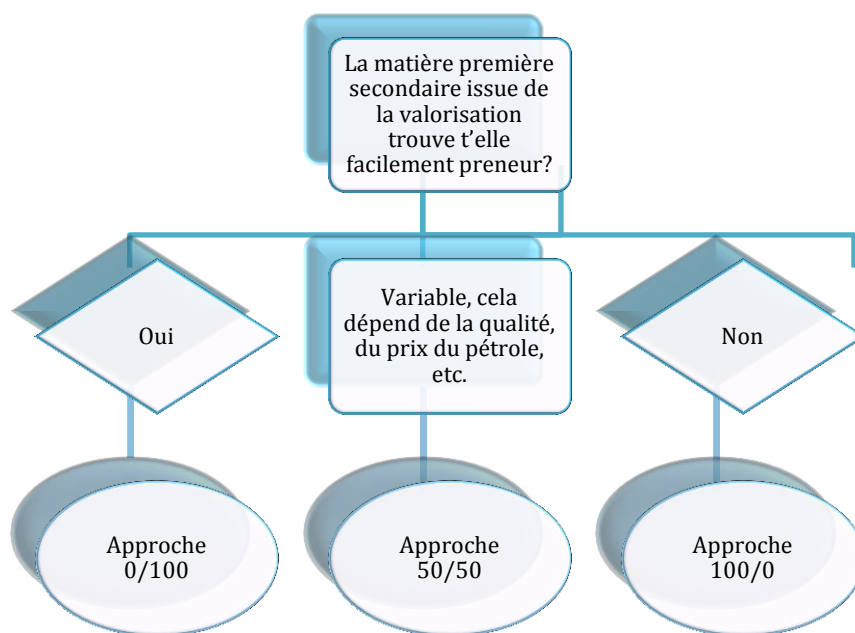


Figure 51- Choix de l'approche à appliquer en fonction des conditions du marché (Source : Quantis)

5.3.1. Approche 0 – 100

Chaque méthode d'allocation proposée pour l'évaluation des boucles matière introduit des règles méthodologiques et, par conséquent, des biais qui lui sont propres. Ceci implique un périmètre

d'étude différent. La figure suivante présente le périmètre évalué par la méthode 0-100.

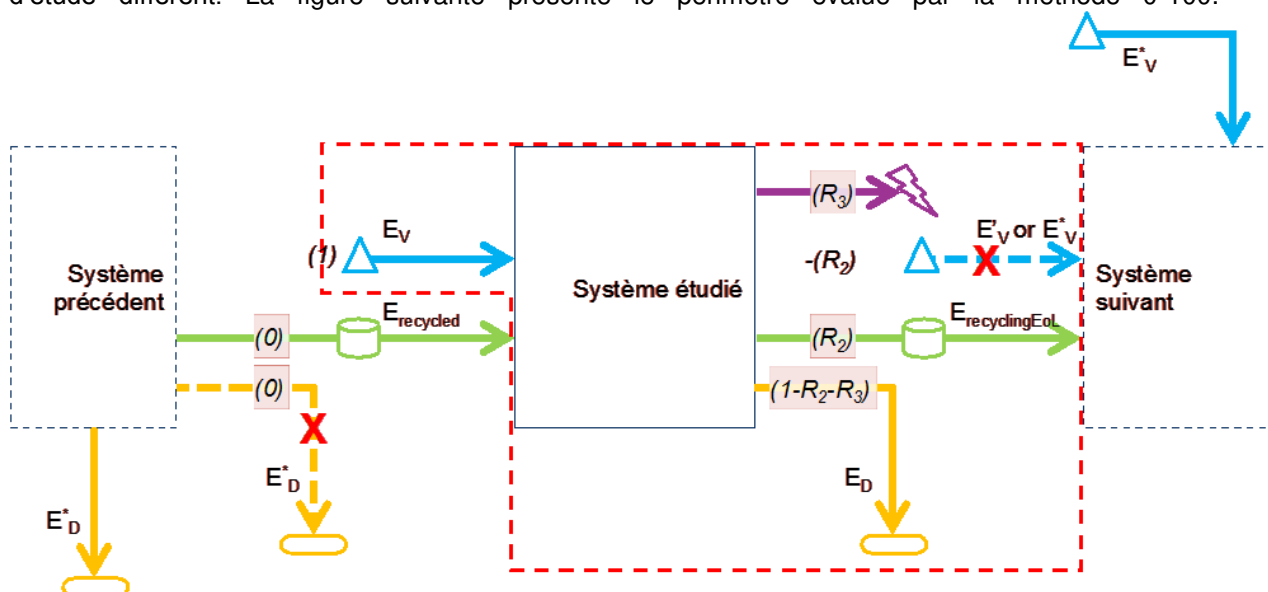


Figure 52 - Schéma présentant le périmètre à prendre en compte au moment d'utiliser la méthode 100-0 (Source : Quantis)

Dans le schéma ci-dessus, les notations utilisées sont les mêmes que celles introduites dans la section 5.

Dans le périmètre étudié, le terme R_1 , correspondant au taux de matière secondaire en entrée, n'intervient pas : peu importe la part de matière secondaire en entrée, ce qui va jouer sur les impacts du système, c'est le traitement de la matière en fin de vie (R_2 et R_3). En effet, au moment d'utiliser l'approche 0-100 l'ensemble de la matière utilisée en entrée du système est considéré comme de la matière première vierge puisque les bénéfices du recyclage sont alloués au système précédent.

Ce biais méthodologique est justifié par la loi du marché, l'utilisation de la méthode 0-100 impliquant un manque de matière recyclée dans le marché. C'est-à-dire que l'utilisation de matière première secondaire entraîne la production de matière première vierge quelque part sur la chaîne de valeur et n'a donc aucun bénéfice environnemental.

Au contraire, les impacts et bénéfices associés au recyclage de matériaux en fin de vie sont entièrement alloués au système étudié. Suivant cette logique, les impacts globaux du système peuvent être mesurés ainsi :

$$EF = E_V + R_2 \times \left(E_{recyclingEoL} - E_V^* \times \frac{Q_S}{Q_P} \right) + R_3(\dots) + (1 - R_2 - R_3) \times E_D$$

Formule 1- Méthode à utiliser pour le calcul des impacts et bénéfices selon l'approche 0-100

Avec $(\dots) = (E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec})$

Dans cette formule, les termes Q_s et Q_p sont utilisés pour rendre compte de la perte de qualité de la matière recyclée en fin de vie. Une approche économique est en général utilisée pour quantifier ces termes. En pratique, ce ratio n'est pas toujours utilisé en ACV. Son utilisation sera discutée postérieurement dans cette étude

Le terme « (...) » inclut les impacts et bénéfices associés à la valorisation énergétique (production de chaleur et électricité).

5.3.2. Approche 100 – 0

Lorsque l'objectif de l'étude est d'encourager l'utilisation de matière recyclée (justifié par une présence importante dans le marché de matière recyclée qui trouve difficilement preneur), l'approche 100-0 doit être favorisée. La figure suivante présente le périmètre à prendre en compte dans les frontières de l'étude.

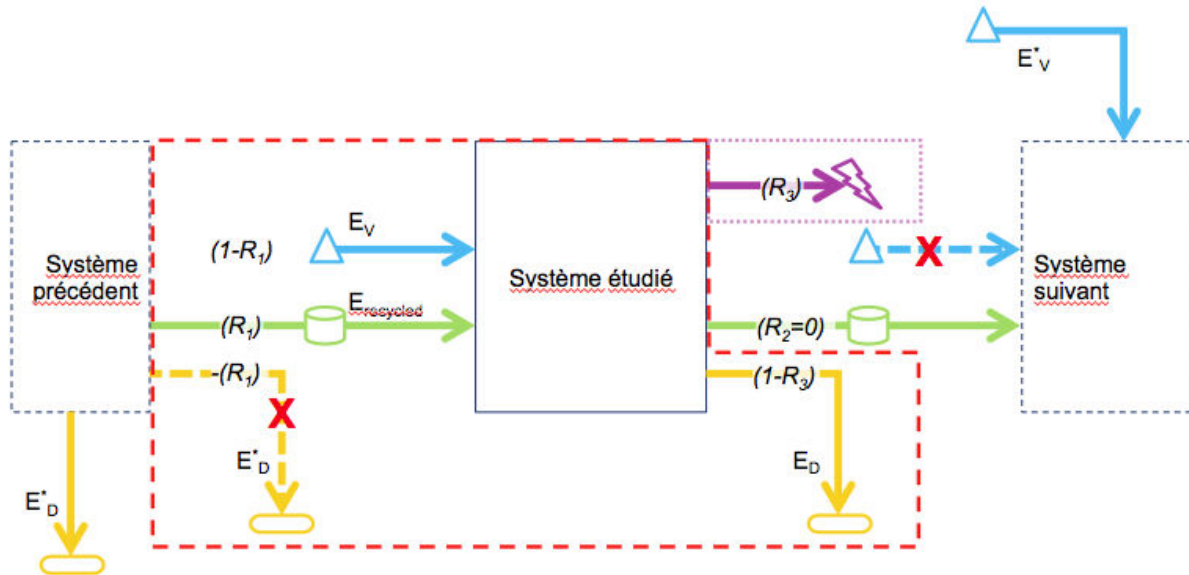


Figure 53 - Schéma présentant le périmètre à prendre en compte au moment d'utiliser la méthode 100 – 0 (Source : Quantis)

Il est intéressant de noter que les bénéfices du recyclage ne sont pas évalués avec la même substitution au moment d'appliquer la méthode 100-0. L'utilisation de matière première secondaire n'est pas considérée comme un évitement de matière première vierge, mais plutôt comme un évitement de son élimination.

On notera également que dans le périmètre, le terme R_2 correspondant au taux de matière recyclée en fin de vie de procédé n'intervient pas dans la formule : peu importe si une part de la matière est effectivement recyclée en fin de vie, la modélisation considère uniquement des scénarios d'enfouissement/incinération et/ou de valorisation énergétique (R_3). Dans cette approche, tout ce qui n'est pas valorisé énergétiquement est considéré comme faisant l'objet d'une mise en décharge ou d'une incinération sans valorisation.

Cette approche est justifiée, encore une fois, par les règles économiques du marché évalué. La méthode 100-0 est en effet utilisée quand la matière recyclée trouve difficilement preneur. Ceci implique une abondance trop importante de matière première secondaire. Rajouter un flux de matière recyclée dans le marché n'a donc aucun bénéfice pour l'environnement. Au contraire, utiliser la matière première secondaire permet de valoriser les stocks disponibles et de limiter l'élimination de celui-ci. L'équation permettant d'évaluer les systèmes régis par l'approche 100-0 s'écrit donc :

$$EF = (1 - R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_3 \times (...) - R_1 \times E'_D + (1 - R_3) \times E_D$$

De même que pour l'approche précédente, le terme (...) inclut les impacts et bénéfices associés à la valorisation énergétique (production de chaleur et électricité). Il est intéressant de noter que même si les bénéfices de la valorisation matière en fin de vie ne sont pas pris en compte par cette approche, les bénéfices de la valorisation énergétique sont quant à eux mesurés.

Ceci est justifié car l'énergie suit globalement l'approche 100-0, trouvant toujours preneur.

5.3.3. Approche 50 – 50

Dans certains cas, la loi du marché est variable pour un matériau donné et la difficulté à trouver un acheteur dépend de paramètres tels que la qualité de la matière première secondaire ou le prix du pétrole. Ceci est notamment vrai pour les plastiques dont le prix peut varier considérablement en fonction du prix du pétrole. L'approche 50-50 peut, dans ces cas, être utilisée.

Le PEF va encore plus loin et encourage l'utilisation de cette approche dans la plupart des cas, évitant ainsi le jugement subjectif du praticien ACV. Le périmètre à prendre en compte et la formule à appliquer au moment d'utiliser la méthode 50-50 sont présentés ci-dessous.

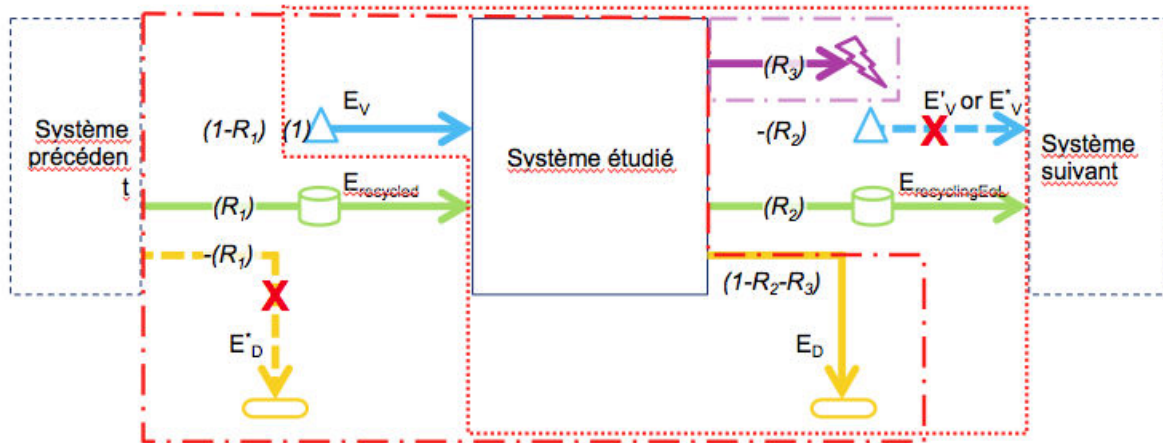


Figure 54 - Schéma représentant le périmètre à prendre en compte au moment d'utiliser la méthode 50-50 (Source : Quantis)

$$EF = \left(1 - \frac{R_1}{2}\right) \times E_v + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times \left(E_{recyclingEol} - E'_v \times \frac{Q_s}{Q_p}\right) + R_3 \times (-) + \left(1 - \frac{R_2}{2} - R_3\right) E_d - \frac{R_1}{2} \times E'_d$$

avec $(-) = (E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{SE,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{SE,elec})$

Dans cette formule, les termes R_1 et R_2 correspondant aux taux de matière secondaire en entrée et au taux de recyclage en fin de vie sont divisés par deux. Tous les impacts et bénéfices associés à l'utilisation de matière recyclée sont ainsi divisés par deux, les partageant équitablement entre le système précédent et le système suivant.

Seuls les bénéfices et impacts de la valorisation énergétique ne sont pas divisés par deux. Les impacts de ce type de valorisation sont en effet évalués en appliquant la méthode 0-100 dans tous les cas.

5.3.4. Cut-off

Une dernière méthode souvent utilisée en ACV est la méthode « Cut-Off » ou méthode des stocks. Cette méthode ne donne pas de « bénéfices » au système étudié en considérant qu'il n'y a pas d'impacts évités par la valorisation matière. Plus simple à utiliser, cette méthode est le choix réalisé par certaines bases de données, comme ecoinvent, pour évaluer le recyclage. Ce choix méthodologique donne indirectement les impacts et les bénéfices du recyclage à l'utilisateur de la matière recyclée. En effet, si la matière première secondaire est moins impactante que la matière première vierge, le fabricant utilisant de la matière recyclée aura un produit globalement moins impactant. Le périmètre à prendre en compte lorsque cette approche est appliquée et la formule à utiliser sont présentés ci-dessous :

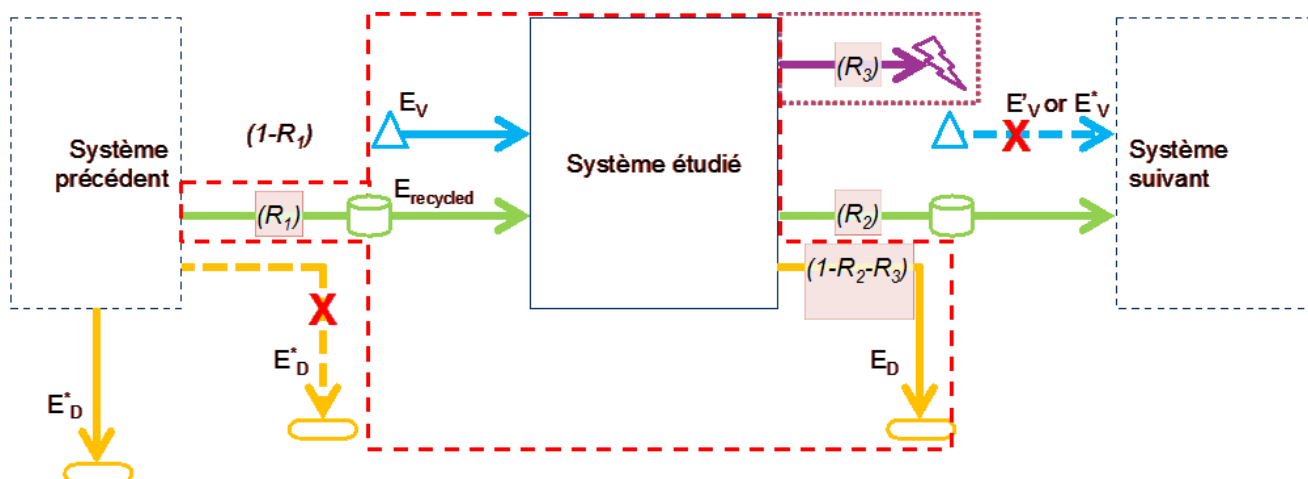


Figure 55 - Schéma représentant le périmètre à prendre en compte au moment d'utiliser la méthode cut-off (Source : Quantis)

$$EF = (1 - R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_3 \times (...) + (1 - R_2 - R_3) \times E_D$$

Dans cette formule on notera que le taux de matière secondaire en entrée et le taux de recyclage en fin de vie influencent tous les deux le résultat global. En revanche aucun bénéfice lié à l'évitement de la production de matière vierge grâce à l'utilisation de matière secondaire n'est comptabilisé.

Au contraire, les bénéfices associés à la valorisation énergétique sont encore une fois pris en compte en appliquant la méthode 0-100.

5.3.5. Vision globale des approches en fonction des référentiels méthodologiques

Les formules présentées dans les sections précédentes sont celles recommandées par le PEF au niveau européen et en cours de validation dans des expérimentations qui recouvrent différents secteurs d'activité. Le cas échéant, elles seront amenées à être modifiées.

