

## APPLICATIONS MULTIPLES EN ACV : ASPECTS METHODOLOGIQUES ET EXEMPLE DU CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES BATTERIES BENEFICIANT D'UNE SECONDE VIE

### Synthèse

Septembre 2019

#### Responsables scientifiques

– Augustin Chanoine, Pierre-Alexis Duvernois, Flavien Colin,  
Chloé Devauze, Fabio Menten

Deloitte, 6 place de la Pyramide, 92908 Paris-La Défense cedex

– Hélène Teulon, Quentin Bézier, Valentin Rousseau

Gingko 21, 8 rue du Conseil de l'Europe, 91300 Massy-Palaiseau

**Deloitte.**



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.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) [www.ademe.fr](http://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.

# 1 Contexte, objectifs et contenu de l'étude

## 1.1. Contexte de l'étude

### ❖ *L'avènement conjugué de l'économie circulaire et de la transition énergétique*

Le concept d'**économie circulaire** est notamment apparu pour répondre aux enjeux d'utilisation efficace des ressources et aux impacts environnementaux associés. Le passage d'un modèle linéaire à un modèle fonctionnant en boucles fermées tend aujourd'hui à s'imposer. On distingue les boucles matière (recyclage) dans lesquelles les matériaux sont récupérés et réinjectés dans l'économie, et les boucles produit dans lesquelles les produits (soit dans leur ensemble soit en partie) sont réinjectés dans l'économie, après éventuelle réparation ou reconditionnement par exemple.

En parallèle, les politiques publiques, notamment en Europe et en France, ont fixé pour les années à venir des objectifs ambitieux de transition vers une production et une consommation d'énergie plus responsables. En particulier, le secteur des transports fait l'objet de plusieurs mesures spécifiques<sup>1</sup>, comme par exemple l'abandon de l'utilisation de voitures conventionnelles (à combustion interne) dans les villes à l'horizon 2050. Pour cela, l'accélération de la conversion du parc automobile vers de nouvelles motorisations (véhicules électriques) est essentielle.

Certains projets ou initiatives, comme la réutilisation de batteries de véhicules électriques pour des usages stationnaires en seconde vie, sont au carrefour de l'économie circulaire et de la transition énergétique puisque visant à la fois à optimiser l'utilisation des biens et services mais aussi à servir une production et une consommation énergétique plus durables.

### ❖ *En réponse, les méthodes d'évaluation notamment environnementale sont-elle adaptées ?*

La mise en place de projets dits « d'économie circulaire », ou pour répondre aux objectifs de transition énergétique pose donc la question de leur performance d'un point de vue environnemental et économique. Les méthodes de quantification d'impacts environnementaux, et l'ACV en particulier, doivent s'adapter pour une meilleure prise en compte de l'optimisation des boucles matières et produits ainsi que des spécificités des projets de transition énergétique, qui soulèvent de nouvelles questions. L'analyse de cycle de vie à long terme décrit, malgré le terme de « cycle », des systèmes linéaires, et s'est penché jusqu'à présent principalement sur les boucles matière sans considérer avec attention les boucles produit. L'émergence actuelle et le développement souhaitable d'une économie véritablement circulaire appellent à revisiter la méthodologie de l'ACV, en particulier concernant le traitement des vies multiples.

## 1.2. Objectifs et contenu de l'étude

Au vu de ces différents enjeux, les objectifs du projet initié par SCORELCA et son contenu ont été les suivants :

- A. Faire un **état de l'art des méthodologies d'ACV de traitement du réemploi et de la réutilisation** d'un produit (ayant durant son cycle de vie plusieurs vies, avec éventuellement des applications multiples), et en tirer des **recommandations pour le praticien ACV** sous un format opérationnel. L'état de l'art a été réalisé 1/ en recensant de façon exhaustive les publications d'ACV traitant les problématiques liées à la gestion de plusieurs vies successives et 2/ en réalisant une analyse détaillée des cinq publications jugées les plus pertinentes dans des fiches méthode pour en dégager les points méthodologiques les plus judicieux selon les cas de figure. La présente synthèse se concentre sur les recommandations pour le praticien ACV et ne revient pas sur l'état de l'art (qui a servi de base pour l'établissement des recommandations), présenté dans le rapport d'étude.

---

<sup>1</sup> SWD(2016) 226 final – Commission Staff Working Document : The implementation of the 2011 White Paper on Transport "Roadmap to a Single European Transport Area – towards a competitive and resource-efficient transport system" five years after its publication: achievements and challenges

- B. Illustrer ces méthodes sur un cas concret, via la réalisation d'une **ACV de batteries bénéficiant d'une seconde vie**. Le jeu de données et le cadrage méthodologique de cette ACV se sont appuyés sur une revue bibliographique des ACV de batteries (selon l'application, mobile, stationnaire, etc.) complémentaire la revue bibliographique méthodologique réalisée dans le cadre de l'état de l'art mentionné ci-dessus. Cette synthèse se focalise sur l'ACV et ne revient pas sur la revue bibliographique des ACV de batteries (présentée dans le rapport d'étude). En particulier, L'ACV réalisée est une illustration des enjeux méthodologiques et n'est pas assez complète pour fournir des valeurs d'impacts environnementaux précises
- C. A partir de la revue bibliographique d'ACV de batteries, **constituer une base de données structurée, utilisable pour une future méta-analyse**. Cette dernière partie, présentée dans le rapport d'étude, n'est pas abordée dans cette synthèse.

## 2 Recommandations pour la gestion des vies multiples en ACV

### 2.1. Préambule et guide de lecture des recommandations

L'objet de cette section est d'accompagner le praticien ACV dans la réalisation d'évaluations environnementales ou d'ACV incluant la considération de vies et/ou d'applications multiples, le réemploi ou la réutilisation d'un produit. Avant d'aborder ces recommandations, notons les points suivants :

- Dans le cadre du projet, un **glossaire** a été élaboré afin de mettre à disposition des définitions claires et précises des différents termes et enjeux évoqués. Un équivalent anglais a également été proposé dès qu'il existait. Le glossaire n'est pas présenté dans la présente synthèse mais fait l'objet d'une section dédiée dans le rapport d'étude.
- Comme mentionné précédemment, les recommandations présentées ci-après sont issues d'un travail d'analyse bibliographique méthodologique. Le fruit principal de ce travail a été l'analyse approfondie des cinq publications d'intérêt présentées dans le tableau suivant et restituées dans des **fiches méthode**.

Tableau 1 : publications portant sur les méthodologies de prise en compte des vies multiples en ACV analysées dans le cadre du projet

| Num. de la fiche | Titre de la publication                                                                              | Auteurs(s)                                                                                   | Date de diffusion | Approche utilisée pour le traitement des vies multiples                   |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1                | Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles                            | Kirti Richa, Callie W. Babbitt, Nenad G. Nenadic, Gabrielle Gaustad                          | 2015              | Comparaison entre extension des frontières du système et allocation       |
| 2                | Life cycle assessment aspects of reuse products                                                      | Andreas Pertl, Gudrun Obersteiner Stefan Salhofer                                            | 2011              | Allocation fondée soit sur la fonctionnalité soit sur la valeur marchande |
| 3                | Comparative life cycle assessment of smartphone reuse: repurposing vs. refurbishment                 | Trevor Zink, Frank Maker, Roland Geyer, Rajeevan Amirtharajah, Venkatesh Akella              | 2014              | Extension des frontières du système                                       |
| 4                | A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems | Leila Ahmadi, Steven B. Young, Michael Fowler, Roydon A. Fraser, Mohammad Ahmadi Achachlouei | 2015              | Extension des frontières du système                                       |
| 5                | The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment  | Bin Lu, Jingru Liu, Jianxin Yang, Bo Li                                                      | 2015              | MLCA (Multi-Life Cycle Assessment)                                        |

- Une enquête auprès de la communauté ACV via un sondage a permis de compléter la base de données des articles identifiés.

