

BOUCLES MATIERES, BOUCLES PRODUITS ET ACV

SYNTHESE

Mars 2020

Responsables scientifiques :

- **Sophie SFEZ, Luca PETRUCCELLI**

Vertech Group, 11 Rue Défly, 06000 Nice



- **Emmanuelle COR, Elise MONNIER**

CEA Liten, 17 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble



L'association SCORE LCA 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.

- ✓ 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.

SOMMAIRE

1.	Introduction	4
2.	Revue de la littérature – boucles « produit et matière »	5
1.	Contexte et objectif des études	5
2.	Approche méthodologique.....	5
3.	Catégories d'impact considérées	6
4.	Résultats obtenus dans les études	6
5.	Conclusions de la revue de la littérature	6
3.	Etudes de cas	7
1.	Cas n° 1, 2 et 3 : valorisation d'aimants permanents en fin de vie	7
1.1.	Description des scénarios	7
1.2.	Inventaire du cycle de vie	7
1.3.	Evaluation d'impact et analyse de sensibilité	7
1.4.	Résultats.....	8
2.	Cas n°4 : reconditionnement de pneus suivant un modèle d'économie de la fonctionnalité	8
2.1.	Description des scénarios	8
2.2.	Inventaire du cycle de vie	9
2.3.	Evaluation d'impacts et analyse de sensibilité	9
2.4.	Résultats.....	9
3.	Cas n°5 : remanufacturing de moteurs.....	10
3.1.	Description des scénarios	10
3.2.	Inventaire du cycle de vie	11
3.3.	Evaluation des impacts et analyse de sensibilité	11
3.4.	Résultats.....	11
4.	Cas n°6 : symbiose industrielle	12
4.1.	Description des scénarios	12
4.2.	Inventaire du cycle de vie	12
4.3.	Evaluation d'impacts et analyse de sensibilité	13
4.4.	Résultats.....	13
4.	Recommandations	14
	Recommandations pour la phase « pré-étude »	14
	Recommandations pour la définition de l'objectif et du champ de l'étude	14
	Recommandations pour la construction de l'inventaire	15
	Recommandation pour la caractérisation des impacts	15
	Recommandation pour l'interprétation des résultats.....	16
5.	Références.....	16

1. Introduction

Depuis le lancement par la Commission Européenne du plan d'action en faveur d'une économie circulaire, les mesures mises en œuvre pour stimuler des systèmes de production circulaires en sont nombreuses. Ces mesures ont pour objectif de passer d'un modèle linéaire à un modèle circulaire permettant la réduction de la consommation de matières premières vierges et la réduction de l'élimination des déchets. Cependant, il n'est pas clair quelles « boucles » adopter pour atteindre cet objectif. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil reconnu pour répondre à cette question en prenant en compte les performances environnementales des systèmes analysés. Cette étude fait suite aux précédentes études de SCORE LCA sur l'économie circulaire¹ en se concentrant sur les informations apportées par l'ACV pour orienter le choix d'une entreprise vers une boucle et les paramètres qui peuvent l'influencer.

La question du choix des boucles de valorisation se pose aux entreprises pour les flux des produits qu'elles mettent sur le marché et arrivant en fin de vie, et les flux de déchets et co-produits issus de leurs activités de production. Nous appellerons les boucles relatives aux premiers les boucles « produit et matière » et les boucles relatives aux seconds les boucles « déchets et co-produits », qui comprennent les systèmes de symbiose industrielle.

Les deux familles de boucles « produit et matière » sont les boucles ouvertes et les boucles fermées. Une boucle fermée est un système dans lequel une partie ou la totalité des matériaux d'un produit en fin de vie est réinjectée dans le même système, produisant ainsi le même produit. Une boucle ouverte est définie par la valorisation d'une partie ou de la totalité des matériaux d'un produit dans un autre système de production, aboutissant en un produit remplissant une fonction différente du produit initial.

Lorsqu'un produit arrive effectivement en fin de vie, il peut réintégrer un système de production à chacune des étapes de production, suivant les routes de valorisation suivantes :

- **Réemploi** : valorisation des substances, matières ou produits qui ne sont pas devenus des déchets (en « fin d'usage ») pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.
- **Préparation en vue de la réutilisation** : toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement. Elle comprend notamment :
 - *Le remanufacturing* : ensemble de procédés consistant à restaurer un produit pour obtenir des performances identiques voire supérieures au produit d'origine.
 - *Le reconditionnement* : restauration d'un produit sans avoir pour objectif de le remettre à neuf mais permettant son fonctionnement.
 - *Le repurposing* : ensemble de procédés consistant à restaurer un produit en un produit ayant des fonctions différentes du produit d'origine.
- **Recyclage** : toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins.
- **Autres opérations** : toutes autres opérations telles que la valorisation énergétique, le traitement des déchets pour la production de fuel et l'utilisation pour des opérations de remblaiement.

Même si la hiérarchie des déchets apparaît comme un premier guide permettant d'orienter les décideurs vers un choix de traitement des déchets, ce choix se doit de rester appuyé sur des analyses au cas par cas. Les questions suivantes concernant la priorisation des boucles de l'économie circulaire se posent : *Que nous apprennent les études ACV sur les boucles de l'économie circulaire les plus performantes d'un point de vue environnemental ? Peut-on identifier des contextes favorisant une boucle plutôt qu'une autre d'un point de vue environnemental ? Peut-on identifier des paramètres de modélisation qui déterminent le plus ce choix ?*

¹ SCORE LCA, Economie circulaire : concepts et méthodes d'évaluation, 2015, 138 pages, n° 2014-02. www.scorelca.org

Cette étude a pour objectif d'apporter des éléments de réponse en suivant deux étapes : une revue de la littérature et une analyse de six cas d'étude.

2. Revue de la littérature – boucles « produit et matière »

La revue de la littérature a été menée dans le but d'identifier des publications (rapport, articles scientifiques etc.) comparant au moins deux boucles de valorisation sur base d'une ACV.

1. Contexte et objectif des études

Vingt études comparant différentes boucles de l'économie circulaire et une étude comparant un ralentissement de boucle avec une boucle de recyclage ont été identifiées. La majorité de ces études a été effectuée en Europe dans les secteurs des Equipements Electriques et Electroniques, des emballages et de l'automobile. Parmi les 20 études comparant des boucles, 69 cas de boucles sont analysés, un cas de boucle représentant un couple produit-boucle. Les boucles de recyclage sont les plus présentes (67% des boucles), suivies par les boucles de préparation à la réutilisation (20%) et de réemploi (13%). Les boucles ouvertes et fermées représentent respectivement 42 et 53% des boucles. Les 69 cas de boucles identifiés permettent d'analyser 56 comparaisons par paires. La comparaison la plus présente est celle de deux boucles de recyclage ouvertes.

2. Approche méthodologique

L'analyse des approches suivies a permis d'identifier trois types d'approches ACV (Figure 1).