En réalité, avant la mise en place du PEF, chaque référentiel avait défini ses propres règles de calcul en utilisant pourtant les mêmes noms que ceux des approches présentées. Cette multitude d'approches était à l'origine d'une grande confusion au sein de la communauté ACV quant aux règles à appliquer. Le tableau ci-dessous détaille les différentes approches existantes pour la mise en œuvre de ces formules suivant les référentiels méthodologiques :

Tableau 3 - Présentation des méthodes d'allocation des impacts en fin de vie en fonction des référentiels et des phases du cycle de vie (source : Quantis)

	Fin de vie évitée amont	Production matière primaire	Production matière secondaire	Processus de recyclage	Production primaire évitée	Valorisation énergétique	Fin de vie aval
BPX30323-0 (2013) 50/50	$-\frac{R_2}{2} \times E_D^*$	$E_V - \frac{R_1}{2} E_V^*$	$\frac{R_1}{2} \times E_{recyclage}$	$\frac{R_2}{2} \times E_{recyclage}$	$-\frac{R_2}{2} \times E_V^*$	$R_3 \times (...)$	$(1 - \frac{R_2}{2} - R_3) \times E_D$
PEF 50/50	$-\frac{R_2}{2} \times E_D^*$	$(1 - \frac{R_1}{2}) \times E_V$	$\frac{R_1}{2} \times E_{recyclage}$	$\frac{R_2}{2} \times E_{recyclage}$	$-\frac{R_2}{2} \times E_V^* \times \frac{Q_S}{Q_P}$	$R_3 \times (...)$	$(1 - \frac{R_1}{2} - R_3) \times E_D$
ILCD & PAS 2050 Boucle fermée		E_V		$R_2 \times E_{recyclage}$	$-R_2 \times E_V$		$(1 - R_2) \times E_D$
0 - 100		E_V		$R_2 \times E_{recyclage}$	$-R_2 \times E_V^* \times \frac{Q_S}{Q_P}$	$R_3 \times (...)$	$(1 - R_2 - R_3) \times E_D$
Pur 100 - 0	$-R_1 \times E_D^*$	$(1 - R_1) \times E_V$	$R_1 \times E_{recyclage}$			$R_3 \times (...)$	$(1 - R_2) \times E_D$
PEF cut-off (« 100 - 0 »)		$(1 - R_1) \times E_V$	$R_1 \times E_{recyclage}$			$R_3 \times (...)$	$(1 - R_2 - R_3) \times E_D$
Pur cut-off ecoinvent		$(1 - R_1) \times E_V$	$R_1 \times E_{recyclage}$			$R_3 \times E_{RR}$	$(1 - R_2 - R_3) \times E_D$
PAS 2050 Coordonné recyclé		$(1 - R_1) \times E_V$	$R_1 \times E_{recyclage}$				$(1 - R_2) \times E_D$

On peut constater une cohérence globale des approches. Cependant, l'approche cut-off d'ecoinvent et celle du PEF se distinguent par une prise en compte différente des impacts associés à l'incinération. Dans la formule du PEF, les bénéfices associés à la production de chaleur et/ou d'électricité par incinération avec valorisation énergétique sont pris en compte. Ce n'est pas le cas dans l'approche ecoinvent qui conserve une approche purement attributionnelle en ne comptabilisant que les impacts de l'incinération et pas les bénéfices.

Il est également intéressant de remarquer que la formule proposée par les méthodes ILCD et PAS 2050 pour l'évaluation des boucles fermées est équivalente à la formule identifiée dans la section « Extension des frontières » (sans prise en compte des déchets valorisés énergétiquement ou éliminés). En effet, lorsque une boucle fermée est hermétique ($R_1 = R_2$), l'application de la méthode 0-100 ou de l'extension de frontières est équivalente pour évaluer l'intégralité de la boucle, confirmant l'intérêt d'utiliser l'extension de frontières pour évaluer les boucles fermées.

5.3.6. Discussion sur la pertinence de ces approches dans une perspective d'économie circulaire

Selon les approches considérées, la quantification des impacts associés au bouclage de la matière pour un système donné peut aboutir à des résultats très différents.

Dans le cadre de projets d'économie circulaire, où l'accent est mis sur les boucles matières, un des enjeux méthodologiques clés d'une ACV est de rendre compte de la capacité du système à :

1. Conserver la disponibilité de la matière étudiée pour d'autres usages,
2. Ne pas puiser dans un stock fini de matière vierge, mais d'utiliser de la matière secondaire.

Dans les paragraphes suivants, l'approche « cut off », aussi appelée « méthode des stocks », est comparée avec les autres approches.

Illustration - Polypropylène :

Soit deux produits en polypropylène, l'un dont la matière est entièrement recyclée en fin de vie (A) et l'autre qui est mis en décharge (B). Les impacts de chacune des étapes du cycle de vie des produits A et B sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4 - Impacts spécifiques du cycle de vie des produits A et B (Source : Quantis)

Impacts de chaque étape (kg CO2-éq/kg de produit)	Elimination évitée en Amont ($R_1 * E_D$)	Production Primaire ($(1-R_1) * E_v$)	Production secondaire ($R_1 * E_{recycle}$)	Recyclage ($R_2 * E_{recycling}$ <small>Eol</small>)	Production Primaire évitée ($R_2 * E_v$)	Elimination en fin de vie ($(1-R_2-R_3) * E_D$)
Produit A	0,0	2,4	0,0	0,5	2,4	0,0
Produit B	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,1

Avec la méthode *cut off* la différence des impacts entre les produits A et B se limitera aux seuls impacts du centre d'enfouissement. Les bénéfices associés à l'évitement de la production de matière première vierge ne sont, en effet, pas pris en compte par cette méthode.

En revanche la différence entre les deux produits sera bien plus importante en utilisant une approche « 0-100 » puisque que les impacts de la production de matière vierge évitée grâce au recyclage en fin de vie seront déduits du système (pour peu que les impacts du processus de recyclage soient plus faible que ceux de la production de la matière vierge).

La méthode «100-0 » ne fait quant à elle aucune différence entre les produits A et B. Les règles de calcul utilisées lorsque cette méthode est appliquée considèrent la part de déchets recyclées comme nulle.

Illustration (suite) :

Les graphiques ci-dessous illustrent ces résultats pour l'impact sur le changement climatique pour un kilogramme de polypropylène, avec :

- Produit A : 100 % recyclé en fin de vie (R1 = 0 ; R2 = 1 ; R3 = 0)
- Produit B : 100 % enfoui (R1 = 0 ; R2 = 0 ; R3 = 0)

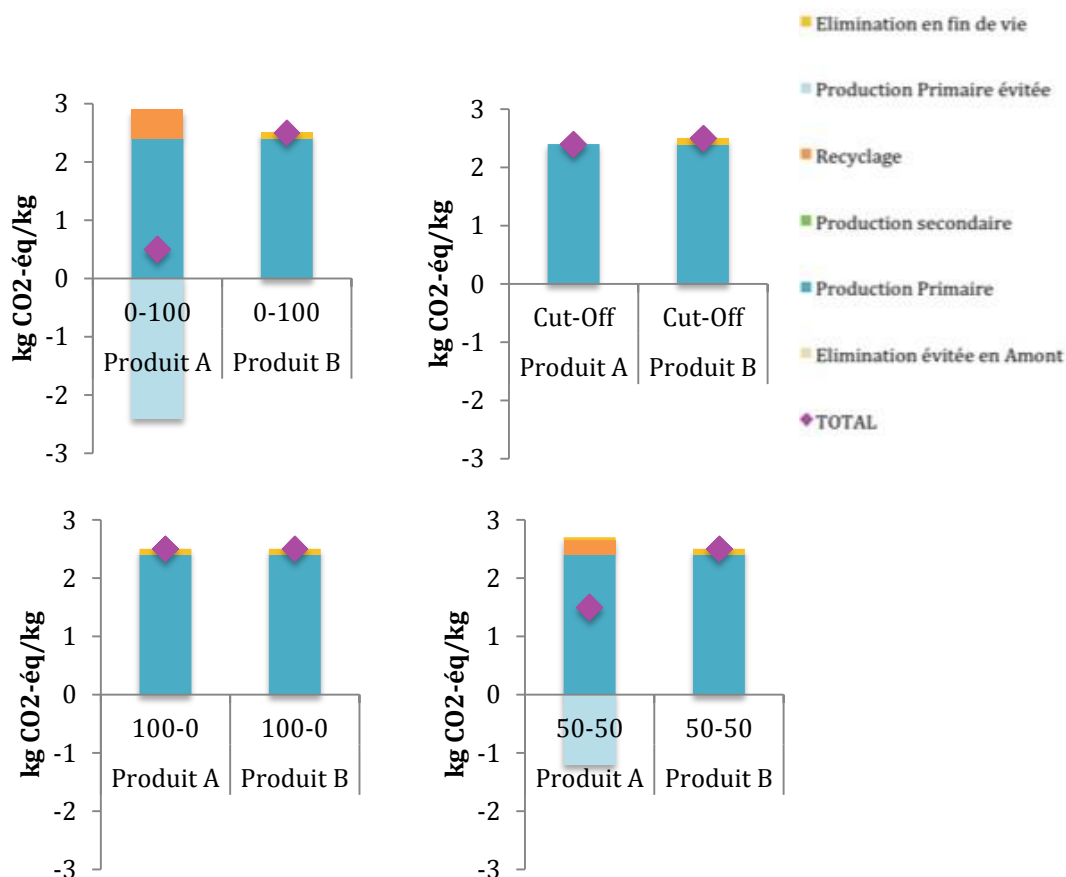


Figure 56 - Impacts et bénéfices des produits A et B en fonction de l'approche d'allocation utilisée (Source : Quantis)

Ces résultats montrent comment la sélection des approches de modélisation peut avoir un rôle majeur dans la quantification des impacts pour les systèmes où la matière première a un poids important sur le cycle de vie.

La méthode 0-100 apparaît ici comme la méthode où le bénéfice du recyclage en fin de vie est le plus marqué (avec une différence de 88% entre les produits A et B), justifiant ainsi sa place comme la méthode à privilégier lorsque l'objectif de l'étude est d'encourager le recyclage des déchets. Au contraire, la méthode 100-0 donne les mêmes impacts au recyclage et à l'élimination des déchets, rendant les efforts de la valorisation matière en fin de vie inutile aux yeux de l'ACV.

Illustration (suite) :

Cependant, si un produit C composé à 100% de matière recyclée ($R_1 = 1$; $R_2 = 0$; $R_3 = 0$) est évalué les tendances sont inversées :

Tableau 5 - Impacts et bénéfices spécifiques du cycle de vie du produit C (Source : Quantis)

Impacts de chaque étape (kg CO2-éq/kg de produit)	Elimination évitée en Amont ($R_1 * E^*_D$)	Production Primaire ($(1-R_1) * E_v$)	Production secondaire ($R_1 * E_{recycle}$)	Recyclage ($R_2 * E_{recycling}$ Eol)	Production Primaire évitée ($R_2 * E^*_v$)	Elimination en fin de vie ($(1-R_2-R_3) * E_D$)
Produit C	0,1	0,0	0,5	0,0	0,0	0,1
Produit B (enfou)	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,1

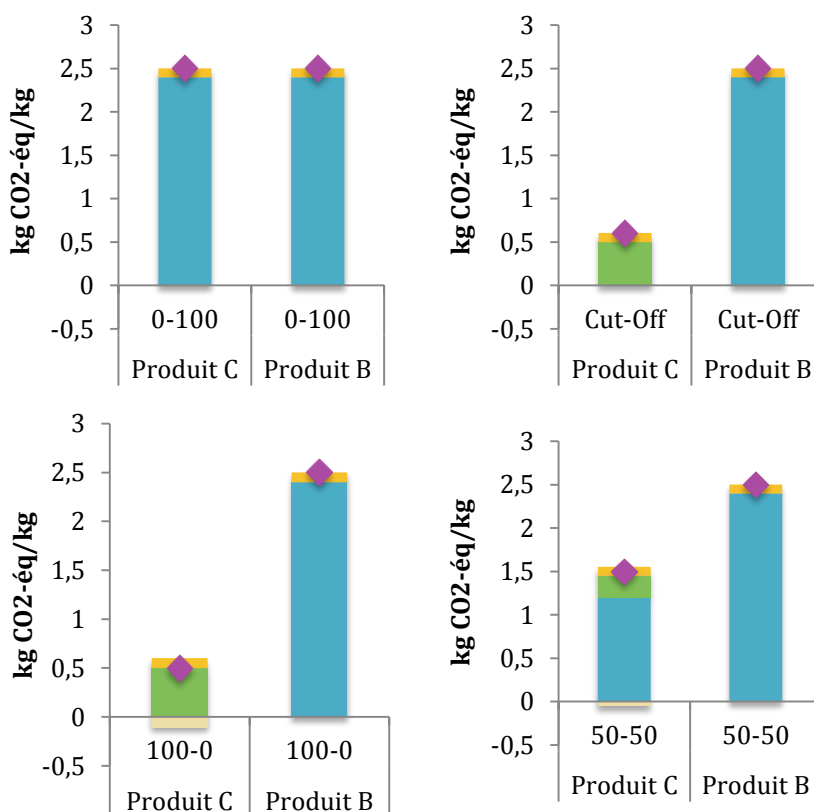


Figure 57 - Impacts et bénéfices des produits C et B en fonction de l'approche d'allocation utilisée (Source : Quantis)

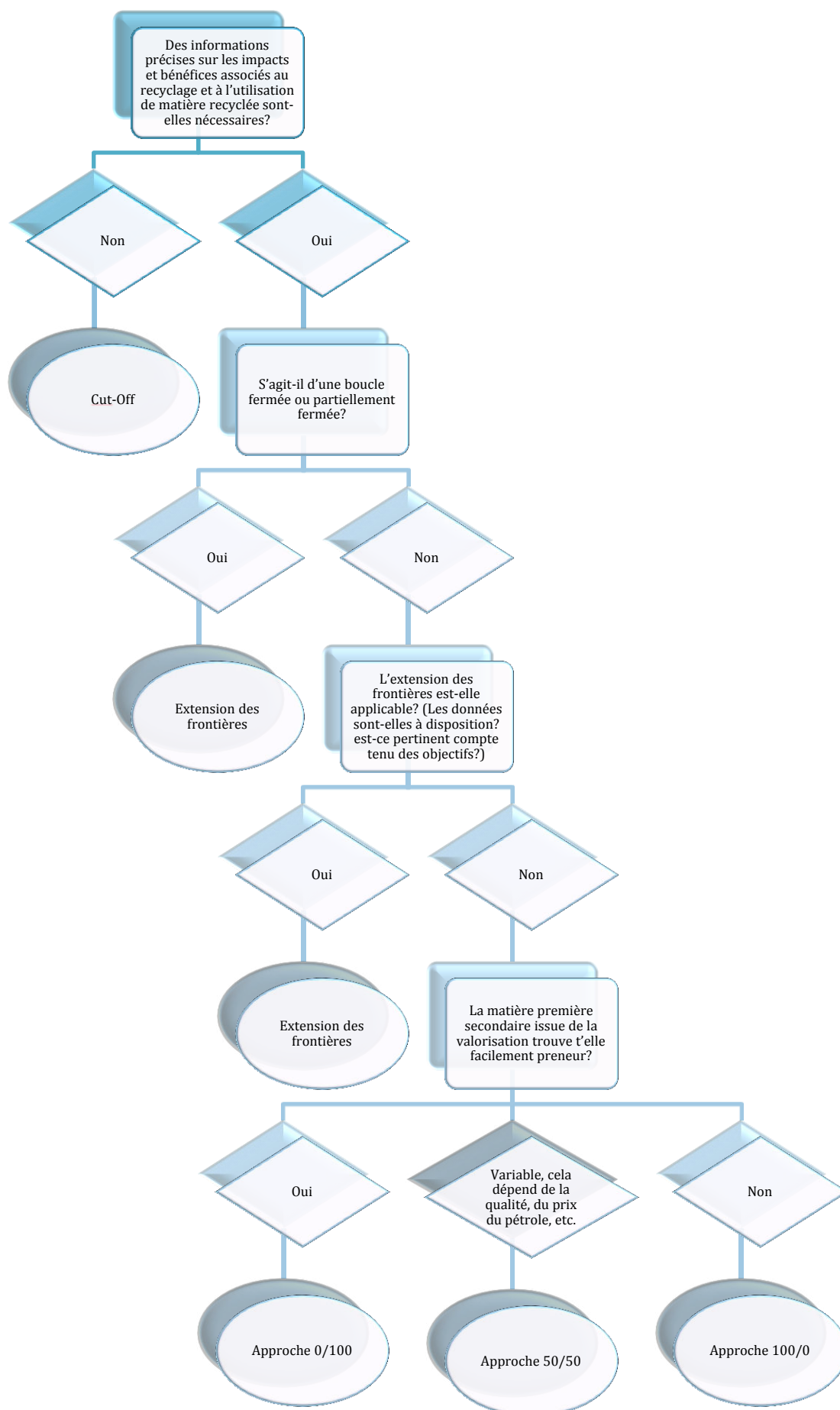
Dans ce contexte, la méthode « 100-0 » apparaît comme la méthode favorisant davantage l'utilisation de matière recyclée, justifiant encore une fois son utilisation lorsque la matière première secondaire ne trouve pas de débouchés dans un marché donné.

Face aux méthodes 100-0 et 0-100, la méthode 50-50 se dessine comme la méthode intermédiaire (conclusion logique, il s'agit en effet d'une moyenne des résultats des deux méthodes). Elle permet donc d'encourager tant le recyclage que l'utilisation de matière recyclée, même si les bénéfices sont moins importants dans les deux cas. Ce positionnement de la méthode 50-50 justifie son utilisation lorsque le marché n'est pas connu et l'encouragement de son utilisation par le PEF.

