



HAL
open science

Concevoir un produit pour plusieurs vies : Propositions pour la conception et l'évaluation environnementales de solutions en cascade

Tom Bauer

► **To cite this version:**

Tom Bauer. Concevoir un produit pour plusieurs vies : Propositions pour la conception et l'évaluation environnementales de solutions en cascade. Génie des procédés. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAI076 . tel-01988566

HAL Id: tel-01988566

<https://theses.hal.science/tel-01988566>

Submitted on 21 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Tom BAUER

Thèse dirigée par **Peggy ZWOLINSKI**, et
co-encadrée par **Guillaume MANDIL** et **Élise MONNIER**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans l'**École Doctorale I-MEP2**

Concevoir un produit pour plusieurs vies : Propositions pour la conception et l'évaluation environnementale de solutions en cascade

Thèse soutenue publiquement le **17 octobre 2018**,
devant le jury composé de :

Monsieur Guillaume MANDIL

Maître de Conférences à l'Univ. Grenoble Alpes, Encadrant de thèse

Monsieur Dominique MILLET

Professeur à l'Université de Toulon, Rapporteur

Madame Élise MONNIER

Ingénieure au CEA-LITEN, Co-encadrante de thèse

Madame Delphine RIU

Professeure à l'Univ. Grenoble Alpes, Examinatrice et Présidente

Monsieur Erik SUNDIN

Associate Professor à Linköping University, Examineur

Madame Nadège TROUSSIER

Professeure à l'Université de Technologie de Troyes, Rapporteur

Madame Peggy ZWOLINSKI

Professeure à l'Univ. Grenoble Alpes, Directrice de thèse



RESUMES

Ces travaux de thèse s'intéressent à une stratégie de fin de vie naissante : le repurposing. Nous le définissons comme un processus industriel par lequel des produits en fin d'usage sont réutilisés dans des applications distinctes. À la fin de leur premier usage, les produits sont réintégrés dans la chaîne industrielle en vue d'une nouvelle utilisation dans une autre application. On parle également d'utilisations en cascade. Le but avoué est la conservation de la valeur-ajoutée des produits, aussi longtemps que possible. Cette stratégie s'inscrit aux côtés d'autres stratégies de réutilisation plus connues telles que le réemploi et le remanufacturing.

L'illustration principale de la littérature, qui constitue également notre terrain d'étude, concerne les batteries au lithium. Utilisées initialement dans les véhicules électriques, elles sont aujourd'hui recyclées lorsque leurs capacités de stockage diminuent de 20 à 30%. Prolonger leur durée de vie par une seconde application, e.g. un usage stationnaire, permettrait de différer les étapes de recyclage tout en maximisant le maintien de la valeur ajoutée lors de la fabrication. Malgré ces avantages, les exemples de transformations de produits pour des applications en cascade restent à l'état de démonstrateurs, en particulier parce qu'aujourd'hui ces produits et leur chaîne de valeur ne sont pas conçus avec des stratégies supportant leur réutilisation.

L'objectif de ces travaux est d'apporter aux équipes de conception une vision claire de ce qu'est la stratégie de réutilisation en cascade, de comment l'intégrer lors des étapes amont du processus de conception et de guider l'évaluation environnementale correspondante, afin de les accompagner pour une réelle industrialisation des produits repurposés. En ce sens, nous émettons trois propositions.

La première consiste en une classification des caractéristiques propres aux solutions en cascade selon trois axes : le produit, le processus de (re)fabrication et le modèle d'affaire envisagé. À travers ce cadre, nous décrivons les dimensions et les caractéristiques des offres de produits repurposés. Elles sont alors utilisables pour l'établissement de compromis dès les phases amont de conception. Celles-ci sont issues d'une étude bibliographique couplée à des études de terrain.

Notre deuxième proposition concerne le processus de conception de tels produits. En effet, plusieurs spécificités sont à prendre en compte en comparaison d'une activité de conception classique : récupération du produit en fin d'usage, applications ultérieures pas ou peu définies, besoins flous, usage influençant les performances, etc.. Une étape de conception pour les produits repurposés devra donc être intégrée en amont du processus de repurposing afin d'optimiser les solutions ultérieures. En complément, plusieurs recommandations pour la conception d'un produit repurposé sont formulées. Intégrées au plus tôt, elles visent à faciliter la réutilisation des produits en tenant compte des parties-prenantes, des phases du cycle de vie et à mieux gérer les priorités et l'information tout au long du cycle de vie.

Enfin, un cadre générique structurant la réalisation d'analyses du cycle de vie de ces solutions est proposé. Les ACVistes pourront ainsi plus facilement tenir compte des spécificités de ces stratégies, car la complexité des modélisations ACV pour les produits aux applications en cascade nécessite davantage de rigueur et de précision que pour des produits à application unique. Pour supporter ce cadre, trois recommandations à destination des équipes de conception sont émises. Elles permettent la formalisation d'éléments de contexte pour améliorer la comparaison avec d'autres études et d'informations en vue des analyses de sensibilité.

Ces trois propositions sont implémentées sur deux cas d'étude 'batterie', au cours de séances de travail regroupant des parties-prenantes de l'ensemble du cycle de vie : commanditaire, équipes de conception, logisticiens, recycleur, etc..

Mots-clefs. Repurposing ; stratégie de fin de vie ; processus de conception ; analyse de cycle de vie ; applications en cascade ; économie circulaire

This PhD dissertation focuses on an innovative end-of-life strategy: repurposing. We define 'repurposing' as a manufacturing process through which products nearing their end-of-life are reused in different applications. At the end of their intended use, products are reintegrated into the manufacturing chain and adapted for their next application. We also refer to this strategy as cascading application reuse (CAR). The main purpose of CAR is the preservation of the added-value of such products. This strategy is in line with other reuse strategies such as direct reuse and remanufacturing.

The central illustration in our case study addresses lithium-ion batteries used in electric vehicles, which are recycled when the battery's charging capacity falls below 80%. Extending the component lifespan with a second application, e.g. stationary application, postpones introduction into the waste stream, retaining the added-value from the original manufacturing process. Despite these advantages, examples of product adaptation for CAR remain at a proof-of-concept scale - currently these products and their value chains are not yet designed with strategies supporting reuse.

The objective of this research is to provide a clear vision to design teams about repurposing strategies, how to integrate the strategies during the upstream stages of the design process and how to facilitate the corresponding lifecycle assessment. The objective is to support designers during the manufacturing of repurposed products. We make three proposals.

The first consists of classifying the characteristics specific to the repurposing strategy according to three axes: the product, the (re)manufacturing process and the business model. Through this framework, we describe the dimensions and characteristics of what the repurposed product offers, which are integral during the design activity. These attributes are the result of a study of the relevant literature coupled with several field investigations.

Our second proposal concerns the design process for such products. Indeed, several differences with classical design practices appear: the need for product recovery at the end of use, subsequent applications and needs not fully defined, which affect performance, etc.. A design stage for repurposed products must therefore be integrated before subsequent applications in order to optimise redesign solutions. Integrated as early as possible, they aim to facilitate product reuse by taking into account stakeholders, life cycle phases, time aspects and better information management.

Finally, a generic framework structuring the carrying out of life cycle analyses of repurposing is proposed. This will simplify the inclusion of their specificities for life cycle assessments (LCA) practitioners. Indeed, the complexity of LCA modelling for cascading applications products requires more rigour and precision than single application products. To support this framework, three recommendations for design teams are made, the objective of which is to better formalise the information from the design process. These recommendations support the formalisation of contextual elements to improve comparison with other studies and the organisation of information for sensitivity analyses.

These three proposals are implemented on two battery case studies, during working sessions involving stakeholders representing the complete life cycle: sponsor, design teams, logisticians, recycler, etc..

Keywords. Repurposing; end of life strategy; design process; life cycle assessment; cascading applications; circular economy

REMERCIEMENTS

Les premières pages sont souvent les dernières écrites... Et probablement les plus lues. Celles et ceux qui liront celles-ci ne diront vraisemblablement pas le contraire ! Et pour cause, elles leur appartiennent probablement tout autant qu'à moi. Ces quelques lignes sont là pour les remercier de leurs conseils, avis, remarques, support ou tout simplement de leur présence au long de ces trois années (même si une bonne partie d'entre eux a osé, un jour, prononcer une des phrases tabou ci-après : "Ben alors... Comment ça s' passe ta thèse ?", "T'avances ?", "Tu cherches déjà ?", "Et tu trouves ?" ☺). Et comme je ne serai probablement pas exhaustif dans ces remerciements (et qu'en 5 ans de présence à G-SCOP on a déjà tendance à oublier) je m'excuse d'avance pour ceux qui ne s'y retrouveront pas.

En premier lieu, je tiens à remercier les membres de mon jury de thèse. Merci tout d'abord à Dominique d'avoir accepté de rapporter ces travaux de thèse et pour sa pertinence par rapport à la thématique abordé. Je remercie Delphine d'avoir accepté de présider mon jury et pour sa bienveillance au moment de la 'dernière ligne droite'. Many thanks to Erik for your comments and questions during the PhD defence and interactions in this 'French world'. Un grand merci également à Nadège. Vos remarques m'ont apporté une autre vision quant à ces travaux de recherche. Vos questions, toujours pertinentes, ont permis de les enrichir et de les clarifier.

Dans un second temps, je tiens à remercier tout particulièrement mon équipe d'encadrement. Merci à Guillaume qui a été un soutien quotidien durant ces trois années. Tant sur le plan scientifique, managérial (si tant est qu'on puisse utiliser pareil terme !), que sur un plan personnel. Merci pour les quelques minutes (secondes ?) à quelques heures (jours ?) passés dans ton bureau pour tirer au clair tout ce qui avait besoin de l'être avec moi ! Merci aussi à Élise. Outre le fait que tu nous aies grand ouvert les portes de CEA (bon sauf quand j'ai eu atteint mon quota de visites, administratif oblige...) et planifié de nombreux rendez-vous, tu m'as aussi apporté de nombreux conseils et su prendre le temps de trouver les mots et méthodes quand ça allait moins. Merci aussi à Peggy pour tes conseils, tes explications et ta 'remise sur rails' les fois où je commençais à m'égarer et à vagabonder un peu trop loin (out of map), ou tout simplement à ne plus voir vers où aller (<http://perdu.com/>) ! Tu as toujours su trouver le point positif qui ressortait et la manière de l'exploiter.

Ensuite je tiens à remercier pleinement les partenaires avec lesquels nous avons eu la chance de nous entretenir tout au long de ces travaux de thèse (et peut-être davantage ?), au cours de réunions ou de workshop. Que ce soit avec notre partenaire industriel, recycleur de batteries, ou les personnes rencontrées au CEA : Boris, Emmanuel, Daniel, Arnaud, Matthieu, Ghislain, Laurent.

C'est parce qu'on ne travaille jamais seul dans son bureau (ou dans celui de Guillaume), mais qu'au contraire les travaux de thèse se nourrissent de discussions avec d'autres, que je remercie chaleureusement les permanents du laboratoire avec qui j'ai échangé au cours de ces trois années. Et tout particulièrement Cédric M., Daniel, Fred', Franck P., François, Guy, Henri, Matthieu M., Maud, Valérie et Yannick pour leurs conseils (même si parfois ça pique un peu, c'est souvent pour de bonnes raisons !). Et parce que ce serait bien plus compliqué (impossible ? impensable ? ingérable ? irréparable ?) si elles et ils n'étaient pas là, merci à Amandine, Christine², Fadila, Kévin, Marie-Jo', Myriam, Olivier, Sébastien et Souad pour leur support au quotidien.

Et bon... Le climat au travail est également un point qui peut être motivant au quotidien (oui, parce qu'en fait, même les jours où on recule, on avance un peu...). Dans ces moments-là, c'est important de pouvoir compter sur l'entourage (qui sont souvent dans le même bateau (ou galère, qui n'est qu'un autre type de bateau) que vous), pour partager un café (le matin), un déjeuner (le midi), une ou deux tablettes de chocolat (l'après-midi) ou un pisse-mémé (le soir). Exceptionnellement (en de rares occasions) on s'autorise un petit écart (une partie de coinche par exemple), mais pas plus ! Pour ces bons moments passés au laboratoire (et en-dehors), merci à ceux qui étaient là lors de mes premiers pas au labo : Bobo, Clément, Dani, Élodie, Florence T., Gricha, Hanna, Julien G., Lucas, Lucie, Lucile, Manu, Maud D., Mauricio, Nico B., Olga et Yacine. Merci à ceux qui ont pris la relève et avec qui nous avons partagé pendant ces années de doctorat : Christelle, Cléa, Damien, Dehia, Florence B., Katyanne, Kléber, Lucie P., Maud P., Pascal, Tomek, Yahya et Yohannes. Et en particulier à l'équipe de l'ADOC (la meilleure, tout le monde l'a dit) : Alex', Francky, Mattheyux et Parisa. Merci à Cajou pour les moments partagés au C304, même si tu n'étais plus trop là à la fin... ! Et à quelques-unes de leur pièce rapportée (ou pas) : Camille K., Cyril, Marine, Margue',...