Ces différents éléments (notamment les fiches méthode), qui ont servi de base à l'élaboration des recommandations synthétisées ci-après, ne sont pas reprises dans cette synthèse mais sont présentés dans le rapport d'étude.

### Guide de lecture des recommandations

Les recommandations sont fournies sous la forme opérationnelle d'un **arbre de décision**, et structurées de la manière suivante :

- L'arbre de décision présenté au §2.2 permet de suivre le cheminement usuel relatif à l'intégration des vies multiples dans l'élaboration de l'ACV.
- La section 2.3 (page 8) reprend et explicite les principaux points de l'arbre de décision. Tous les blocs sont détaillés dans le rapport d'étude. La présente synthèse se focalise sur les blocs jugés les plus importants.

## 2.2. Arbre de décision

L'arbre de décision pour la prise en compte de vies multiples en ACV est présenté en page suivante. Les blocs à fond blanc en forme de rectangle sont des blocs « information », c'est-à-dire des blocs qui guident le praticien dans sa prise de décision, tandis que les blocs en forme de rectangle avec les bords repliés sont des blocs « question » desquels deux possibilités ou plus découlent.

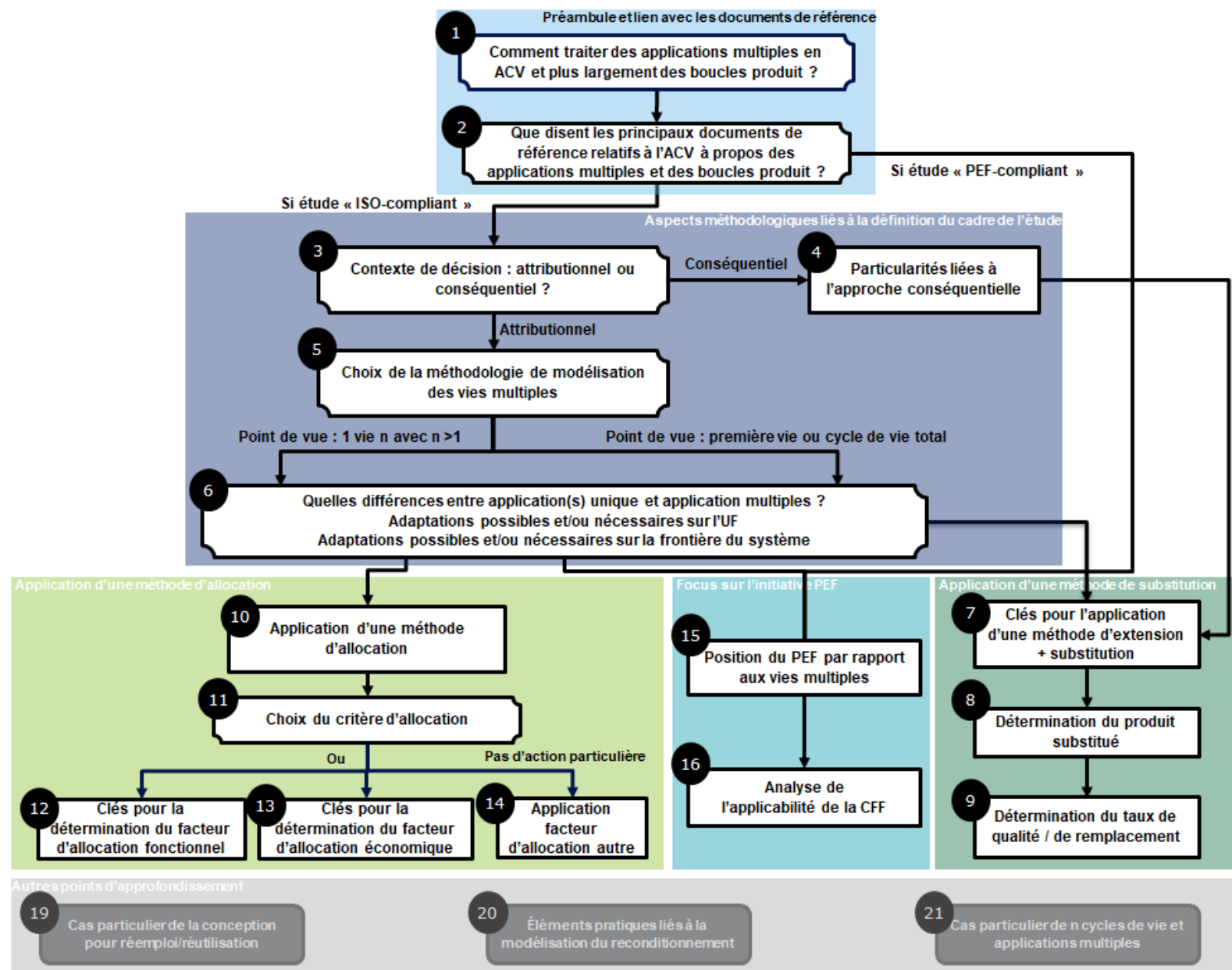


Figure 1 - Arbre de décision pour la prise en compte de vies multiples en ACV

## 2.3. Recommandations

### 2.3.1 Préambule et lien avec les documents de référence

#### ❖ #1 Comment traiter des applications multiples en ACV et plus largement des boucles produit ?

##### • Cas d'usages similaires entre les vies d'un même produit

Du point de vue de l'ACV, si l'usage de la seconde vie est le même qu'en première vie, alors le cycle de vie total reste inchangé et il est possible de considérer que l'unité fonctionnelle et le périmètre sont étendus. Il apparaît qu'il y a plusieurs façons de résoudre les problèmes liés à l'extension de la durée de vie d'un produit ou service sur **un usage similaire : soit par simple allongement de la durée de vie, soit par allocation entre deux usages successifs** – qui se ramène au cas précédent si l'allocation est simplement fondée sur la durée d'utilisation.

##### • Cas d'usages différents entre les vies d'un même produit

Si la seconde vie concerne un produit et/ou un usage différent(s), par exemple pour une batterie de voiture électrique qui serait réutilisée en usage stationnaire dans une seconde vie, **alors on peut estimer que la modélisation se rapproche conceptuellement de celle d'un procédé multifonctionnel**.

La spécificité de la problématique des vies multiples, par rapport à celle des coproduits, est que l'on ne connaît pas toujours l'état du produit à l'issue de sa première vie, ni à l'issue de sa n-ième vie, ni le nombre de vies successives, ni la performance du produit dans sa n-ième vie. Les étapes de réparation ou de reconditionnement entre deux vies successives sont également complexes à évaluer.

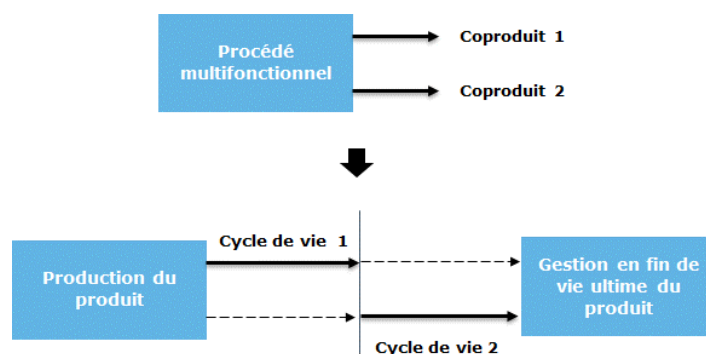


Figure 2 : Illustration du parallèle entre coproduits et multi-cycle de vie dans le cas de deux vies successives

#### ❖ #2 Que disent les principaux documents de référence relatifs à l'ACV à propos des applications multiples et des boucles produit ?