Il est intéressant de noter que dans l'exemple ci-dessus, les résultats obtenus avec la méthode cut-off encouragent tant le recyclage en fin de vie que l'utilisation de matière première secondaire. Cette conclusion justifie l'utilisation de l'approche cut-off quand les enjeux d'allocation des impacts et bénéfices de la fin de vie sont faibles. Frischknecht (Firschknecht, 2010) indique que les approches de type 0-100/100-0/50-50 sont pertinentes pour aider à identifier quelles options de traitement en fin de vie d'un produit donné sont plus avantageuses. Par contre, dans le cas où des questions plus générales se posent du type «quel matériau doit être utilisé dans un produit qui offre une certaine fonction », **les approches 0-100/100-0/50-50 ou cut-off sont toutes adaptées.**

Il est donc possible de conclure que même si les approches 0-100/100-0/50-50 permettent l'obtention d'informations plus précises quant à l'encouragement à donner à une pratique, la méthode cut-off présente l'intérêt d'être facilement applicable sans avoir accès à des informations sur les pratiques évitées par la valorisation matière. Elle doit donc être favorisée dans le cadre d'ACV simplifiées visant à obtenir des tendances générales.

Le diagramme suivant permet de définir la méthode d'évaluation des boucles matière à appliquer en fonction du type de boucle, du marché et des objectifs de l'étude :



5.3.7. Discussion sur la notion de substitution

L'illustration ci-dessus est fournie pour une boucle où la matière recyclée en fin de vie peut être utilisée pour un usage similaire. Dans le cas contraire l'application de l'approche 0-100 nécessite de déterminer quelle doit être la matière vierge substituée lors du recyclage (E_V^*). Autrement dit, il s'agit de répondre à la question : quelle serait la matière vierge utilisée si la matière secondaire n'était pas disponible ?

La réponse à cette question dépend largement de la filière étudiée, il est cependant possible de distinguer deux approches différentes :

- **Mix technologique** : En se basant sur l'approche attributionnelle, le choix de la technologie substituée est réalisé en fonction du mix moyen de technologies du marché.
- **Technologie marginale** : Inspirée de l'approche conséquentielle, le choix de la technologie substituée est réalisé en fonction de la technologie marginale. Celle-ci représente le moyen de production affecté par la diminution de la consommation, il s'agit donc de la technologie « réellement substituée ».

Les résultats de l'ACV peuvent dépendre considérablement de l'approche utilisée. Les référentiels existants reconnaissent d'ailleurs le biais introduit par la notion de substitution (Bilan Carbone, 2009), (AFNOR, 2012). Le choix repose en effet sur une part de subjectivité. Pour chacune des étapes, la sélection du matériau remplacé peut être sujette à débat et **la mise en œuvre d'analyses de sensibilité est nécessaire pour rendre compte de l'influence de ces choix** sur les conclusions de l'étude.

Points clés :

- **Les méthodes d'allocation des impacts en fin de vie permettent d'intégrer certains objectifs de l'économie circulaire (encouragement de l'utilisation de matière recyclée ou du recyclage)**
- **Au moment de réaliser des ACV simplifiées, la méthode « Cut-Off » permet d'obtenir des résultats aussi adaptés que les approches d'allocation des impacts en fin de vie**
- **Les résultats obtenus en appliquant les approches existantes sont fortement dépendants du choix de procédé substitué. Des analyses de sensibilité sont nécessaires pour assurer la robustesse des résultats**

6. Intégrer les objectifs de l'économie circulaire à l'unité fonctionnelle

Les méthodes d'évaluation des boucles matière présentées ci-dessus permettent de définir le périmètre qui doit être pris en compte au moment de réaliser l'ACV. Lorsque le périmètre de l'étude a été clairement défini, il est essentiel de traduire ce système dans l'unité fonctionnelle. Selon la norme ISO 14 044, l'unité fonctionnelle utilisée en ACV doit permettre de traduire la performance du produit évalué en prenant en compte le périmètre et les objectifs de l'étude.

L'unité fonctionnelle est donc particulièrement importante dans le cadre de l'économie circulaire, étant un des leviers pour encourager directement la prolongation de la durée de vie, la réduction des déchets ou la réutilisation et le réemploi. Par exemple, intégrer la durée de vie d'un produit dans l'unité fonctionnelle permet de favoriser les produits avec une plus longue durée de vie et d'encourager la production de produits plus durables.

La durée de vie est un des paramètres essentiels pour définir la performance d'un produit, pourtant sa prise en compte est souvent oubliée au moment de réaliser une ACV (notamment dans l'approche Cradle-to-Gate). Les transferts d'impact peuvent être importants lorsque cet aspect est négligé. Par exemple, un meuble qui utilise plus de matière première lors de sa fabrication peut paraître plus

impactant qu'un meuble plus léger. Par contre, si la durée de vie est intégrée, le rapport entre les deux produits pourrait être inversé, plusieurs meubles légers étant nécessaires pour satisfaire la fonction d'un meuble plus robuste.

La recyclabilité ou réutilisabilité d'un produit fait également partie de la performance de celui-ci et peut être intégrée à l'unité fonctionnelle. Ce choix permet non seulement de valoriser cet enjeu de l'économie circulaire mais également d'indiquer la production de matière première secondaire en fin de vie. Par exemple, dans le cas d'une évaluation des couches lavables, l'unité fonctionnelle pourrait être définie comme : « Assurer les changes d'un enfant non propre pendant 1 jour dans des conditions normales d'utilisation » (Ces conditions assurant la réutilisabilité de la plupart des couches lavables).

Cette réflexion peut même être poussée au bout et la production de matière première secondaire peut être directement intégrée à l'unité fonctionnelle. La fonctionnalité du système devient, dans ce cas, double, permettant de fournir un produit ou un service et de fournir une quantité de matière première secondaire. Le recyclage devient une fonction à part entière et les bénéfices associés à la production de matière première secondaire ne doivent donc pas être pris en compte. L'utilisation d'une telle unité fonctionnelle permet de simplifier le calcul des impacts de la fin de vie et d'éviter les biais méthodologiques liés à la substitution. De plus, le recyclage en fin de vie passe d'un bénéfice connexe à une fonction principale, c'est un changement de perspective vers une responsabilisation du producteur.

Comme le périmètre de l'étude, le choix de l'unité fonctionnelle doit donc être fait en fonction des objectifs de l'étude et des objectifs de l'économie circulaire que l'on souhaite évaluer ou mettre en valeur.

7. Evaluer la qualité de la matière recyclée

L'économie circulaire et la mise en place de boucles matière encouragent la réutilisation des ressources. Ce recyclage permet de limiter la consommation de matière première vierge mais peut entraîner une perte de la qualité. La modification des propriétés physiques d'un matériau est un problème récurrent au sein des filières de recyclage. C'est d'ailleurs cette perte de qualité qui est à l'origine des boucles ouvertes, on parle alors de *downcycling* ou de sous-cyclage.

Comme présenté précédemment (Section 5.3), plusieurs approches sont utilisées en ACV pour évaluer les impacts et bénéfices environnementaux de la valorisation matière. Ces méthodes présentent pourtant des limites importantes quant à l'évaluation de la perte de qualité dans ces systèmes. Cette section vise donc à guider le praticien ACV dans l'évaluation de la qualité des matières recyclées et à discuter de la pertinence des approches utilisées par les référentiels.

7.1. Evaluation de la qualité de la matière première secondaire dans les approches 0-100 et 50-50 : Le facteur Q_s/Q_p

Dans le PEF, la formule utilisée pour calculer les bénéfices environnementaux associés à la production primaire évitée est :

$$-R_2 \times E_v \times \frac{Q_s}{Q_p}$$

Le PEF introduit ainsi le facteur Q_s/Q_p . Dans cette formule Q_s représente la qualité de la matière première secondaire et Q_p celle de la matière première vierge. Q_s/Q_p est donc un ratio sans dimension permettant d'approximer les différences de qualité qui pourraient exister entre les deux matériaux comme conséquence du sous-cyclage.

L'utilisation de ce terme soulève des questions quant à la définition des termes Q_s et Q_p qui ne sont pas des grandeurs physiques directement mesurables. Le PEF répond à cette question avec la même hiérarchie que celle utilisée pour gérer les problèmes de multifonctionnalité. Ainsi, si une relation

physique inhérente au matériau est jugée comme pertinente pour évaluer sa qualité, elle pourra être utilisée pour calculer le ratio. Une des approches utilisées consiste à évaluer le taux de substitution de la matière vierge par du recyclé. Par exemple, pour le carton recyclé, cette valeur est de 0,85, une conséquence des fibres moins résistantes que celle du carton vierge.

Par contre, si la possibilité d'utiliser une relation physique n'existe pas, une autre relation, et notamment une relation économique, peut être appliquée pour estimer la qualité. Si un rapport économique est utilisé alors Q_S/Q_P doit être calculé en se basant sur les prix du marché.

Illustration : Fonte recyclée

- *Contexte* : La fonte ductile issue du recyclage peut être utilisée pour la fabrication de canalisations en fonte sans perte de qualité permettant ainsi de réduire la quantité de matière vierge utilisée

La fonte issue du recyclage présente les mêmes performances physiques que la fonte vierge, elle peut donc être utilisée pour la fabrication de systèmes de canalisation sans altérer la performance finale du produit. La qualité de la fonte recyclée est donc identique à celle de la fonte vierge.

$$\frac{Q_S}{Q_P} = 1$$

En réalité, l'évaluation de la qualité par rapport à une grandeur physique est difficile, le choix d'un matériau par rapport à un autre est rarement fait en fonction d'une seule caractéristique. C'est un ensemble de facteurs qui permet de définir un matériau. L'approche économique se profile comme la seule méthode réellement applicable pour l'évaluation de la qualité de la matière recyclée mais sa pertinence est à débattre. La corrélation entre qualité et prix du marché n'est pas toujours existante et le prix de matières recyclées peut être inférieur comme une conséquence de prix de production plus faibles et de l'image perçue par l'acheteur.

Exemple - Cas d'étude : Placoplatre

L'utilisation de plâtre recyclé n'a pas d'impact sur la performance des produits de Placoplatre. Pourtant, le prix des matières premières utilisées n'est pas le même en raison des moyens de production utilisés et de la disponibilité de la ressource.

Dans ce cas, l'utilisation des facteurs économiques pour évaluer la qualité de la matière semble peu pertinent, une autre approche est donc nécessaire.

Cet exemple soulève une problématique à considérer : Le facteur de qualité doit-il être systématiquement appliqué ?

L'ACV repose sur la notion d'unité fonctionnelle et ce principe doit guider le praticien au moment d'évaluer la qualité de la matière première secondaire. Si deux matériaux sont interchangeables sans perte de fonctionnalité, malgré des caractéristiques physiques différentes, aucune perte de qualité ne devrait être considérée. Le ratio Q_S/Q_P serait donc égal à 1.

Cette hypothèse est particulièrement importante au moment d'évaluer des boucles ouvertes. Les approches 0-100 et 50-50 font en effet appel à la notion de « Production primaire évitée », traitée à travers la notion de substitution. Si au moment d'appliquer cette méthode, la matière réellement substituée, ses impacts et ses caractéristiques physiques sont connus, l'utilisation d'un facteur permettant d'évaluer la qualité du matériau semble redondante. La matière première secondaire remplacera un matériau uniquement si les fonctionnalités sont conservées. Si ce n'est pas le cas, le

procédé de fabrication devra être modifié pour contrebalancer ces différences et les modifications devront être prises en compte parmi les impacts du recyclage.

Illustration : Recyclage des panneaux de particules

- **Contexte** : Lorsque les fabricants de panneaux de particules utilisent la matière première secondaire issue du recyclage du bois, ils doivent utiliser une quantité plus importante de colle pour assurer la qualité du produit recyclé.

Dans cet exemple, les broyats issus du recyclage se substituent aux broyats issus de l'agroforesterie. Si une approche 0-100 ou 50-50 est appliquée, au moment de calculer les bénéfices, il est nécessaire de soustraire les impacts de la fabrication de colle. Le schéma ci-dessous présente le calcul à effectuer.



Figure 58 - Calcul des bénéfices associés au recyclage du bois (Source : Quantis)

Le ratio de qualité se profile ainsi comme le facteur à appliquer quand l'utilisation exacte d'un matériau au sein des systèmes suivants n'est pas connue. Dans le cas contraire, c'est au moment de réaliser la substitution que les différences entre les matériaux devront être évaluées. Si le praticien ACV doit avoir recours à l'utilisation de ce ratio, il devra dans la mesure du possible, évaluer la fonctionnalité de la matière recyclée par rapport à la matière vierge et estimer si le prix du marché est représentatif de cette différence.

7.2. Discussion sur l'évaluation de la qualité de la matière première secondaire

Dans le paragraphe précédent, nous avons discuté l'évaluation de la qualité de la matière première recyclée au sein des méthodes 0-100 et 50-50. Il est intéressant de noter qu'un tel facteur n'est pas appliqué pour évaluer la qualité de la matière première secondaire en entrée du système. Il est donc pertinent de se demander : Comment l'impact lié à l'utilisation de matière première secondaire de moindre qualité est-il évalué ? La réponse à cette question se trouve dans la définition de l'unité fonctionnelle et dans la construction de l'ICV du procédé.

L'unité fonctionnelle doit traduire les caractéristiques et les fonctions du produit évalué. Si l'utilisation de matière première recyclée entraîne une réduction des fonctionnalités d'un produit, l'unité fonctionnelle doit être adaptée en conséquence. Par exemple, si la durabilité d'un matériau de construction est modifiée par l'utilisation de matière première secondaire, il sera nécessaire de prendre en compte l'effet de cette évolution sur la durée de vie.

Dans certains cas, l'utilisation de matière première secondaire peut perturber le procédé de fabrication. Cette modification peut entraîner des consommations énergétiques plus importantes, l'ajout de consommables supplémentaires ou même l'utilisation de matière première vierge pour diluer la matière recyclée et assurer le maintien des propriétés physiques et mécaniques. Dans ces cas, la modélisation du procédé prend en compte indirectement la perte de qualité : dans un scénario idéal cette modification n'aurait pas lieu et la matière recyclée pourrait être utilisée directement.

Cette réflexion implique que le praticien ACV doit estimer la qualité de la matière première utilisée et ses implications au moment de réaliser son évaluation. Ceci est notamment vrai lorsque deux scénarios hypothétiques sont comparés. Comparer deux procédés, un utilisant de la matière première

vierge et un autre de la matière première secondaire, sans évaluer les modifications résultantes, semble imprudent. Les impacts associés à l'utilisation d'une ressource recyclée de moindre qualité pourraient, en effet, être plus importants.

La qualité des matières premières recyclées peut donc avoir un impact sur la façon de modéliser un système et peut donc influencer les résultats d'une ACV. Le praticien ACV doit évaluer cette qualité et son influence sur le système avec prudence.

Points clés :

- **Le facteur Q_s/Q_p permet de prendre en compte la perte de qualité de la matière recyclée son utilisation est cependant peu aisée et peut introduire un biais méthodologique.**
- **La perte de qualité peut être prise en compte indirectement si le procédé de recyclage est connu en détail. Le facteur de qualité n'est pas nécessaire dans ce cas.**

8. Evaluation des projets futurs d'Economie Circulaire

Un des grands enjeux de l'économie circulaire est lié à la nouveauté de l'approche. Bien que certaines filières de recyclage soient structurées depuis plusieurs années, beaucoup restent très jeunes et la mise en place de boucles de valorisation peut nécessiter de périodes d'adaptation plus ou moins importantes. Que ce soit une filière de gestion de déchets, la mise en place de boucles locales dans des projets d'écologie industrielle ou le développement de produits à base de matière recyclée, le manque de maturité entraîne des biais sur l'évaluation environnementale de ces boucles.

Par principe, un système qui manque de maturité pourra difficilement être aussi efficace et rentable qu'un système mis au point depuis longtemps. Cette différence fondamentale peut rendre un procédé de recyclage encore jeune plus impactant du point de vue environnemental que la production de matière première vierge. Il devient donc essentiel de pouvoir évaluer les scénarios futurs où la filière de recyclage sera mature. Cette problématique n'est pas propre à l'Economie Circulaire, étant liée à toute évaluation de procédés innovants ou nouveaux. Cependant, face à l'importance de cet enjeu dans l'évaluation des boucles matières il a été décidé de la mentionner.

Les ACV attributionnelles couramment utilisées en ACV sont une photographie des impacts faite à un instant « t », la représentativité temporelle étant généralement la date de réalisation de l'étude. Une telle approche permet difficilement d'évaluer les impacts associés à un nouveau développement.

Une des solutions possibles repose sur l'approche conséquentielle utilisée en ACV. Cette approche permet de prendre en compte les évolutions du marché pour étudier les conséquences d'une évolution technologique ou d'une action précise. Ainsi, en étudiant les impacts associés à la mise en place d'une boucle de recyclage ou au remplacement d'une matière vierge par une matière recyclée, il est possible d'étudier les effets que ce développement aura sur l'environnement et sur le marché. Appliquer la méthode conséquentielle nécessite des connaissances précises sur le marché économique mondial et sur la filière évaluée. Le rapport SCORELCA N° 2012-01 (Centre de Recherche Public Henri Tudor, 2013) présente en détail les enjeux méthodologiques associés à l'application de cette approche.

9. Indicateur ressources – Enjeux de l'évaluation environnementale de l'impact sur les ressources en ACV

Un des principaux enjeux de l'économie circulaire est de limiter la consommation et les pertes des ressources naturelles présentes sur terre afin de garantir leur disponibilité pour les générations futures. Bien que la nécessité d'une utilisation durable des ressources naturelles soit acceptée par la communauté scientifique, il n'existe pas de consensus sur sa définition et sur le meilleur moyen de mesurer *l'utilisation de ressources*.

9.1. Les enjeux associés aux indicateurs « ressources » existants et les développements de la méthode ImpactWorld+

Selon la méthode d'évaluation des impacts, l'« **épuiement des ressources** » peut évaluer la consommation de matières vierges, les aspects énergétiques (quantité d'énergie nécessaire pour extraire un matériau), les aspects économiques (coût de l'extraction des ressources) ou les aspects géopolitiques (zones de conflit, objectifs politiques). Par conséquent, un grand nombre d'indicateurs peuvent être appliqués lors d'une analyse et les résultats obtenus sont très dépendants des choix réalisés.