Mais les WE et les vacances (ceux qui ne sont pas consacrés à la thèse, hein...) sont également essentiels au bon fonctionnement du chercheur. C'est un peu la soupape de sécurité qu'il faut veiller à conserver. Les partager est d'autant plus plaisant. Je remercie pour ça ceux qui m'ont accompagné sur un caillou : Dom', Jérôme, Nico L., Vivi et une partie de ceux d'là-haut ; et ceux avec qui j'ai partagé d'autres bons moments : Alex', Aurore, Cécile, Céline, Christophe, Claire, Delphine, Jenn', Laureline, Laurent, et Vio. Et tout particulièrement, merci aux copains du pays, les retrouvailles ne se font plus dans les pubs de la capitale (Besac bien sûr) mais c'est d'autant plus chouette ! Le must c'est que vous appréciez à sa juste valeur le grand cru de chez nous ! Des bisous à Bast', Boub, Chichi, Dek's, J.-Bride, Jules, Kéké, La P'tite Fille, Lolotte, PAB, Pierre et toute leur famille.

Enfin, parce que c'est là qu'il fait et fera toujours bon revenir, un très grand merci à tout ma famille. Merci pour votre soutien, notamment lors de la finalisation du manuscrit. Un grand merci à mes parents et à mes deux (petites ?) sœurs pour votre investissement et votre réactivité lors de la relecture et pour la préparation du pot. Merci à mes grands-parents, oncles et tantes pour leur soutien durant ces trois années et dans la dernière ligne droite. Special thanks to David for your time when I needed to sum up this work in English! Merci aussi tout particulièrement à Nicolas, Romain et ma Zine. Et, parce que sans sa motivation infailible au quotidien, du style : "Non mais tu vas aller au bout et en trois ans mon coco !", "Pas moyen que ça traîne !" ou "T'as signé, tu continues !" j'aurais probablement pris un peu plus mon temps (au mieux...) ou y'aurait eu trois cacahuètes au pot ; mais aussi et surtout pour tous les à-côtés du quotidien, un très grand merci à Gwen.

Et parce que parfois ça dépasse les mots, mes dernières pensées vont à ma Mamie.

TABLE DES MATIERES

Résumés.....	1
Remerciements.....	3
Table des Matières.....	5
Table des Figures.....	9
Table des Tables.....	11
Glossaire.....	13
Introduction générale	15
Chapitre 1 De la prise en compte de la fin de vie des produits au prolongement de leur durée de vie	19
1.1 L'encadrement de la fin de vie des produits et ses répercussions	20
1.1.1 La prise en compte de la fin de vie de produits.....	20
1.1.2 Différentes stratégies en réponse	21
1.1.3 Cas industriels & exemples d'applications	23
1.2 Une stratégie pour des produits aux applications successives et distinctes	24
1.2.1 Utiliser les termes appropriés.....	25
1.2.2 Les fondements du repurposing	26
1.2.3 Les cas d'étude liés au repurposing et issus de la littérature	27
1.3 Éléments de synthèse	31
Chapitre 2 Positionner la problématique naissante du prolongement de l'usage par de nouvelles applications dans la littérature existante	33
2.1 Le repurposing parmi les stratégies de fin d'usage de la littérature	34
2.1.1 Les dessous du réemploi de produits	34
2.1.2 La stratégie de remanufacturing passée à la loupe	34
2.1.3 Investigations quant aux offres de produits repurposés	36
2.1.4 Synthèse des caractéristiques des stratégies de FdU issues de la littérature	37
2.2 Les démarches de conception : une prise en compte de l'usage, de sa fin et des suivants.....	38
2.2.1 S'ouvrir pleinement à l'usage : la démarche de conception intégrée	38
2.2.2 Une prise en compte plus large du cycle de vie, pour l'inclusion de la fin d'usage	45
2.2.3 Les démarches de conception pour le repurposing	50
2.2.4 Conclusion	53

2.3	Les évaluations environnementales pour la fin de vie : quid des applications en cascade ?	55
2.3.1	La démarche d'ACV	55
2.3.2	Considérations pour la fin d'usage et de vie en ACV	56
2.3.3	Les difficultés de la modélisation ACV pour le repurposing	58
2.3.4	Des recommandations pour l'ACV, spécifiées pour des applications successives	63
2.3.5	Conclusion	63
2.4	Conclusions	64
Chapitre 3	Présentation de la démarche de recherche adoptée	67
3.1	Contexte général de ces travaux de thèse	68
3.1.1	Études prospectives	68
3.1.2	Démonstrateurs	68
3.1.3	Présentation du cas d'étude 'batterie'	68
3.1.4	Synthèse du contexte de recherche	70
3.2	La recherche-action comme support d'investigation	70
3.2.1	Présentation de ce qu'est la recherche-action	70
3.2.2	Application de la recherche-action à notre contexte de recherche	70
3.2.3	Brève discussion sur les premières limites apparues a posteriori	71
3.3	Conclusion	72
Chapitre 4	Propositions en vue de l'intégration de la stratégie de repurposing en conception de produits ..	73
4.1.	Caractérisation de la stratégie de repurposing pour un usage en conception	74
4.1.1.	Une caractérisation en triptyque, élargie pour les stratégies de fin d'usage	74
4.1.2.	Un terrain industriel pour confronter la littérature	79
4.1.3.	Point de vue des acteurs sur les caractéristiques liées aux offres de produits repurposés	82
4.1.4.	Conclusion sur les caractéristiques des offres de produits repurposés	87
4.2.	Évolution du processus de conception	88
4.2.1.	Une évolution sujette à différents besoins	88
4.2.2.	L'organisation du processus de conception	90
4.2.3.	Conception pour le repurposing : recommandations et exemple d'implémentation	93
4.2.4.	Conclusions sur l'activité de conception	99
4.3.	Proposition d'un cadre pour l'ACV des applications en cascade	100
4.3.1.	Un cadre générique pour l'analyse de cycle de vie de produits en fin d'usage	100
4.3.2.	Des recommandations spécifiques à la réutilisation en cascade	105
4.3.3.	Synthèse et piste d'implémentation pour l'ACV	106
4.4.	Conclusions	108
Chapitre 5.	Mise en usage des propositions et discussions	109
5.1	Contexte	110
5.1.1	L'activité de conception de batteries à application unique au CEA	110
5.1.2	Présentation des séances de travail sur la phase préliminaire de conception d'une batterie repurposée	111

5.2	Mise en usage des propositions dans une démarche de conception	112
5.2.1	L'expérimentation des propositions relatives à la conception de produits repurposés	112
5.2.2	Illustration de la dernière proposition : un cadre pour l'analyse de cycle de vie de produits aux applications en cascade	122
5.2.3	Conclusion sur la mise en usage des propositions.....	127
5.3	Discussions autour des propositions	128
5.3.1	Dimensions et caractéristiques d'un produit aux applications en cascade.....	128
5.3.2	Processus de conception d'un produit repurposé.....	130
5.3.3	Le repurposing cadré pour l'ACV.....	131
5.4	Conclusions	132
Conclusion générale.....		133
	Les apports relatifs à la stratégie de repurposing	133
	Vers où mener de futures investigations ?.....	135
Bibliographie.....		137
Annexes.....		147
	Annexe 1. Synthèse de la définition des termes permettant de caractériser les stratégies de Fin d'Usage et exemples	
	Annexe 2. Grille d'entretien suivie avec le recycleur et réponses	
	Annexe 3. Grille d'entretien suivie avec le CEA et réponses	
	Annexe 4. Tableau de définition des critères propres aux fonctions dans le cadre du repurposing	
	Annexe 5. Document de préparation au workshop	
	Annexe 6. Récolte des besoins pour le repurposing	
	Annexe 7. Tableau d'explicitation des fonctions par rapport aux critères et caractéristiques de conception	
	Annexe 8. Tableaux de caractérisation des fonctions par R&Delec, R&Dbms et R&Drecycl	
	Annexe 9. Guidelines pour la conception de produits repurposés	

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Exemples de DIY	15
Figure 2 - Cycle de Vie d'un produit, adapté de Zhang (2014)	21
Figure 3 - Coûts engagés pour un projet lors de son développement (Decreuse et Feschotte 1998) ...	23
Figure 4 - Exemples de produits réutilisés	24
Figure 5 - Cycles de vie d'un produit pour plusieurs applications successives et distinctes (2 sont représentées).....	26
Figure 6 - Installation photovoltaïque du parc de Yellowstone.....	30
Figure 7 - Étapes du processus de remanufacturing générique, selon Sundin et Bras (2005)	35
Figure 8 - Processus de conception classique	39
Figure 9 - Représentation de l'importance des besoins par Ullman (2003, p 144)	40
Figure 10 - Diagramme d'expression du besoin.....	42
Figure 11 - Description schématique du processus de conception par Gero (1990) au travers du modèle FBS	42
Figure 12 - Graphe des interacteurs (à gauche) et Graphe des interactions (à droite).....	43
Figure 13 - Exemple de graphe IDEF0	43
Figure 14 - Illustration du diagramme QFD, issu de Ullman (2003)	44
Figure 15 - Processus de conception au sein des étapes de vie d'un produit pour un usage	46
Figure 16 - Exemple de structure AHP dans une optique de remanufacturing, issue de Chakraborty, Mondal et Mukherjee (2017)	48
Figure 17 - Les étapes de l'analyse de cycle de vie (ISO 14040 2006).....	55
Figure 18 - Batterie d'une Nissan Leaf et éléments la constituant (Belchi Lorente 2016)	69
Figure 19 - Le cycle de la recherche-action selon Checkland et Holwell (1998)	71
Figure 20 - Triptyque Produit - Processus de (re)fabrication - Modèle d'affaire	75
Figure 21 - Processus de conception au sein des étapes du cycle de vie d'un produit pour deux applications en cascade	92
Figure 22 - Exemple de décomposition du graphe des interactions selon les phases du cycle de vie ...	95
Figure 23 - Extrait du tableau de définition simultanée des fonctions pour des applications successives.....	97
Figure 24 - Matrice de comparaison 'Pairwise' pour différentes applications.....	98
Figure 25 - Récapitulatif des actions et outils en support à l'ACV de produits repurposés.....	107
Figure 26 - Représentation des expertises des acteurs présents par rapport au cycle de vie du produit	114
Figure 27 - Extrait de la matrice 'Pairwise' liée à l'usage A, remplie par INDUS.INTEG	115
Figure 28 - Éléments du milieu extérieur pour une batterie à deux applications en cascade	117
Figure 29 - Graphe des interactions pour une batterie aux applications en cascade pour l'ensemble du cycle de vie	118

Figure 30 - Graphes des interactions pour (a) l'application A, (b) le processus de repurposing et (c) l'application B	119
Figure 31 - Synthèse de l'intégration des recommandations pour la conception et l'ACV de produits repurposés lors d'une démarche d'analyse fonctionnelle.....	128

TABLE DES TABLES

Table 1 - Synthèse des particularités de chacune des études ACV traitant du repurposing	62
Table 2 - Principales caractéristiques ‘processus’ d’une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)	75
Table 3 - Principales caractéristiques ‘produit’ d’une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)	76
Table 4 - Principales caractéristiques ‘modèle d’affaire’ d’une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)	76
Table 5 - Principales caractéristiques ‘processus’ d’une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)	76
Table 6 - Principales caractéristiques ‘produit’ d’une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)	77
Table 7 - Principales caractéristiques ‘modèle d’affaire’ d’une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)	77
Table 8 - Principales caractéristiques d’une offre de produit repurposé, issues des entretiens	82
Table 9 - Caractéristiques liées au ‘produit’ pour le repurposing	83
Table 10 - Catégories de caractéristiques liées au ‘processus de (re)fabrication’ pour le repurposing	84
Table 11 - Catégories de caractéristiques liées au ‘modèle d’affaire’ pour le repurposing	85
Table 12 - Principales dimensions d’un produit repurposé (synthèse)	87
Table 13 - Définition des critères visant à caractériser les fonctions d’un produit repurposé.....	96
Table 14 - Variables de décision potentielles.....	98
Table 15 - Nombre de besoins récoltés par phase et par industriel interrogé (INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL).....	114
Table 16 - Résumé de la hiérarchisation des besoins pour des applications successives, par INDUS.INTEG.....	116
Table 17 - Résumé de la hiérarchisation des besoins pour des applications successives, par INDUS.RECYCL	116
Table 18 - Description des fonctions et de leurs liens avec les différentes applications	118

GLOSSAIRE

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de d'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AF	Analyse Fonctionnelle
AFB	Analyse Fonctionnelle du Besoin
AFT	Analyse Fonctionnelle Technique
AHP	Analytic Hierarchy Process (ou Processus d'Analyse Hiérarchique)
BMS	Système de gestion d'une batterie
BSI	British Standards Institution
CdC	Cahier des Charges
CdV	Cycle de Vie
CLI	Chaine Logistique Inverse
D2L	Design for 2 Lives, littéralement Conçu pour Deux Vies
DEEE	Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques
DfX	Design for X, ou Conception pour X
DIY	Do It Yourself
EISD	Entretien individuel semi-directif
ELIBAMA	European Li-Ion Battery Advanced Manufacturing for Electric Vehicles
EME	Élément du Millieu Extérieur
FA	Fonction d'Adaptation
FBS	Function-Behavior-Structure (ou Fonction-Comportement-Struture)
FdU	Fin d'Usage
FdV	Fin de Vie
FI	Fonction d'Interaction
INDUS.INTEG	Intégrateur et fournisseur de batteries
INDUS.RECYCL	Industriel, recycleur de batteries
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques

L Co	Lithium Cobaltate
LFP	Lithium Iron Phosphate
M F	Modélisation Fonctionnelle
N iCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel Métal Hydrure
NMC	Lithium Nickel Manganèse Cobalt Oxyde
O P	Obsolescence Programmée
P PMa	Produit – Processus de (re)fabrication – Modèle d'affaires'
PSS	Product Service System, littéralement Système de Produit-Service
Q FD	Quality Function Deployment (ou Déploiement des Fonctions Qualités)
QR	Question de Recherche
R &D	Recherche et Développement
R&DBMS	Expert du système de gestion des batteries
R&DECO ²	Experte en éco-conception et éco-innovation
R&DELEC	Expert en architecture électrique de batteries
R&DINSTRUM	Expert R&D au niveau de la gestion et de l'instrumentation des batteries
R&DINTEG	Intégrateur R&D de batterie
R&DRECYCL	Expert R&D du recyclage des batteries
RA	Recherche-Action
REP	Responsabilité Élargie du Producteur
RsM	Remise sur le Marché
T RL	Technology Readiness Level : niveau de maturité d'un projet
U 1	Usage 1
U2	Usage 2
UE	Union Européenne
UF	Unité Fonctionnelle
UF _{rang1}	Unité Fonctionnelle de rang 1
UF _{rang2-X}	Unité Fonctionnelle de rang 2, liée à l'application X
V E	Véhicule Électrique

INTRODUCTION GENERALE

324 millions de tonnes, cela représente le poids de nos poubelles en France en 2014 (ADEME 2017). 324 millions de tonnes de déchets, ramenés à l'échelle de chaque individu, c'est 4'960 kg par personne pour cette seule année ! 324 millions de tonnes de déchets produits en France en 2014, si j'avais pris ma part cela aurait représenté 80 fois plus que mon propre poids. En 2014, 324 millions de tonnes de déchets représentaient aussi un coût de 17 milliards d'euros en termes de gestion (ADEME 2017).

Mais les perspectives liées au management des déchets ne sont pas si noires ! Dans le secteur industriel par exemple, l'INSEE (2016) rend compte des efforts réalisés : en 2012, 90% des déchets banals triés étaient valorisés. Toutefois, reste que pas moins de 2,1 millions de tonnes de ces déchets étaient incinérés sans récupération d'énergie ou déposés en centres de tri¹ ou de stockage². Et c'est sans compter sur les autres types de déchets produits (déchets en mélange, dangereux, etc.).

Au-delà du simple coût de gestion, il est primordial de s'interroger sur les conséquences environnementales résultant de la production de ces déchets et de mettre en place des stratégies visant leur réduction, voire leur prévention. Car, mieux que la diminution c'est bel et bien la non-production de déchets l'objectif qui doit nous animer. En ce sens, plusieurs initiatives citoyennes cherchent des solutions, à l'échelle d'individus ou de collectifs. Des mouvements comme Zéro Waste Grenoble³ participent à ces réflexions et à la mise en place d'actions locales en faveur d'une consommation axée autour de ces valeurs. Cela va de la sensibilisation du grand public à la proposition d'un 'plan citoyen pour réduire et valoriser les déchets ménagers sur le bassin grenoblois', en passant par l'accompagnement vers la confection de 'solutions maisons' visant la minimisation des impacts de notre consommation. Il est notamment question du DIY (Do It Yourself⁴). Cette solution se définit comme la réutilisation de produits en Fin d'Usage pour une application différente de la précédente, sous couvert de quelques modifications apportées par son utilisateur-fabricant. Mais les motivations de ces derniers vont bien au-delà de la simple préservation des ressources, car l'autosatisfaction de la réalisation d'un objet, les aspects ludiques et créatifs sont bels et bien présents (Lasjaunias 2013). La Figure 1 illustre la variété de cette pratique.

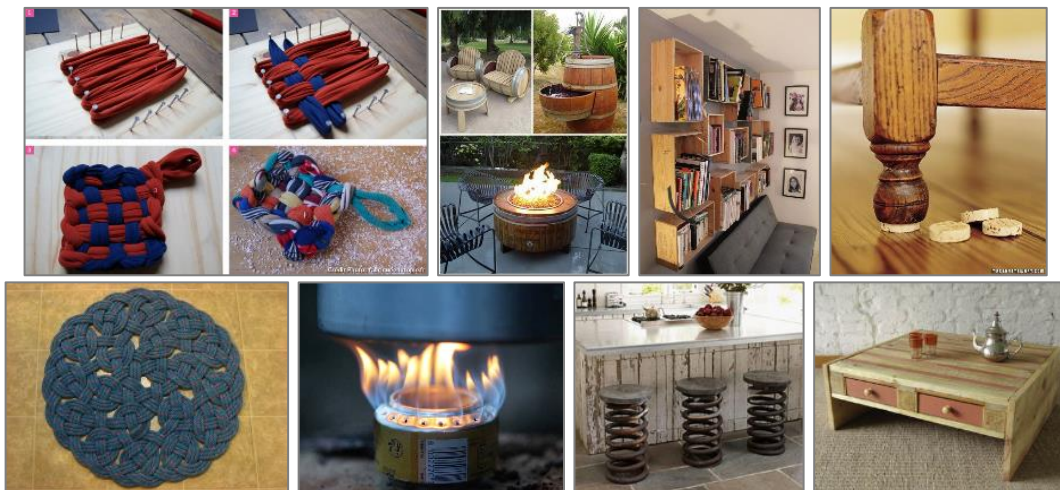


Figure 1 - Exemples de DIY (Crédits : Pinterest©, fabriquéenutopie.fr, thekimsixfix.com, marthastewart.com, lafabriquedudiy.com)

1 Centre de traitement des déchets visant à séparer les flux de déchets avant leur recyclage. Les capacités de tri étaient estimées à 7 millions de tonnes en 2017.

2 Décharges ou centres d'enfouissement.

3 <http://zerowastegrenoble.wixsite.com/accueil>

4 Littéralement : 'Fais le toi-même'.

En quoi ces pratiques, et notamment le DIY, nous intéressent ? De fait, il n'est ni plus ni moins qu'une 'vision alternative de la consommation' (Lasjaunias 2013). Certes. Néanmoins, un aspect en particulier doit être souligné : lorsque ces objets sont en fin d'usage (FdU), le DIY crée une réelle opportunité de réutilisation et de prolongation de l'usage avant que celui-ci ne soit complètement détruit. La valeur ajoutée est ainsi (partiellement) préservée, tout comme les ressources associées aux produits. Mieux encore, la seconde vie donnée aux produits peut permettre d'augmenter leur valeur-ajoutée. Nous parlons alors d'upcycling⁵. Mais, comme son nom l'indique, cette stratégie de FdU (si tant est qu'elle puisse être considérée comme telle, voir Chapitre 1), ne peut être qu'artisanale. Principalement car la fonction principale du produit est fortement modifiée, voir remplacée par une nouvelle fonction du fait de l'utilisation de l'objet dans une nouvelle application radicalement différente. Dans le même esprit, Kim et Paulos (2011) présentent de nombreux cas de réutilisation d'équipements électroniques, où, souvent, seule la fonction structurelle est conservée. Ce qui est également illustré dans la Figure 1, par les ressorts d'amortisseurs de camions transformés en tabourets, ou encore les caisses de vin en étagères. La fonction propre au produit est détournée.

Cette activité de DIY nous permet d'introduire le contexte de ces travaux de thèse par des exemples du quotidien. À l'instar de cette activité, nous cherchons à limiter la production de déchets et à préserver au maximum les ressources en réutilisant des produits dans des applications distinctes. C'est le 'repurposing'⁶. Mais là s'arrête la comparaison car nos travaux sont adressés à une toute autre échelle et dans un cadre industriel. Dans l'industrie, justement, plusieurs stratégies permettent d'ores et déjà la réutilisation de produits lorsque ceux-ci arrivent en fin d'usage. Nous parlons en général de réemploi et de remanufacturing. Ces stratégies sont davantage détaillées dans le Chapitre 1. L'intérêt majeur du repurposing est de pouvoir prolonger la durée de vie du produit lorsque d'autres stratégies de FdU ne sont pas appropriées. Quelques études montrent la faisabilité de sa mise en place sur certains produits (voir section 1.2.3), toujours à partir de produits en FdU et, au mieux, à l'échelle de démonstrateur. Pour faciliter la mise en place de cette stratégie de repurposing à une échelle industrielle, il semble que les différents usages doivent être pris en compte au plus tôt. C'est ainsi que sont conçus la large majorité des produits. Mais cela nécessite de concevoir et conditionner le produit pour répondre aux exigences successives, contrôler ses performances au cours des différents cycles d'usages et mettre en place le réseau nécessaire à leur récupération.

De par sa nature, la stratégie de réutilisation par de nouvelles applications se veut pro-environnementale, car préservatrice de ressources. Nous nous attacherons à vérifier la pertinence de ces propos ainsi que la manière dont ces études sont réalisées.

Ainsi, ces travaux de thèse veulent lever certaines interrogations par rapport à cette stratégie de réutilisation de produits, appelée aussi repurposing de produit. Nous chercherons donc à répondre à la question de recherche suivante :

'Comment intégrer la stratégie de repurposing au sein d'une démarche de conception et dans une optique d'économie circulaire ?'

Le Chapitre 1 présente le contexte spécifique de nos travaux, relatif aux stratégies de FdV actuellement mises en place dans l'industrie.

Le Chapitre 2 positionne le travail de recherche par rapport à la littérature. Différents cas d'étude autour de la problématique du repurposing sont examinés pour mieux apprécier les différences avec les stratégies de FdV existantes. Une réflexion autour des enjeux actuels liés à l'évaluation environnementale est menée. Les points précédents sont ensuite confrontés à un contexte de conception.

⁵ Littéralement : le surcyclage.

⁶ Littéralement : reconversion, redéfinition, transformation.

Le Chapitre 3 détaille la méthode de recherche et démontre la logique de l'approche suivie : l'utilisation de la recherche-action pour intégrer les problématiques sur cette stratégie naissante.

Le Chapitre 4 détaille les propositions faites en réponse à notre question de recherche. Les études menées ont permis de définir un cadre pour évaluer quelles sont les caractéristiques des offres liées au repurposing et en quoi cette stratégie influence le processus de conception. Nous détaillons ensuite les éléments à prendre en compte lors de la réalisation d'évaluations environnementales.

Le Chapitre 5 illustre la mise en usage des différentes propositions au cours d'une démarche de conception. En parallèle, les étapes de l'évaluation environnementale sont précisées. Une discussion sur l'ensemble des travaux de thèse, ses apports et ses limites vient compléter ce chapitre.

Enfin, les conclusions générales de ces travaux sont présentées et nous proposons de nouvelles perspectives de recherche.

Chapitre 1 *De la prise en compte de la fin de vie des produits au prolongement de leur durée de vie*

Résumé du chapitre. L'objectif ici est de faire un parallèle entre les stratégies de fin de vie (FdV) de la littérature et le repurposing qui nous intéresse plus particulièrement. Dans un premier temps, nous resituons le contexte, nous présentons ces stratégies de FdV et nous les illustrons. Dans un second temps, nous définissons l'objet de nos recherches et établissons un recueil des études et projets qui y sont liés.

Sommaire.

1.1	L'encadrement de la fin de vie des produits et ses répercussions	20
1.1.1	La prise en compte de la fin de vie de produits	20
1.1.2	Différentes stratégies en réponse.....	21
1.1.3	Cas industriels & exemples d'applications	23
1.2	Une stratégie pour des produits aux applications successives et distinctes	24
1.2.1	Utiliser les termes appropriés	25
1.2.2	Les fondements du repurposing	26
1.2.3	Les cas d'étude liés au repurposing et issus de la littérature	27
1.2.3.1	Des exemples parfois exotiques du repurposing	27
1.2.3.2	Les batteries face à la stratégie de réutilisation en cascade	28
1.3	Éléments de synthèse	31

De plus en plus pointé du doigt, notre mode de consommation actuel est loin d'être viable. D'un côté se trouve le tout-jetable. Il est initié dans les années 1960, pour des produits du quotidien⁷, essentiellement, et il prend son essor dès les années 1970, jusqu'à nos jours. De l'autre, certains produits sont pensés pour être plus durables⁸, mais sont jetés par leur détenteur avant même d'avoir atteint leur durée de vie. L'ADEME (2012) parle alors d'obsolescence et distingue deux cas de figure :

- L'obsolescence dite fonctionnelle, qui 'correspond au fait qu'un produit ne réponde plus aux nouveaux usages attendus, pour des raisons techniques [...], réglementaires et/ou économiques',
- L'obsolescence dite d'évolution, qui 'correspond au fait qu'un produit ne réponde plus aux envies des utilisateurs qui souhaitent acquérir un nouveau modèle du fait d'une évolution de fonctionnalité ou de design'.

L'une comme l'autre, lorsqu'elle est impulsée de manière intentionnelle par les industriels, et donc prévue dès la conception, est considérée comme de l'obsolescence programmée (OP). Bernard London (1932) est l'un des premiers à mettre en avant cette expression. L'obsolescence programmée permettait, selon London, de sortir d'une crise économique en favorisant la consommation. En réalité, elle permet avant tout aux industriels de générer davantage de profits en trompant les consommateurs et consommatrices sur la valeur des biens acquis. Pratiquée depuis les années 1920 (au moins), et révélée une vingtaine d'années plus tard par le scandale des ampoules incandescentes⁹, l'OP n'a été reconnue et légiférée officiellement en France que récemment avec la *Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte* (2015).