Une fois le parallèle fait entre vies multiples et multifonctionnalité, il est important de regarder ce que disent les textes normatifs et de référence sur le traitement en ACV des vies multiples, du réemploi et de la réutilisation.

Les normes ISO 14040 et 14044 hiérarchisent les modes de traitement de la multifonctionnalité de la façon suivante :

- **Subdivision du système** : ce cas de figure n'est pas approfondi dans l'étude. En effet les processus de réemploi et de réutilisation sont par nature difficiles à découper.
- **Extension des frontières du système** pour y inclure la ou les secondes fonctions et **substitution** des impacts associés au coproduit évité.
- **Allocation** des impacts entre les coproduits ou fonctions.

Les autres documents (ILCD Handbook, PEFCR Guidance, EN 15804, Affichage environnemental des produits de grande consommation) présentent une hiérarchie des modes de traitement de la multifonctionnalité globalement alignée sur les normes ISO. Néanmoins, le PEF et le référentiel pour

l'affichage des produits de consommation en France adoptent en parallèle une méthode d'allocation-substitution.

### 2.3.2 Aspects méthodologiques liés à la définition du cadre de l'étude

Le point #3 (« Contexte de décision : attributionnel ou conséquentiel ? ») développé dans le rapport d'étude distingue le cas d'une ACV attributionnelle de celui d'une ACV conséquentielle. Une ACV conséquentielle (voir le point #4 « Particularités liées à l'approche conséquentielle » dans le rapport d'étude) incluant une problématique de réemploi ou de réutilisation privilégiera une méthode de substitution pour la modélisation des vies multiples. Dans le cas d'une ACV attributionnelle, le point #5, synthétisé ci-dessous, permet d'orienter le praticien dans le choix de la méthode la plus appropriée.

#### ❖ #5 Choix de la méthodologie de modélisation des vies multiples

On part des questions suivantes : quel est le point de vue du praticien ACV ? L'objectif de l'étude ?

1. Point de vue « **tous les cycles de vie** ».

Si praticien ACV cherche à évaluer les impacts de l'essor de la réutilisation ou du réemploi d'une catégorie de produits à un niveau macroscopique (**approche conséquentielle**) il est recommandé – suivant la hiérarchie des modes de traitement de la multifonctionnalité<sup>2</sup> – de privilégier une **extension des frontières du système avec substitution**.

Si ce n'est pas le cas et que le praticien cherche à connaître les impacts précis associés à chaque vie dans une **approche attributionnelle** avant de les agréger au niveau cycle de vie, alors il doit plutôt se tourner vers des méthodes **d'allocation** ou bien vers la **Circular Footprint Formula (CFF)**.

2. Point de vue « **première vie** ». Cela s'applique lorsque le praticien ACV cherche à évaluer les impacts environnementaux d'un produit réutilisé / réemployé du point de vue de la première vie, c'est-à-dire du metteur sur le marché (amont) à un niveau microscopique. Dans ce cas il est également recommandé de privilégier si possible une **extension des frontières du système avec substitution**, Néanmoins, la **CFF reste également pertinente**, notamment si la définition du produit substitué est imprécise. Il est aussi possible de faire appel à une méthode d'allocation, mais à condition qu'elle ne prenne pas en compte les vies suivantes (par exemple si le facteur d'allocation est fondé sur la durée de vie totale, cette dernière n'est pas connue / définie à l'issue de la première vie).

3. Point de vue « **vie quelconque avec  $n > 1$**  ». Cela s'applique lorsque le praticien cherche à évaluer les impacts environnementaux d'un produit réutilisé / réemployé du point de vue de l'utilisateur (aval) à un niveau microscopique. Il est alors recommandé d'appliquer une **allocation entre les  $n$  cycles de vie couverts** (si possible) **ou bien d'appliquer la CFF**.

### 2.3.3 Application d'une méthode de substitution

#### ❖ #7 Conseils pour l'application d'une méthode d'extension des frontières du système avec substitution

Le principe d'une méthode de substitution appliquée à la réutilisation ou au réemploi est de ramener l'ensemble du cycle de vie à un procédé monofonctionnel, en soustrayant au système la fonction de la vie ultérieure non spécifiquement étudiée. L'application de la méthode de substitution pour des boucles produit ne diffère pas fondamentalement de la méthode pour des boucles matières.

#### ❖ #8 Clés pour la détermination du produit substitué

La méthode d'extension des frontières du système et substitution dans le cas de la réutilisation ou du réemploi consiste à étendre les frontières du système pour inclure une (ou plusieurs) vie successive(s), et à retrancher les impacts et bénéfices du système substitué par cette(ces) vie(s) successive(s). Par conséquent, **la**

---

<sup>2</sup> Ceci n'est pas mentionné explicitement, mais l'on suppose qu'une subdivision du système multifonctionnel en plusieurs systèmes monofonctionnels équivalents n'est pas possible.

**définition du système substitué est primordiale puisqu'elle peut fortement conditionner les résultats de l'analyse.**

Il est possible de distinguer deux cas généraux :

1. **Le système étendu considéré par le praticien reflète une réalité existante.** Dans ce cas, il faut déterminer le plus précisément possible le fonctionnement du marché et comparer des systèmes réellement équivalents.
2. **Le système étendu considéré par le praticien reflète une situation future probable.** Ce cas est plus complexe puisqu'il implique de faire des hypothèses prospectives sur l'évolution d'un marché. Les recherches doivent alors se porter sur la définition de ce scénario futur ainsi que sur les données associées.

De manière générale il est souvent ardu de définir avec précision le système substitué, et encore plus de collecter les données pertinentes associées. Il est malgré tout indispensable de faire l'exercice de recherche pour bien identifier les éventuels manques de connaissances, notamment en vue de l'évaluation de la qualité des données.

### ❖ #9 Clés pour l'affinage du taux de qualité / de remplacement

Un aspect essentiel pour définir avec précision le système substitué est de définir **le taux de remplacement, à savoir la quantité de système effectivement substitué**. Ce taux de remplacement s'applique lorsqu'il est possible de raisonner en termes de nombre de produits réutilisés<sup>3</sup>, ou en qualité du service rendu par le bien ou service étudié. Par exemple, l'achat d'un téléphone reconditionné ne se substitue pas toujours à l'achat d'un smartphone neuf, il y a des cas où l'acheteur se retrouve avec deux téléphones.

Ainsi, il est primordial de se poser la question du taux de remplacement et dans la mesure du possible d'y apporter une **réponse fondée sur des études techniques et sur des données consommateurs les plus fiables possibles**, telles que des sondages auprès des usagers.

## 2.3.4 Application d'une méthode d'allocation

### ❖ #11 Choix du critère d'allocation

En l'absence de référentiel méthodologique plus précis ou prescriptif, le choix à opérer par défaut est de suivre l'ordre de priorité recommandé par l'ISO 14044 en fonction des données disponibles. Il convient de distinguer d'une part l'allocation économique et fonctionnelle et d'autre part les allocations de type 50/50, 80/20 ou 100/0, etc.

En effet, les allocations économiques et fonctionnelles sont spécifiques au produit considéré puisqu'elles rendent compte d'une réalité *mesurable*, qu'elle soit physique ou économique. Ainsi, la question à se poser est la suivante : **Via quels paramètres la valeur de mon produit est-elle mesurée ?** A l'inverse, les allocations de type 100/0 (ou 0/100), 50/50, 80/20 (ou 20/80) sont plutôt applicables dans des cas d'étude relatifs à un référentiel méthodologique donné, ou lorsque le praticien ne dispose pas de données assez robustes sur son système pour pouvoir faire une allocation fonctionnelle ou économique qui traduise fidèlement la réalité.