Face à ces enjeux méthodologiques, SCORELCA a réalisé l'étude N°2012-02 sur les indicateurs utilisés en ACV pour mesurer l'épuisement des ressources (Bio Intelligence Service, 2012). Cette étude distingue quatre types d'indicateurs en fonction de la grandeur mesurée et des objectifs de l'évaluation:

- Evaluer l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource (exemple : énergie extraite)
- Evaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource (exemple : prise en compte des réserves et des taux d'extraction)
- Evaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future (exemple : énergie supplémentaire nécessaire à l'extraction future de minerais moins concentrés)
- Evaluer la contribution de l'extraction d'une ressource à l'atteinte d'un objectif politique (exemple : Swiss Eco-Scarcity)

Ainsi, les méthodes utilisées par chaque famille d'indicateurs sont très différentes et peuvent conduire à des résultats en apparence contradictoires. De plus, au sein d'une même famille, les choix méthodologiques réalisés lors de la construction des indicateurs peuvent mener à des différences considérables. Ceci est notamment vrai pour les indicateurs basés sur la rareté de la ressource où la notion de stock existant peut varier de façon importante.

Pour De Bruille (De Bruille, 2014), afin de construire une méthode robuste pour évaluer les impacts de l'épuisement des ressources il est essentiel de prendre en compte et de quantifier :

1. La fonctionnalité de la ressource
2. Les mécanismes d'adaptation des utilisateurs faisant face à la compétition due à l'épuisement, incluant notamment la substitution des ressources par d'autres ressources fonctionnellement équivalentes,
3. La distinction entre ressource extraite et ressource dissipée
4. L'effet de la dissipation des ressources sur les utilisateurs

En se basant sur ces principes, il a construit la nouvelle méthode *MidPoint* utilisée par ImpactWorld+ pour évaluer l'épuisement des ressources.

9.1.1. Fonctionnalité de la ressource

Selon l'ILCD Handbook (Wolf, Pant, Sala, & Pennington, 2012), une amélioration possible pour les indicateurs mesurant l'épuisement des ressources serait d'évaluer l'épuisement des ressources par rapport à leur fonctionnalité, une ressource n'ayant pas de valeur si elle n'est pas utile.

Dans cette approche initialement ébauchée par Stewart et Weidema, (Stewart & Weidema, 2005), les auteurs considéraient que les impacts associés à l'épuisement des ressources devaient être mesurés économiquement, l'enjeu des ressources étant un enjeu pour la société mais pas nécessairement pour l'environnement. Leur hypothèse centrale est de dire que la consommation de la ressource peut endommager sa qualité au point de rendre la ressource peu adaptée pour répondre à certains

besoins. Une consommation trop importante d'une ressource fonctionnelle engendrerait ainsi un stress sur les utilisateurs qui devraient faire face à une augmentation des prix de la ressource ou qui devraient s'adapter en modifiant les technologies existantes. Dans les deux cas, une compétition plus importante engendrerait un coût supplémentaire pour l'utilisateur (le coût d'une matière plus rare ou le coût d'adaptation), l'impact de l'épuisement des ressources peut donc être monétisé.

Il peut être supposé que la dynamique présentée ci-dessus a une limite. Les auteurs considèrent en effet l'existence d'un plafond, une technologie ultime d'extraction ou technologie de *back-up*. Ce dernier recours permettrait d'extraire une ressource très diluée dans la nature, rendant les quantités disponibles quasi-infinies à l'échelle humaine.

9.1.2. Capacité d'adaptation des utilisateurs et substituabilité de la ressource

L'approche proposée par Stewart et Weidema repose en grande partie sur la notion d'adaptation des utilisateurs. D'après De Bruille, la capacité d'adaptation dépend de deux paramètres clés, d'un côté l'évolution des technologies existantes et de l'autre la substituabilité de la ressource.

Le premier paramètre est fortement lié au secteur d'utilisation de la ressource, les ressources minérales faisant partie d'un marché majoritairement privé et international. Ainsi, une filière d'avenir avec des ressources économiques importantes pourra s'adapter plus facilement qu'une filière moins développée ou en voie de disparition. Cette définition, basée sur l'approche définie par Boulay et al. (Boulay, Bulle, Bayart, Deschenes, & Margni, 2011) pour l'évaluation des impacts liés à l'épuisement des ressources en eau, suppose une corrélation directe entre la richesse et la capacité d'adaptation.

La substituabilité de la ressource mesure la capacité d'une ressource à être remplacée par une autre. Ce terme traduit l'existence de matières interchangeable pour des applications données. L'acier et l'aluminium peuvent, par exemple, être tous les deux utilisés pour la fabrication de boîtes de conserves sans perte des fonctions majeures de l'emballage. Un utilisateur ayant recours à une ressource facilement interchangeable ne subira pas le même stress que l'utilisateur d'une ressource unique. Il serait donc moins impactant de consommer une ressource substituable qu'une qui ne l'est pas.

Afin de mesurer la substituabilité de la ressource, il est nécessaire de se baser sur une étude de sa fonctionnalité, en fonction des différentes filières concernées. La Commission Européenne a notamment publié un rapport où la substituabilité et l'anti-substituabilité (part de l'utilisation de la ressource qui ne peut pas être remplacée par une autre ressource) de plusieurs ressources minérales a été évaluée. Le tableau suivant présente l'exemple de cette évaluation pour le Lithium en fonction de la filière et du pourcentage de la ressource lié à cette application (« End-Use Fraction ») :

Tableau 6 - Substituabilité du lithium en fonction de la filière considérée (Bulle, 2015)

End-Use (USGS, 2012)	End-Use Fractions (USGS, 2012)	Anti-Substitutability (CE, 2010)
Pharmaceuticals	5%	0.3
Aluminum production	2%	0.3
Air treatment	4%	0.3
Others	16%	0.5
Greases	12%	0.7
Casting	5%	0.7
Ceramic/Glass	29%	1
Batteries	27%	1

9.1.3. La dissipation des ressources

Il est intéressant de noter que pour Stewart et Weidema, la perte de qualité de la ressource est liée à sa consommation et non à son extraction. Cette définition implique l'introduction de la notion de dissipation des ressources. Cette approche contraste avec les approches traditionnellement utilisées pas les indicateurs, basées sur la quantité extraite.

En 2002, Van Oers et al. (Van Oers, De Koning, Guinee, & Huppes, 2002) soulevaient déjà la problématique associée à la dissipation des ressources. Ils considéraient en effet qu'une ressource n'est épuisée que si elle est dissipée, une ressource concentrée dans l'anthroposphère étant disponible pour des utilisations futures. La raréfaction d'une ressource doit donc être mesurée à travers un taux de dissipation et non pas par rapport au taux d'extraction. Le taux de dissipation permettrait de rendre compte des stocks issus du recyclage et des stocks présents dans la technosphère. Ce développement méthodologique permet ainsi de valoriser les ressources facilement recyclables et d'encourager la mise en place de boucles matières, deux des objectifs de l'économie circulaire.

9.1.4. Définition de la méthode ImpactWorld +

A travers cette discussion, il a été constaté que les méthodes actuelles ne permettent pas de répondre aux problématiques majeures associées à l'épuisement de ressources, mais des développements méthodologiques pouvant améliorer la robustesse de l'approche existent. Cette logique a mené au développement d'une nouvelle méthode pour ImpactWorld+ par DeBruille et al.

Cette méthode a été construite autour d'un cadre méthodologique intégrant l'ensemble de la chaîne de cause à effet, depuis l'utilisation des ressources jusqu'aux effets sur les utilisateurs futurs. Dans un premier temps, le modèle évalue la compétition entre les différents utilisateurs en fonction d'une part de la disponibilité de la ressource (basée sur sa dissipation) et de l'autre côté de l'adaptation potentielle des utilisateurs face à la raréfaction de la ressource (basée sur la substituabilité de la ressource). Ces informations permettent de définir un facteur de compétition appelé MACSI (*MAterial Competition Scarcity Index*) exprimant « la fraction des utilisateurs initiaux qui n'auront potentiellement pas été capables de s'adapter le jour où les réserves facilement accessibles seront épuisées en tenant compte de cet indicateur de longévité dynamique » (De Bruille, 2014).

Cet indicateur midpoint permet ensuite d'évaluer l'effet de l'utilisation des ressources sur les utilisateurs futurs. La méthode développée par DeBruille évalue donc les différents types d'utilisateurs qui devront faire face à cette raréfaction et détermine le coût additionnel qu'ils devront payer pour s'adapter. Le facteur de caractérisation traduit ainsi « le prix additionnel potentiel que la société devra payer pour accéder à une ressource rendue moins disponible » (De Bruille, 2014).

A ce jour, le facteur de caractérisation au niveau midpoint de 65 ressources minérales et fossiles a été déterminé, alors que seules 7 ressources ont été caractérisées au niveau endpoint. Cet écart est justifié par la complexité qui existe à identifier les différentes technologies d'extraction existantes et futures et à évaluer leur coût pour les utilisateurs finaux.

La figure suivante compare les facteurs de caractérisation développés avec la méthode présentée ci-dessus à ceux proposés par les méthodes traditionnelles :

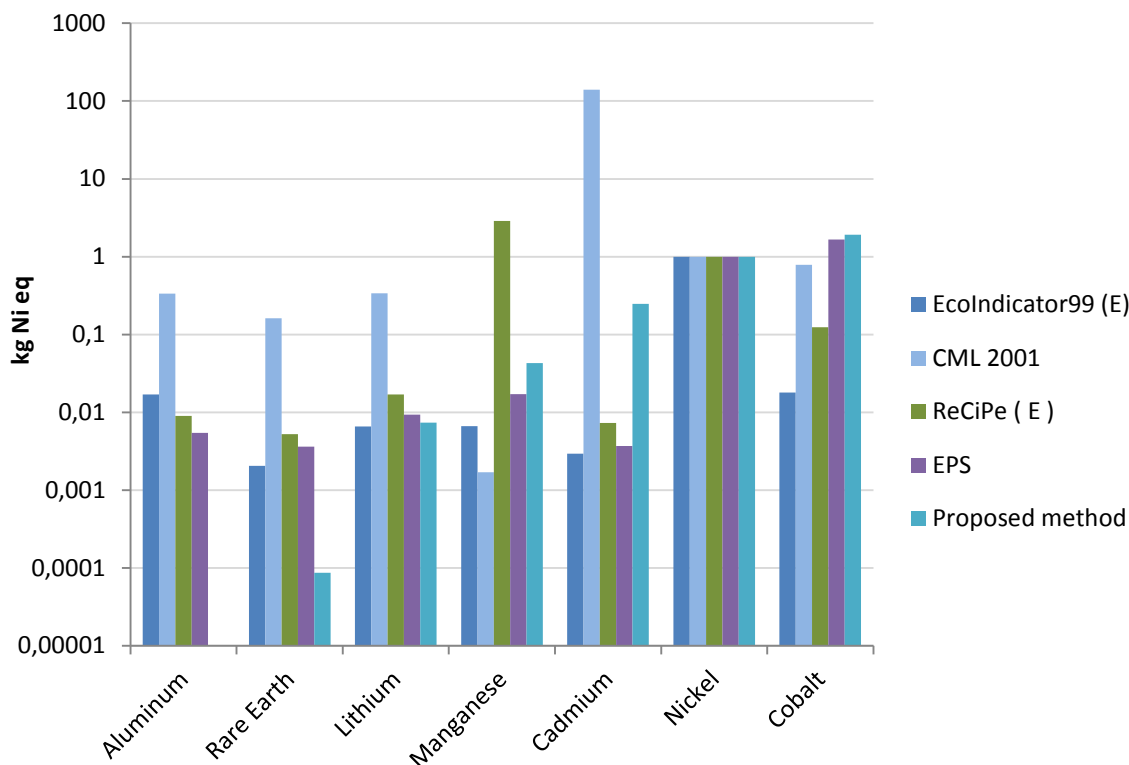


Figure 59 - Comparaison des facteurs de caractérisation de l'indicateur "épéuisement des ressources" de plusieurs méthodes d'évaluation des impacts (Bulle, 2015)

A travers cette comparaison, il est possible d'apercevoir des différences notables entre les méthodes existantes et la méthode fonctionnelle proposée par ImpactWorld+, même si les tendances restent similaires. Un exemple intéressant est l'aluminium qui est considéré par cette nouvelle approche comme une ressource peu dissipée, justifiant son caractère peu impactant. La méthode IMPACTWorld+ permet donc de prendre en compte non seulement le caractère fonctionnel de la ressource mais également d'intégrer son stock dans l'anthroposphère au moment d'évaluer sa rareté. Cette approche encourage ainsi les projets d'économie circulaire rendant moins rares les ressources facilement recyclables.

Il est intéressant de remarquer que lorsque cette méthode (mais également les autres méthodes d'évaluation des ressources) est comparée aux ressources critiques définies par la Commission Européenne, certaines différences peuvent être observées (Figure 5). Notamment, le nickel n'est pas considéré par la commission européenne comme une ressource à risque, pourtant les méthodes de caractérisation existantes l'évaluent comme une ressource rare. Cette différence est liée à la méthodologie utilisée par la Commission Européenne, basée en grande partie sur les conflits géopolitiques et la concentration de certaines ressources dans des régions données, des facteurs non pris en compte par la méthode Impact World+ car sujet à des variations à une échelle de temps très courte.

9.2. Discussion sur l'évaluation de la dissipation des ressources en ACV

9.2.1. L'évaluation de la dissipation des ressources

La méthode permettant de caractériser l'épéuisement des ressources ImpactWorld+ se profile aujourd'hui comme la seule méthode d'évaluation des impacts intégrant la notion de dispersion. Il semble en effet pertinent d'évaluer la dispersion des ressources et non pas leur extraction, l'épéuisement des ressources étant lié à leur non disponibilité et non pas à leur absence sur la croûte terrestre.

Cette problématique soulève cependant une autre question, est-ce que toutes les utilisations d'une

ressource sont équivalentes ? L'impact sur l'épuisement des ressources d'une activité ou d'un produit ne devrait-il pas être évalué en fonction de sa participation à la dissipation ? Parmi les objectifs de l'économie circulaire, la diminution des pertes dissipatives et l'optimisation de l'étanchéité des boucles matières sont explicitées.

Pourtant, en utilisant les méthodes de caractérisation existantes, la consommation d'1 tonne d'acier pour la fabrication de trombones aura le même impact que la consommation d'une quantité équivalente pour la fabrication d'une poutre. Il semble cependant évident que potentiellement l'effort nécessaire pour récupérer l'acier dans le premier scénario est beaucoup plus important que dans le deuxième.

Les méthodes existantes ne permettent donc pas d'évaluer les impacts associés à la dissipation des ressources mais uniquement d'évaluer si la ressource utilisée est dissipée ou pas dans les conditions actuelles du marché. L'ACV est donc incapable de répondre entièrement à la question des ressources aujourd'hui. Elle doit faire appel à des méthodes complémentaires permettant de se focaliser sur cet aspect, qui peuvent être combinés avec l'ACV pour affiner les résultats obtenus.

Comme vu dans la partie 2 de cette étude, le MFA est une méthode permettant l'évaluation de l'utilisation efficace des ressources à travers des bilans massiques. En réalité, le MFA et l'ACV possèdent des similarités importantes et commencent tous les deux par la réalisation d'un inventaire des différents flux entrant et sortant du système. C'est cet inventaire qui permet ensuite d'évaluer les pertes les plus importantes et les procédés les moins efficaces, des informations essentielles pour évaluer la dissipation des ressources.

Le MFA et l'ACV apparaissent ainsi comme deux méthodes complémentaires avec beaucoup de similarités. La combinaison de ces deux approches semble pertinente pour évaluer l'impact environnemental et la dissipation des ressources au sein d'une même étude. D'ailleurs, plusieurs études combinant les deux approches ont été menées (Venkatesh & Hammervold, 2009).

Illustration : Application d'une approche couplée ACV-MFA pour l'évaluation de la fin de vie du PET en Colombie (Rochat, 2004)

- **Contexte** : Avec l'augmentation de l'utilisation d'emballages plastiques de plus en plus de pays en voie de développement cherchent à évaluer les impacts des différentes filières de traitement des déchets plastiques.
- **Objectif de l'étude** : Evaluer différents scénarios de fin de vie des bouteilles en PET dans la commune de Tunja en Colombie à travers les méthodes MFA et ACV
 - Le MFA doit permettre d'évaluer les flux entrants et sortants ainsi que les échanges avec l'environnement pour déterminer la quantité de PET disponible pour le recyclage (Dispersion)
 - L'ACV doit permettre l'évaluation environnementale des différentes filières de gestion des déchets et déterminer la filière la plus performante environnementalement.
- **Unité fonctionnelle** : Pour réaliser un MFA, le périmètre géographique du système doit être clairement défini, l'unité fonctionnelle doit donc traduire cette caractéristique :

« Le service rendu par la quantité totale de PET utilisée dans la région pendant un an »
- **Résultats** :
 - MFA : En utilisant le MFA, il a été déterminé que 10 tonnes de PET sont stockées chaque mois dans la région évaluée. Cette évaluation a donc permis aux chercheurs non seulement de déterminer les pertes qui ont lieu chaque année (dispersion de la matière) mais également d'évaluer la viabilité technico-économique de développer le recyclage localement, d'imaginer les variations possibles du management des déchets et d'identifier les acteurs impliqués à chaque étape.
 - ACV : À travers l'ACV, les chercheurs ont démontré l'intérêt environnemental du recyclage. En combinant l'approche ACV avec l'approche MFA, ils ont été capables d'évaluer des scénarios réalistes qui intègrent les étapes de distribution et de consommation en détail (une étape souvent négligée en ACV).
- **Conclusion**: En combinant l'ACV et le MFA, il est possible d'évaluer des métabolismes complexes qui intègrent toute une région ou filière pour déterminer la viabilité et la performance environnementale d'un projet. De plus, l'application des deux méthodes permet de prendre en compte des enjeux différents et d'améliorer la globalité de l'évaluation

9.2.2. La prise en compte de la « temporalité »

Une des notions non évoquée par les méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources et celle de la « temporalité ». Certains matériaux sont en effet intégrés dans des usages de durée de vie plus ou moins longue. Par exemple, le stock d'acier contenu dans une voiture sera remis à disposition plus rapidement que celui des matériaux de construction. La ressource de ces stocks anthropiques n'est pas rendue disponible pour des nouveaux usages au même rythme, limitant le stock réellement disponible dans les années à venir.