Et, malgré tout, la transition s'opère. De nombreux industriels ont vu le potentiel long terme des solutions plus pérennes d'offres de produits réellement durables. Celles-ci permettent de minimiser les impacts sur leur cycle de vie (CdV) et la production de déchets. Elles peuvent être mises en place à différents niveaux (Global Reporting Initiative 2013 ; Goodall, Rosamond et Harding 2014). À une échelle globale, les pouvoirs publics (la commission européenne, l'État français, etc.) peuvent cadrer la Fin de Vie¹⁰ (FdV) des produits par le biais de réglementations. À une échelle plus ou moins locale, les producteurs de déchets (industries, entreprises de services, particuliers, etc.) désireux de réduire les impacts environnementaux de leurs produits, mais aussi de maximiser leurs profits en touchant un marché plus large ou simplement répondre à des contraintes réglementaires, peuvent initier différentes stratégies : maximisation de la durée d'usage, réutilisations, recyclage, compostage, etc..

1.1 L'encadrement de la fin de vie des produits et ses répercussions

Nous présentons ici les principales stratégies de FdV et les illustrons au travers de différents exemples industriels.

1.1.1 La prise en compte de la fin de vie de produits

Pour le secteur industriel, les véhicules, les équipements électriques et électroniques ou encore les piles et accumulateurs sont des exemples de catégories de produits sur lesquelles la commission européenne a décidé de légiférer en raison de leur criticité en FdV (European Commission 2000 ; European Commission 2012 ; European Commission 2013). En rendant les producteurs de biens manufacturés responsables de la FdV des produits qu'ils mettent sur le marché, ces réglementations visent un meilleur contrôle de leurs conditions d'élimination tout en réduisant leurs impacts environnementaux. Soumettre les producteurs à des objectifs de réutilisation, de recyclage et de valorisation est aussi repris sous l'appellation de 'Responsabilité Élargie du Producteur' (European Commission 2008b).

⁷ Produits dit à usage-unique, ou non rechargeables : stylo, briquet, assiette, couvert, bouteille, etc. (Institut National de l'Audiovisuel 2018).

⁸ Entendre ici 'ayant une plus grande durée d'usage' : ampoule, téléviseur, imprimante, téléphone portable, etc.

⁹ Un cartel de fabricants imposait des durées de vie maximales sous peines d'amendes, voir (ARTE France 2013).

¹⁰ Moment à partir duquel un utilisateur se sépare de son produit.

Mais aux vues des objectifs environnementaux (programmes 3x20 pour 2020, économie circulaire), de l'Union Européenne (UE) les initiatives ne peuvent pas se limiter qu'à la fin de vie des produits (European Commission 2008a ; European Commission 2015a). La série de norme ISO 14040 (ISO 14040 2006) met en avant 5 phases principales relatives au Cycle de Vie (CdV) d'un produit, toutes ayant de potentiels impacts environnementaux : l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport, l'utilisation et la FdV (Figure 2). Ainsi d'autres textes de la commission européenne se concentrent davantage sur la phase d'utilisation en visant la réduction des impacts liés à différents intrants - énergie, eau, etc. (European Commission 2009 ; European Commission 2011). Mais dans la course à la minimisation des impacts environnementaux, la Commission européenne propose également de prolonger la durée de vie des produits (European Commission 2011), ce qui, dans certains cas, conduirait à diminuer tous les impacts en même temps.

En prônant une gestion efficace au moment de la production des produits, une sobriété à l'usage mais aussi un management de la FdV, l'Europe veut impulser une dynamique de diminution des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie des produits tout en engageant les différents acteurs.

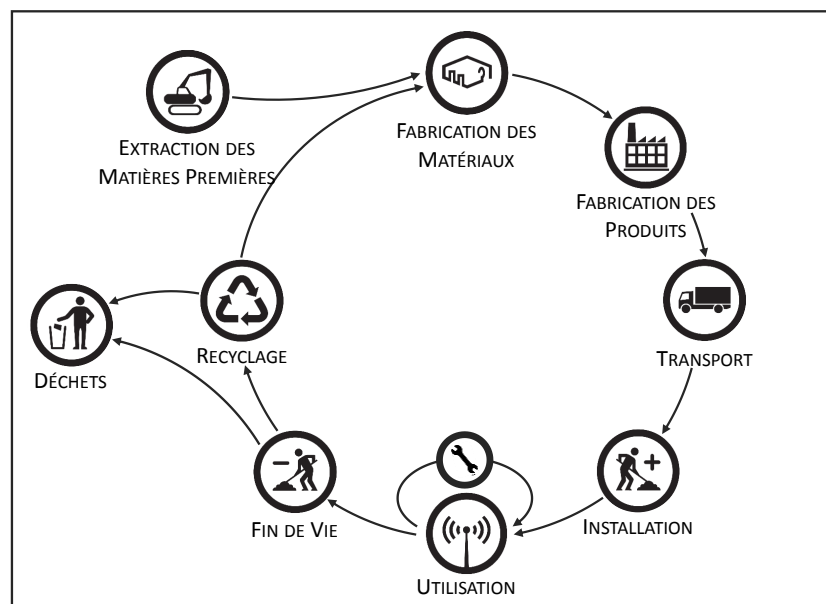


Figure 2 - Cycle de Vie d'un produit, adapté de Zhang (2014)

1.1.2 Différentes stratégies en réponse

Responsabiliser les producteurs aux déchets engendrés par leurs produits a largement contribué à développer diverses filières de FdV, allant de la réutilisation directe au recyclage. Dans la directive 'déchets' (European Commission 2008b), un ordre préférentiel de traitement des produits en FdV a été établi. Ainsi, de manière générale, il vise à favoriser :

1. la prévention,
2. la préparation en vue du réemploi,
3. le recyclage,
4. la valorisation énergétique et enfin
5. l'élimination.

Dans cette hiérarchie, les deux premières stratégies maintiennent la valeur ajoutée lors des étapes de fabrication au sein du produit. Pour cette raison elles nous intéressent particulièrement dans nos travaux. La première vise la réduction à la source en vue d'une minimisation des déchets produits alors que la seconde tend à prolonger l'usage du produit de différentes manières, réduisant par là même les impacts environnementaux des produits considérés (European Commission 2008b ; Arnette, Brewer et Choal 2014 ; Go, Wahab et Hishamuddin 2015). Dès lors, il n'est plus juste de parler de Fin de Vie, le

terme Fin d'Usage (FdU) étant plus approprié lorsque tout ou partie de la valeur ajoutée est conservée et le produit réemployé¹¹. Les stratégies impliquant directement la FdV du produit en revanche (recyclage, valorisation énergétique et élimination) ne seront que peu considérées dans cette thèse. En effet, le recyclage est entendu comme un processus permettant de récupérer de la matière issue de produits en Fin de Vie (Worrell et Reuter 2014), afin d'éviter de nouvelles extractions et, ce faisant, peut également tendre à limiter les impacts environnementaux et les problèmes d'approvisionnement. Néanmoins, la stratégie de recyclage détruit une bonne partie de la valeur ajoutée du produit en ne récupérant que les matériaux. Ces stratégies permettent de 'fermer la boucle', car les ressources sont réutilisées sous une forme ou une autre. La valorisation énergétique et l'élimination en revanche ne représentent pas des stratégies durables car elles ne permettent pas la récupération d'éléments : la valeur ajoutée et les matériaux sont détruits, respectivement par incinération et stockage des produits. Ces stratégies seront regroupées sous le label 'Déchets' (Figure 2).

Dans la famille des stratégies préservant la valeur ajoutée, des distinctions significatives peuvent être faites en fonction des étapes du processus de refabrication suivies et des performances qui en sont issues. Les stratégies de réemploi, remanufacturing et reconditionnement sont les principales (British Standard BS8887-2-2009 in Bakker et al. 2014).

Réemploi. La stratégie de réemploi est définie par la commission européenne (2008b) comme : 'toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont réutilisés dans le même but que celui pour lequel ils ont été conçus'. Gelbmann et Hammerl (2015) précisent que les performances des fonctions des produits réemployés doivent être équivalentes à celles des neufs alors que pour Arnette, Brewer et Choal (2014), les produits doivent être 'assez bons' pour permettre l'utilisation suivante. Dans tous les cas, les produits doivent être en état de fonctionnement suffisant pour être réemployés et sont souvent considérés comme d'occasion ou utiles pour de la réparation (Go, Wahab et Hishamuddin 2015).

Remanufacturing. Le remanufacturing a été tout d'abord défini par Lund (1984) comme 'un processus industriel par lequel des produits usés étaient restaurés à l'identique d'un produit neuf'. La commission européenne (2015b) précise que le remanufacturing doit garantir une performance identique ou supérieure à celle d'origine et inclure une garantie équivalente. En d'autres termes, la stratégie de remanufacturing permet de régénérer la valeur ajoutée lors des étapes de fabrication d'origines afin de prolonger la durée de vie du produit (Zwolinski, Lopez-Ontiveros et Brissaud 2006 ; Gray et Charter 2008).

Reconditionnement. Parler de reconditionnement équivaut plus ou moins à faire du remanufacturing mais de manière dégradée, c'est-à-dire sans objectif de reconstruction « a neuf ». En ce sens, le British Standard BS8887-2-2009 le définit comme une succession d'étapes de 'refabrication et de réparation de composants proches de défaillir permettant le retour du produit à un état de fonctionnement satisfaisant'.

En tout état de fait, ces stratégies ne sont possibles que si les performances des produits sont suffisantes, pour le réemploi par exemple, ou si les processus de refabrication permettent de rendre tout ou partie de leurs performances aux produits, dans le cas des stratégies de reconditionnement et de remanufacturing. Qu'elles soient pensées dès la conception du produit ou initiées en cours d'usage, ces stratégies ont un objectif commun : remettre sur le marché un produit similaire à celui d'origine, (re)fabriqué à partir des mêmes matériaux voire des mêmes éléments. Ainsi, les produits réemployés et remanufacturés devraient bénéficier de garanties équivalentes et tous devraient être réutilisés pour les mêmes applications.

À l'autre bout du CdV, et en fonction des caractéristiques des produits, de la réglementation à laquelle ils sont destinés et de la politique interne de l'entreprise, ce sont les concepteurs qui peuvent mettre en place des stratégies de maintien de la valeur ajoutée. En les intégrant au plus tôt dans le CdV du produit, ils maximisent le respect de leurs obligations relatives à la FdV, les étapes amont étant décisives

¹¹ Pour autant, le terme 'stratégie de FdV' continuera à être employé pour parler à la fois de la FdV et de la FdU.

pour assurer une minimisation des impacts sur le CdV global (Roucoules, Yannou et Eynard 2006). En ce sens, le célèbre graphe des coûts engagés en fonction de l'avancement d'un projet peut être transposé à la problématique environnementale (Figure 3). Le Bureau Veritas va dans ce sens en précisant qu'à l'issue de la phase de conception, 90% des coûts sont engagés, mais seulement 10% des dépenses. Les impacts environnementaux peuvent alors être déterminés à hauteur de 80% (les 20% restant étant imprévisibles car liés à des phases du CdV non réalisées) (Bureau Veritas 2012).

Pour guider les équipes de conception à l'intégration de ces stratégies et de l'environnement au sens large, de nombreuses méthodes, directives et normes sont disponibles aujourd'hui. On peut citer le 'Design for Environment', 'Design for Remanufacturing', 'Design for Refurbishment', 'Design for Recycling', des normes relatives à l'écoconception (NF E 01-005), des outils d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) quantitatifs et qualitatifs encadrés par des normes (ISO 14040, ISO 14062), etc. (ISO 2006 ; Crul et Diehl 2009 ; Hatcher, Ijomah et Windmill 2011 ; AFNOR 2013 ; Arnette, Brewer et Choal 2014 ; den Hollander, Bakker et Hultink 2017).