### ❖ #12 Clés pour la détermination du facteur d'allocation fonctionnelle

Pour déterminer le facteur d'allocation fonctionnelle le plus pertinent, le praticien peut se poser les questions suivantes :

- Quelle est la grandeur physique la plus pertinente pour mesurer la qualité / l'efficacité / la dégradation de performance du produit au long de son existence (par exemple le temps que met une batterie de smartphone à se décharger durant un état de veille) ?
- Comment l'usage du produit influe-t-il sur cette grandeur (par exemple le temps d'utilisation quotidien du smartphone) ?

---

<sup>3</sup> L'analogie peut être faite avec le taux de qualité de la matière secondaire quand on étudie un procédé de recyclage, avec le ratio Qs/Qp de la Circular Footprint Formula

- Existe-il des modèles pour traduire la variation de cette grandeur physique en fonction du temps ? Sinon, est-il possible d'en établir un ?

Pour **rendre compte de la qualité d'un produit tout au long de sa vie, et en particulier entre deux vies consécutives**, deux approches principales ont émergé de l'analyse bibliographique et de la réflexion menée dans le cadre du projet :

- **Approche en delta** : si la dégradation de la performance du produit est de  $X\%$  sur l'ensemble de son existence, alors chaque utilisateur  $i$  responsable de la dégradation de  $x_i\%$  de la performance du produit peut se voir allouer  $(x_i / X)\%$  des impacts des activités « communes » aux différentes vies. Cela revient à allouer les impacts des activités « communes » entre les différentes vies au prorata de l'usure de la performance de chacune d'entre elles.
- **Approche intégrée** : cette approche consiste à intégrer la fonctionnalité sur la durée de chaque vie et à allouer les impacts communs à chaque vie au prorata de la fonctionnalité intégrée. Cette approche tient non seulement compte de l'évolution de la fonctionnalité au cours du temps mais aussi de la durée de chaque vie. Cette approche revient à allouer les impacts proportionnellement à la quantité de service rendu (à scénario d'usage identique entre les différentes vies). Cette approche présente l'avantage de tenir compte, en plus de la dégradation de la performance, de la durée de chaque vie via l'intégration de la fonctionnalité au cours du temps, et donc de tenir compte du temps d'immobilisation du produit par chaque vie.

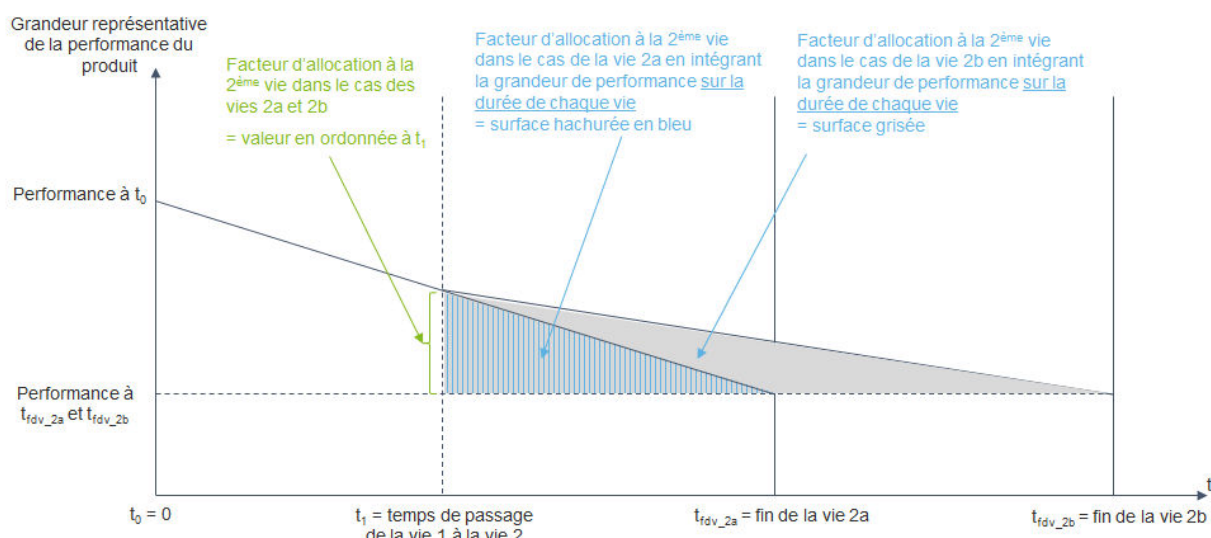


Figure 3 - illustration de deux approches d'allocation : « en delta » en vert ; « intégrée » en bleu

### ❖ #13 Clés pour la détermination du facteur d'allocation économique

Si l'allocation économique peut paraître de prime abord plus évidente que l'allocation fonctionnelle, elle n'en reste pas moins complexe. En effet, la valeur d'un produit au cours du temps peut se mesurer de différentes manières : soit les prix du marché sont connus et fiables, soit ils ne le sont pas (marché pas encore établi, confidentialité, etc.). Si les prix sont connus, l'allocation économique est relativement simple à réaliser. Dans le cas contraire, le praticien doit se demander s'il existe des modèles économiques prédictifs fiables ou des données extrapolables. Dans des cas généraux ou bien si aucune information pertinente n'est disponible, il est possible de dire que la valeur d'un produit diminue à chaque pas de temps d'un facteur  $X\%$ ,  $X$  étant fixe ou variable.

Il est également intéressant de noter que souvent, dans le cas de produits ayant plusieurs vies successives, la valeur économique intègre déjà la baisse de la fonctionnalité du produit.

### 2.3.5 Focus sur le Product Environmental Footprint

#### ❖ *Positionnement du référentiel PEF vis-à-vis du réemploi, de la réutilisation et de la seconde vie*

La PEFCR Guidance<sup>4</sup> ne diverge pas de l'ILCD Handbook ou des normes ISO concernant la hiérarchisation des modes de traitement de la multifonctionnalité. Dans la section 7.8 « Extension de la durée de vie d'un produit » de la PEFCR Guidance sont notamment distingués deux cas :

1. Applications identiques. Dans ce premier cas de figure, il est recommandé d'inclure l'allongement de la durée de vie grâce au réemploi dans le périmètre de l'étude.
2. Applications multiples. Elles nécessitent d'être traitées au même titre que le recyclage, via l'application de la Circular Footprint Formula.

Un point important à noter est que la question du réemploi et de la réutilisation a été très peu couverte au sein des différents « Technical Secretariats » de la phase pilote du PEF, pour diverses raisons. Le sujet pourra être approfondi le jour où des PEFCR sont initiés pour des catégories de produits où le réemploi/la réutilisation sont incontournables. Il paraît notamment judicieux (comme cela est évoqué à plusieurs endroits dans la PEFCR Guidance pour les boucles matières) que les paramètres de modélisation de la seconde vie, que ce soit le choix d'un facteur d'allocation, les paramètres liés à la substitution, etc., soient cadrés au niveau des PEFCR, afin d'améliorer la comparabilité des produits de la même catégorie. Enfin, une autre limite actuelle du référentiel PEF est le manque d'approfondissement sur l'application de la CFF au cas du réemploi ou de la réutilisation, ce qui constitue l'objet du paragraphe suivant.