La séquestration des ressources au sein d'un système ne nuit-elle pas au développement des boucles matière? Un minéral pour lequel il reste 30 ans de stock au rythme de consommation actuel sera épuisé dans 30 ans (toutes choses égales par ailleurs) si les usages dans lesquels on l'utilise sont de long terme (par exemple 50 ans). Même si on sait qu'il sera récupérable à 100% dans 50 ans, le

problème d'épuisement des ressources se posera dans 30 ans. Au bout d'un certain temps, un système producteur de matière recyclée ne devrait plus recevoir les bénéfices du recyclage.

Cette réflexion est en apparence en contradiction avec les principes de l'économie circulaire et de la hiérarchie des déchets qui encouragent la prolongation de la durée de vie des produits. Mais l'ACV est jusqu'à une certaine mesure capable de répondre aux deux questions. D'un côté, l'augmentation de la durée de vie permet de réduire les impacts environnementaux associés aux étapes de fabrication. De l'autre, la prise en compte de la temporalité et du « temps de résidence » des ressources dans le système permet de favoriser leur mise à disposition. L'idéal étant ainsi de trouver l'optimum permettant d'avoir le plus de bénéfices.

Points clés :

- **Les indicateurs « ressources » utilisés aujourd'hui en ACV ne permettent pas la prise en compte de tous les enjeux associés à l'utilisation des ressources (dissipation, substituabilité, adaptation, ...)**
- **La méthode ImpactWorld+ permet de répondre à certaines de ces problématiques mais n'assure pas l'évaluation de la dispersion d'une ressource au sein d'un système**
- **Des méthodes complémentaires comme le MFA peuvent permettre de répondre à ces questions.**

10. Prioriser les impacts

L'évaluation de scénarios de boucles matière selon une approche ACV permet d'obtenir des résultats pour différentes catégories d'impacts. Si le classement de ces scénarios varie en fonction de ces catégories, il est nécessaire de les prioriser. Une étape de normation peut aider à l'identification du scénario le plus performant en rapportant à une même unité l'ensemble des indicateurs. Le besoin de priorisation des impacts est propre à l'ACV de façon générale. Il s'agit, en effet, de la clé vers une gestion aisée des impacts environnementaux. Ce n'est donc pas un enjeu propre à l'évaluation des boucles matières, cependant, face aux derniers développements en matière de priorisation et à l'importance du sujet, il a été décidé de le traiter dans cette section.

La normation est la division des indicateurs de catégories d'impact résultant d'une ACV par des valeurs de références. Le rapport SCORELCA N° 2012-04 (RDC Environnement, 2013) explicite les différents modes d'utilisation de la normation :

- 1) Identifier des incohérences dans le processus itératif de l'ACV. En comparant les résultats d'ACV de manière itérative à des références sectorielles ou d'autres valeurs de références, le praticien peut identifier des aberrations et des incohérences.
- 2) Aider à la sélection de catégories d'impact pertinentes à analyser. La normation permet d'identifier les indicateurs de catégories d'impact pour lesquels le produit étudié contribue le plus, relativement à une valeur de référence. Cette information peut être utilisée notamment lors de la sélection d'indicateurs de catégories d'impact en vue d'un affichage environnemental.
- 3) Etudier les contributions relatives par rapport à une référence. En rapportant les résultats d'ACV à un scénario de référence (une référence historique par exemple), la normation appuie son rôle d'aide à la décision ou encore d'indicateur de performance. Attention, ce type d'analyse se rapproche de l'ACV comparative.
- 4) Donner une meilleure perception des résultats d'ACV via :
 - L'utilisation d'ordre de grandeur
 - Le positionnement des résultats et la comparaison directe

L'utilisation la plus courante est celle de la normation en « équivalent habitant ». Plusieurs questions

peuvent être soulevées quant à l'utilisation de cette approche :

- L'utilisation d'une référence en termes d'impacts générés sur un territoire et non attribuable aux habitants d'un territoire est-elle pertinente ? En effet une part non négligeable des impacts générés par les français a lieu en dehors des frontières françaises
- L'utilisation de la répartition actuelle des impacts environnementaux générés par un habitant d'une zone géographique donnée est-elle pertinente pour cibler où sont les enjeux prioritaires dans une perspective de durabilité (En réalité, dans une société durable, la répartition des impacts serait probablement différente) ?

Björn & Hauschild proposent des éléments de réponse à ces questions. Ils affirment que l'importance relative des problématiques environnementales peut être analysée en quantifiant la contribution du système étudié sur l'ensemble des contraintes exercées sur l'écosystème terre par les sociétés humaines.

Cette approche consiste à évaluer les seuils des pressions exercées à ne pas franchir sous réserve d'engendrer une déstabilisation des écosystèmes (« *Planetary Boundaries* » en anglais).

Cette approche appelée Planetary Boundaries (Rockström, Steffen, Noone, Persson, & F. S. Chapin, 2009) provient d'une initiative lancée en 2008 par un groupe de 28 scientifiques reconnus internationalement en collaboration avec le Stockholm Resilience Center. Leur objectif était d'identifier et quantifier les limites de la planète à respecter afin que les générations à venir puissent continuer à vivre et se développer.

Lors de cette première analyse, mise à jour en 2015, ils ont identifié 9 priorités qui régulent le fonctionnement de notre planète, à savoir :

- le changement climatique
- l'intégrité de la biosphère (perte de la biodiversité et extinction des espèces)
- la diminution de la couche d'ozone stratosphérique
- l'acidification des océans
- les flux biogéochimiques (phosphore et azote)
- le changement de l'utilisation des sols
- l'utilisation d'eau douce
- les charges d'aérosol dans l'atmosphère
- l'introduction aux nouvelles entités (polluants organiques, matériaux radioactifs, nanomatériaux et micro-plastiques)

La figure ci-dessous présente les différents seuils définis par cette méthode pour chacun des indicateurs mentionnés :

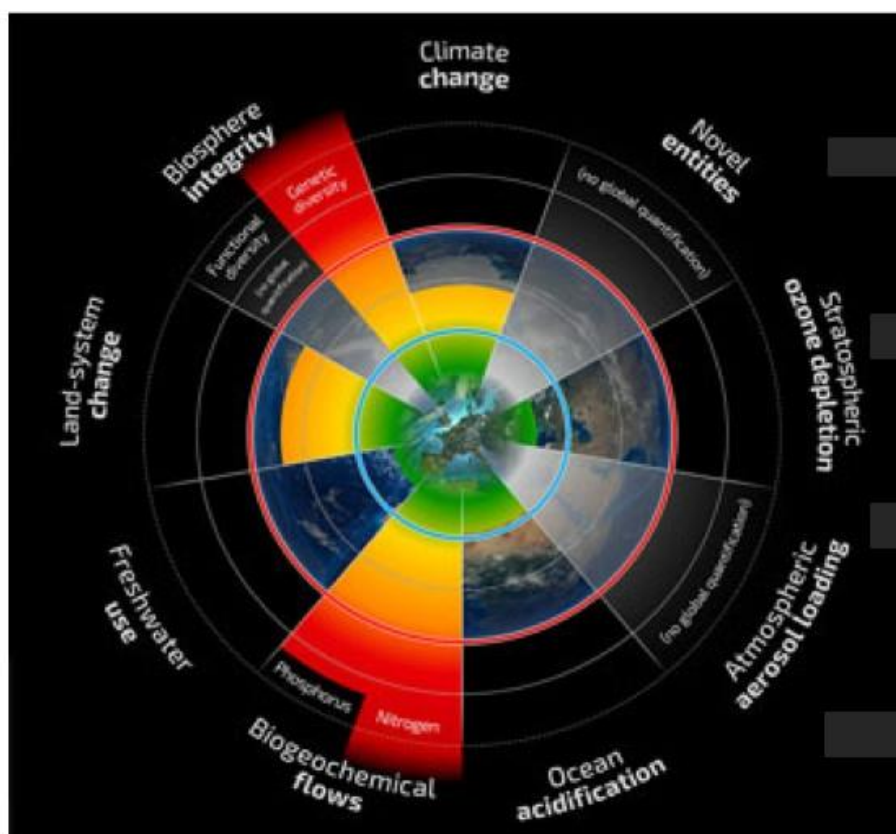


Figure 60 - Seuils limites pour les 9 priorités identifiées dans la méthode *Planetary Boundaries* (Stockholm Resilience)

Le but est donc de rester dans la zone de sécurité d'opération (en vert dans ce modèle) afin de permettre le développement long-terme de l'humanité. On notera que 4 des 9 limites identifiées ont d'ores et déjà été franchies dont 2 dans la zone à haut risque (le changement climatique et les flux biogéochimiques) et les deux autres sont dans la ceinture d'incertitude (l'intégrité de la biosphère et les changements dans l'utilisation des terres). Cela risque d'engendrer une dégradation des conditions de vie sur notre planète, remettant en cause significativement le bien-être des 7 milliards d'habitants actuels et des 11 milliards à venir d'ici 2100.

L'approche suivie par Björn & Hauschild (Björn, 2015) reprend donc cette notion pour quantifier ces impacts maximum globaux annuels et les diviser par la population mondiale. Dans le tableau ci-dessous Björn & Hauschild proposent des valeurs pour les principaux indicateurs environnementaux en ACV.

Tableau 7 - Impacts maximum globaux par personne en fonction des catégories d'impact selon (Bjorn & Hauschild, 2014)

Impact category ¹⁶	NR_Global person year) (per	CF compatibility	Carrying capacity approach (indicator based on)
Climate change	2.5 ton CO ₂ -eq	GWP100 (CO ₂ -eq) (Forster et al. 2007)	Resilience (2° target)
Climate change, alternative	1.3 ton CO ₂ -eq	GWP100 (CO ₂ -eq) (Forster et al. 2007)	Resilience (350ppm CO ₂)
Ozone depletion	5.7E-02 kg CFC-11-eq	ReCiPe midpoint (ODP) (Montzka and Fraser 1999)	Resilience (7.5% decrease in average ozone conc.)
Photochemical ozone formation	53 kg NMVOC-eq	ReCiPe, midpoint (Van Zelm et al. 2008)	Protection of sensitive species (X ppm h AOT40)
Terrestrial acidification	1.8*10 ³ mole H+ eq	OT method of Posch et al. (2008)	Buffer flow (X mole H ⁺ eq/ha/year)

Terrestrial eutrophication	$2.1 \cdot 10^3$ mole N eq	OT method of Posch et al. (2008)	Buffer flow (X mole N eq/ha/year)
Freshwater eutrophication	1.6kg P eq	ReCiPe, midpoint (Struijs et al. 2009b)	Resilience (X mg/L P)
Marine eutrophication	25 kg N eq	ReCiPe, midpoint (Struijs et al. 2009b)	Resilience (X mg/L N)
Freshwater ecotoxicity	$1.4 \cdot 10^4$ [PAF]*m ³ *day	USEtox, ecotox (Rosenbaum et al. 2008)	Protection of sensitive species (HC5(NOEC))
Land use, soil quality	1.3 tons eroded soil	Saad et al. (2013), land occupation CFs only	Buffer flow (X tons/(ha*year))
Land use, biodiversity loss	$1.1 \cdot 10^4$ m ² *year	LCI data, land occupation only	Resilience (X% un-conserved land are)
Water depletion	582 m ³	LCI data classified as blue water consumption	Buffer flow (X km ³ /year)

Une approche plus adaptée consisterait donc non pas à diviser les valeurs seuils des impacts environnementaux par la population mondiale mais à diviser ces objectifs de réduction entre les différentes activités industrielles (en allouant par secteur ou par compagnie des émissions maximales). Ce travail permettrait de définir un niveau de performance à atteindre par entreprise et donc de mesurer l'écart à ce niveau de performance pour chacun des indicateurs.

De nombreux scientifiques s'accordent en effet sur l'importance de prendre en compte le contexte global lorsqu'il s'agit de mesurer les impacts environnementaux. Dans cette même perspective, une initiative appelée Science-Based Targets lancée par le WRI, WWF, CDP et UNGC s'est lancée en 2014. Leur objectif est de promouvoir l'utilisation des Planetary Boundaries lors de la définition des objectifs en termes d'émissions de GES des entreprises.

Le changement climatique est aujourd'hui considéré comme l'un des fléaux du 21^e siècle : des émissions annuelles croissantes engendrent une augmentation de la température, qui elle-même aboutit à un dérèglement des cycles temporels (inondations, tempêtes, sécheresses), une diminution des rendements de productions alimentaires, la fonte des glaces, etc.

Afin de limiter cet impact, l'objectif mondial de limiter l'augmentation de la température à 2°C d'ici 2100 par rapport au début de l'ère industrielle fut fixé en 2009 par la conférence de Copenhague. Suite à cet engagement, certaines organisations et agences ont développé des scénarios fixant quelles devraient être les émissions des secteurs d'ici 2100 pour favoriser le respect de cet engagement.

L'AIE (Agence Internationale de l'énergie) a développé le scénario dit 2°C (2DS) qui décrit un système énergétique consistant avec une trajectoire d'émissions qui permettrait de limiter l'augmentation de la température à 2°C avec une probabilité de 80%. Ce scénario mène à la définition d'un objectif de réduction de 50% d'ici 2050 par rapport au niveau de 2009 et qui devrait continuer à diminuer par la suite.

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) a estimé qu'un montant de 1000 Gigatonne de carbone (= 3670 Gt CO₂) pouvait encore être émis d'ici 2100 par rapport au niveau préindustriel (IPCC, 2014).

Une étude de PWC réalisée en 2014 (PricewaterhouseCoopers LLP, 2014) tend à montrer que ce budget carbone sera dépensé d'ici 2034 si l'on continue à émettre au même rythme. Les réductions annuelles actuelles de 0,9% en intensité carbone sont en effet bien loin des 6,2% nécessaires estimés par PWC pour contenir l'augmentation de la température à 2°C.

Toutes ces questions restent cependant au niveau mondial. Afin d'aider les entreprises à définir des objectifs en ligne avec ces scénarios, l'initiative Science-Based Target a développé un outil appelé – Approche de décarbonisation sectorielle.

Cet outil, développé par le WRI, CDP et WWF en collaboration avec Ecofys définit un budget carbone par secteur, en prenant en compte les différences entre secteurs telles que le potentiel de croissance économique ou la croissance démographique. Pour cela, ils se sont basés sur les recherches effectuées par l'AIE qui a publié en 2014 ses perspectives liées à la technologie énergétique (Energy

Technology Perspectives – ETP). Dans ce scénario, le budget disponible d'ici 2050 est estimé à 1055 Gt CO₂. Les secteurs actuellement inclus dans l'outil représentent 60 % des émissions de GES.

L'approche choisie est celle dite de la valeur ajoutée : le budget carbone est ici déterminé en fonction de la contribution relative des entreprises à l'économie comme le montre la figure suivante :

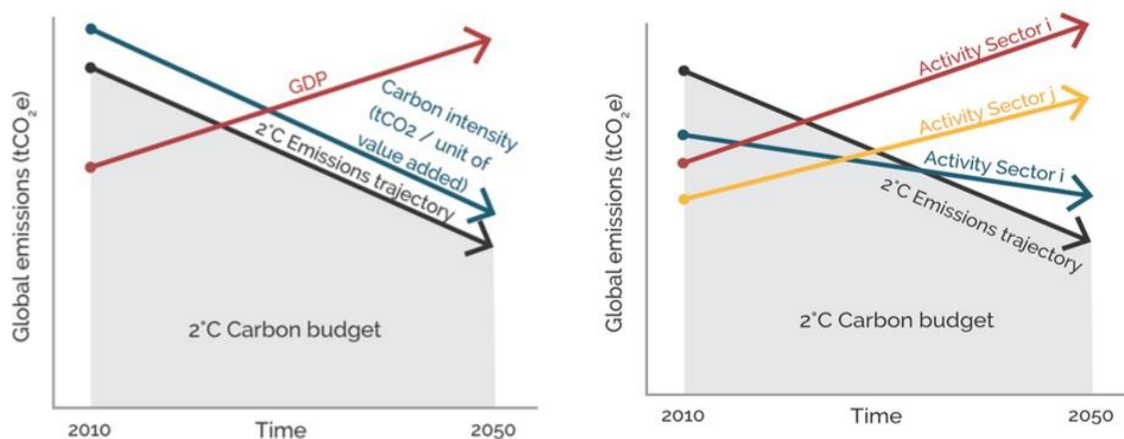


Figure 61 - Représentation graphique de l'approche "Value added"

Cette approche a été adaptée afin de permettre de prendre en compte non seulement l'apport relatif des différents secteurs à l'économie, mais également les potentiels de croissance variables entre secteurs, leur potentiel d'atténuation ainsi que les technologies disponibles.

A l'heure actuelle, l'approche Planetary Boundaries permet donc de définir quels enjeux sont clés grâce à une identification des limites de notre planète ainsi qu'une analyse de leur seuil de résistance. Savoir que 4 d'entre elles ont déjà été franchies devrait permettre aux entreprises de prioriser leurs actions en fonction de ces enjeux mondiaux.

De plus, des approches et méthodologies comme les 'Science-Based Targets' devraient à terme permettre à chaque entreprise de se positionner par rapport à chaque enjeu, et en fonction de ses propres objectifs définis scientifiquement, définir quels sont ses enjeux clés dans le contexte durable de la planète.

Points clés :

- **La priorisation des impacts semble une étape nécessaire pour assurer une gestion efficace de la performance environnementale**
- **A l'heure actuelle, la méthode *Planetary Boundaries*, basée sur les seuils acceptables pour la planète, se profile comme une méthode innovante et adaptée pour la priorisation des impacts**

Conclusion

La prise de conscience de la nécessité d'assurer une gestion efficace des ressources remonte aux années 1970. Pourtant cette idée s'impose au début des années 2000, en raison de la hausse du prix des matières premières. La crise financière et économique de 2008 l'amplifie. Et c'est dans ce contexte récent que le concept d'économie circulaire a véritablement émergé.

Toutefois l'économie circulaire a fait son apparition dans un foisonnement de concepts existants en lien avec la soutenabilité, concepts dont la majorité ont été développés entre la fin des années 80 et le début des années 90, à l'image de la *Performance economy*, du *Cradle to Cradle*, de l'*Industrial ecology*, du *Biomimicry* et de la *Green economy*.