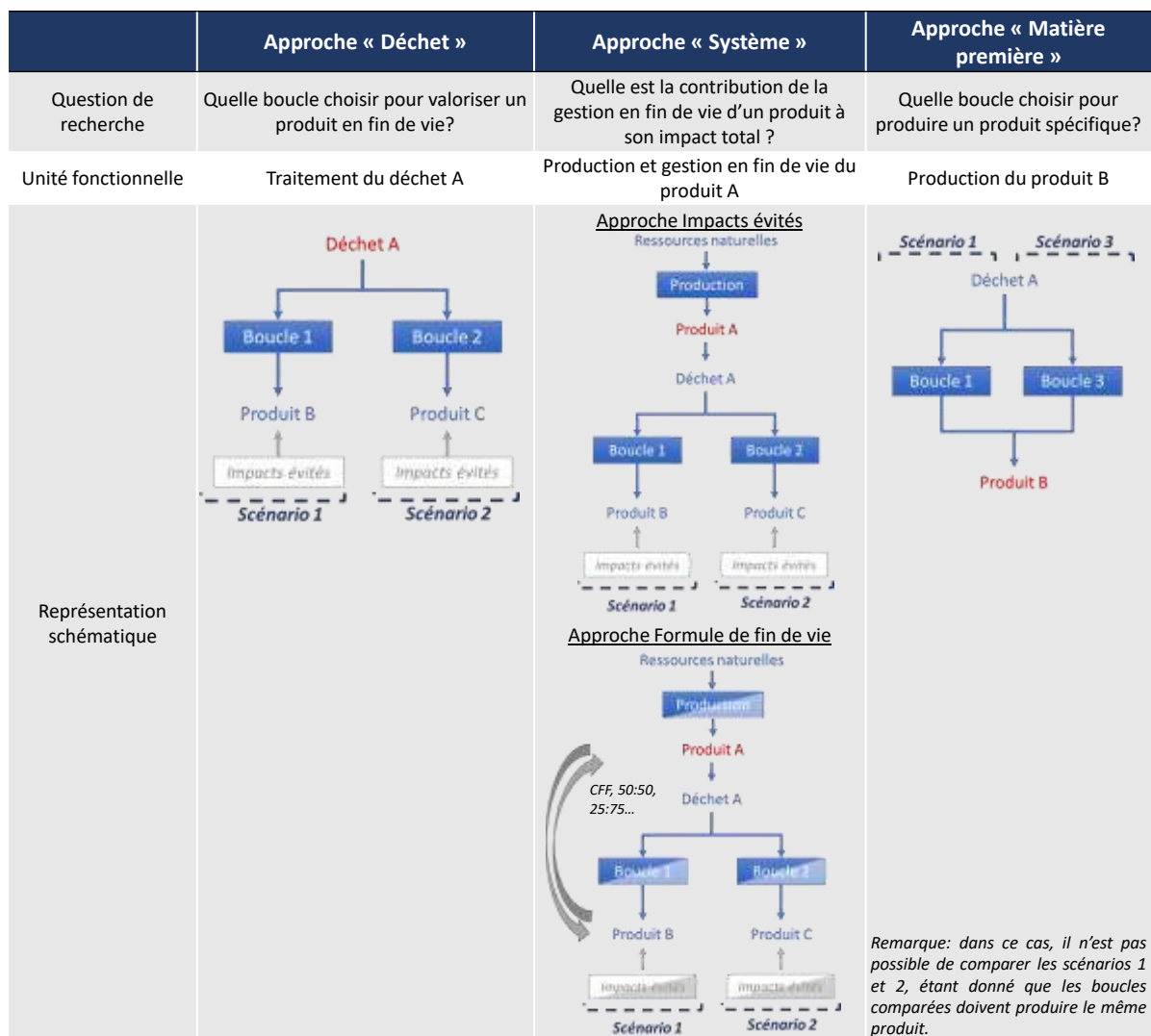


Figure 1: Représentation schématique des différentes approches possibles pour comparer des boucles de l'économie circulaire

Celles-ci ont été intitulées les approches « Déchet » (suivie dans 33% des études), « Système » (40% des études) et « Matière première » (27% des études). Ces trois approches se caractérisent par des frontières du système et des unités fonctionnelles différentes et par conséquent par la question de recherche à laquelle elles répondent.

Différentes boucles peuvent avoir des bénéfices différents sur l'environnement par la production de produits ou services. Généralement, ces bénéfices sont considérés par la méthode de substitution, qui soustrait les impacts évités par la production d'un nouveau produit/service à l'impact total des procédés de valorisation. Dans le cas de l'approche « Système » une Formule de fin de vie (type Formule de l'Empreinte Circulaire²) peut aussi être appliquée. Dans ce cas, les impacts des procédés de valorisation et les impacts évités sont alloués aux différents produits issus de la chaîne de valeur sur base de facteurs d'allocation.

3. Catégories d'impact considérées

Les catégories d'impact relatives à la consommation de ressources sont des catégories clés à prendre en compte pour l'étude de la durabilité des systèmes d'économie circulaire. Cependant, l'analyse des publications montre une couverture incomplète des catégories d'impact de consommation des ressources, ce qui permet de ne dresser que des conclusions partielles sur la hiérarchie des boucles et leur potentiel d'augmentation de l'autosuffisance des régions ou organisations qui les mettent en place.

4. Résultats obtenus dans les études

Les conclusions relatives à la validation ou non de la hiérarchie des déchets sont examinées. Parmi les 27 comparaisons permettant de répondre à cette question, 21 valident la hiérarchie des déchets, contre 6 qui ne la valident pas.

Parmi les 11 comparaisons comparant une boucle fermée et une boucle ouverte, 6 concluent sur l'avantage des boucles ouvertes par rapport aux boucles fermées, 2 obtiennent des résultats qui ne sont pas clairs quant à la boucle à favoriser, et 3 concluent sur l'avantage des boucles fermées par rapport aux boucles ouvertes.

Sur les 21 études identifiées, 15 réalisent une analyse de sensibilité. Parmi ces études, 7 identifient des paramètres qui vont changer les conclusions de l'étude. Dix paramètres contribuent à changer les résultats sur la hiérarchie des boucles dans au moins une étude (ex : durée de 1^{ère} vie, choix du produit évité et méthode de caractérisation des impacts).

5. Conclusions de la revue de la littérature

Les apprentissages pouvant être tirés de l'analyse de la littérature sont les suivants :

- Les boucles de réemploi/préparation en vue de la réutilisation ont en grande majorité un impact environnemental plus faible que les boucles de recyclage.
- Pour les produits avec une forte contribution de la phase d'utilisation et des progrès technologiques rapides permettant de diminuer l'impact de l'utilisation, l'avantage du réemploi/préparation en vue de la réutilisation par rapport au recyclage dépend du temps, des améliorations technologiques permettant une réduction de l'impact de l'utilisation étant réalisées.
- Les boucles fermées n'apparaissent pas moins impactantes que les boucles ouvertes.
- L'analyse des études a permis d'identifier des paramètres (10) pouvant changer la hiérarchie des boucles de l'économie circulaire.