#### ❖ *Analyse de l'applicabilité de la Circular Footprint Formula dans le cas du réemploi ou de la réutilisation.*

La Circular Footprint Formula (CFF) est la formule à appliquer dans le cadre du PEF pour répartir les impacts environnementaux de la valorisation énergétique ou matière entre l'amont et l'aval du système étudié. La PEFCR Guidance met le *reuse* au même niveau que le recyclage. Il s'agit d'une formule de substitution et allocation<sup>5</sup>. Les termes d'intérêt de la CFF, sous sa forme modulaire (CFF-M), sont présentés ci-après, notamment les termes liés aux bénéfices et charges liés aux intrants secondaires (issus de la vie n-1) et aux bénéfices et charges liés aux sortants secondaires (fournis à la vie n+1).

|                                                                            |                                                                                   |                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Charges associées à la production</b>                                   | $(1 - R_1) E_V + R_1 \times E_{\text{reused}}$                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Facteur d'allocation entre amont et aval</li> </ul>                                                                              |
| <b>Charges et bénéfices en liés à la réutilisation d'un produit</b>        | $-(1 - A) R_1 \times (E_{\text{reused}} - E_V \times Q_{\text{Sin}}/Q_p)$         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de réutilisation / réemploi</li> <li>• ICV du reconditionnement.</li> <li>• ICV du produit « neuf » / original »</li> </ul> |
| <b>Charges et bénéfices liés à l'envoi d'un produit à la réutilisation</b> | $+(1 - A) R_2 \times (E_{\text{reuslingEol}} - E_V^* \times Q_{\text{Sout}}/Q_p)$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ICV du produit (virtuellement) substitué</li> <li>• Facteur qualité</li> </ul>                                                   |

Figure 4: Termes de la CFF liés à la production du produit et à la valorisation matière / produit en fin de vie (les termes liés à la valorisation énergétique et à la fin de vie sans valorisation)

On peut faire les commentaires suivants concernant l'application de la CFF à la réutilisation / au réemploi :

- $R_1$  et  $R_2$  correspondent au taux de réemploi et/ou de réutilisation du produit étudié.
- $+/(1 - A)$  correspond au facteur d'allocation entre les cycles de vie. Il est défini par convention dans le PEFCR. La fixation de A pose question dans le cas du réemploi ou de la réutilisation.
- $Q_s/Q_p$  est équivalent au taux de remplacement (voir item #9) et doit rendre compte de la nature et de la qualité de la substitution.

<sup>4</sup> La version analysée est la version draft 6.3 de décembre 2017

<sup>5</sup> Au même titre que la formule de fin de vie d'autres référentiels tels que celui relatif à l'affichage environnemental en France.

## APPLICATIONS MULTIPLES EN ACV : ASPECTS METHODOLOGIQUES ET EXEMPLE DU CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES BATTERIES BENEFICIANT D'UNE SECONDE VIE

- $E_v$  et  $E_v^*$  correspondent à l'ICV de fabrication du produit substitué. La construction de cet ICV n'est pas forcément évidente à établir selon le type de produit étudié.
- $E_{\text{recycled}}$  et  $E_{\text{recyclingEol}}$  correspondent à l'ICV de la préparation en vue du réemploi / réutilisation. La construction de cet ICV est également complexe à établir.

On constate donc que sur le papier, la CFF est effectivement applicable au cas de la réutilisation / du réemploi. Dans la pratique, à notre connaissance, cela n'a pas encore été fait, et c'est l'un des objectifs du cas d'étude ACV présenté dans la section suivante que de tester l'applicabilité de la CFF au cas de la réutilisation / du réemploi.

## 3 ACV de batteries bénéficiant d'une seconde vie

### 3.1. Bibliographie

Les recherches bibliographiques effectuées couvrent l'ensemble des technologies de batteries, matures (Li-ion, PbA) et en développement (Li-Silicon, Vanadium redox flow), sur tous types d'applications. Le premier constat est qu'à ce jour, seules les batteries automobiles ont été étudiées dans le cadre des vies multiples. En effet, dans ce cas, la première application mobile impose une contrainte de capacité de charge minimale en dessous de laquelle la masse de la batterie à déplacer demande trop d'énergie. La valeur admise sur la majorité des publications est 20 % de perte de charge en première vie (Kons13), voire 30 % (Faria14). Sinon les applications stationnaires permettent a priori d'utiliser la batterie totalement. Toutefois, une capacité de charge finale de 50 % (Cicc12) est la limite observée.

L'étude bibliographique a mis en évidence des paramètres clés utilisées dans les ACV de batteries :

- La capacité de charge est le premier (indispensable pour segmenter les usages selon plusieurs vies)
- La profondeur de décharge
- La durée de vie attendue (en années, nombre de cycles ou en km parcourus)
- Le rendement (kWh fournit/kWh stocké) de la batterie (déterminant en phase d'utilisation)

Or, ces paramètres varient du simple au double :

- Distance parcourue : 100 000 (Kons13) - 200 000 km (Zack16)
- Durée de vie utilisation stationnaire : 4 (Kons13) - 20 ans (Cicc12).

Par ailleurs, aucune étude proposant 3 vies successives n'a été trouvée. Comme nous l'avons expérimenté dans l'étude ACV (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), il y a une limite sur les variantes modélisables à cause du manque de données sur le reconditionnement et les données de consommation d'énergie (heures « creuses » et heures « pleines ») permettant de distinguer les pratiques de stockage d'énergie en stationnaire.

Cela soulève les limites actuelles de modélisation des vies multiples. D'une part, les lois de dégradation de la batterie sont multiples. La perte de charge dépend de la chimie et peut faire intervenir un nombre important de paramètres :

- LFP – Elli14 : perte moyenne de 0,008 % par cycle
- LiTi<sub>4</sub>O<sub>5</sub> – Casa15 : loi exponentielle dépendant du temps, de la tension, de la température, du courant etc.

Nos tentatives de mise en application des lois de dégradation ont montré qu'il est difficile de concilier tous les paramètres.

D'autre part, l'étape de reconditionnement est déterminante dans l'évaluation des vies successives. En particulier, le remplacement des cellules défaillantes est un point sensible dans la légitimité des scénarios de vies multiples. Mais il n'a pas été observé dans les publications étudiées. D'ailleurs, Ahma14 tient compte d'un impact de reconditionnement équivalent à 50 % de la production de la batterie neuve.

En conclusion, les études de vies multiples de batteries n'est aujourd'hui appliqué qu'au secteur automobile (1<sup>ère</sup> vie). Malgré l'intérêt pour ce type de produit, très peu de données provenant des constructeurs sont disponibles. Ce manque de données est aussi vrai pour les retours d'expérience utilisateurs, ce qui implique des difficultés pour élaborer des scénarios solides justifiant la réduction des impacts environnementaux grâce au réemploi de la batterie. Bien que la technologie NMC s'impose de plus en plus, notamment grâce aux constructeurs Renault et Nissan, les cas d'études restent limités, la batterie Li-ion LFP étant la plus courante. Malgré tout, les valeurs des paramètres clés identifiés (durée de vie, capacité de charge, rendement énergétique, profondeur de décharge) ont pu être définies de façon cohérente dans le modèle ACV réalisé pour l'étude.

## APPLICATIONS MULTIPLES EN ACV : ASPECTS METHODOLOGIQUES ET EXEMPLE DU CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES BATTERIES BENEFICIANT D'UNE SECONDE VIE

L'objectif est de **tester trois méthodes de modélisation des vies multiples en ACV** suite à l'analyse bibliographique présentée en partie A. Il se décline selon deux grands axes :

- Repérer par la pratique les difficultés spécifiques d'une étude ACV comprenant des vies multiples ;
- Mettre en évidence les différences de résultats d'impacts environnementaux selon la méthode de répartition des impacts utilisée.

La vocation de l'étude d'ACV est essentiellement méthodologique : Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont détaillées et justifiées dans le rapport complet. Les résultats, illustrent les différences méthodologiques et ne doivent pas être considérés comme représentant de façon précise l'impact environnemental des batteries.

### 3.2. Analyse de cycle de vie

#### 3.2.1 Méthodes de répartition des impacts de fin de vie

##### *Extension des frontières*

La méthode d'extension des frontières du système (EF) consiste à étendre les frontières du système à l'ensemble des vies du produit, et à substituer le(s) cycle(s) de vie du/des produit(s) substitué(s) qu'il remplace. Ici, la batterie NMC utilisée en mobilité remplace ensuite une batterie LFP neuve lors de sa seconde vie (en ferme solaire ou dans un foyer).