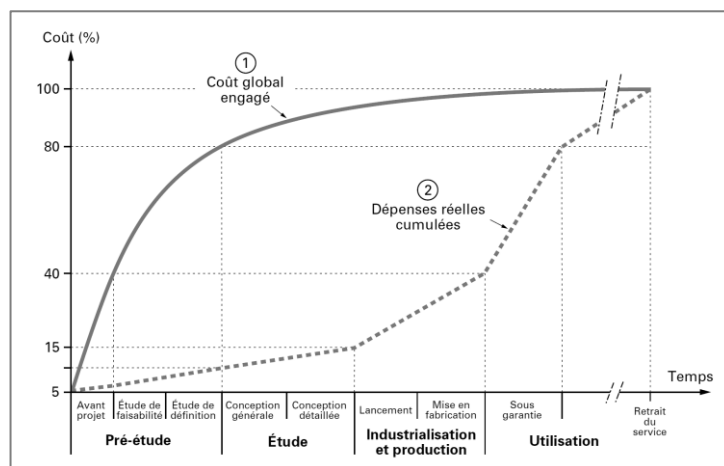


Figure 3 - Coûts engagés pour un projet lors de son développement (Decreuse et Feschotte 1998)

1.1.3 Cas industriels & exemples d'applications

La littérature illustre bien cette tendance à vouloir prolonger l'usage de produits. De nombreux projets académiques et/ou industriels sont menés depuis plusieurs années pour comprendre les problématiques qui y sont liées. Par exemple, le projet européen ResCoM¹² avait pour objectif de transformer des déchets en ressources en aidant au choix de la stratégie de FdV la plus appropriée pour fermer la boucle (Lieder et Rashid 2016). Certains projets visent la réduction des impacts environnementaux liés à la phase d'usage. Cela peut passer par l'intégration des services basés sur les technologies de l'information et de la communication (projet EPES¹³ (Armijo et al. 2015)) ou l'intégration de cycles d'upgrades¹⁴ consécutifs (projet IDCyclUM¹⁵ (Pialot et al. 2015)). D'autres, plus spécifiques et orientés FdV, visaient le développement de méthodologie pour la réparation de matériaux composites (ReCarboFit¹⁶ (Plank et al. 2013)) ou leur régénération (ReCoVeR¹⁷). Plus largement, le projet européen ERN¹⁸ a permis de dresser un état des lieux européen des entreprises investies dans la réutilisation de produits, et plus particulièrement du remanufacturing. Les quelques exemples ci-après en sont issus.

¹² Resource Conservative Manufacturing (<http://rescoms.eu/>).

¹³ Eco Process Engineering System for composition of services to optimize product life cycle (<http://epes-project.eu/>).

¹⁴ Amélioration, ou mise à jour, physique du produit pour inclure de nouveaux besoins.

¹⁵ Innovations Durables à Cycles d'Upgrades Multiples (<http://www.g-scop.grenoble-inp.fr/product-process-design/idcyclum-683857.kjsp>).

¹⁶ Development of a repair-methodology for carbon fiber reinforced components.

¹⁷ Regenerated Composite Value Reinforcement (<http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/I037970/1>).

¹⁸ European Remanufacturing Network (www.remanufacturing.eu).

Des applications très diverses existent pour les produits réutilisés et, ce, dans de nombreux secteurs d'activité tels que l'aérospatial, l'automobile, les produits électriques et électroniques, les meubles, les machines industrielles, la marine, le sport, etc.. Ces produits peuvent être simples ou complexes (Figure 4 i & a), utilisés à large échelle ou pour des applications spécifiques (Figure 4 b & g) pour des particuliers ou des professionnels (Figure 4 d & e). De plus, la réutilisation peut s'opérer sur des composants ou sur des produits complets (Figure 4 b & c).

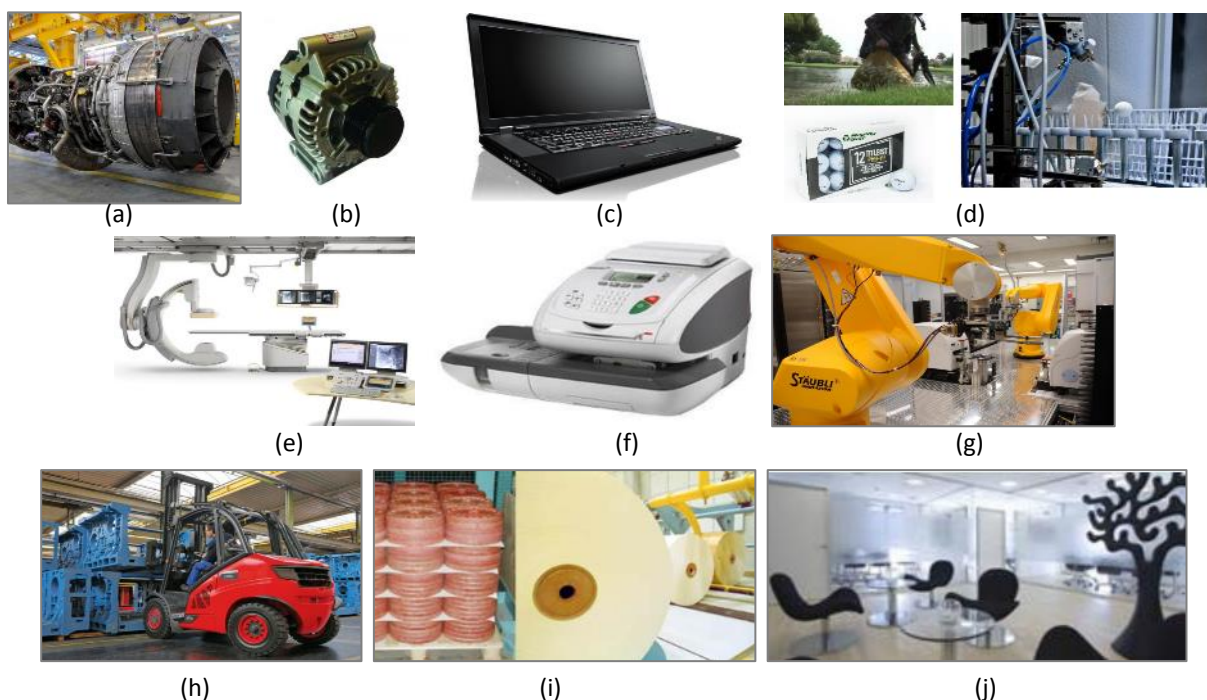


Figure 4 - Exemples de produits réutilisés (Crédit photos : Projet ERN) : (a) moteur d'avion remanufacturé, (b) alternateurs de voitures remanufacturés, (c) ordinateurs reconditionnés (d) des balles de golf remanufacturées, (e) matériel médical upgradable et personnalisable, (f) machines d'affranchissement du courrier, (g) robots industriels remanufacturés, (h) chariot élévateur reconditionné, (i) bouchons pour bobines de papiers, (j) matériel de bureau reconditionné

D'une manière générale, les opérations visant la réutilisation du produit peuvent être axées sur l'une ou l'autre des phases du CdV d'un produit : dès la fabrication, en facilitant les opérations à venir par une conception appropriée ; lors de l'utilisation, par l'évaluation et la correction des performances attendues en cours d'usage ; et en FdU et FdV par la récupération du produit et sa remise à niveau. Malgré tout, ces stratégies de FdV visant le maintien de la valeur ajoutée peuvent ne pas convenir à tous les produits. C'est notamment le cas lorsque les fonctions principales des produits sont trop dégradées et qu'elles ne peuvent être restaurées. Les produits doivent alors, au mieux, être recyclés.

1.2 Une stratégie pour des produits aux applications successives et distinctes

La réutilisation pour une autre application. Cela doit permettre de prolonger la durée d'usage d'un produit et, donc, de limiter ses impacts sur l'environnement. La littérature emploie différents termes pour caractériser cette stratégie. Ceux-ci sont présentés ci-après ainsi que la stratégie retenue. Des exemples issus de la littérature sont également apportés.

1.2.1 Utiliser les termes appropriés

Le réemploi ou le reconditionnement pour une application différente, la réutilisation (voire réhabilitation, régénération ou encore la réaffectation) de déchets, l'utilisation en cascade, le 'repurposing', la reconfiguration, la recontextualisation, la seconde vie, le second usage, etc., sont autant de termes et d'expressions employés pour caractériser cette stratégie de réutilisation.

Définition. La stratégie considérée a d'ores et déjà été définie dans Bauer et al. (2016) et Bauer, Brissaud et Zwolinski (2017). Elle vise la réutilisation de produits en Fin d'Usage afin de préserver leur valeur ajoutée, principalement lorsque les stratégies de réutilisation, comme le réemploi ou le remanufacturing, ne sont pas applicables du fait de contraintes économiques ou techniques liées au système. D'après DeRousseau et al. (2017), cette stratégie est une bonne alternative au recyclage lorsque le remanufacturing n'est pas une option pleinement envisageable. L'une des principales raisons est liée à la diminution des performances des produits. Ne pouvant être rétablies à leur niveau initial, du fait d'un processus de refabrication inexistant ou de coûts trop élevés, les performances sont telles que le produit n'a d'autre choix que d'être réutilisé dans des applications et domaines différents. Cette stratégie permet de retarder le recyclage (ou l'élimination) du produit en prolongeant sa durée de vie. Des accords liés à la Responsabilité Élargie du Producteur¹⁹ (REP) peuvent également être définis entre les fabricants successifs. Dans le cas présent, et à la fin de la première utilisation, la responsabilité de la Fin de Vie (FdV) peut être, en partie ou en totalité, transférée sur le second usage. Et cela sur autant de cycles que possible avant la FdV effective du produit. À l'instar des autres stratégies de réutilisation, la prise en compte des applications successives dès les phases amont de la conception doit permettre une meilleure intégration et faciliter les opérations nécessaires à leur réutilisation d'une application à l'autre.

Quel terme utiliser ? Les termes de réemploi et reconditionnement sont d'ores et déjà utilisés dans des cas précis et définis au paragraphe 1.1.2. La réutilisation de déchets, la seconde vie ou le second usage sont des termes qui attachent plus d'importance à l'une ou l'autre des applications au détriment de la (ou des) autre(s) et ne sont donc pas retenues. La réaffectation laisse entendre que le produit est réutilisé directement et complètement à un nouvel usage. Si la notion de nouvelle application est bien présente, le processus qui le permet est gommé. L'expression d''utilisations en cascade' illustre davantage les problématiques de réutilisation associées à cette stratégie, à savoir que les applications ultérieures dépendent des applications antérieures. En ce sens, le nombre, les performances en FdU, la disponibilité des produits, etc., lie les applications les unes aux autres. L'International Resource Panel²⁰ définit l'expression d'usage en cascade comme 'une succession de phases d'utilisation où la valeur du produit diminue'. La reconfiguration est, elle, davantage entendue comme la modification momentanée du produit pour répondre à une attente particulière. Il est alors possible, sans contrainte, de revenir à la configuration initiale. Le BSI définit le repurposing comme 'l'utilisation d'un produit ou de l'un de ses composants dans un rôle pour lequel il n'est pas originellement conçu' (British Standards 2009) et n'inclut ni de référence à la conception sur plusieurs usages, ni les aspects de contrôles et refabrication à l'instar des stratégies plus classiques de réutilisation. Ce dernier point est la raison pour laquelle den Hollander, Bakker et Hultink (2017) lui préfèrent le terme 'recontextualisation', plus précis mais n'incluant toujours pas les aspects de conception pour plusieurs applications. Du fait de sa large présence dans la littérature, le terme repurposing sera malgré tout retenu et adapté à la définition précédente. L'expression d''utilisations en cascade' est considérée comme équivalente dans ces travaux de thèse, à ceci près qu'aucune hypothèse de dégradation de la valeur du produit n'y est associée.

¹⁹ La REP contraint les metteurs sur le marché (producteurs, importateurs ou distributeurs de produits), des filières concernées (Équipements Électriques et Électroniques par exemple) à en gérer la FdV.

²⁰ Voir la définition du terme 'cascading use' : <http://internationalresourcepanel.org/glossary>

1.2.2 Les fondements du repurposing

La stratégie de repurposing ainsi définie vise le prolongement de la durée de vie du produit. Pour ce faire, il est utilisé consécutivement dans des applications distinctes, une fois, deux fois, n fois, etc.. Des bénéfices environnementaux liés à cette réutilisation du produit sont probables du fait de l'optimisation matière qui en résulte (Ahmadi et al. 2014). Certains points spécifiques caractérisent cette stratégie. Tout d'abord, les fonctions principales des produits ne devraient pas beaucoup varier d'une utilisation à l'autre. En effet, même si les performances peuvent évoluer d'un usage à l'autre, le produit doit répondre au même besoin principal. Ensuite, le produit doit être récupérable (physiquement et intellectuellement) en FdU pour assurer l'usage suivant. Il n'y a pas de cannibalisation de parts de marché entre les usages comme cela est possible avec le remanufacturing du fait d'applications distinctes. Par ailleurs, les étapes de refabrication nécessaires pour garantir les performances d'une FdU à l'application suivante doivent être définies, de préférence à l'avance. Pour faciliter ces étapes, surveiller l'évolution des performances du produit au cours de ses phases d'usage devrait faciliter son repurposing au moment venu. La Figure 5 représente la succession d'étapes liées au CdV d'un produit destiné à plusieurs applications.