² Pour plus d'information sur son application, se référer à l'étude SCORE LCA, Applications multiples en ACV : aspects méthodologiques et exemple du calcul des impacts environnementaux des batteries bénéficiant d'une seconde vie, 2019, N° 2017-04. www.scorelca.org

3. Etudes de cas

1. Cas n° 1, 2 et 3 : valorisation d'aimants permanents en fin de vie

1.1. DESCRIPTION DES SCENARIOS

Ces cas comparent les performances environnementales de trois voies de valorisation d'aimants permanents d'éoliennes en fin de vie : remanufacturing, recyclage par refonte des aimants et recyclage par extraction des terres rares. La Figure 2 synthétise les grandes étapes de ces 3 voies (en bleu les procédés propres au remanufacturing, en orange au recyclage par refonte et en vert au recyclage par extraction des terres rares). L'unité fonctionnelle est « la gestion en fin de vie d'une tonne d'aimants permanents utilisés dans une éolienne ». Tous les procédés du démantèlement de l'éolienne à la production d'aimants pour les cas 1 et 2 et d'extraits de terres rares pour le cas 3 sont inclus dans les frontières du système. L'approche suivie est une approche « Déchet » et les bénéfices de la valorisation sont pris en compte par la méthode des impacts évités.



Figure 2: Etapes des trois boucles de valorisation des aimants permanents en fin de vie

1.2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Les procédés de valorisation sont modélisés sur base de données expérimentales de procédés développés par le CEA. Les données concernant le revêtement et les finitions sont tirées de Sprecher et al. (2014). Pour les cas 1 et 2, les impacts évités sont ceux de la production d'aimants permanents neufs en Chine issu de la Base de Donnéesecoinvent. Pour le cas 3, les impacts évités sont la production d'oxydes de terres rares à partir d'activité minières. De plus, le nickel est récupéré et évite donc l'extraction de nickel vierge. Dans les 3 cas, la qualité des produits sortants est la même que les produits issus de ressources primaires.

1.3. EVALUATION D'IMPACT ET ANALYSE DE SENSIBILITE

La méthode CML v3.05 est appliquée. Une analyse de sensibilité est menée sur :

- **Approche ACV :** L'approche « Matière première » est testée, avec comme unité fonctionnelle « une tonne d'aimants permanents prêts à être utilisés dans une éolienne » pour les cas 1 et 2 et « la production d'1 kg d'oxydes de terres rares » pour le cas 3. Les aimants en fin de vie sont considérés libres de tout impact environnemental.
- **Méthode de caractérisation des impacts :** calcul des impacts avec les méthodes ILCD v1.10 et Impact 2002+ v2.14.

- *Données d'inventaire du procédé de recyclage* : estimations des données expérimentales à l'échelle industrielle.
- *Données d'inventaire des produits évités* : production d'aimants permanents neufs en Europe.

1.4. RESULTATS

Le remanufacturing apparaît comme la boucle avec l'impact environnemental le plus faible. A l'échelle du laboratoire, l'impact du recyclage 1 est plus élevé que celui du recyclage 2 (Figure 3).

Avec des données estimées à l'échelle industrielle, la tendance s'inverse, résultant en un recyclage par extraction des terres rares moins intéressant d'un point de vue des émissions et de consommation de ressources fossiles. Cependant, le recyclage par extraction des terres rares a un impact inférieur sur la consommation de métaux et minéraux puisqu'il permet la valorisation des matières à leur plus haute valeur (dans ce cas le nickel, valorisé dans une boucle de recyclage mais pas dans l'autre).

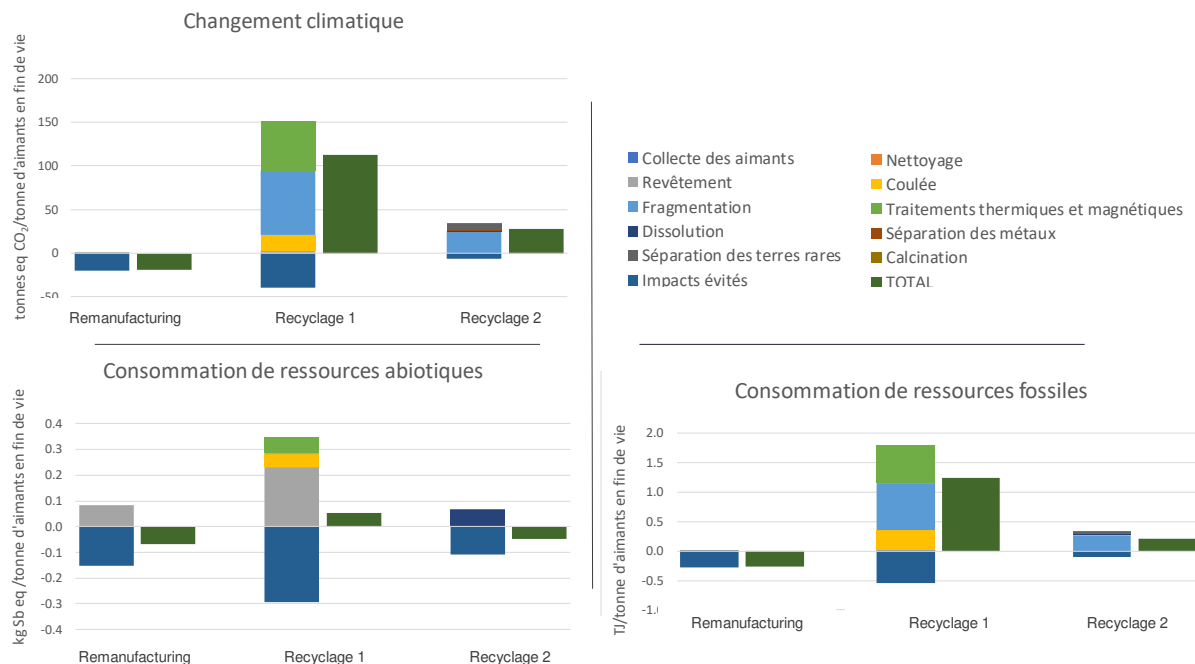


Figure 3: Résultats de l'ACV du remanufacturing et recyclage en boucle fermée d'une tonne d'aimants permanents en fin de vie (CML v3.05)

L'approche « Déchet » permet de comparer les trois voies de valorisation d'aimants en fin de vie alors que l'approche « Matière première » permet de comparer d'une part la production d'aimants à partir d'aimants en fin de vie avec la production d'aimants à partir de matière première primaire, et d'autre part la production d'oxydes de terres rares à partir d'aimants en fin de vie avec celle à partir de matière première issue d'activités minières. La production d'aimants neufs a un impact plus élevé pour les trois catégories d'impact étudiées en comparaison à la production d'aimants à partir d'aimants en fin de vie. Cependant, la production d'oxydes de terres rares à partir de matière première primaire apparaît préférable au recyclage des terres rares à partir d'aimants en fin de vie. Le choix d'utiliser des oxydes de terres rares issus du recyclage ou d'activité minière dépend de la problématique environnementale priorisée par le secteur en question (e.g., préservation des ressources minérales ou réduction des émissions de gaz à effet de serre).