L'appropriation de ce concept est réalisée aux échelles tant française, qu'européenne ou internationale. La conférence environnementale et la conférence de mise en œuvre de l'économie circulaire de 2013 ont précisé les actions majeures à entreprendre sur le territoire français, tandis que la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte y consacre une partie. D'autres pays ont déjà mis en place des politiques nationales, à l'image du Japon, des Pays-Bas, de la Chine ou de l'Allemagne. L'Europe, de son côté, en a fait un élément essentiel pour sa stratégie Europe 2020, permettant de contribuer à un usage plus efficace des ressources, et indirectement d'atteindre les objectifs fixés sur le plan des dérèglements climatiques. Des organisations, comme l'OCDE et le PNUE sont actives depuis plusieurs années sur le sujet de la gestion des ressources, même si l'utilisation du terme « économie circulaire » se fait rare dans leurs publications.

Bon nombre d'acteurs, impliqués sur le sujet, ont proposé une définition de l'économie circulaire, qui reste, à ce jour, une notion aux contours non stabilisés. Quelques représentations schématiques ont également été proposées, centrées sur la notion de « boucle ». A ce titre, des experts attirent l'attention sur le caractère restrictif des boucles et appellent à une vision élargie, mais toutefois structurée, à l'image des quatre stratégies de maturation formulées par le Pr. Erkman.

Certaines composantes citées dans la définition du concept proposée par l'ADEME, révèlent des moyens d'action comme le recyclage ou le réemploi, ainsi que des méthodologies - l'éco-conception, l'écologie industrielle et territoriale, l'économie de fonctionnalité et l'économie collaborative - déjà mis en œuvre par certains acteurs économiques, pouvoirs publics ou citoyens. L'intérêt environnemental de telle ou telle action qui s'inscrirait en lien avec ces composantes est généralement questionné, souvent validé mais mérite une attention particulière, compte tenu du caractère non systématique à tous produits ou toutes matières. A ce propos, certaines barrières à la mise en œuvre de l'économie circulaire ont été mises en évidence, qu'elles soient liées aux produits, mais aussi aux marchés et aux pouvoirs politiques. Les manques en matière de connaissances environnementales sont également un frein et ont des conséquences sur la manière d'évaluer une boucle d'économie circulaire. Trois grandes catégories de méthodes d'évaluation des boucles ont été identifiées, parmi l'Analyse de Flux de Matières, l'Analyse du Cycle de Vie et les Indicateurs d'évaluation et de suivi de la performance.

A travers cet état des lieux, quatre objectifs de l'évaluation des boucles de l'économie circulaire ont été identifiés. Le premier objectif est d'évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des boucles de recyclage et d'allongement de la durée de vie. Le second objectif de l'évaluation est de comparer et prioriser les différentes boucles pour sélectionner les scénarios les plus pertinents à mettre en œuvre. L'aide à la mise en œuvre de ces scénarios est le troisième objectif de l'évaluation des boucles. Enfin, le dernier objectif consiste à évaluer l'évolution des systèmes et la performance des boucles mises en applications.

Pour mener à bien les évaluations des boucles d'économie circulaire différentes approches et méthodes ont été identifiées. L'analyse de flux de matière et d'énergie (AFME) est l'approche la plus fréquemment rencontrée pour évaluer la faisabilité d'une boucle de recyclage. Une déclinaison de cette méthodologie, la méthode de comptabilité en flux matière (*Material Flow Cost Accounting, MFCA* en anglais) permet de développer la production propre dans les entreprises de production.

L'analyse du cycle de vie est la méthode la plus courante dans cet état de l'art pour évaluer les impacts environnementaux d'une boucle. L'approche cycle de vie a également été rencontrée pour l'évaluation des coûts économiques à travers la méthode de l'analyse des coûts du cycle de vie (*Life cycle costing, LCC* en anglais). Des travaux sont par ailleurs actuellement en cours pour intégrer l'évaluation des impacts sociaux dans cette approche d'analyse du cycle de vie.

Enfin de nombreux indicateurs ont été mis au point par la communauté scientifique pour évaluer les impacts environnementaux, économiques et sociaux ainsi que pour identifier les points clés de développement d'un scénario ou suivre la performance d'une stratégie d'économie circulaire.

En lien avec ces évaluations aux finalités différentes et les méthodes qui leurs sont associées, plusieurs enjeux conceptuels et méthodologiques ont été identifiés. En ce qui concerne les enjeux de l'évaluation des impacts des boucles d'économie circulaire, il s'agit de traduire la faisabilité quantitative et qualitative d'une boucle dans les impacts environnementaux, sociaux et économiques, définir et évaluer la valeur « réelle » d'une matière et d'identifier des indicateurs représentatifs du bien-être de la société.

D'un point de vue méthodologique, la justification de la méthode statistique utilisée pour modéliser des données manquantes en AFME est un enjeu identifié. L'analyse du cycle de vie a fait l'objet d'une attention particulière dans notre état des lieux et plusieurs enjeux méthodologiques ont été identifiés pour cette méthode. Il s'agit de :

- Justifier un choix de méthode statistique pour modéliser les données manquantes en AFME.
- Exploiter les données accessibles telles que les données statistiques ou économiques pour réaliser l'évaluation environnementale.
- Construire un inventaire du cycle de vie spécifique à un territoire.
- Allouer les impacts entre les différents acteurs d'une même boucle.
- Obtenir des résultats robustes, notamment en élargissant le périmètre.
- Choisir le scénario marginal pour une application de l'approche conséquentielle.
- Prendre en compte l'impact des pertes dissipatives.
- Prendre en compte la qualité de la matière recyclée après plusieurs boucles.

La comparaison et la hiérarchisation des boucles d'économie circulaire ont pour enjeu principal la définition du meilleur compromis pour la société en considérant ses impacts environnementaux, économiques et sociaux. Du point de vue des impacts environnementaux et compte tenu des objectifs en matière d'efficacité de l'usage des ressources de l'économie circulaire et du focus qui peut exister sur les impacts de la consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, un enjeu important sera de positionner ses impacts les uns par rapport aux autres.

La priorisation des boucles peut avoir lieu sans agréger des résultats d'évaluation d'impacts aux unités différentes. Mais la comparaison d'une boucle peut motiver le calcul d'un score unique dont les enjeux seront d'agréger des impacts exprimés dans des unités différentes, d'éviter les doubles comptages et éventuellement d'établir des facteurs de pondération pour les différentes catégories d'impacts évaluées.

L'enjeu de l'évaluation comme outil d'aide à la mise en œuvre est d'identifier les indicateurs représentatifs des objectifs de l'économie circulaire.

Enfin, l'enjeu de l'évaluation de la performance des boucles mises en œuvre est d'identifier les indicateurs représentatifs de chacune d'entre elles.

Cependant, certains des enjeux identifiés ne sont pas exclusifs à l'évaluation des boucles matière et sont plus largement représentatifs des enjeux connus de l'ACV. Il a donc été décidé d'étudier en détail seules les problématiques liées à l'évaluation des boucles matière. Cette analyse a été menée en suivant la logique portée par le praticien ACV au moment de réaliser son étude. Chaque étape d'une ACV étant déterminante pour assurer la robustesse de l'évaluation.

Ainsi, le praticien ACV doit assurer la cohérence entre les objectifs de son évaluation environnementale et les objectifs de son projet dans le cadre de l'économie circulaire. Et même si l'ACV ne peut pas répondre à tous les objectifs de l'économie circulaire, la définition des objectifs est essentielle pour définir le type d'ACV menée, le périmètre de l'étude, l'unité fonctionnelle, les indicateurs d'évaluation des impacts et la méthode de priorisation les plus pertinents pour l'évaluation des boucles matière.

Une fois les objectifs de l'étude définis, le praticien ACV doit décider l'approche qu'il utilisera pour évaluer la boucle matière. Deux approches complémentaires existent aujourd'hui pour évaluer la fin de vie (étape déterminante au moment d'évaluer une boucle matière), l'approche déchet et l'approche produit. Et si l'ACV déchets permet de répondre à plusieurs enjeux de l'économie circulaire, elle nécessite cependant une bonne connaissance de la fin de vie et doit être menée en ayant conscience des limites de l'approche.

Si une ACV produit est menée, une des questions essentielles est celle de la définition du périmètre d'évaluation. La norme ISO encourage l'utilisation de l'extension de frontières. Cette approche scientifiquement robuste permet d'évaluer facilement les boucles fermées ou partiellement fermées, mais est difficile à appliquer lors de l'évaluation des boucles ouvertes ou des cascades de recyclage. Pour pallier cette problématique, plusieurs méthodes d'allocation des impacts en fin de vie ont été développées, permettant, en fonction des règles du marché, d'encourager le recyclage ou l'utilisation de matière recyclée. En fonction de la méthode appliquée, les résultats obtenus peuvent varier de façon importante, le choix d'une méthode doit donc être fait avec précaution.

Ces méthodes nécessitent, en plus, d'une bonne connaissance de la matière substituée par la matière recyclée et, notamment, des différences de qualité entre les deux matières. Un facteur permettant de quantifier l'écart de qualité est promu par le PEF pour faciliter l'évaluation de la substitution en l'application des méthodes proposées. Nous avons cependant remarqué que l'utilisation d'un tel facteur doit être faite avec prudence, elle peut introduire un biais méthodologique important et pénaliser les boucles matière. Dans ces circonstances, la réalisation d'analyses de sensibilité semble nécessaire pour éviter une surestimation ou une sous-estimation des bénéfices de la valorisation matière.

Les objectifs de l'étude et le périmètre défini doivent ensuite être traduits dans l'unité fonctionnelle. A travers une approche pragmatique, il est possible d'adapter l'unité fonctionnelle pour assurer la prise en compte des objectifs de l'économie circulaire mise en valeur précédemment. La prise en compte de la durée de vie des produits ou de la circularité de la matière étant des approches faciles à mettre en œuvre par le praticien ACV pour encourager l'économie circulaire.

Or, même en appliquant les différentes recommandations réalisées, le manque de maturité de certaines filières de valorisation matière peut entraîner un désavantage concurrentiel du point de vue environnemental. L'approche attributionnelle ne peut pas, dans ce cas, répondre aux objectifs de l'étude et des approches prospectives ou conséquentielles doivent être privilégiées.

Lorsque les boucles matières ont été clairement définies et l'inventaire du Cycle de vie a été construit, il est nécessaire d'évaluer les impacts environnementaux associés. Un des principaux enjeux de l'économie circulaire est de limiter la consommation et les pertes des ressources naturelles afin de garantir leur disponibilité pour les générations futures, l'indicateur « ressource » est donc d'un grand intérêt pour l'évaluation des boucles matière. Mais les indicateurs utilisés aujourd'hui en ACV ne permettent pas de prendre en compte tous les enjeux associés à l'utilisation des ressources (dissipation, substituabilité, adaptation, ...). La méthode ImpactWorld+ apparaît ainsi comme une des méthodes permettant de répondre à certaines de ces problématiques. Elle n'assure cependant pas l'évaluation de la dispersion d'une ressource au sein d'un système. Des méthodes complémentaires comme le MFA semblent donc nécessaires dans le cadre de l'économie circulaire.

L'évaluation de scénarios de boucles matière selon une approche ACV permet d'obtenir des résultats pour différentes catégories d'impacts. Si le classement de ces scénarios varie en fonction de ces catégories, il est nécessaire de les prioriser. Une nouvelle approche appelée Planetary Boundaries basée sur les seuils d'impact acceptables sur Terre a récemment été développée. Cette approche innovante se profile aujourd'hui comme une méthode scientifiquement robuste pour comparer les impacts. De nombreux scientifiques s'accordent en effet sur l'importance de prendre en compte le contexte global lorsqu'il s'agit de mesurer les impacts environnementaux. Il semble donc cohérent d'appliquer une telle approche dans le cadre de l'économie circulaire

L'économie circulaire se présente aujourd'hui comme une approche sans un champ de recherche scientifique à proprement parler. En revanche, les méthodes d'évaluation de systèmes répondant de ce concept sont travaillées par les milieux scientifiques. Face à cette problématique, il est difficile de généraliser sur l'évaluation des boucles matière dans le cadre de l'économie circulaire. Ce rapport se

présente donc comme une première étape pour l'évaluation des projets d'économie circulaire qui pourrait bénéficier de travaux supplémentaires à chaque étape identifiée.

Bibliographie de la partie 1

- ADEME / ARF, 2014. Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France.
- Aldersgate Group, 2012. Resilience in the Round, Seizing the growth opportunities of a circular economy.
- Aurez V., Levy, J-C., 2013. Economie circulaire, écologie et reconstruction industrielle ?, Paris, éd. CNCD.
- Bjorn A., Hauschild M. Z., 2012. Absolute versus Relative Environmental Sustainability, What can the Cradle-to-Cradle and Eco-efficiency Concepts Learn from Each Other ?, Journal of Industrial Ecology.
- Brunner P. H., 2013. Cycles, spirals and linear flows. Waste Management & Research 31(10) Supplement 1-2.
- CGEDD, Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, 2014. L'économie circulaire, état des lieux et perspectives.
- Ellen MacArthur Foundation, 2012. Towards the Circular Economy Economic and business rationale for an accelerated transition.
- Erkman S., 1998. Vers une écologie industrielle, éd. Charles Léopold Mayer.
- Green Alliance, 2013. Resource resilient UK – A report from the Circular Economy Task Force.
- Geldron A., ADEME, 2013. Economie Circulaire : Notions – Fiche technique.
- Greffet P. et al., INSEE, 2012. Définir et quantifier l'économie verte, Dossier.
- Lehmann M., et al., 2014. Circular Economy – Improving the Management of Natural Resources, Akademien der Wissenschaften Schweiz.
- Le Moigne R., 2014. L'Economie circulaire – Comment la mettre en œuvre dans l'entreprise grâce à la reverse supply chain ?, éd. Dunod.
- Massard G., 2011. Les symbioses industrielles : une nouvelle stratégie pour l'amélioration de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques par les activités économiques. Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- OECD, 2008. Measuring material flows and resource productivity, Synthesis report.
- OFEV, 2011. Etude internationale sur les parcs d'éco-innovation, Analyse de projets d'éco-innovation en zone industrielle ou urbaine, Eco-Innova.
- PNUE, 2011. Vers une économie verte, Pour un développement durable et une éradication de la pauvreté. Synthèse à l'intention des décideurs.
- Preston F., Chatham House, 2012. A global redesign ? Shaping the circular economy, Energy, Environment and Resource Governance
- Van Niel J., 2014. L'économie de fonctionnalité : principes, éléments de terminologie et proposition de typologie, Développement durable & territoires.

Bibliographie de la partie 2

- Ardente, Fulvio, and Fabrice Mathieux. 2014. "Identification and Assessment of Product's Measures to Improve Resource Efficiency: The Case-Study of an Energy Using Product." *Journal of Cleaner Production* 83: 126–41. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614007860> (November 25, 2014).
- Bakker, Conny, Feng Wang, Jaco Huisman, and Marcel den Hollander. 2014. "Products That Go Round: Exploring Product Life Extension through Design." *Journal of Cleaner Production* 69(0): 10–16. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614000419>.
- Weidema Bo. 2009. "Regionalisation in social LCA". Presentation to the 29th Swiss LCA Discussion Forum, Zürich, 2009-11-13.
- Brogaard, Line K et al. 2014. "Evaluation of Life Cycle Inventory Data for Recycling Systems." *Resources, Conservation & Recycling* 87: 30–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.011>.
- Chen, Xudong et al. 2012. "The Impact of Scale , Recycling Boundary , and Type of Waste on Symbiosis and Recycling An Empirical Study of Japanese Eco-Towns." *Journal of Industrial Ecology* 16(1): 129–41.
- Chompu-inwai, Rungchat, Benyaporn Jaimjit, and Papawarin Premsurianunt. 2014. "A Combination of Material Flow Cost Accounting and Design of Experiments Techniques in an SME: The Case of a Wood Products Manufacturing Company in Northern Thailand." *Journal of Cleaner Production*. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614008622> (December 5, 2014).
- Chou, Chun-Juei, Chong-Wen Chen, and Chris Conley. 2015. "An Approach to Assessing Sustainable Product-Service Systems." *Journal of Cleaner Production* 86(0): 277–84. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614008828>.
- Fröhling, Magnus, Frank Schwaderer, Hauke Bartusch, and Frank Schultmann. 2012. "A Material Flow-Based Approach to Enhance Resource Efficiency in Production." *Methods, tools and software* 17(1): 5–19.
- Guyonnet, Dominique et al. 2013. "Material Flow Analysis for Identifying Rare Earth Element Recycling Potentials in the EU 27." In *Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium*.
- Hatayama, Hiroki, Ichiro Daigo, Yasunari Matsuno, and Yoshihiro Adachi. 2012. "Evolution of Aluminum Recycling Initiated by the Introduction of next-Generation Vehicles and Scrap Sorting Technology." *Resources, Conservation and Recycling* 66: 8–14. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344912001036> (December 5, 2014).
- Hatayama, Hiroki, Ichiro Daigo, and Kiyotaka Tahara. 2014. "Tracking Effective Measures for Closed-Loop Recycling of Automobile Steel in China." *Resources, Conservation and Recycling* 87: 65–71. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344914000640> (December 5, 2014).
- Hilty, Lorenz M, Rolf Widmer, Mathias Schluep, and Martin Faulstich. 2014. "Modeling Metal Stocks and Flows: A Review of Dynamic Material Flow Analysis Methods." *Environmental Science & Technology*.
- Hou, Deyi et al. 2014. "Using a Hybrid LCA Method to Evaluate the Sustainability of Sediment Remediation at the London Olympic Park." *Journal of Cleaner Production* 83: 87–95. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614007902> (November 26, 2014).