La production de cette batterie LFP neuve n'est donc pas nécessaire (voir figure 1). Ainsi ses impacts sont retranchés à ceux du système étudié.

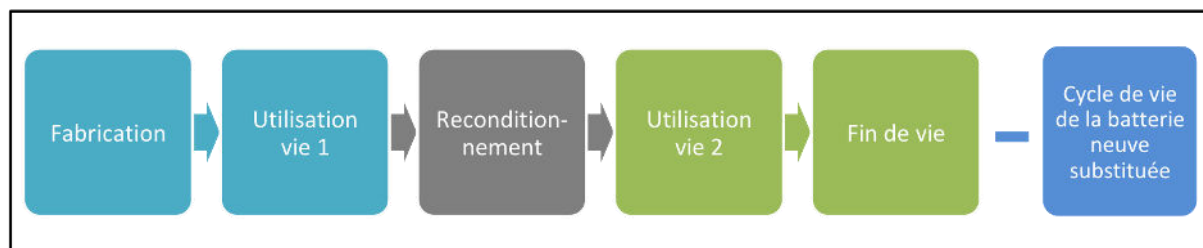


Figure 5 : Méthode des impacts évités

##### *Fonctionnalité intégrée*

La méthode fonctionnalité intégrée tient compte de l'évolution du niveau de service rendu (fonctionnalité) du produit en fonction du temps, pour chacune de ses vies. Dans le cas étudié, deux paramètres sont utilisés pour exprimer ce niveau de fonctionnalité : la quantité d'énergie restituée ( $Q_i$  en kWh) et la capacité de charge moyenne restante ( $\Delta C\%$ ), pour chaque vie  $i$ . Les facteurs d'allocation sont donc calculés selon la formule suivante :

$$FI_i = \frac{Q_i * \Delta C\%_i}{\sum_i Q_i * \Delta C\%_i}$$

La figure ci-dessous représente l'évolution de la capacité de charge de la batterie NMC811 et le calcul des  $\Delta C\%$ .

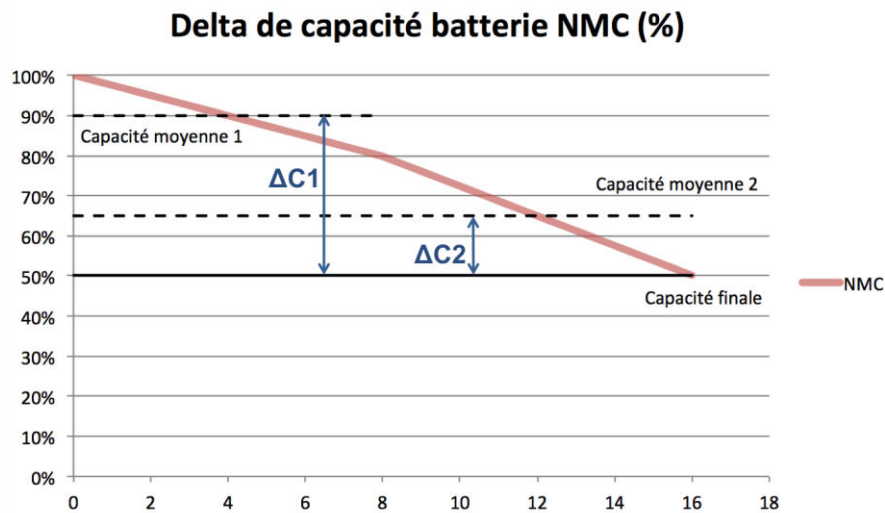


Figure 2 : Capacité de charge restante à chaque vie – Scénarios A et B

La fin de dernière vie de la batterie est modélisée selon la formule CFF. Dans la méthode de fonctionnalité intégrée, les impacts des différentes étapes de cycle de vie sont répartis équitablement entre chaque vie. Chaque utilisateur se voit ainsi allouer une part des impacts des autres étapes, notamment le reconditionnement.

### Méthode CFF

La méthode CFF vise à répartir les impacts entre des cycles de vie successifs en tenant compte de facteurs de qualité des matières recyclées, et de facteur de marché traduisant l'offre et la demande pour lesdites matières. Elle peut s'appliquer à un produit réemployé. Pour cela, nous avons déterminés les coefficients de qualité  $Q_s$  (appliqués à la batterie) en prenant en compte les paramètres suivants au point de substitution : capacité de la batterie, rendement. La figure ci-dessous montre les valeurs de rendement énergétique estimées aux points de substitution.

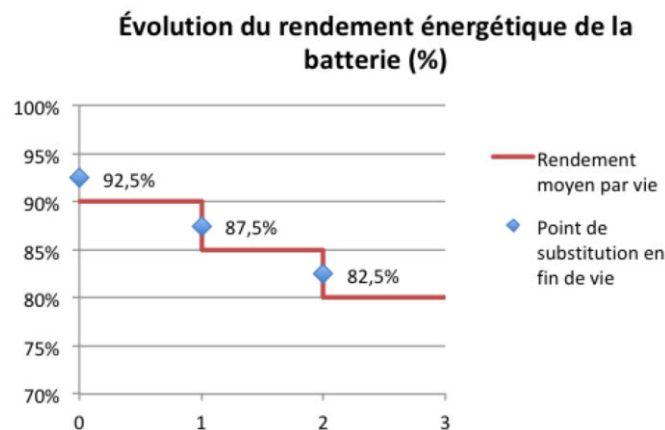


Figure 3 : Évolution du rendement énergétique

### 3.2.2 Hypothèses et limites

L'ACV est rendue difficile en raison de l'accessibilité des données, à chaque étape du cycle de vie. Pour la production, les nomenclatures détaillées sont rares. En phase d'utilisation, l'émergence de la technologie entraîne un manque de retour d'expérience. Quant à la fin de vie, seules les données du PEF ont permis de modéliser l'intégralité du traitement (pyrométallurgie et hydrométallurgie) et de fixer les coefficients de la méthode CFF.

Plusieurs hypothèses initiales ont été fixées pour l'étude, elles sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Hypothèses de l'étude ACV et leur niveau de criticité

| Hypothèse                                | Étape                           | Criticité sur les résultats                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Contrainte temporelle de charge/décharge | Utilisation (stationnaire)      | <b>Forte</b> : La quantité d'énergie délivrée définit le niveau de service rendu                                                                                                                                                                          |
| Perte de capacité de charge              | Utilisation                     | <b>Forte</b> : La quantité d'énergie délivrée et les coefficients d'allocations (FI, CFF) sont proportionnels à la capacité de charge.                                                                                                                    |
| Rendement énergétique                    | Utilisation                     | <b>Moyenne</b> : Le rendement varie moins fortement que la capacité. Son incertitude est cependant supérieure.                                                                                                                                            |
| Défaillance des cellules                 | Utilisation - reconditionnement | <b>Moyenne</b> : Le taux de défaillance est fixé à 0 dans l'étude.                                                                                                                                                                                        |
| Préparation pour le réemploi             | Reconditionnement               | <b>Moyenne</b> : La transformation du pack et le reconditionnement des cellules peuvent être conséquents sur le cycle de vie. L'hypothèse précédente ne laisse que le changement du BMS, qui a un impact significatif à l'échelle d'une vie stationnaire. |
| Recyclage des métaux                     | Fin de vie                      | <b>Forte</b> : Seul le PEFCR batteries et accumulateurs nous renseigne sur le recyclage des métaux. Cela influence les impacts évités (EF) et les allocations (FI, CFF).                                                                                  |
| Transport                                | Cycle de vie                    | <b>Faible</b> : C'est une simplification raisonnable vis-à-vis de la portée méthodologique de l'étude.                                                                                                                                                    |

### 3.2.3 Résultats

#### Résultats généraux et par vie

Nous comparons d'abord les méthodes par rapport au bilan des impacts cumulés sur l'ensemble des vies. La figure 4 montre les résultats sur le changement climatique.