2. Cas n°4 : reconditionnement de pneus suivant un modèle d'économie de la fonctionnalité

2.1. DESCRIPTION DES SCENARIOS

Le système étudié est celui mis en place par Michelin dans son offre Michelin Fleet Solutions™ à destination de flottes de véhicules. Il est basé sur le principe d'économie de la fonctionnalité : la vente est celle d'un service et non d'un produit. Les clients optant pour cette offre payent les services de Michelin sur base des kilomètres parcourus plutôt que par pneu acheté. Le service inclut notamment la fourniture des pneus et des inspections régulières. Michelin est donc responsable de la maintenance des pneus et de leur reconditionnement. Ce dernier inclut le recreusage et le rechapage.

L'objectif de ce cas d'étude est de comparer les performances environnementales du modèle mis en place par Michelin pour une flotte de poids-lourds à celles du modèle conventionnel de vente des pneus. L'unité fonctionnelle est l'« ensemble des pneumatiques de gamme régionale « X Multi » équipant une flotte en France de 400 véhicules poids-lourd parcourant 100 000 km par an pendant 5 ans dans un contexte de production et de fin de vie Européen ».

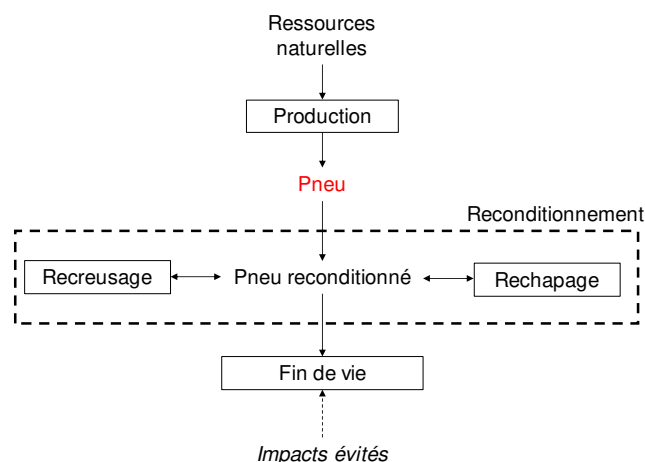


Figure 4: Etapes du cycle de vie des deux scénarios comparés (en rouge le flux de référence associé à l'unité fonctionnelle)

Les étapes du cycle de vie des pneus sont les mêmes pour les deux scénarios. Quatre paramètres les différencient :

- *Hauteur de retrait* : profondeur des rainures des pneus à laquelle les pneus sont retirés de la circulation ;
- *Taux de recreusage* : pourcentage des pneus subissant un traitement de recreusage ;
- *Pourcentage de sous-gonflage* : différence moyenne entre les pressions réelle et recommandée des pneus en circulation ;
- *Taux d'articles détériorés* : pourcentage de pneus nécessitant d'être changés suite à un incident lors de leur usage.

Les procédés inclus dans le périmètre de l'étude sont la production des pneus, leur distribution, leur usage, les procédés de recreusage et de rechapage et leur fin de vie.

2.2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Les données d'inventaire ont été collectées par Michelin pour les deux scénarios. Les paramètres les différenciant sont présentés dans le Tableau 1. Le mix de fin de vie comprend des voies de valorisation matière et énergétique, sur base de données Aliapur (Aliapur 2010).

Tableau 1: Paramètres différenciant les deux systèmes comparés

Paramètre	Système conventionnel	Système « économie de la fonctionnalité »
Hauteur de retrait	4 mm	4.5 mm
Taux de recreusage	50%	90%
Pourcentage de sous-gonflage	10%	0%
Taux d'articles détériorés	20%	15%

2.3. EVALUATION D'IMPACTS ET ANALYSE DE SENSIBILITE

La méthode CML v3.05 est appliquée. Une analyse de sensibilité est menée sur quatre paramètres : hauteur de retrait (testée à 1.6 mm au lieu de 4.5 mm dans le scénario Michelin), le taux de recreusage (augmenté de 10% dans le scénario Michelin), le taux d'article détériorés et la réduction de la durée de vie due au sous-gonflage (tous deux diminués de 10%).

2.4. RESULTATS

Le système d'économie de la fonctionnalité a un impact inférieur à celui du système conventionnel. Les bénéfices sont minimes pour certaines catégories d'impact mais peuvent atteindre 9% de

réduction d'impact pour les catégories avec une contribution prépondérante des matières premières pour la fabrication des pneus (e.g., ADP éléments, voir Figure 5). Le système mis en place a le potentiel d'être amélioré, notamment en diminuant la hauteur de retrait. Aujourd'hui, ceux-ci sont retirés à une hauteur moyenne de 4.5 mm contre 4 mm pour le système conventionnel. Tout effort visant à réduire cette hauteur de retrait permettrait une augmentation conséquente des bénéfices du système mis en place par Michelin.

Ce cas d'étude révèle les différences potentielles entre les bénéfices estimés avant la mise en œuvre de tels systèmes et les bénéfices réels, qui peuvent s'avérer moindre. En effet, une hauteur de retrait inférieure à celle du système conventionnel avait tout d'abord été communiquée par l'équipe de Michelin, basé sur l'argument d'un meilleur contrôle des pneus permettant de « pousser » plus loin leur utilisation. En réalité, il a été observé que la hauteur de retrait est plus élevée que le système conventionnel car la responsabilité est entièrement celle de Michelin, qui va par conséquent réduire au maximum les risques d'accidents qui pourraient être imputés à une mauvaise gestion des pneus. (Voir rapport complet)

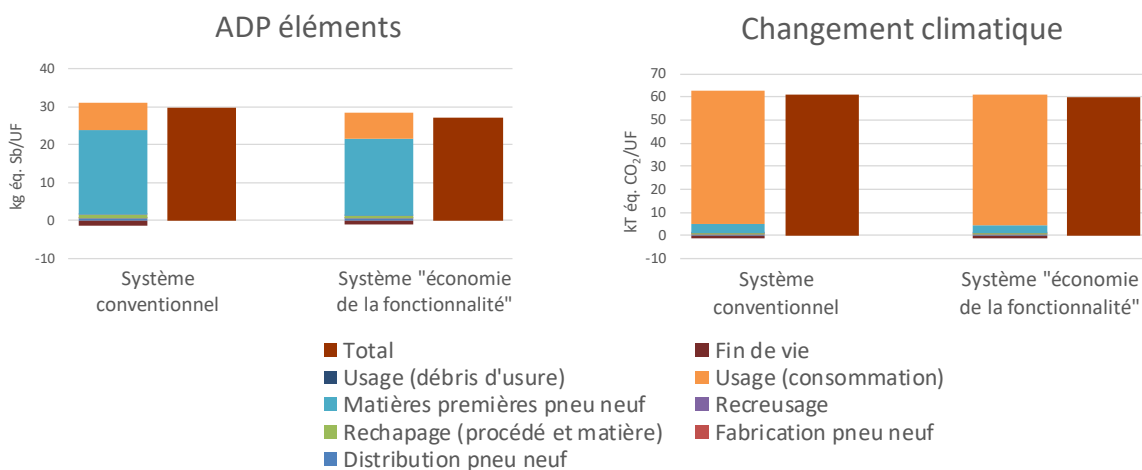


Figure 5: Comparaison des différences d'impacts des deux systèmes sur la consommation de ressources (à gauche) et le changement climatique (à droite)