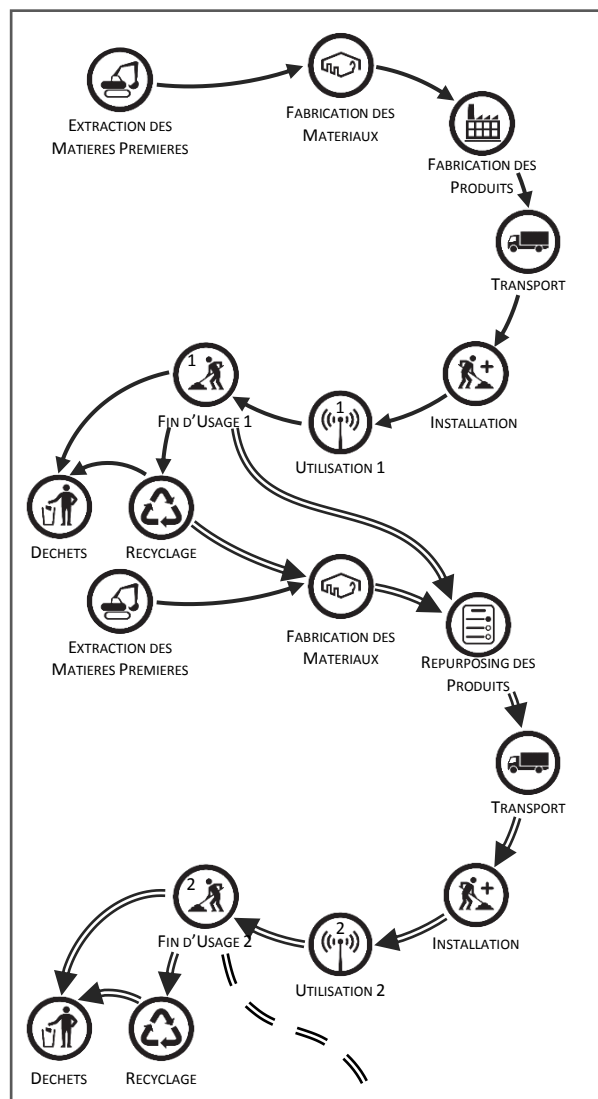


Figure 5 - Cycles de vie d'un produit pour plusieurs applications successives et distinctes (2 sont représentées)

Contrairement aux produits aux cycles de vie linéaires 'classiques', c'est-à-dire utilisés une fois et jetés, un produit réutilisé est conçu et fabriqué (Fabrication des Produits) pour être utilisé dans une première application (Utilisation 1) avant d'atteindre sa première FdU (Fin d'Usage 1). Le produit est ensuite réutilisé - c'est-à-dire que ses fonctions sont réadaptées à l'application suivante - lors d'un autre processus de fabrication (Repurposing des Produits) avant d'être utilisé dans une 2ème application (Utilisation 2) et d'atteindre la seconde FdU. À partir de là, d'autres applications sont possibles. Néanmoins, à un moment donné, le produit finira par être recyclé ou jeté (Déchets) car il ne répondra plus au besoin. L'un des principaux exemples dans la littérature concerne les batteries de véhicules électriques (VE) qui pourraient être réutilisées comme stockage électrochimique pour des applications stationnaires lorsqu'elles atteignent leur FdU dans les VE.

Deux stratégies de conception sont possibles pour les applications en cascade. La première consiste à attendre la FdU1 pour intégrer les problématiques et les besoins liés au second usage. L'avantage réside dans le fait que l'état du produit est connu, ainsi que ses caractéristiques et performances résiduelles. La seconde cherche à inclure le second usage, dès la conception du premier, afin d'optimiser performances environnementales et gains économiques sur l'ensemble du CdV en facilitant la réutilisation du produit. En revanche, intégrer des applications successives au moment des phases de conception implique davantage de contraintes à prendre en compte et davantage de compromis à faire. Par ailleurs, l'investissement fait en amont peut être vain si les performances du produit ne sont pas suffisantes pour un (ou des) usage(s) ultérieur(s).

1.2.3 Les cas d'étude liés au repurposing et issus de la littérature

Il existe plusieurs exemples de produits ayant des applications successives et distinctes dans la littérature. Certaines études évaluent la faisabilité technique du repurposing d'une application à la suivante. D'autres cherchent à valider la pertinence environnementale de la stratégie sur un produit en particulier. Les dernières visent à apprécier la pertinence économique et les conditions d'un retour sur investissement. Plusieurs projets de recherche couvrent ces thématiques, souvent autour d'un même produit dédié à une application spécifique en plein essor : les batteries des véhicules électriques (VE), réutilisées en fin d'usage (FdU). Ce produit fait l'objet d'une attention particulière au sein de ces travaux de thèse car il constitue le cas d'étude principal pour leur développement. Mais, d'après la définition donnée à la section 1.2.1, la stratégie de repurposing ne se limite pas à ce seul exemple et regorge d'autre cas d'étude, présentés ci-après.

1.2.3.1 Des exemples parfois exotiques du repurposing

Pour mieux comprendre ce qui est entendu par l'expression 'repurposing de produits', plusieurs exemples issus de la littérature sont présentés.

Des exemples variés de produits repurposés. Le fabricant de meubles VITSOE²¹ propose toute une gamme de meubles modulaires et reconfigurables. Passer d'une étagère à un bureau, d'un bureau à un meuble bas est la philosophie de leur gamme de produits '606 Universal Shelving System'. Toujours dans la réutilisation de meubles, Krystofik et al. (2017) parle de remanufacturing 'adapté' en prenant exemple de la société Davies qui reconfigure les mêmes meubles différemment en fonction de leurs clients. D'autres initiatives, comme le fabricant de meubles Maximum, utilise des produits et sous-ensembles issus de l'industrie dans la fabrication de leurs produits. Ceux-ci sont donc pour la plupart composés d'éléments réutilisés, considérés comme des déchets pour leur ancien propriétaire.

Tout comme les meubles, la mise en place d'une conception modulaire en vue d'une réutilisation est un élément présent dans la littérature pour des robots industriels (Prassler et al. 2009 ; Bi et al. 2015). Les composants et les programmes des robots doivent être divisés en plusieurs sous-systèmes fiables pour faciliter leur réutilisation et leur reconfiguration (Prassler et al. 2009). De plus, chaque phase de

²¹ www.vitsoe.com/eu/606

reconception doit être spécifiquement adaptée à la nouvelle mission et au nouvel environnement (Bi et al. 2015).

Dans son manuscrit de thèse, Park (2009) met en avant de nombreuses possibilités de prolonger la durée de vie des produits électroniques. Il évoque notamment la réutilisation de téléphones portables en FdU pour diverses applications : anémomètre, éthylomètre, horloge, etc..

La stratégie de repurposing peut également s'appliquer à des produits plus simples. Une étude montre que des sacs de caisse haute densité peuvent être employés en tant que pare-vapeur pour un immeuble après qu'ils aient été découpés et réassemblés. Avec un processus de refabrication exigeant et hautement technologique (la fusion par fer à repasser), les résultats du produit final équivalent ceux des pare-vapeurs classique en terme de perméabilité et durabilité (Beltramo et al. 2011).

Avec un changement radical de fonction, d'application et d'usage, Kim et al. (2017) ont développé une méthode pour repurposer des CDs²² en moules dans le but de fabriquer des nanofils pour des transistors à effet de champ organique haute-performance, en remplacement du processus de fabrication conventionnel de lithographie douce.

Au Royaume-Uni, plusieurs équipes ont étudié la faisabilité de la réutilisation d'une alimentation d'ordinateur de bureau. Tout d'abord, pour l'alimentation d'un système photovoltaïque destiné aux pays en voie de développement. Celle-ci permet la correction du facteur de puissance pour la charge de la batterie photovoltaïque (Rogers et al. 2013). Puis, plus proche de sa fonction d'origine, en convertisseur de courant alternatif-continu pour permettre la charge d'une batterie de voiture (Abuzed et al. 2016). Le dernier exemple de produit où le rôle a été changé est un ordinateur, réutilisé comme serveur de clients légers, pour le stockage de données et l'exécution de logiciels (den Hollander, Bakker et Hultink 2017). Une fois de plus, cela permet de conserver une partie de la valeur-ajoutée par la prolongation de la durée de vie du produit.

Synthèse. Ces exemples de produits très variés reflètent les possibilités qui se retrouvent derrière le repurposing. Dans tous les cas, la fonction du produit évolue d'un usage à l'autre, plus ou moins en fonction de l'application ciblée. Mais ces exemples sont pour la plupart des expériences uniques alors que le repurposing se veut être une stratégie industrielle. Un autre cas est au cœur de l'attention de la stratégie de repurposing ces dernières années. Il en reflète davantage les enjeux car il associe à la fois les nécessités de prise en compte techniques pour le passage d'une application à l'autre, mais aussi environnementales.

1.2.3.2 Les batteries face à la stratégie de réutilisation en cascade

Le cas 'batterie'. La spécificité de ce cas d'étude vient essentiellement du fait que les batteries de VE ne sont pas obsolètes fonctionnellement en FdU, bien qu'elles ne répondent plus au besoin initial. Le vieillissement des batteries tend à réduire leur capacité de stockage. Lorsque cette diminution attend 20 à 30% de la capacité initiale, soit entre 5 et 10 ans, celles-ci sont remplacées par de nouvelles et recyclées. Classiquement, une batterie est considérée comme un déchet ultime lorsque sa capacité résiduelle est inférieure à 50% (ADEME 2012). Sur le papier, prolonger la durée de vie des batteries de VE par une seconde application permettrait de différer leur recyclage tout en maximisant leur valeur-ajoutée et en minimisant leurs impacts environnementaux. Dans le cas des batteries au lithium, et jusqu'à il y a peu, aucun processus de remanufacturing ne permettait de recouvrer leurs capacités initiales. Ou alors, ces processus n'étaient possible qu'avec des batteries en très bonne santé (DeRousseau et al. 2017). Mais les recherches expérimentales du Pr. Yazami ont récemment abouties à la régénération de batteries à hauteur de 95% (Grenoble IN'Press 2018). Bien que ces recherches ne précisent pas les applications envisagées ni les coûts de l'opération, elles sont prometteuses dans les actions de prolongation de l'usage. En attendant une industrialisation de ces processus, le repurposing de batteries semble à privilégier.

²² Ancêtre du fichier MP3 et successeur de la cassette audio et du vinyle, le CD est encore utilisé chez de rares individus pour ses fonctions premières originelles : stocker du contenu multimédia et/ou permettre l'écoute de musique.

Les problématiques environnementales. En attendant une nouvelle rupture technologique dans ce domaine, de nombreux projets et études gravitent autour de la réutilisation des batteries automobiles pour d'autres applications. Et pour cause, bien que cela ne se vérifie pas systématiquement, le développement du véhicule électrique fait partie des solutions présentées comme les plus prometteuses par les pouvoirs publics pour enrayer les 'émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques' liés au secteur du transport (*Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte* 2015). Il est donc voué à générer de plus en plus de déchets, potentiellement dangereux en ce qui concerne leur batterie. Des chercheurs du Golisano Institute for Sustainability du RIT ont davantage étudié la question de la fin de vie (FdV) des batteries de VE. Leurs projections rendent compte d'une augmentation significative des impacts liés aux déchets. Par ailleurs, seulement 42% d'entre elles pourraient être recyclées avec les technologies actuellement en place (Richa et al. 2014). L'une des réponses est apportée par la School of Environment, Enterprise and Development, de l'Université de Waterloo qui a axé le projet Sustainable management of lithium-ion batteries sur la réutilisation de batteries de VE dans des applications smartgrid. L'objectif étant de faciliter l'intégration de l'utilisation de sources d'énergie renouvelables tout en diminuant les impacts environnementaux globaux et en maximisant la valeur ajoutée des batteries. Plusieurs Analyses de Cycle de Vie²³ (ACV) ont été réalisées pour évaluer les impacts environnementaux du repurposing de batteries vers des applications de stockage d'électricité provenant du réseau. C'est ainsi qu'Ahmadi et al. (2014) comparent différents scénarios de première et seconde vies en termes d'émissions de dioxyde de carbone. Néanmoins, comme toute ACV, la nécessité de définir précisément le CdV des batteries apparaît. Il est nécessaire d'avoir un maximum d'informations liées aux caractéristiques techniques des batteries, pour chacune des applications. Mais au-delà de ce point, dans le cadre du repurposing, l'accès à l'historique du vécu des batteries est tout autant primordial. Or, ces données ne sont souvent disponibles qu'a posteriori, à l'issue des phases d'usage, alors qu'il est nécessaire de les caractériser au mieux, le plus en amont possible. Par ailleurs, peu d'informations sont présentes sur la viabilité économique de la réutilisation de batteries pour d'autres applications. Ce business, bien que se voulant vertueux, ne verra pas le jour s'il n'est pas économiquement rentable.

Des projets de recherche multiples. Axé sur les aspects technologiques des batteries, le projet ELIBAMA²⁴ évalue leur potentiel pour une seconde vie. Leur capacité et leur vieillissement en première et seconde vies sont jaugés pour différentes applications et une description de différents procédés de diagnostics est apporté. Les potentielles applications de seconde vie sont identifiées d'après la littérature : stationnaires ou mobiles, de petite, moyenne ou large taille. Seules les applications d'alimentation sans coupure (bloc de secours) sont écartées pour des raisons techniques. Dans le projet Batteries 2020²⁵, porté par IK4 IKERLAN, les partenaires cherchent à améliorer la performance des batteries de VE, leur durée de vie ainsi que leur coût total de possession. Pour ce faire, ils visent le développement de cellules performantes et durables, de moyens de prévision de durée de vie fiables ainsi que la compréhension des phénomènes de vieillissement. Dans une étude de 2016, Assunção, Moura et de Almeida évaluent la faisabilité technique et la rentabilité économique de la stratégie de repurposing sur le cas batteries. Leurs conclusions vont en faveur de la stratégie de réutilisation tant pour l'une que pour l'autre. Pour maximiser les possibilités de second usage, Rohr et al. (2017) proposent une méthode pour quantifier les incertitudes liées aux aspects économiques et techniques de la réutilisation de batteries de VE. Tong et al. (2017) ont mis en place un démonstrateur pour évaluer la faisabilité de la réutilisation de batteries de VE pour une application stationnaire. Couplées à un système de production d'électricité solaire et placées dans une maison, les batteries ont nécessité le développement d'un nouveau système de gestion (BMS) pour pouvoir fonctionner. L'étude montre que les batteries repurposées ont permis d'atténuer l'intermittence solaire et de réduire la fluctuation de la demande d'énergie en stockant l'énergie excédentaire lors des heures creuses et en la restituant en périodes de pointe. Une étude prospective

²³ Voir section 2.3.1 pour une explication de l'ACV.