- Johnson, Jeremiah X, Colin A Mcmillan, and Gregory A Keoleian. 2013. "Evaluation of Life Cycle Assessment Recycling Allocation Methods The Case Study of Aluminum." *Journal of Industrial Ecology* 17(5).
- Kasemset, Chompoonoot, Jintana Chernsupornchai, and Wannisa Pala-ud. 2014. "Application of MFCA in Waste Reduction: Case Study on a Small Textile Factory in Thailand." *Journal of Cleaner Production*: 1–10. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010105> (December 5, 2014).
- Kim, Junbeum, Yongwoo Hwang, and Kwangho Park. 2009. "An Assessment of the Recycling Potential of Materials Based on Environmental and Economic Factors; Case Study in South Korea." *Journal of Cleaner Production* 17(14): 1264–71. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652609001097> (December 5, 2014).
- Knauf, Marcus. 2014. "Waste Hierarchy Revisited — an Evaluation of Waste Wood Recycling in the Context of EU Energy Policy and the European Market." *Forest Policy and Economics* (0). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934114002317>.
- Kovanda, Jan. 2014. "Incorporation of Recycling Flows into Economy-Wide Material Flow Accounting and Analysis : A Case Study for the Czech Republic." *Resources, Conservation & Recycling* 92: 78–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.08.006>.
- Lim, Seong Rin et al. 2013. "System Optimization for Eco-Design by Using Monetization of Environmental Impacts: A Strategy to Convert Bi-Objective to Single-Objective Problems." *Journal of Cleaner Production* 39: 303–11. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612003782> (December 5, 2014).
- Liu, Gang, and Daniel B. Müller. 2012. "Addressing Sustainability in the Aluminum Industry: A Critical Review of Life Cycle Assessments." *Journal of Cleaner Production* 35: 108–17. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612002533> (December 3, 2014).
- Martin, Michael, Niclas Svensson, and Mats Eklund. 2013. "Who Gets the Benefits? An Approach for Assessing the Environmental Performance of Industrial Symbiosis." *Journal of Cleaner Production*: 1–9. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613004058> (December 5, 2014).
- Mongelli, Ignazio, Sangwon Suh, and Gjalt Huppes. 2005. "Input-Output Analysis (Subject Editor : Sangwon Suh) A Structure Comparison of Two Approaches to LCA Inventory Data , Based on the MIET and ETH Databases." *International journal of LCA* 10(5): 317–24.
- Nakamura, Shinichiro et al. 2014. "MaTrace: Tracing the Fate of Materials over Time and Across Products in Open-Loop Recycling." *Environmental Science & Technology*.
- Nakamura, Shinichiro, and Yasushi Kondo. 2006. "A Waste Input-Output Life-Cycle Cost Analysis of the Recycling of End-of-Life Electrical Home Appliances." *Ecological Economics* 57(3): 494–506. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800905002454> (December 5, 2014).
- Nelen, Dirk et al. 2014. "A Multidimensional Indicator Set to Assess the Benefits of WEEE Material Recycling." *Journal of Cleaner Production* 83(0): 305–16. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007070>.
- Ohno, Hajime, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, and Shinichiro Nakamura. 2014. "Unintentional Flow of Alloying Elements in Steel during Recycling of End-of-Life." *Journal of Industrial Ecology* 18(2).
- Osset, Philippe, Catherine Clauzade, Charlotte Hugrel, and Magali Palluau. 2012. "ACV et Valorisation Des Produits En Fin de Vie - Affectation Des Impacts Environnementaux Des Cycles de Vie Amont et Aval." *Annales des Mines-Realités industrielles*.

- Pakarinen, Suvi, and Laura Sokka. 2010. "Quantifying the Total Environmental Impacts of an Industrial Symbiosis - a Comparison of Process-, Hybrid and Input - Output Life Cycle Assessment." *Environmental Science & Technology* 44(11): 4309–14.
- Paraskevas, Dimos, Karel Kellens, Wim Dewulf, and Joost R. Duflou. 2014. "Environmental Modelling of Aluminium Recycling: A Life Cycle Assessment Tool for Sustainable Metal Management." *Journal of Cleaner Production*. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010646> (November 27, 2014).
- RDC Brussels. 2008. *Évaluation Des Bénéfices Environnementaux, Économiques et Sociaux de Différents Scénarios de Réutilisation Des Déchets Par Les Entreprises D'économie Sociale*.
- Rochat, David, Claudia R Binder, Jaime Diaz, and Olivier Jolliet. 2013. "Combining Material Flow Analysis, Life Cycle Assessment, and Multiattribute Utility Theory." *Journal of Industrial Ecology* 17(5).
- Sevigné-Itoiz, Eva, Carles M. Gasol, Joan Rieradevall, and Xavier Gabarrell. 2014a. "Environmental Consequences of Recycling Aluminum Old Scrap in a Global Market." *Resources, Conservation and Recycling* 89: 94–103. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344914001086> (December 3, 2014).
- Sevigné-Itoiz, Eva, Carles M. Gasol, Joan Rieradevall, and Xavier Gabarrell. 2014b. "Methodology of Supporting Decision-Making of Waste Management with Material Flow Analysis (MFA) and Consequential Life Cycle Assessment (CLCA): Case Study of Waste Paper Recycling." *Journal of Cleaner Production*: 1–10. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614007318> (December 5, 2014).
- Shuaib, Mohannad et al. 2014. "Product Sustainability Index (ProdSI)." *Journal of Industrial Ecology* 18(4): 491–507. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12179>.
- Silvestre, José Dinis, Jorge de Brito, and Manuel Duarte Pinheiro. 2013. "From the New European Standards to an Environmental, Energy and Economic Assessment of Building Assemblies from Cradle-to-Cradle (3E-C2C)." *Energy and Buildings* 64: 199–208. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778813002703> (November 10, 2014).
- Sokka, Laura, Suvi Lehtoranta, Ari Nissinen, and Matti Melanen. 2011. "Analyzing the Environmental Benefits of Industrial Symbiosis." *Journal of Industrial Ecology* 15(1): 137–55. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2010.00276.x> (December 5, 2014).
- Sørensen, Birgitte Lilholt, and Henrik Wenzel. 2014. "Life Cycle Assessment of Alternative Bedpans - a Case of Comparing Disposable and Reusable Devices." *Journal of Cleaner Production* 83: 70–79. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614007276> (December 5, 2014).
- Starr, Katherine, Gara Villalba, and Xavier Gabarrell. 2015. "Upgraded Biogas from Municipal Solid Waste for Natural Gas Substitution and CO2 Reduction - A Case Study of Austria, Italy, and Spain." *Waste management (New York, N.Y.)*: 1–12. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25655352> (February 18, 2015).
- Ziemann, Saskia, Marcel Weil, and Liselotte Schebek. 2012. "Tracing the Fate of Lithium — The Development of a Material Flow Model." *Resources, Conservation & Recycling* 63: 26–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.04.002>.
- Zimmermann, Till, and Stefan Gößling-reisemann. 2013. "Critical Materials and Dissipative Losses : A Screening Study." *Science of the Total Environment* 461-462: 774–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.040>.

Bibliographie de la partie 3

AFNOR. (2012). *NF EN 15804*. AFNOR.

Bilan Carbone. (2009). *Guide Méthodologique*. Guide, ADEME.

Bio Intelligence Service. (2012). *Indicateurs d'épuisement des ressources en analyse du Cycle de vie*. SCORELCA.

Bjørn, A. D. (2015). Strengthening the Link between Life Cycle Assessment and Indicators for Absolute Sustainability To Support Development within Planetary Boundaries. *Environmental Science Technologies*, 49, 6370-6371.

Bjorn, A., & Hauschild, M. (2014). Proposal for a new normalization reference based on carrying capacity. *SETAC Basel meeting*. Basel.

Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschenes, L., & Margni, M. (2011). Regional characterization of freshwater use in LCA : Modeling direct impacts on human health. *Environmental Science and Technology*, 5 (20), 8948-8957.

Bulle, C. (2015). Metallic resources use and competition impacts. *SCORELCA Workshop*. Paris.

Centre de Recherche Public Henri Tudor. (2013). *Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle : Identifications des conditions de mise en oeuvre et des bonnes pratiques*. SCORELCA. Paris: SCORELCA.

Cleary, J. (2012). Incorporating Waste Prevention Activities Into Life Cycle Assessment of Residential Solid Waste Management Systems. *Department of Geography*, 313.

Colemant, T., Masoni, P., Dryer, A., & McDougall, E. (2003). International expert group on life cycle assessment for integrated waste management. *International Journal of LCA*, 175-178.

COM. (2005). Mise en oeuvre de l'utilisation durable des ressources : Une stratégie thématique pour la prévention et le recyclage des déchets. 666 final.

Commission Européenne. (s.d.). Directive n°2008/98/CE transposée en 2010.

De Bruille, V. (2014). *Impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte cycle de vie : une approche fonctionnelle*. Thèse de doctorat, Université de Montréal, Département de Génie Chimique, Montréal.

Firschknecht. (2010). Modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 666-671.

IPCC. (2014). *Fifth Assessment Report (AR5)*. IPCC.

ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and Framework*.

ISO. (2006). *ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and Guidelines*.

JRC. (2012). *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*. JRC.

Lazarevic, D., Buclet, N., & Brandt, N. (2010). The influence of the waste hierarchy in shaping European waste management: the case of plastic waste. *Regional Development Dialogue*, 31(2), 124-148.

Manfredi, S., Pant, R., & Pennington, D. (2011). Supporting environmentally sound decisions for waste management with LCT and LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 937.

- Nessi, S., & Rigamonti, L. G. (2012). LCA of waste prevention activities: a case study for drinking water in Italy. *Journal of Environmental Management* , 108, 73-83.
- Osset, P., Clauzade, C., Hugrel, C., & Palluau, M. (2012). ACV et Valorisation des produits en fin de vie - Affectation des impacts environnementaux des cycles de vie amont et aval. *Responsabilité & Environnement* , 57-66.
- PricewaterhouseCoopers LLP. (2014). Two Degrees of Separation: Ambition and Reality. *Low Carbon Economy Index* .
- RDC Environnement. (2013). *Appréhender l'ordre de grandeur des résultats d'impacts environnementaux - Les apports et les limites de la normation*. SCORELCA. Paris: SCORELCA.
- Rochat, D. (2004). *Assessment of end-of-life scenarios for PET in Tunja, Colombia, using Material Flow Analysis (MFA), Life Cycle Assessment (LCA) and Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)*. Diploma thesis, Ecole Polytechnique de Lausanne, Environmental Science and Engineering.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., & F. S. Chapin, I. E. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society* , 14.
- Stewart, M., & Weidema, B. (2005). A consistent framework for assessing the impact from resource use - A focus on functionality. *International Journal of LCA* , 10, 240-247.
- Stockholm Resilience. (s.d.). *Planetary Boundaries*. Récupéré sur Stockholm Resilience: <http://www.stockholmresilience.org/21/research/research-programmes/planetary-boundaries.html>
- Van Oers, L., De Koning, A., Guinee, J., & Huppes, G. (2002). *Abiotic resource depletion in LCA. Improving Characterisation Factors Abiotic Resource Depletion as Recommended in the new Dutch LCA handbook*. RWS-DWW report.
- Venkatesh, G., & Hammervold, J. B. (2009). Combined MFA-LCA for Analysis of Wastewater Pipeline Networks Case Study of Oslo, Norway. *Journal of Industrial Ecology* , 13, 532-550.
- Wolf, M. A., Pant, R. C., Sala, S., & Pennington, D. (2012). *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe*. . Handbook, Ispra: Publications Office of the European Union. .

Annexe : Cas d'étude

Cas d'étude OSILUB

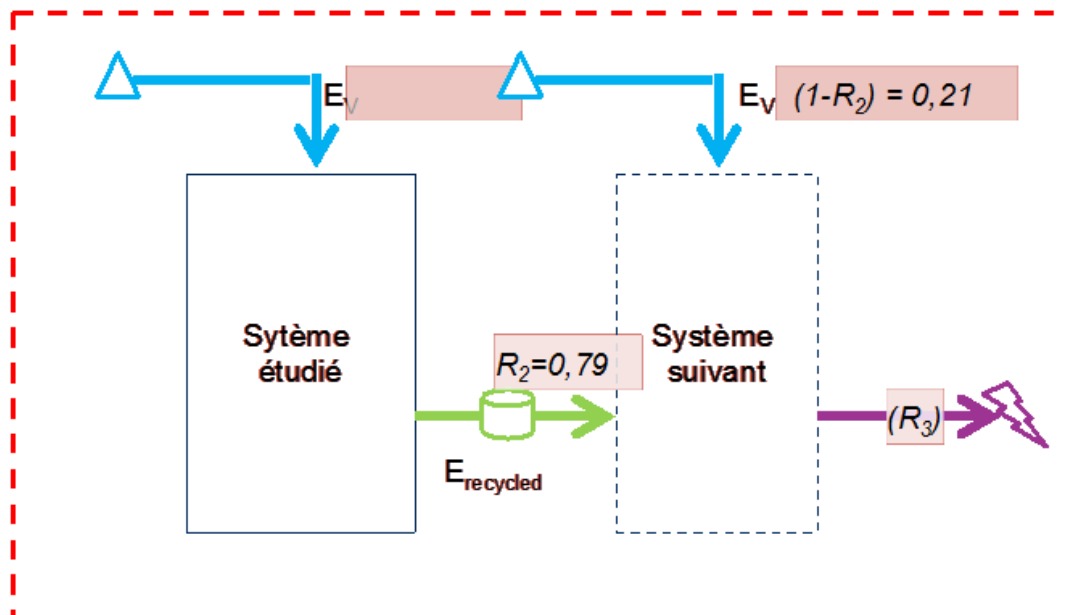
Dans le cadre de l'économie circulaire et de la hiérarchie européenne des déchets, la société OSILUB (filiale de Veolia et Total) a construit une usine de recyclage des huiles usagées afin de valoriser les huiles en fin de vie. Afin d'évaluer la performance environnementale de ces huiles et notamment de leur régénération, OSILUB a décidé de mener une ACV comparative des différentes options de gestion de fin de vie des huiles usagées

Le procédé développé par OSILUB permet d'utiliser les huiles usagées noires pour la production de VGO (Vacuum Gas Oil). Ce produit possède une couleur caractéristique qui le différencie des huiles issues des matières premières vierges. Cependant, il répond aux critères de définition d'une huile et peut être vendu directement sur le marché. Ce produit a donc la même fonction après son recyclage. **Il s'agit d'une boucle fermée.**

Les huiles usagées peuvent également être renvoyées en raffinerie où elles sont assimilées à une huile vierge ou dans un processus plus simple qui améliore ses caractéristiques et les rends équivalentes à des huiles de base. Lorsqu'une valorisation matière des huiles n'est pas mise en place, les huiles sont envoyées en cimenterie et valorisées énergétiquement. Ces trois types de valorisation ne seront pas présentés en détail dans le présent rapport.

La régénération des huiles se décompose en deux étapes, dans un premier temps les huiles sont clarifiées, puis distillées. Ce procédé mène à la production de VGO mais également de 3 coproduits : les résidus asphaltés, l'essence et le gasoil à désulfurer. Une allocation économique entre les différents coproduits a été réalisée. Les impacts de la régénération sont principalement associés à la consommation énergétique (gaz naturel et électricité) mais également au traitement des déchets du procédé. Ainsi, les événements sont incinérés et les effluents liquides sont traités avant d'être rejetés.

Lors de la régénération des huiles en VGO, pour 1t d'huile usagée collectée, 0,79t d'huiles peuvent être remises sur le marché. Si l'on considère que les huiles usagées sont régénérées une seule fois par le procédé OSILUB, le périmètre évalué est :



R_2 = taux de recyclage en fin de vie R_3 = taux de valorisation énergétique en fin de vie

Figure 62 - Frontières du système pour l'évaluation du projet OSILUB si les huiles sont régénérées une seule fois (source : Quantis)

En supposant 2 recyclages avec les mêmes rendements, avant l'élimination de l'huile usagée, le périmètre suivant est obtenu :

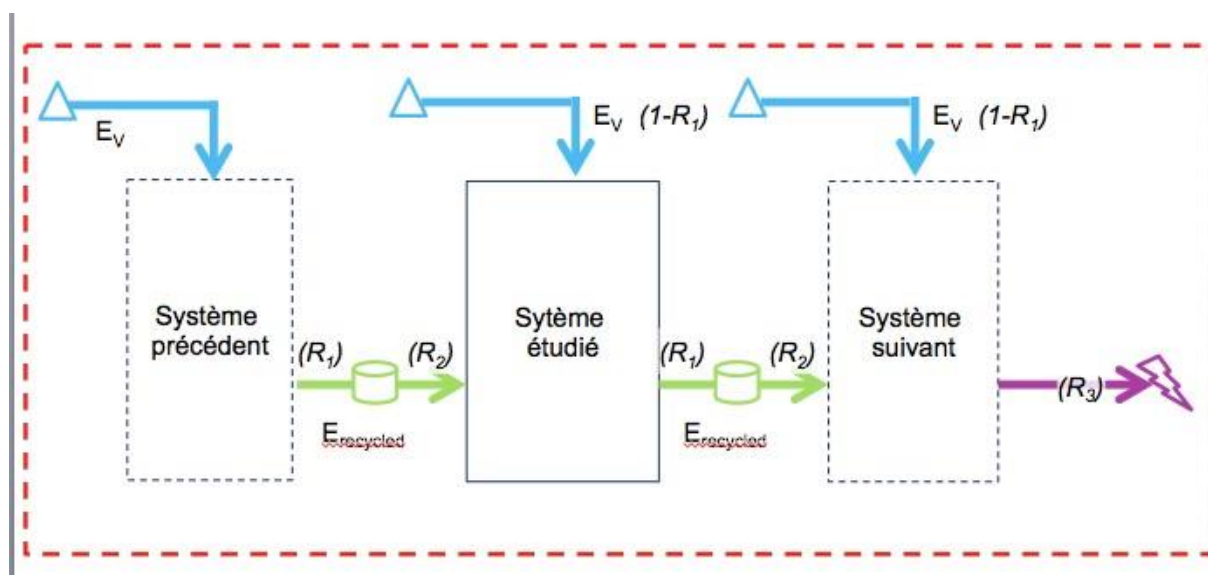


Figure 63 - Frontières du système pour l'évaluation du projet OSILUB si les huiles sont régénérées 2 fois (Source : Quantis)

De façon plus générique, l'huile produite pourrait être utilisée N fois et son évaluation pourrait être réalisée selon le même principe. Prenons en compte le tableau suivant :

Utilisation	Impacts de l'huile vierge	Impacts de l'huile régénérée	Impacts de l'incinération
1 ^{ère} utilisation	E_v	0	0
2 ^{ème} utilisation	$(1-R_1)*E_v$	$R_2*E_{Recycled}$	0
3 ^{ème} utilisation	$(1-R_1)*E_v$	$R_2*E_{Recycled}$	0
...
N ^{ème} utilisation	$(1-R_1)*E_v$	$R_2*E_{Recycled}$	$R_3*(...)$