3. Cas n°5 : remanufacturing de moteurs

3.1. DESCRIPTION DES SCENARIOS

Ce cas d'étude a pour objectif de comparer les performances environnementales d'un moteur neuf avec celles d'un moteur remanufacturé par Renault à Choisy-le-Roi. L'étude se concentre sur un type de moteur appelé K9K. Les moteurs proviennent d'un réseau de garages Renault et franchisés offrant le service d'échange standard et envoyés vers le site de Choisy-le-Roi. Les moteurs y sont démontés et lavés. Lors du démontage, les pièces non conformes sont écartées et envoyées pour traitement de fin de vie. Les moteurs sont remontés à partir des sets de pièces préparés, composés de pièces provenant d'un ancien moteur et de pièces neuves. Pour chaque moteur remanufacturé, environ 1.2 moteurs usagés/en fin de vie ont été nécessaires en entrée (Figure 6).

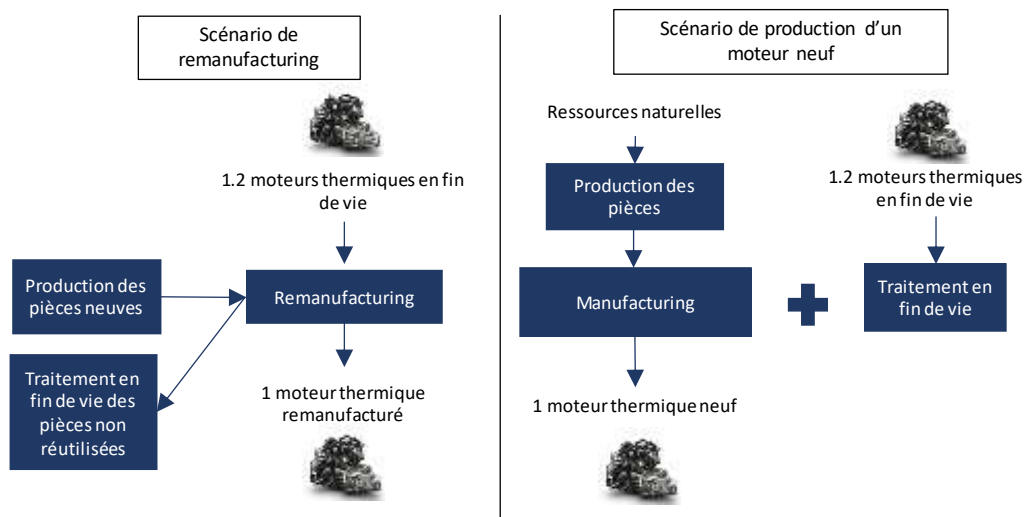


Figure 6: Approche suivie pour la comparaison d'un moteur remanufacturé avec un moteur neuf

Une approche « Matière première » est suivie. L'unité fonctionnelle est « la production d'un moteur Renault et traitement de fin de vie de moteurs défectueux ».

3.2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Remanufacturing

L'impact matière d'un moteur remanufacturé correspond à l'impact des pièces neuves nécessaires à la production d'un nouveau moteur. Le bilan matière d'un moteur et le taux de remplacement des pièces communiqués par Renault ont donc été utilisés pour quantifier les matériaux neufs consommés. En moyenne, 32% du poids d'un moteur remanufacturé est constitué de pièces réutilisées. Les données de production du site de Choisy-le-Roi ont été utilisées. Une allocation massique est appliquée pour allouer ces données aux moteurs K9K sortant. Toutes les pièces remplacées sont envoyées vers une filière de recyclage spécifique, exceptées les pièces en plastique, incinérées.

Moteurs neufs

Les données relatives aux sites de production ont été communiquées par Renault pour le site de production des moteurs neufs. Les chutes de production sont estimées sur base des déchets produits par le site. Pour les pièces non produites par le site (ex : les joints plastiques, les pièces en verre etc.), aucune chute de production n'est considérée. Les chutes de production, dont seules celles de l'aluminium, la fonte et l'acier sont prises en compte, sont envoyées au recyclage. L'hypothèse est faite que la fin de vie d'un moteur est la même qu'un véhicule hors d'usage (VHU), c'est-à-dire qu'il est envoyé en centre de traitement VHU. Les données sur les quantités de matières extraites des VHU et leur destination par matière sont tirées du rapport de Deloitte Développement Durable (2017).

3.3. EVALUATION DES IMPACTS ET ANALYSE DE SENSIBILITE

La méthode d'évaluation d'impact choisie est CML v3.05. Dans l'analyse de sensibilité, une approche « Système » est appliquée, avec pour unité fonctionnelle « la production et le traitement en fin de vie d'un moteur Renault ». Dans le scénario de remanufacturing, le traitement en fin de vie est le remanufacturing, duquel est produit 0.8 moteur remanufacturé. Le scénario de remanufacturing produit donc 1.8 moteurs. Pour remplir une fonctionnalité identique, le scénario de référence (« moteur neuf ») doit donc considérer la production et gestion en fin de vie de 1.8 moteurs neufs. L'analyse de sensibilité teste également la variation du nombre de boucles de remanufacturing.

3.4. RESULTATS

Les résultats montrent un avantage clair du remanufacturing par rapport à un scénario de production de moteurs neufs pour toutes les catégories d'impact (e.g., -28 kg éq. CO₂/UF). Ces bénéfices sont dus à une moindre consommation de matière première mais également à une meilleure gestion des métaux « précieux ». Ceux-ci, bien que peu réutilisés, sont envoyés dans des filières de fin de vie

spécifiques après démantèlement sur le site de remanufacturing, alors qu'ils ne sont pas valorisés par la voie classique de gestion d'un moteur en fin de vie.

Les résultats avec l'approche « Système » révèlent un bénéfice plus faible du remanufacturing par rapport à celui obtenu avec l'approche « Matière première ». Cependant, ils considèrent un système réaliste dans lequel la production d'un premier moteur est nécessaire avant le remanufacturing. En considérant le moteur entrant sur le site de remanufacturing libre de tout impact environnemental, l'approche « Matière première » n'autorise pas une comparaison juste entre les deux scénarios. L'analyse de sensibilité a aussi montré que la différence d'impact entre les deux scénarios obtenus avec l'approche « Matière première » n'est atteinte avec l'approche « Système » que dans le cas idéal d'un nombre infini de boucles et d'une efficacité du remanufacturing de 100%. L'approche « Matière première » surestime donc les bénéfices du remanufacturing.