²⁴ European Li-Ion Battery Advanced Manufacturing for Electric Vehicles, (www.elibama.wordpress.com).

²⁵ www.batteries2020.eu

de Beverungen et al. (2017) identifie également plusieurs applications possibles pour la réutilisation de batteries (pont de puissance, mobilité légère, systèmes de secours en containers) et évoque la nécessité de reconcevoir le BMS pour l'application ultérieure. Klör et al. (2017) a développé un outil d'aide à la décision pour définir le choix de l'application de seconde vie lors du retour d'une batterie usagée. Un rapport de Standridge et Corneal (2014) précise néanmoins que la viabilité de la mise en place du re-purposing de batteries de VE dans des applications stationnaires ne doit pas dépasser un coût de développement de 114 \$/kWh.

Dans une approche plus globale, une étude prospective sur la mise en place d'une filière de seconde vie pour les batteries des VE a également été réalisée par l'ADEME (2011). Sur la base d'entretiens avec des experts, les applications préférentielles et les performances attendues en FdU sont précisées et les pertinences environnementale et économique de cette stratégie sont évaluées et confirmées. Le projet ABattReLife²⁶, quant à lui, tend à développer l'état actuel des connaissances sur des aspects couvrant les trois piliers du développement durable. Les partenaires cherchent à optimiser le Cycle de Vie (CdV) des batteries de VE par leur réutilisation dans d'autres applications. La définition des leviers sociaux, économiques et réglementaires associés, ainsi que l'étude du comportement de dégradation de la batterie, doit permettre la création d'une chaîne de valeur intégrée pour sa gestion. Plus proche de Grenoble, par le temps et l'espace, le projet CIRCULAR²⁷ de l'Univ. Grenoble Alpes vise à développer des systèmes industriels circulaires robustes capables de transformer des produits en FdU en de nouveaux produits tout en conservant au maximum leur valeur ajoutée. Le cas des batteries est une fois de plus lié à cette stratégie de réutilisation. Par ailleurs, Idjis (2015) a modélisé les différentes variables technico-économiques afin d'évaluer la faisabilité de la mise en place d'une filière de réutilisation de batteries de VE, de manière prospective. Les principales à considérer sont : le pourcentage des ventes VE, le pourcentage de batteries en FdU reconditionnées pour une seconde application, les coûts fixes annuels inhérents à chaque unité de reconditionnement et le prix des futures batteries. Pour évaluer la chaîne de valeur globale pour des batteries de VE réutilisées dans des applications stationnaires, Bowler (2014) propose d'identifier les différences de fonctionnalités entre les applications. Pour ce faire, les batteries sont décomposées selon leurs sous-ensembles et les écarts entre les 2 applications sont évalués. À plus large échelle un projet a été initié au parc national de Yellowstone, aux États-Unis (Figure 6). En partenariat avec Toyota, 208 packs batteries servent à stocker de l'électricité photovoltaïque pour permettre au ranch du Lamar Buffalo d'être indépendant du réseau électrique (Toyota 2015). Enfin, un projet labellisé 'investissements d'avenir' entre le CEA et la SNAM a été initié sur la période 2015-2019. Il vise le développement de méthodes et moyens de diagnostics pour valoriser des batteries de seconde vie dans de nouvelles applications. (ADEME 2015).



Figure 6 - Installation photovoltaïque du parc de Yellowstone (crédit photo : 3BL Media)

Premiers éléments apportés par la littérature 'batterie'. Particulièrement bien documenté, le cas du re-purposing de batteries de VE vers d'autres applications, essentiellement stationnaires, a en quelques

²⁶ Automotive Battery Recycling and 2nd Life (www.abattrelife.eu).

²⁷ Designing circular industrial systems for the Industry of the Future (www.circular.univ-grenoble-alpes.fr).

années suscité l'engouement de nombreux académiques et industriels. La valeur résiduelle des batteries aidant. Les perspectives de gains environnementaux aussi. Au travers des projets et études présentées précédemment, différents éléments ressortent particulièrement. Tout d'abord, certaines spécificités sont liées exclusivement au produit 'batterie'. En fonction de l'usage initial, il est nécessaire d'évaluer sa durée de vie restante et sa capacité. Établir quels types de sollicitations la batterie a subi permet de mieux définir l'évolution de son vieillissement et ses performances résiduelles. Mais des éléments doivent être totalement réadaptés à la nouvelle application. Le processus de (re)fabrication fait l'objet d'une attention particulière, principalement en ce qui concerne la fabrication d'un nouveau BMS. D'autres opérations sont également considérées comme majeures : les tests pour l'évaluation et la caractérisation des performances des batteries font l'objet d'une recherche attentive. Plus globalement, l'organisation qui va autour est un élément essentiel à prendre en compte. La logistique inverse en est le premier maillon car, sans produit, cette stratégie ne peut exister. L'application la plus adaptée, aux performances de la batterie mais aussi au marché doit être précisée. La législation doit a minima autoriser cette stratégie (si les fabricants des applications sont différents par exemple), voire la soutenir. Au-delà de ces aspects très pragmatiques, la problématique de l'offre 'juste' doit être définie pour que toutes les parties-prenantes en bénéficient au mieux. De nombreuses variables vont intervenir dans cette équation, liées au produit, au processus de (re)fabrication et à l'organisation de l'offre.

1.3 Éléments de synthèse

Les exemples et cas d'applications autour de la stratégie de réutilisation incluent des produits plus ou moins complexes, électronique ou non, parfois conçu pour plusieurs cycles d'usage mais pas systématiquement. À travers ces exemples certaines spécificités liées à la stratégie de réutilisations en cascade apparaissent. À titre d'exemples, les performances des batteries, ou encore les problématiques d'espace disponible et de sécurité sont davantage contraintes dans la première application que dans la seconde. À contrario, la capacité des batteries utilisées dans des applications stationnaires est généralement bien plus importante que dans les VE. Mais peu de projets ou études présents dans la littérature abordent cette problématique dans une logique d'industrialisation à part entière. En conséquence, ni les besoins propres aux offres de produits repurposés, ni les processus de refabrication, ni les implications que cela a en conception ne sont clairement établies dans la littérature. Et pour cause, cela tend à multiplier les contraintes à ces différents niveaux, ce qui est d'autant plus difficile à appréhender lorsque la durée de vie des produits dans leur premier usage est longue.

Au vu des premiers éléments, il semble que le repurposing ait de fortes similitudes avec les stratégies de remanufacturing et de réemploi présentées dans la section 1.1.2. Il semble donc possible de faire certains parallèles entre ce qui existe dans la littérature relative aux stratégies de FdU et celle à l'étude. C'est ce qui va nous intéresser, dans un premier temps, au chapitre suivant.

Chapitre 2 *Positionner la problématique naissante du prolongement de l'usage par de nouvelles applications dans la littérature existante*

Résumé du chapitre. Ce chapitre présente tout d'abord différentes stratégies de fin d'usage. Puis, leur implémentation au moment de la conception des produits fait l'objet d'une attention particulière. Ces travaux de thèse pourront ainsi, par analogie, mieux cerner les enjeux liés à la stratégie de repurposing. Par la suite, un état des lieux des problématiques liées à la modélisation environnementale des produits en FdU est également établi et les manques soulignés.

Sommaire.

2.1	Le repurposing parmi les stratégies de fin d'usage de la littérature	34
2.1.1	Les dessous du réemploi de produits	34
2.1.2	La stratégie de remanufacturing passée à la loupe	34
2.1.3	Investigations quant aux offres de produits repurposés	36
2.1.4	Synthèse des caractéristiques des stratégies de FdU issues de la littérature	37
2.2	Les démarches de conception : une prise en compte de l'usage, de sa fin et des suivants	38
2.2.1	S'ouvrir pleinement à l'usage : la démarche de conception intégrée	38
2.2.1.1	Présentation de la conception intégrée	39
2.2.1.2	Les étapes du processus de conception.....	39
2.2.1.3	Le rôle majeur des étapes préliminaires pour la conception intégrée	40
2.2.1.4	Des exemples de méthodes pour l'analyse des besoins et des fonctions en conception ...	41
2.2.1.5	Conclusion	44
2.2.2	Une prise en compte plus large du cycle de vie, pour l'inclusion de la fin d'usage	45
2.2.2.1	Les intérêts de la conception intégrée pour la fin d'usage.....	45
2.2.2.2	Une représentation différente du cycle de vie et ses conséquences en conception	46
2.2.2.3	Les approches développées pour la fin d'usage	47
2.2.2.4	Conclusion	49
2.2.3	Les démarches de conception pour le repurposing.....	50
2.2.3.1	Des phases de conception distinctes mais dépendantes	50
2.2.3.2	Une gestion de l'information inter-usage	51
2.2.3.3	Des compromis à identifier avant le premier usage.....	52
2.2.3.4	Conclusion	53
2.2.4	Conclusion	53
2.3	Les évaluations environnementales pour la fin de vie : quid des applications en cascade ?.....	55
2.3.1	La démarche d'ACV	55
2.3.2	Considérations pour la fin d'usage et de vie en ACV	56
2.3.2.1	Prérequis pour stratégies de fin d'usage et de vie.....	56
2.3.2.2	Approches et gestion des allocations	57
2.3.3	Les difficultés de la modélisation ACV pour le repurposing	58
2.3.3.1	Cas d'étude de la littérature.....	58
2.3.3.2	Synthèse des principales problématiques	60
2.3.4	Des recommandations pour l'ACV, spécifiées pour des applications successives	63
2.3.5	Conclusion	63
2.4	Conclusions.....	64

Positionner la stratégie de repurposing parmi les stratégies de fin d'usage (FdU) plus classiques, en évaluer les similitudes et les différences doit permettre de mieux en définir les contours. C'est ce qui nous intéresse dans un premier temps. Par la suite nous investiguons ce qui existe dans la littérature pour intégrer cette stratégie en conception et réaliser l'analyse de cycle de vie.

2.1 *Le repurposing parmi les stratégies de fin d'usage de la littérature*

L'un des objectifs principaux de ces travaux de thèse est d'apporter une meilleure connaissance de la stratégie de repurposing, pour permettre son intégration dès la conception initiale des produits. Dans une précédente étude (Bauer et al. 2016), nous nous sommes penchés sur la littérature relative au réemploi et au remanufacturing afin de mieux comprendre les leviers relatifs à ces stratégies. Basée sur une analyse bibliographique, cette étude met en lumière les principales caractéristiques de ces stratégies à conservation de valeur-ajoutée. Ces dernières sont restituées et développées ci-après. Dans ces travaux de thèse, un éclaircissement sur les caractéristiques de la stratégie de réutilisation en cascade est apporté. Jeantet (1998) précise que 'concevoir un produit c'est passer de l'expression d'un besoin à la définition des caractéristiques [...] permettant de le satisfaire'. Ainsi, avoir connaissance des caractéristiques générales propres au repurposing devrait faciliter la conception de produits pour des usages successifs, ces dernières orientant certains choix de conception. Par ailleurs, lors de la reconception d'un produit, avoir connaissance des caractéristiques générales d'une offre de produit repurposé permet d'évaluer si celle-ci possède d'ores et déjà certaines des caractéristiques facilitant sa réutilisation.

2.1.1 *Les dessous du réemploi de produits*

En se rapportant aux définitions données section 1.1.2, la stratégie de réemploi n'implique aucune activité de fabrication, contrairement à la réparation ou au reconditionnement, mais 'seulement' la gestion de la **chaîne logistique inverse** (CLI) (Gray et Charter 2008). Elle n'est possible que lorsque la durée de vie de certains sous-ensembles (ou du produit) est plus grande que la durée d'usage du produit (Go, Wahab et Hishamuddin 2015). La CLI vise alors à récupérer des produits en FdV et les réinsérer dans la chaîne industrielle en vue de leur réutilisation. Il faut toutefois noter qu'au niveau des étapes du processus de refabrication, seul un **contrôle** des performances et/ou des fonctions du produit serait à réaliser (Go, Wahab et Hishamuddin 2015).

Les processus en place dans une stratégie de réemploi permettent avant tout de s'assurer que le produit réutilisé réponde aux **performances attendues** pour sa nouvelle application (Aziz et al. 2016 ; Goodall, Rosamond et Harding 2014). Au niveau du produit, ou de l'**architecture globale** du produit, il est attendu qu'un produit réutilisable soit fiable et robuste (Go, Wahab et Hishamuddin 2015 ; Aziz et al. 2016).

La prolongation de la durée de vie des produits, ou des composants, tend à minimiser les coûts environnementaux et **financiers** liés à la phase de fabrication (Arnette, Brewer et Choal 2014). Enfin, pour permettre cette stratégie, il est important que les **volumes** de produits initiaux soient **suffisants** pour permettre d'alimenter les usages successifs (Goodall, Rosamond et Harding 2014 ; Go, Wahab et Hishamuddin 2015).