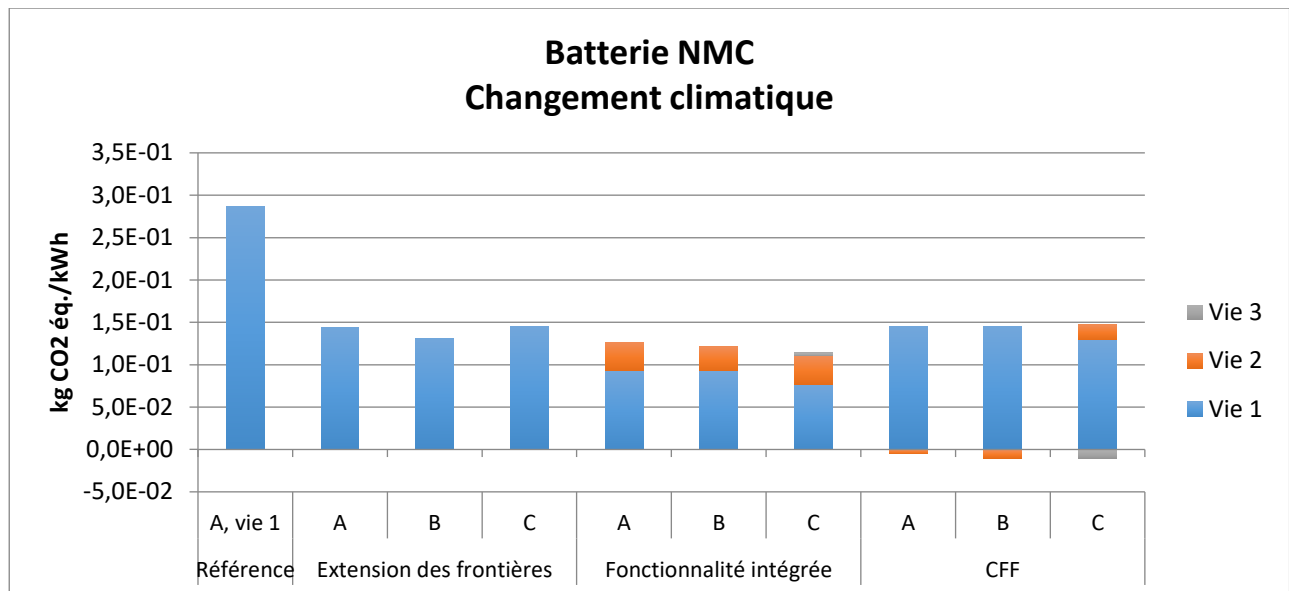


Figure 4 : Résultats globaux, changement climatique (/kWh)

Ce type de graphique met en évidence des tendances similaires pour les indicateurs :

- changement climatique
- acidification
- smog photochimique
- eutrophisation.

Les phases de production et de fin de vie (ultime) sont prépondérantes sur les indicateurs cités ci-dessus.

Quant aux indicateurs de ressources minérales et d'énergie, les résultats varient principalement en fonction du reconditionnement (métaux rares contenus dans le BMS) et de la consommation d'énergie dans un foyer.

D'autre part, nous comparons les vies entre deux scénarios pour une méthode donnée (figure 5). Cela permet de rassembler les indicateurs afin de déterminer dans quelle mesure la méthode retenue répartit les impacts des phases en amont et en aval.

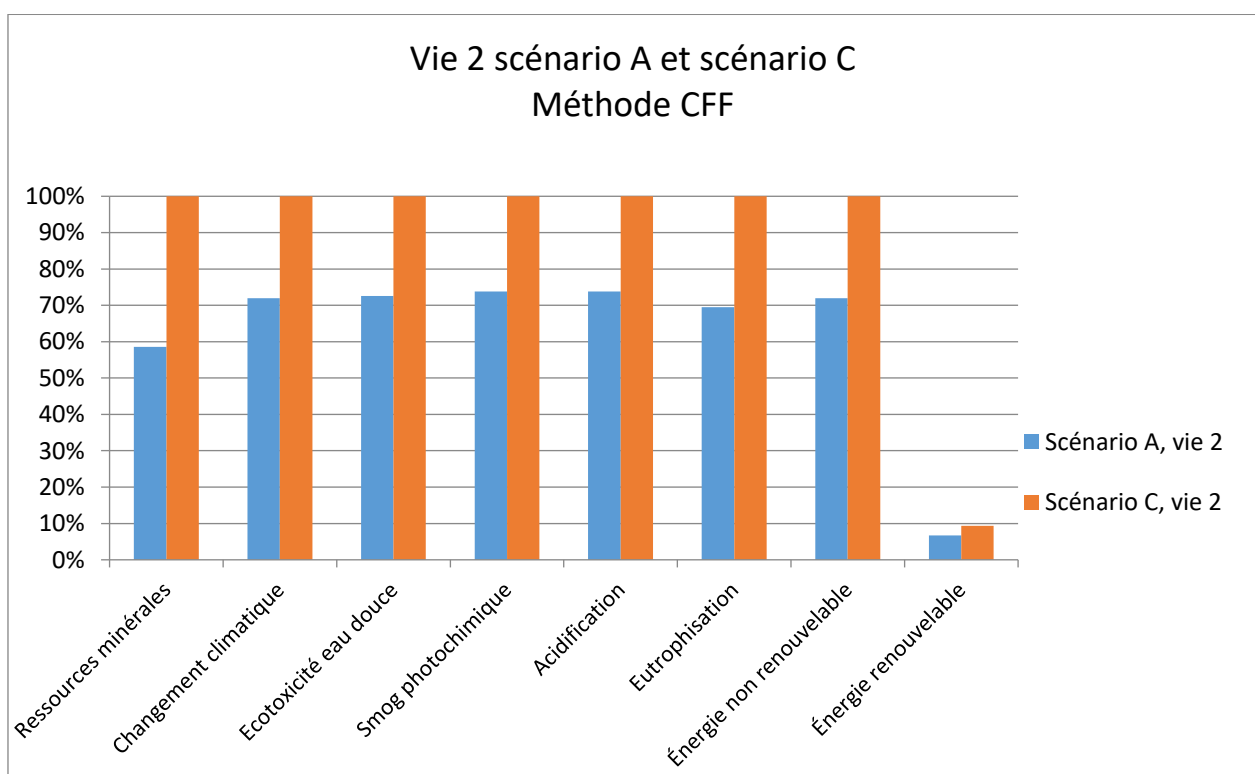


Figure 5 : Résultats comparatifs (%) de la 2<sup>ème</sup> d'utilisation selon la méthode de fonctionnalité intégrée – Scénario A vs. scénario C (/kWh)

Remarque : les indicateurs de consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable sont représentés en proportion relatives l'un par rapport à l'autre.

Ce type de représentation met en évidence l'importance du service rendu. La fonctionnalité intégrée permet de répartir plus d'impacts entre trois vies. Le scénario C est donc plus performant en vie 2.

### Analyses de sensibilité

Plusieurs analyses de sensibilité ont été réalisées afin d'approfondir les aspects méthodologiques de la méthode CFF notamment. Les quatre analyses de sensibilités touchent des points spécifiques du cycle de vie ou de la méthode CFF :

1. Incorporation de 15 % de métaux recyclés (Ni, Mn, Co) dans la production ;
2. Facteur CFF : coefficient A modifié à 0,5, à la place de 0,8 ;
3. Facteur CFF : coefficient Qs déterminé seulement à partir de la capacité aux points de substitution.