4. Cas n°6 : symbiose industrielle

4.1. DESCRIPTION DES SCENARIOS

Le cas d'étude choisi est celui théorique d'un échange de chaleur fatale entre un site sidérurgique et un quartier résidentiel en France. La demande de chaleur du quartier résidentiel est basée sur Kachacha et al. (2019) (116 GWh/an). La capacité de production du site sidérurgique est estimée à 7.5 MT d'acier par an, sur base d'une aciérie identifiée dans le nord de la France. La chaleur fatale peut être considérée comme un déchet, donc libre de tout impact environnemental. L'unité fonctionnelle est la « production de chaleur délivrée à un quartier résidentiel dans le nord de la France correspondant à une demande de 116 GWh/an ».

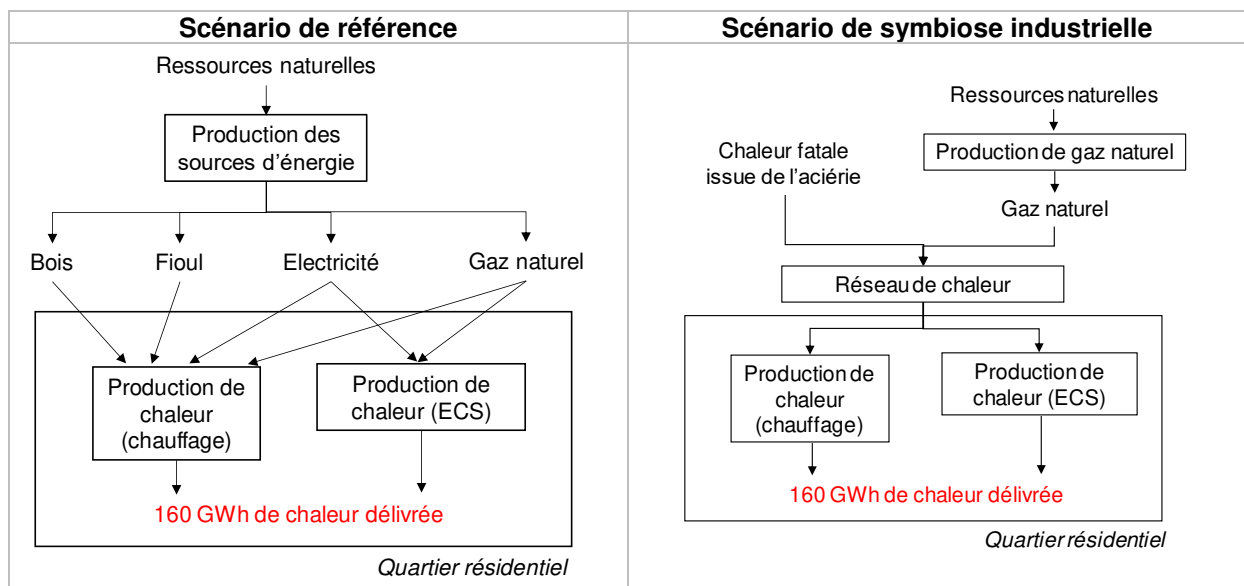


Figure 7: Schémas représentant les scénarios de référence et scénario de symbiose industrielle dans le cas de l'application de l'approche « zero-burden » (ECS : Eau chaude sanitaire)

Dans le scénario de référence, les frontières du système incluent la production des sources d'énergie utilisées pour produire de la chaleur ainsi que leur conversion en chaleur dans les logements. Les infrastructures sont incluses dans les frontières. Dans le scénario de symbiose industrielle, les frontières incluent la production de gaz naturel nécessaire pour compléter la demande et l'infrastructure du réseau de chaleur (conduites et échangeurs de chaleur).

4.2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Le mix de production de chaleur dans le scénario de référence est tiré des statistiques nationales sur la consommation d'énergie par usage résidentiel publiées par l'ADEME³.

³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-residentiel>

13% de la chaleur consommée par le secteur du fer et de l'acier est émise sous forme de chaleur fatale (Papapetrou et al. (2018)). La chaleur fatale du site sidérurgique est donc estimée sur base de la chaleur consommée par le site (donnéesecoinvent). 3.4×10^8 MJ de chaleur fatale est estimée récupérable du site par le réseau de chaleur. 5% de la chaleur est utilisée pour le fonctionnement des pompes et 10% perdue par diffusion (Berge et al. 2015). 3.1×10^8 MJ de chaleur fatale peut donc être livrée au quartier résidentiel (74% de la demande en chaleur). La demande en chaleur est complétée par du gaz naturel.

L'infrastructure du réseau de chaleur est modélisée sur base de données fournies par EDF sur la longueur et le type de conduites ainsi que le nombre et le type d'échangeurs de chaleur nécessaires pour un réseau similaire. Une durée vie de 20 ans est considérée pour l'infrastructure (Oliver-Solà et al. 2009).

4.3. EVALUATION D'IMPACTS ET ANALYSE DE SENSIBILITE

La méthode d'évaluation d'impact choisie est la méthode CML v3.05. Une analyse de sensibilité est menée sur trois paramètres :

- L'intégration de l'impact de la production de chaleur dans l'analyse. Deux approches sont testées :
 - Expansion du système : l'unité fonctionnelle est définie comme *la production de 7.5 MT d'acier et la production de chaleur délivrée à un quartier résidentiel dans le nord de la France correspondant à une demande de 116 GWh/an* ;
 - Allocation des impacts de la sidérurgie à la chaleur fatale et à l'acier. La fonction de production d'acier est exclue de l'unité fonctionnelle. Celle-ci est définie comme *production de chaleur délivrée à un quartier résidentiel dans le nord de la France correspondant à une demande de 116 GWh/an*. Deux facteurs d'allocation sont testés : allocation exergétique (4.3%) et économique (0.2%).
- Le mix de production de chaleur : le mix Belge est utilisé pour évaluer son impact sur les résultats.
- La nature des logements desservis : l'hypothèse d'un quartier résidentiel constitué de 100% d'appartements ou 100% de maisons est testé.

4.4. RESULTATS

Les résultats montrent un net bénéfice du système de symbiose industrielle avec l'approche « zero-burden » pour toutes les catégories d'impact (e.g., -14.8 kg éq. CO₂/UF). La question de considérer la chaleur fatale d'un site industriel comme un déchet ou un co-produit a été discuté en comparant les résultats obtenus avec les approches « zero-burden », expansion du système et allocation (Tableau 2). Seules les approches « zero-burden » et expansion du système permettent de valoriser les bénéfices de mise en place d'un système de symbiose industrielle. En allouant une partie de l'impact du site industriel à la chaleur fatale, la méthode d'allocation défavorise le scénario de symbiose industrielle tout en réduisant en quantité infime l'impact du parc industriel (ici un site sidérurgique). Par conséquent, cette approche a pour résultat de décourager les collectivités à la mise en place d'un tel système tout en n'encourageant aucunement le parc industriel, dont la réduction d'impact est négligeable. Il est donc préférable de choisir une approche « zero-burden » ou d'expansion du système plutôt qu'une approche d'allocation. Il faut noter que cette conclusion peut varier d'un secteur à l'autre.