Au total, l'impact de N cycles est donné par :

$$EF = (1 + (N - 1) * (1 - R_1)) \times E_v + ((N - 1) \times R_2 \times E_{recycled}) + R_3 \times (...)$$

Soit, pour un seul cycle :

$$EF = \frac{(1 + (N - 1) * (1 - R_1)) \times E_v + (N - 1) \times R_2 \times E_{recycled} + R_3 \times (...)}{N}$$

Ainsi, si les huiles sont régénérées à l'infini, les impacts sont données par

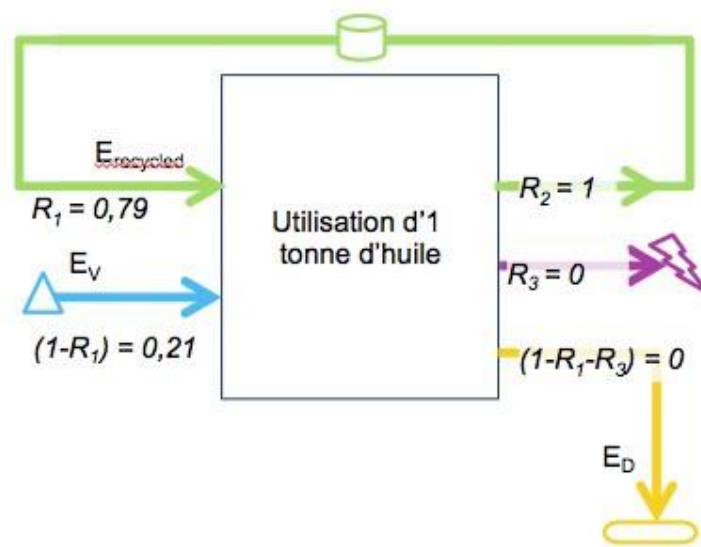


Figure 64 - Frontières du système pour l'évaluation environnementale du projet OSILUB (Source : Quantis)

$$EF = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{(1 + (N - 1) * (1 - R_1)) \times E_V + (N - 1) \times R_2 \times E_{recycled} + R_3 \times (...)}{N}$$

Alors les impacts environnementaux associés à ce système s'écrivent :

$$EF = 0,21 \times E_V + E_{recycled}$$

En appliquant cette formule pour l'évaluation des impacts des huiles produites avec le procédé OSILUB, les résultats suivants sont obtenus :

Tableau 8 - Impacts associés à la production d'une tonne de VGO (avec régénération des huiles usagées)

	Changement Climatique (kg CO2-ég)	Ecotoxicité Aquatique (PDF.m ² .an)	Ressources énergétique (MJ)
Impact par tonne de VGO vendue	385	12,6	14500

Si, ces résultats sont comparés aux résultats de la valorisation énergétique des huiles usagées en cimenterie, les écarts suivant sont observés :

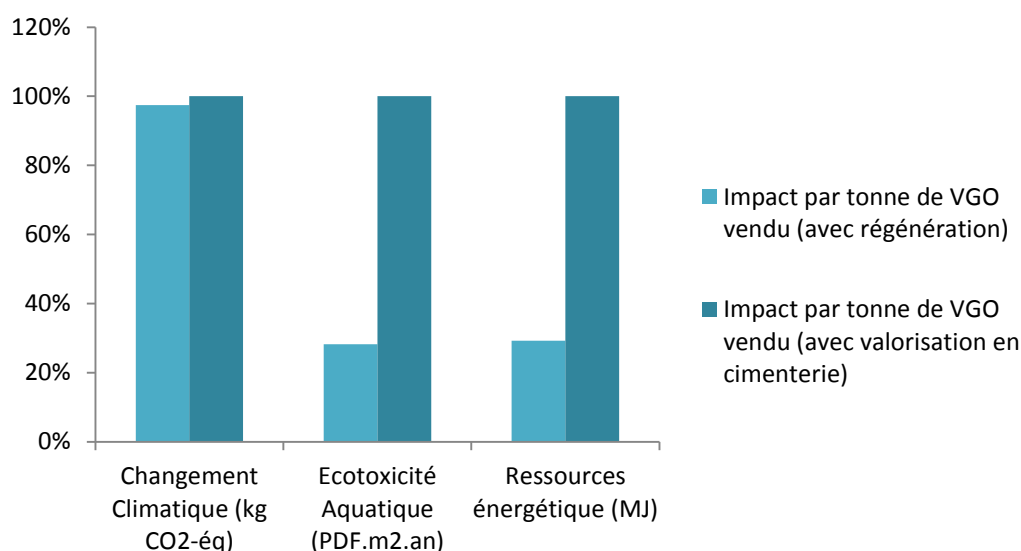


Figure 65 - Impacts d'une tonne de VGO vendue en fonction du type de valorisation en fin de vie

La valorisation des huiles usagées en VGO apparaît ainsi comme une solution moins impactante sur tous les indicateurs évalués permettant ainsi de valoriser la mise en place de la boucle matière et favorisant l'économie circulaire.

Ces résultats sont cependant à nuancer. Sur le changement climatique, un écart de moins de 10% peut être observé entre les deux solutions, cette différence est une conséquence directe de la substitution prise en compte pour l'évaluation des bénéfices de la valorisation énergétique. Dans le modèle, une substitution au charbon, coke de pétrole et fioul est en effet considérée, diminuant fortement les impacts de la cimenterie sur le changement climatique. Des analyses de sensibilité sont donc nécessaires pour améliorer la robustesse des résultats obtenus.

Cas d'étude NordPackage

La région Nord-Pas-de-Calais est aujourd'hui la première région française productrice d'emballages de carton ondulé et la deuxième région en transformation papier-carton. Or, depuis plusieurs années, l'industrie papetière en Nord-Pas de Calais connaît une situation difficile, du fait notamment de la concurrence étrangère asiatique sur les approvisionnements en vieux papiers. Les industries chinoises achètent en effet une grande partie des déchets papier-carton de la région limitant ainsi la capacité de la boucle matière présente historiquement dans la région.

Le besoin de rendre environnementalement, socialement et économiquement intéressants les circuits locaux de production, d'utilisation, de récupération et de recyclage des papiers-cartons est donc fort. A l'aide d'une collaboration avec Groupe Agéco, spécialiste mondial de l'ACV sociale, et Ernst & Young, Quantis a apporté des éléments chiffrés permettant de mettre en évidence les bénéfices environnementaux et socio-économiques d'une filière locale, et ainsi d'accompagner Nord Package dans l'illustration de son argumentaire.

L'approche utilisée a été déclinée selon plusieurs volets : ACV environnementale et sociale, dans des visions attributionnelles et conséquentielles (permettant de mettre en évidence les conséquences d'une éventuelle disparition de la filière). L'étude NordPackage visait à évaluer deux exutoires différents (recyclage en France ou en Chine) pour un gisement de déchets hétérogène (différents types de papier et cartons) et d'origine variable. **L'approche déchet** était globalement mieux adaptée pour répondre aux objectifs fixés.

En ACV déchets, les frontières du système évalué sont centrées autour de la fin de vie, le périmètre défini pour cette étude était donc le suivant :

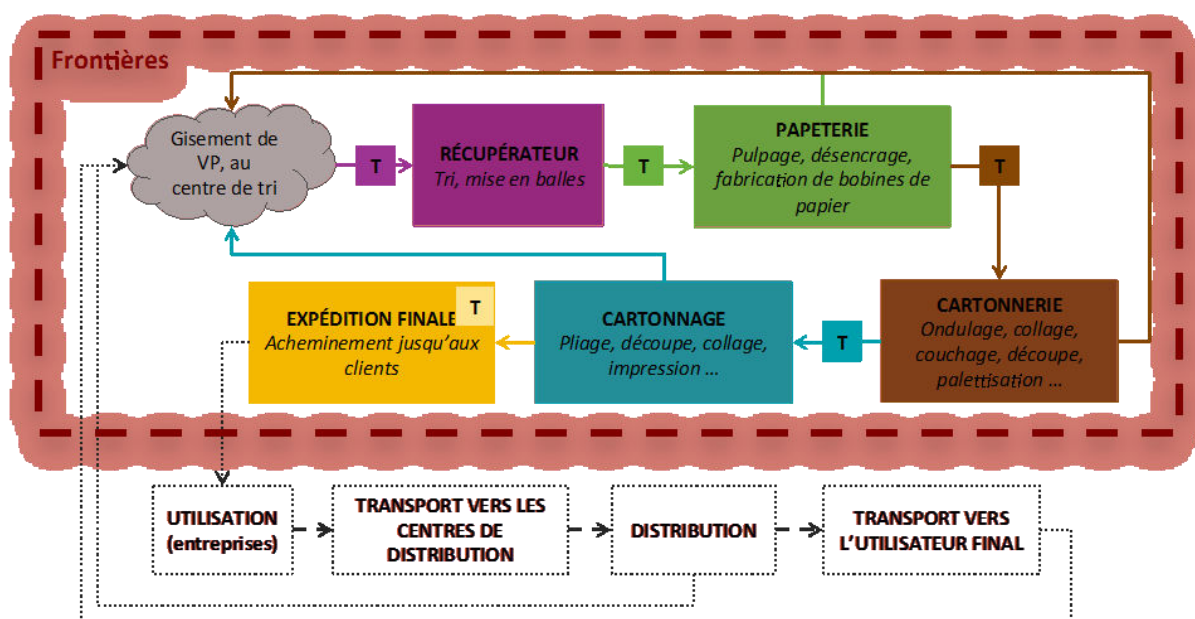


Figure 66 - Frontières du système pour l'évaluation environnementale et sociale de la filière NordPackage (Source : Quantis)

Le traitement des déchets papier-carton dans le Nord-Pas-de-Calais permet non seulement de gérer ces déchets mais également de fabriquer des nouveaux produits. La valorisation de ces déchets a donc une double fonctionnalité qui doit être évaluée et prise en compte dans l'unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle définie pour cette étude est :

Gérer et traiter une tonne de déchets de papier-carton générés dans la région Nord-Pas-de-Calais en 2013 et fournir une quantité de papiers-cartons recyclés à la demande mondiale

Cette approche a permis la comparaison de deux scénarios. Le premier, la régénération de vieux papiers par la **filiale Nord Package** (récupération, papeterie, cartonnerie, cartonnage) et leur expédition vers les utilisateurs finaux, le deuxième un scénario identique avec un recyclage en Chine. L'interprétation des résultats avait pour objectif de faire ressortir les enjeux environnementaux comparativement entre 2 situations (recyclage en France et en Chine), et non pas de détailler les impacts associés à chaque acteur de la filière.

Les résultats comparatifs de cette évaluation sont présentés sur la figure suivante :

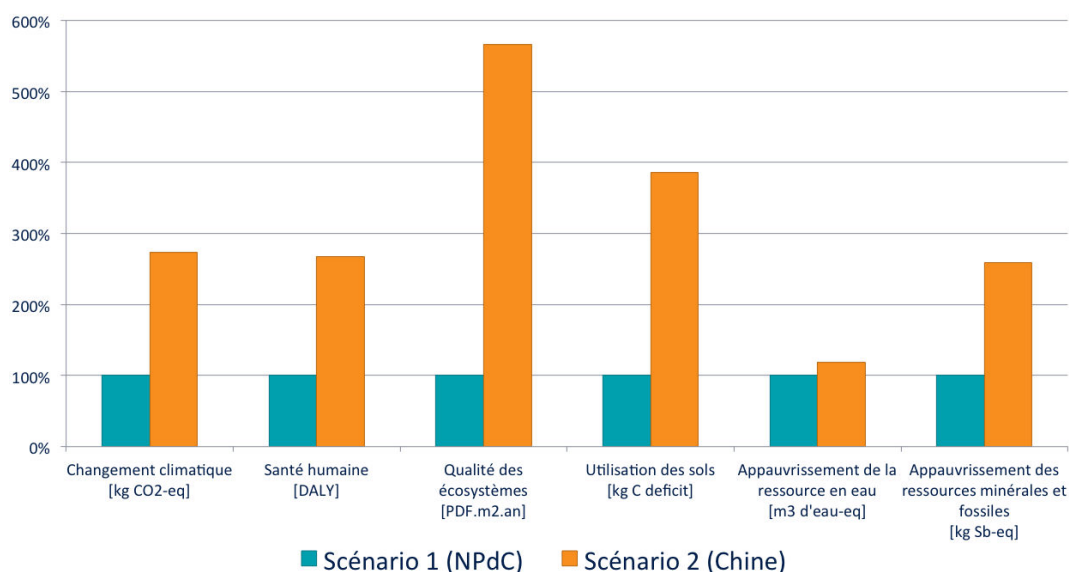


Figure 67 - Impacts associés à la filière de recyclage de papier-carton en fonction du scénario évalué

En comparaison avec un recyclage en Chine, il est entre 2,5 et 6 fois plus intéressant de recycler localement en fonction des catégories d'impacts considérées. Seul l'impact sur l'appauvrissement de la ressource en eau semble être peu impacté par le passage d'une filière de recyclage en Chine. Il est particulièrement intéressant de noter que les analyses de sensibilité menées (allocation des impacts du transport en bateau, mix électrique utilisé lors du recyclage en France, efficacité du procédé de recyclage en Chine) ne font pas changer les conclusions principales, assurant la robustesse des résultats et valorisant la mise en place de filières locales.

De plus, les impacts environnementaux liés aux conséquences d'une disparition de la filière sont forts et restent en faveur de la sauvegarde d'une activité locale. L'approche sociale confirme les résultats obtenus par les ACV environnementales avec un plus fort impact de la filière chinoise, comme le montre la figure suivante.

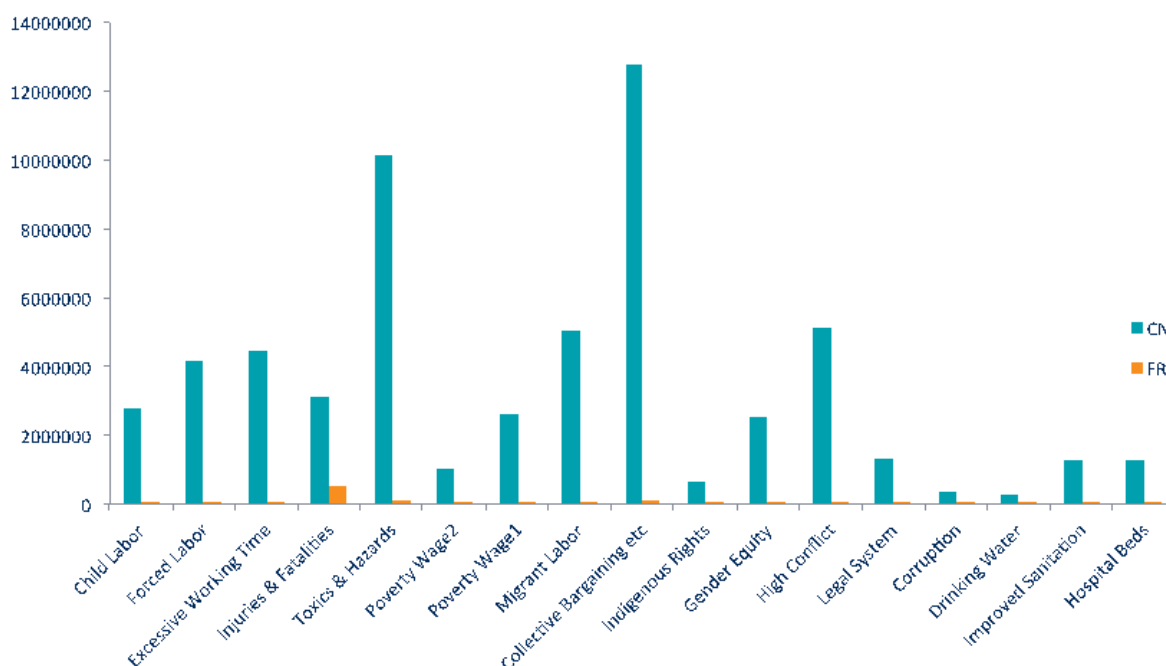


Figure 68 - Impacts sociaux associés à la filière de recyclage du papier-carton en fonction du pays

L'étude NordPackage montre comment l'utilisation d'approches complémentaires (ACV déchets, ACV conséquentielle, ACV sociale) peut permettre une mise en perspective plus importante des boucles matière et des projets d'économie circulaire.

Cas d'étude Placoplatre

Lors de la fabrication de certains de ses produits, Placoplatre intègre une partie de plâtre recyclé issu des déchets de construction. Placoplatre gère ainsi toute la chaîne de valeur depuis l'extraction des matières premières (réalisée à proximité du site de production) jusqu'à la collecte et la valorisation matière de la matière recyclée.

Le procédé de recyclage du plâtre est assez simple, peu consommateur d'énergie et produisant une matière première secondaire de bonne qualité. L'utilisation de plâtre recyclé n'a donc aucun impact sur la performance des produits de Placoplatre. Cependant, les déchets nécessaires pour le recyclage du plâtre sont dispersés et peuvent provenir de régions éloignées entraînant l'augmentation des distances de transports.

Au contraire, les gisements des ressources nécessaires à la production du plâtre vierge se situent aujourd'hui à proximité des usines fabriquant ce produit, limitant fortement les transports de matière. De plus, la fabrication du plâtre est une activité globalement peu impactante.

Au moment de réaliser son évaluation environnementale l'objectif du projet de Placoplatre n'était pas de comparer les différents exutoires possibles pour les déchets de plâtre issu de la construction mais d'identifier les enjeux environnementaux de leur produit. De plus, le gisement de déchets géré par Placoplatre est homogène, l'utilisation d'une **ACV produit** était donc entièrement adaptée.

Cependant, face aux enjeux de transport, les résultats obtenus montrent le recyclage comme une activité globalement plus impactante que l'extraction des ressources vierges et l'enfouissement des déchets de plâtre apparaît aujourd'hui à la lumière de l'ACV comme la pratique la moins impactante pour gérer leur fin de vie. Cette conclusion est en opposition avec la hiérarchie des déchets définie par la commission européenne et pointe certaines limites de l'ACV. Des méthodologies complémentaires, telles que l'ACV sociale et le MFA permettraient d'avoir une vision plus claire des conséquences de cette boucle matière et de mieux valoriser la non dissipation de la ressource.