#### Incorporation de métaux recyclés

La part de nickel secondaire réduit l'impact d'oxydation photochimique et l'acidification de 10 %. Le bénéfice du recyclage n'est pas significatif sur les autres indicateurs. Le recyclage reste un point d'incertitude fort vis-à-vis des progrès technologiques à venir. Les données actuellement disponibles sont elles-mêmes peu transparentes.

Bien que les métaux des cellules soient critiques dans l'épuisement des ressources, la contribution du BMS reste importante.

#### Facteur CFF : A

La diminution du coefficient A multiplie le taux d'allocation des impacts de production aux vies stationnaires par 2,5 (proportionnel à 1-A).

Dans le cas de la méthode CFF, la variation de A influence le taux d'allocations global. En dessous de 15 % d'allocation de production de la batterie, les impacts et les bénéfices de la fin de vie dépassent ceux de la production. Ce facteur est donc déterminant sur l'intérêt des vies multiples en ACV.

#### Facteur CFF : Qs

La modification des facteurs Qs réduit les impacts de près de 50% les impacts de production de la batterie alloués aux vies stationnaires.

### 3.2.4 Enseignements de l'étude

#### Scénarios et paramétrage

Les méthodes EF et CFF nécessitent de définir la filière de référence, qui fait l'objet d'une substitution. Cela est explicite dans la méthode EF, où la filière de référence est « soustraite » au système d'étude. En revanche, dans la méthode FI les usages successifs du produit initial sont définis et il n'y a pas de substitution.

Le choix de cette filière doit être argumenté car il influence sensiblement les résultats. La question se pose de savoir si le bien réutilisé en seconde vie remplace ou non un bien neuf. Par exemple, nous avons modélisé le cas où, en troisième vie, la batterie constitue un achat d'opportunité pour un foyer, qui n'aurait pas, en l'absence de bien d'occasion, investi dans une batterie.

Par ailleurs, la nature, la qualité et la quantité de ce bien neuf auquel on se substitue doivent être déterminées avec soin. Or ces paramètres font l'objet d'une discussion à cause de leur incertitude. Cela affecte surtout la méthode d'extension des frontières qui ne comporte pas d'allocations.

### *Méthode d'extension des frontières*

La méthode d'extension des frontières du système nécessite de définir un point de vue. En effet, elle conduit à appréhender l'intégralité des cycles de vies multiples, et d'y retrancher une des filières en fonction du point de vue (voir Figure 5). Trois cas se présentent alors :

- Point de vue de la vie 1, le cycle de vie du bien substitué en vie 2 est retranché, ce qui permet de calculer les impacts de la vie 1 ;
- Point de vue de la vie 2, le cycle de vie du bien en vie 1 avec une fin de vie classique, c'est-à-dire sans réutilisation, ce qui permet de calculer les impacts de la vie 2 ;
- Étude de l'intérêt du réemploi, les cycles des 2 vies isolées sont retranchés au système.

### *Méthode de fonctionnalité intégrée*

La méthode FI présente les particularités suivantes :

- **L'ensemble des cycles de vie du produit étudié doivent être connus.**
- **La durée et la performance du produit dans chacune des vies doivent être connues** ou déterminées pour paramétrer la répartition des impacts entre les vies successives, Cette méthode est donc contraignante pour une technologie émergente.
- **L'utilisateur 1 est plus ou moins pénalisé ou crédité par les usages ultérieurs**, bien qu'il n'en soit pas directement responsable. Ce constat relatif à la méthode FI ne concerne pas la méthode CFF.

### *Méthode CFF*

Bien que la méthode CFF soit cadrée et mise en œuvre dans le cadre du PEF, le grand nombre de paramètres utilisés pour caractériser l'état du marché de seconde main et la capacité de recyclage rendent son application difficile à une technologie émergente. Les principaux enseignements de l'application de cette méthode, notamment enrichis par les analyses de sensibilité :

- **Avantage par rapport à la méthode FI** : seule les vies N-1 à N+1 doivent être connues. L'ACV des vies successives est effectuée avec des facteurs déterminés par les guides de la méthode. Elle peut donc être utilisée pour des technologies émergentes.
- **Allocation des déchets à la dernière vie** : les déchets sont attribués uniquement à la dernière application. Cela met en avant le risque que l'utilisateur 1 repousse l'impact des déchets à la dernière vie.
- **Nécessité de bien connaître la manière dont le produit est préparé pour le réemploi**, afin de déterminer la manière d'appliquer la **version modulaire de la CFF** au produit ou à ses sous-systèmes : batterie complète ou séparément pour chaque composant.

## **3.2.5 Conclusion pour les trois méthodes**

L'application des trois méthodes montre une forte sensibilité aux coefficients d'allocations et de substitutions. Le manque de données primaires et la modélisation des métaux critiques ajoutent aussi un niveau d'incertitude.

Les résultats montrent qu'augmenter le nombre de vies n'est pas systématiquement plus performant d'un point de vue environnemental. Un équilibre entre le service rendu et le processus de reconditionnement en seconde vie doit être trouvé. Or ce dernier point reste un axe d'amélioration de la modélisation.

## 4 Conclusions et perspectives

Les travaux menés ont permis de structurer les différentes étapes qu'il est nécessaire de déployer dans le cas d'une étude ACV incluant du réemploi ou de la réutilisation. Dans ce cadre, effectuer le parallèle avec la multifonctionnalité permet de cadrer la problématique et de hiérarchiser les différentes solutions possibles.

Trois principales méthodes pour traiter ces problématiques ont été identifiées grâce à la revue bibliographique méthodologique : l'extension des frontières du système avec substitution, l'allocation et l'application d'une méthode de substitution et allocation (par exemple la Circular Footprint Formula (CFF) mise en place dans le cadre du PEF).

La réalisation d'une ACV de batterie bénéficiant d'une seconde vie a permis de tester l'applicabilité de ces différentes méthodes (notamment de la CFF) et leurs avantages et limites.

Différents aspects de ces méthodes ont été développés, spécifiquement dans le cas de boucles produit. On peut notamment citer la nécessité de déterminer les dynamiques de marché entre produits de seconde et de première main, ou le besoin de se fonder sur des études techniques spécifiques pour déterminer l'équivalence fonctionnelle entre produit neuf et produit réutilisé / réemployé. In fine, dans un contexte d'économie circulaire, il nous semble fructueux d'aborder ces problématiques de vies multiples, de réemploi ou de réutilisation avec une vision conjointe entre enjeux environnementaux, économiques et techniques.

Dans le cadre du projet, le fait que les problématiques sont différentes entre des produits à longue durée de vie (bâtiments par exemple), des produits réutilisés de nombreuses fois (par exemple outils médicaux) ou des produits limités à deux ou trois vies maximum (comme les batteries), a été discuté. Il n'a pas été possible dans le cadre de ce projet de définir des recommandations par type de produit – cependant, une prochaine étude SCORELCA sur les boucles produit pourrait permettre de compléter ces aspects, pourquoi pas en complémentarité du guide méthodologique établi ici.

Par ailleurs, et plus généralement, nous approchons avec la réflexion sur la modélisation des vies successives d'un produit en ACV le problème plus large et déjà identifié par ailleurs de la modélisation de la consommation des ressources. En effet, des travaux récents<sup>6</sup> mettent l'accent sur l'incohérence entre une modélisation de l'utilisation des ressources sous la forme d'une consommation, et sur l'intérêt de distinguer les usages conservatifs des usages dispersifs, voire de comptabiliser les usages « concentrateurs », qui permettent par exemple de mettre à disposition des métaux à partir de minerais peu concentrés.

---

<sup>6</sup> Voir les travaux de Adibi, 2016, ou Asselin & Teulon 2016, par exemple