Tableau 2: Différences d'impact obtenues suivant l'approche zero-burden et les trois approches de modélisation

Approche	Différence d'impact entre les deux scénarios ⁽¹⁾	
	kT eq CO ₂	%
Zero-burden	-14.8	-71%
Expansion du système	-14.8	-1%
Allocation exergétique	+63.2	+304%
Allocation économique	-11.7	-56%

⁽¹⁾ Impact avec symbiose industrielle - Impact sans symbiose industrielle

Le cas d'étude a également montré l'importance d'utiliser des données géographiques spécifiques sur le mix de production de chaleur. Celui-ci impacte de façon importante l'amplitude des bénéfices de mise en place d'un système de symbiose industrielle.

4. Recommandations

Recommandations pour la phase « pré-étude »

Ces recommandations concernent la phase de réflexion avant la réalisation de l'étude. Ces recommandations peuvent servir de base pour argumenter la nécessité de réaliser une étude ACV comparant les impacts de boucles considérées par l'organisation.

- **Recommandation 1 : Ne pas supposer (et donc communiquer sans évaluation) un impact plus faible d'une boucle fermée par rapport à une boucle ouverte.**

L'analyse de la littérature n'a pas permis de tirer des conclusions sur la préférence des boucles fermées par rapport aux boucles ouvertes, ni d'une boucle dite « courte » par rapport à une boucle dite « longue ». Ce n'est donc pas un argument à utiliser à des fins de communication internes ou externes.

- **Recommandation 2 : Pour les produits caractérisés par une forte contribution de la phase d'utilisation notamment imputable à la consommation d'énergie, l'importance du taux d'évolution de la technologie est à avancer lors de discussions sur le choix d'une boucle.**

Ces produits peuvent parfois déroger à la hiérarchie des déchets. En effet, l'évolution technologique peut permettre aux produits neufs d'atteindre des performances de consommation énergétique (ou autre) qui contrebalancent le fort impact de production de nouvelles matières par rapport à ceux du réemploi/préparation en vue de la réutilisation. Cet argument peut permettre de justifier la réalisation d'une étude approfondie des impacts avant toute communication sur les bénéfices de mise en place d'un système de collecte pour réemploi/préparation en vue de la réutilisation.

- **Recommandation 3 : Si aucune ressource n'est disponible pour réaliser une analyse quantifiée des impacts des différentes boucles envisagées, la hiérarchie des déchets peut être suivie.**

Recommandations pour la définition de l'objectif et du champ de l'étude

- **Recommandation 4 : Choisir l'approche de modélisation en fonction de l'objectif de l'étude.**

Lors de la définition de l'objectif et du champ de l'étude, l'approche choisie doit être justifiée pour éviter toute surestimation des bénéfices liées aux boucles, comme illustré avec le cas n°5. Un arbre d'aide à la décision pour le choix de l'approche est proposé en Figure 8.

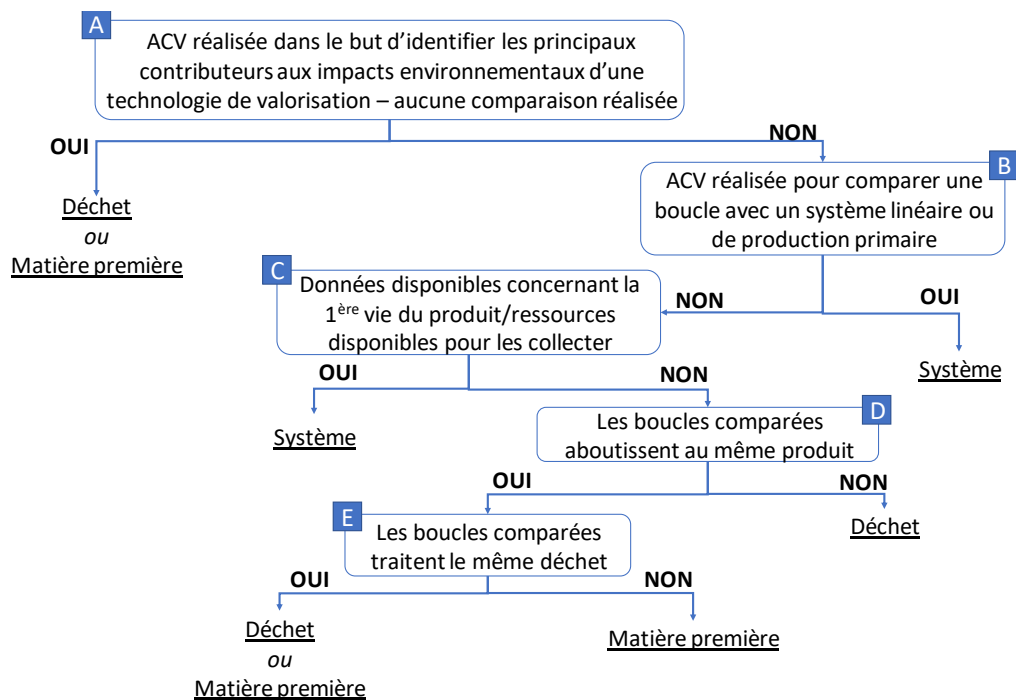


Figure 8: Arbre d'aide à la décision du type d'approche choisi en fonction de l'objectif de l'étude

- **Recommandation 5 : Inclure un schéma clair des choix méthodologiques suivis**

La revue de la littérature a révélé une difficulté à identifier l'objectif et le champ de l'étude choisis dans les publications. Il est donc recommandé d'ajouter un schéma reprenant les principaux choix méthodologiques de l'étude dans la section « Objectif et champ de l'étude ». Ce schéma reprend : l'unité fonctionnelle (ou flux de référence lorsque différents), les frontières du système et le choix d'allocation. Le but de ce schéma n'est pas de se substituer à un schéma complet présentant les frontières du système mais de permettre rapidement d'identifier la perspective choisie pour la comparaison des boucles.

Recommandations pour la construction de l'inventaire

- **Recommandation 6 : Réaliser une analyse des flux afin d'assurer l'étude d'un système cohérent.**

Une analyse des flux de matière le long des boucles est nécessaire pour modéliser un système cohérent et compréhensible. Des logiciels tels que STAN peuvent être utilisés comme outils de représentation et de vérification.

- **Recommandation 7 : Lors de l'évaluation prospective de systèmes d'économie de la fonctionnalité, la valeur des paramètres de modélisation entraînant une grande variabilité des résultats doit être vérifiée auprès d'une équipe technique spécialisée.**

L'analyse rétrospective du système d'économie de la fonctionnalité mis en place par Michelin sur ses pneus a montré qu'un paramètre clé supposé optimiser le système en réduisait en réalité la performance (tout en restant plus performant qu'un système « classique » de vente). Une discussion avec une équipe technique spécialisée par exemple dans la gestion des risques, aiderait à identifier les risques liés à la mise en œuvre d'un tel système, notamment concernant la responsabilité de l'entreprise, accrue dans le cas d'un système d'économie de la fonctionnalité.

Recommandation pour la caractérisation des impacts

- **Recommandation 8 : Choisir une méthode d'évaluation des ressources couvrant le plus grand nombre de ressources et permettant de distinguer ressources fossiles et minérales.**

Une ou une combinaison de méthode(s) de caractérisation des impacts environnementaux permettant de couvrir le plus grand nombre de ressources doit être considérée dans les études. De plus, les cas n°1, 2 et 3 ont montré qu'une distinction des résultats pour les ressources fossiles et les ressources minérales permet une meilleure compréhension des résultats.

Recommandation pour l'interprétation des résultats

- **Recommandation 9 : Si le contexte de mise en place d'une boucle peut varier, mener l'étude dans le but d'identifier les contextes pour lesquels la boucle étudiée est préférable à un autre système.**

L'analyse de la littérature a montré que la préférence d'une boucle par rapport à une autre peut varier d'un contexte à un autre. Lorsque certains éléments de contexte ne sont pas encore connus ou peuvent varier, il est recommandé de mener l'étude dans un but d'identifier ceux dans lesquels la boucle est favorable et non dans le but d'obtenir une réponse tranchée sur base de données fixes. Dans ce cas, l'analyse de sensibilité est une phase centrale de l'étude. Sur base de l'analyse de la littérature menée dans cette étude, une liste de paramètres clés à étudier est proposée dans le rapport complet.

5. Références

- Aliapur. 2010. "Analyse Du Cycle de Vie Pour 9 Voies de Valorisation Des Pneus Usagés Non Réutilisables. Document de Référence. Publication Juin 2010. R&D Aliapur."
- Bailey, Gwendolyn, P. James Joyce, Dieuwertje Schrijvers, Rita Schulze, Anne Marie Sylvestre, Benjamin Sprecher, Ehsan Vahidi, Wim Dewulf, and Karel Van Acker. 2020. "Review and New Life Cycle Assessment for Rare Earth Production from Bastnäsité, Ion Adsorption Clays and Lateritic Monazite." *Resources, Conservation and Recycling* 155 (April): 104675. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104675>.
- Baxter, John. 2019. "Systematic Environmental Assessment of End-of-Life Pathways for Domestic Refrigerators." *Journal of Cleaner Production* 208 (January): 612–20. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.173>.
- Bensadoun, Farida, Bart Vanderfeesten, Ignaas Verpoest, Aart W. Van Vuure, and Karel Van Acker. 2016. "Environmental Impact Assessment of End of Life Options for Flax-MAPP Composites." *Industrial Crops and Products* 94 (December): 327–41. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.09.006>.
- Berge, Axel, Bijan Adl-Zarrabi, and Carl-Eric Hagentoft. 2015. "Assessing the Thermal Performance of District Heating Twin Pipes with Vacuum Insulation Panels." *Energy Procedia* 78 (November): 382–87. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.678>.
- Bernstad, A., and J. la Cour Jansen. 2012. "Review of Comparative LCAs of Food Waste Management Systems – Current Status and Potential Improvements." *Waste Management* 32 (12): 2439–55. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2012.07.023>.
- Deloitte. 2018. "Rapport ADEME - Analyse Du Cycle de Vie de Dispositifs de Réemploi Ou Réutilisation (B to C) d'emballages Ménagers En Verre."
- Deloitte Développement Durable, Katherine SALÈS, Lorna LUCET, Radia BENVALLAM, ADEME, and Eric LECOINTRE. 2017. "Rapport Annuel de l'Observatoire Des Véhicules Hors d'Usage – Données 2015."
- European Commission. n.d. "Guidance on the Interpretation of the Term Backfilling." <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/4953052/Guidance-on-Backfilling.pdf/c18d330c-97f2-4f8c-badd-ba446491b47e>.
- Kachacha, Christina, Assaad Zoughaibb, and Cong Toan Tranc. 2019. "A Methodology to Design Flexible Heat Recovery in Industrial Parks: Application to District Heating Supply." In *Proceedings of ECOS 2019 - The 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.
- Morris, J., H.S. Matthews, and C. Morawski. 2011. "Review of LCAs on Organics Management Methods & Development of an Environmental Hierarchy. Prepared for: Alberta Environment, Edmonton, AB. February 2011."
- Oliver-Solà, Jordi, Xavier Gabarrell, and Joan Rieradevall. 2009. "Environmental Impacts of the Infrastructure for District Heating in Urban Neighbourhoods." *Energy Policy* 37 (11): 4711–19. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2009.06.025>.
- Papapetrou, Michael, George Kosmadakis, Andrea Cipollina, Umberto La Commare, and Giorgio Micale. 2018. "Industrial Waste Heat: Estimation of the Technically Available Resource in the EU per Industrial Sector, Temperature Level and Country." *Applied Thermal Engineering* 138 (June): 207–16. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.04.043>.
- Quantis, and Sofies. 2015. "Economie Circulaire : Concepts et Méthodes d'évaluation. Rapport Final. Octobre 2015. Etude ScoreLCA N° 2014-02."
- Richa, Kirti, Callie W. Babbitt, and Gabrielle Gaustad. 2017. "Eco- efficiency Analysis of a Lithium- ion

- Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy.” *Journal of Industrial Ecology* 21 (3): 715–30.
- Sfez, Sophie, Sophie Huysveld, and Jo Dewulf. 2018. “Environmental Impact Evaluation of the ReDesign Products. ReDesign Deliverable.”
- Six, L., F. Velghe, S. Verstichel, and S. De Meester. 2016. “Sustainability Considerations on the Valorization of Organic Waste.” *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products*, January, 287–307. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803622-8.00011-2>.
- Sprecher, Benjamin, Yanping Xiao, Allan Walton, John Speight, Rex Harris, Rene Kleijn, Geert Visser, and Gert Jan Kramer. 2014. “Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets.” *Environmental Science & Technology* 48 (7): 3951–58.
- Valentino, Giulia. 2017. “Life Cycle Assessment of PET Bottles: Closed and Open Loop Recycling in Denmark and Lombardy Region. Thèse de Master. Politecnico Milano.”
- Worrell, Ernst, and M.A. Reuter. 2014. *Handbook of Recycling: State-of-the-Art for Practitioners, Analysts, and Scientists*. 2014th ed. Elsevier.
- Zink, Trevor, Frank Maker, Roland Geyer, Rajeevan Amirtharajah, and Venkatesh Akella. 2014. “Comparative Life Cycle Assessment of Smartphone Reuse: Repurposing vs. Refurbishment.” *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (5): 1099–1109. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0720-7>.
- Ziout, A., A. Azab, and M. Atwan. 2014. “A Holistic Approach for Decision on Selection of End-of-Life Products Recovery Options.” *Journal of Cleaner Production* 65 (February): 497–516. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.10.001>.