Le réemploi consiste en la réutilisation quasi-directe du produit à l'issue de son utilisation. Les paramètres présentés sont à considérer dès la conception du produit pour s'assurer que le produit sera apte à être réutilisé pour un nouvel usage. Lorsque les produits deviennent obsolètes et ne peuvent plus être réutilisés, d'autres stratégies doivent être envisagées.

2.1.2 *La stratégie de remanufacturing passée à la loupe*

La stratégie de remanufacturing est étudiée depuis plusieurs années, ce qui fait que des méthodologies de conception, des outils et techniques évaluant le potentiel de remanufacturing, des guidelines²⁸ et de

²⁸ Littéralement : lignes directrices, consignes

nombreux cas d'études foisonnent dans la littérature (Hatcher, Ijomah et Windmill 2011 ; Goodall, Rosamond et Harding 2014 ; Go, Wahab et Hishamuddin 2015 ; Chakraborty, Mondal et Mukherjee 2017). Identifiée comme une stratégie de réutilisation, le remanufacturing inclue par nature les caractéristiques associées à la stratégie de réemploi précédemment identifiée.

Le processus de remanufacturing se compose de 3 différentes étapes : la **CLI**, les **opérations de remanufacturing**, suivies de la **remise sur le marché** (Gray et Charter 2008 ; Hatcher, Ijomah et Windmill 2011). Il existe 7 opérations possibles lors d'un processus de remanufacturing : le **contrôle / l'inspection**, le **désassemblage**, le **nettoyage**, le **réassemblage**, le **stockage**, les **tests** et les opérations de **refabrication** (ou de remanufacturing) à proprement parler (Hatcher, Ijomah et Windmill 2011 ; Tolio et al. 2017). Celles-ci peuvent être réalisées, en tout ou partie, dans l'ordre qui sera le plus adéquat selon le produit (Sundin et Bras 2005). Ils l'illustrent au travers de la Figure 7.

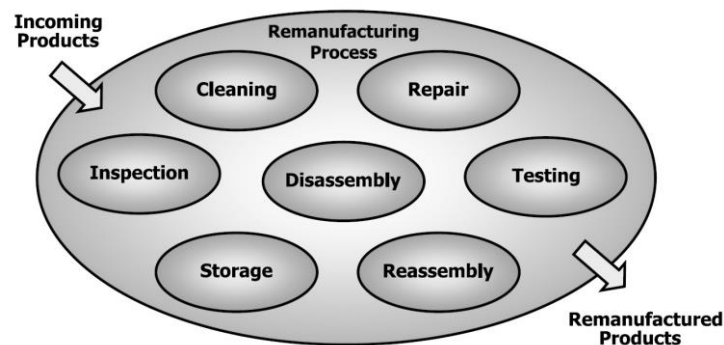


Figure 7 - Étapes du processus de remanufacturing générique, selon Sundin et Bras (2005)

Les étapes du processus de remanufacturing sont facilitées lorsque l'**architecture** du produit est pensée pour le désassemblage et le réassemblage. C'est-à-dire que les différents éléments sont facilement accessibles, leurs liaisons démontables et le nombre de pièces et modules du système remanufacturé aussi petit que possible pour influencer positivement sur le potentiel de remanufacturabilité du produit. Leur géométrie doit être pensée pour permettre un nettoyage facile et les composants ou sous-ensembles fiables et facilement identifiables. Par ailleurs, permettre aux produits d'être upgradables²⁹ et modulaires contribue à leur réutilisation et / ou remanufacturing. Le dernier point concerne l'évaluation des **performances** des produits à la fin de la première utilisation. Ce paramètre est important, d'autant qu'il peut être fortement influencé par les utilisateurs eux-mêmes (Zhao et al. 2010 ; Aziz et al. 2016 ; Chakraborty, Mondal et Mukherjee 2017). Dans le cadre du remanufacturing, les performances peuvent évoluer et se détériorer au cours de l'usage. En revanche, à l'issue du processus de refabrication, elles doivent être au moins équivalentes à celles d'un produit neuf.

Lorsque le processus de remanufacturing peut ne pas être entièrement pris en charge par le fabricant d'origine, c'est l'occasion de créer des **partenariats** avec d'autres acteurs pour assurer, par exemple la CLI, le désassemblage, le contrôle, etc. (Gelbmann et Hammerl 2015). Différents acteurs de la chaîne de valeur peuvent en être le moteur et impulser cette stratégie (Hatcher, Ijomah et Windmill 2011 ; Goodall, Rosamond et Harding 2014). Les clients peuvent préférer des produits remanufacturés plutôt que neufs si leur **prix** est inférieur. Bakker et al. (2014) précisent que les stratégies d'extension de la durée de vie du produit sont plus souvent mises en place lorsque les ressources liées aux produits sont fortement contraintes et que la technologie est mature. Elles le sont davantage encore lorsque les **réglementations** et la compétitivité du marché poussent les entreprises vers ces solutions (Bakker et al. 2014 ; Tolio et al. 2017). Par ailleurs, la gestion de la fin de vie se retrouve facilitée lorsqu'elle est prévue dès la conception du produit. La littérature relative au remanufacturing s'intéresse également aux Systèmes Produits-Services (PSS) (Sundin et Bras 2005 ; Sakao et Mizuyama 2014). Ces auteurs s'accordent à dire qu'il est important de considérer, dans son ensemble, la stratégie visée pour la distribution du

²⁹ Littéralement : améliorables

produit sur le marché : faut-il vendre le produit ou uniquement son usage - i.e. la **possession du produit** - ? La première permet des gains à court terme, tandis que la seconde permet d'en maximiser la valeur sur l'ensemble de son cycle de vie tout en minimisant les impacts environnementaux. Cela donne lieu à une meilleure gestion des informations liées aux produits sur l'ensemble de son CdV (Tolio et al. 2017). En ce sens, Hartwell et Marco (2016) évaluent comment la propriété intellectuelle est et peut être gérée lors du remanufacturing d'un produit. Enfin, il va de soi que des **volumes suffisants** de produits sont nécessaires à la mise en place d'un marché de second usage.

La stratégie de remanufacturing est établie sur de nombreuses caractéristiques, dont une partie est similaire à celles du réemploi. Ce qui les distingue avant tout est le fait que, dans la stratégie de remanufacturing, le produit ne peut être remis sur le marché quasi-directement : il doit être en partie refabriqué pour pouvoir être réutilisé dans des conditions équivalentes à celles d'origine. De ce fait, les caractéristiques des offres de produits remanufacturés sont davantage complexes que celles des offres de produits réemployés. L'activité suppose ainsi une prise en compte de ces aspects en amont pour pouvoir les gérer au mieux sur l'ensemble du CdV de l'offre. Le remanufacturing permet, en quelque sorte, de passer outre l'obsolescence du produit car celui-ci est refabriqué à partir de l'existant. En revanche, lorsque l'obsolescence du produit est fonctionnelle et qu'aucun processus ne permet d'y remédier, le remanufacturing n'est plus la solution adéquate pour prolonger l'usage.

2.1.3 Investigations quant aux offres de produits repurposés

La stratégie de repurposing 'contourne' la précédente difficulté de remise à niveau des performances du produit. L'objectif premier étant le prolongement de l'usage, si le produit ne peut plus être utilisé dans l'application initiale, il est réutilisé dans une autre application.

De fait, dans le cas d'un produit repurposé, la majorité des fonctions ne devraient pas changer d'un usage à l'autre. En revanche, les **performances** du produit sont amenées à évoluer pour s'adapter aux usages successifs (Bowler 2014). Pour une batterie de véhicule électrique, repurposée dans une application de stockage d'énergie stationnaire, la fonction de stockage d'énergie est commune aux deux applications. Toutefois, les performances du produit - *puissances, densités d'énergie, types de sollicitations,...* - doivent évoluer pour répondre précisément à chacun des usages (Beverungen et al. 2017). À l'instar du remanufacturing, il est nécessaire de pouvoir garantir les performances attendues pour le produit repurposé, notamment aux moments des usages aval (Bowler 2014). Globalement, au niveau du produit, les caractéristiques citées pour le réemploi et le remanufacturing se retrouvent dans la stratégie de repurposing, que ce soit au niveau de la nécessaire prise en compte de l'**architecture globale** du produit - *notions de modularité, de robustesse, de fiabilité,...* - ou la définition des **architectures sous-jacentes** - *architecture mécanique du produit (besoin de définir le nombre et les types de fixations facilitant chacun des usages), architecture électrique, électronique, etc.* (Bowler 2014 ; Bauer et al. 2017 ; Beverungen et al. 2017). Dans le même esprit, la prise en compte des **caractéristiques dimensionnelles** est primordiale pour s'assurer que le produit pourra physiquement répondre à l'usage suivant (Beverungen et al. 2017). Dans leurs papiers, Bauer, Brissaud et Zwolinski (2017) et Beverungen et al. (2017) évaluent différents critères pour la réutilisation en cascade de batteries. Ils notent entre autres que les **problématiques de sécurité** doivent être précautionneusement considérées sur les batteries. Elles peuvent en effet varier fortement d'une application à l'autre. Tout comme ceux précités, il est à noter que cet aspect se transpose facilement à d'autres produits.

Les trois phases mentionnées précédemment pour les stratégies de réutilisation se retrouvent également dans le processus de (re)fabrication lié au repurposing. Dans un premier temps, il est donc nécessaire de définir les éléments de la **chaîne logistique inverse** (CLI), pour permettre de récupérer le produit à la fin du 1^{er} usage : que ce soit le démontage du produit chez son utilisateur, son acquisition, son transport ou son stockage (Bowler 2014). Par la suite, il est primordial de définir quels sont les paramètres facilitant la **remise sur le marché** (RsM) du produit - *la vente, le transport, l'installation et les*

possibles services proposés (Bauer et al. 2016). Entre ces deux phases (CLI et RsM), le produit est susceptible de suivre différentes opérations manufacturières, semblables à celles du remanufacturing et destinées à le préparer à sa nouvelle utilisation (Bowler 2014 ; Bauer et al. 2016). On retrouve ici le **contrôle / l'inspection**, le **désassemblage**, le **nettoyage**, le **réassemblage**, le **stockage**, les **tests** et les opérations de **refabrication** (aussi appelées opérations de repurposing). Parmi ces 7 opérations, le contrôle / l'inspection occupent une place stratégique. En tout état de fait et pour le cas 'batterie', la connaissance de l'état de santé du produit apparaît comme prépondérante pour garantir l'usage suivant (Bowler 2014 ; Beverungen et al. 2017). C'est à l'issue de la caractérisation de l'état de santé du produit que le processus global de repurposing peut être défini plus précisément. Dans l'ensemble, le processus de refabrication doit être souple et flexible pour pouvoir s'adapter au mieux au marché de l'application suivante (Bauer et al. 2016).

Différents autres paramètres ont également été soulevés dans la littérature. Afin de pouvoir réutiliser le produit dans une autre application, Bowler (2014) stipule que les **critères de retour** doivent être précisés. Cela permet de s'assurer de la récupération du produit avant que celui-ci ne soit plus suffisamment efficace pour une seconde application. À l'instar des stratégies de réutilisation, on peut s'attendre à ce que la **législation** facilite la mise en place du repurposing - *sous couvert de la responsabilité élargie du producteur (REP)* (Bauer et al. 2016 ; Beverungen et al. 2017). En ce sens, Bowler (2014) mentionne la standardisation comme un élément grandement facilitateur de la stratégie de repurposing. Par ailleurs, pour la mettre en place à une échelle industrielle, il importe de pouvoir récupérer un **volume suffisant** de produits en FdU (Bowler 2014 ; Bauer et al. 2016). Comme pour le remanufacturing, cette nouvelle activité peut sortir, en tout ou partie, du champ d'action du premier fabricant. L'établissement de **partenariats** avec d'autres acteurs de la chaîne de valeur doit être défini pour s'assurer une répartition au plus juste de la valeur des produits (Bowler 2014 ; Bauer et al. 2016). Ces deux derniers points sont liés à la stratégie de RsM. La vente du produit ou de son usage est un élément devant être défini au plus tôt lors de la conception de l'offre car il permet, ou pas, de faciliter l'usage suivant en restant propriétaire du produit. C'est ce qui est entendu sous le terme de **possession** du produit (Bauer et al. 2016). Enfin, le **prix** de vente d'un produit repurposé est à définir (Bowler 2014 ; Beverungen et al. 2017). Doit-il être inférieur à celui d'un produit neuf ? Doit-il être équivalent si des garanties sont apportées par rapport à sa durée de vie et ses performances ? Foster et al. (2014) ont étudié les implications économiques du repurposing, du remanufacturing et du recyclage d'un système de batteries Li-Ion, d'une application véhicule électrique (VE) vers une application de stockage stationnaire. Ils estiment que lorsqu'une batterie au lithium n'est pas conçue pour être réutilisée, des coûts de recherche et de développement sont nécessaires. Dans ce cas, le coût des opérations de refabrication doivent rester inférieurs à 55% du prix de vente pour rendre viable cette activité. La nécessité de définir les différentes utilisations dès les phases de conception est donc critique.

Peu d'études s'intéressent aux caractéristiques de la stratégie de repurposing. Malgré tout, au travers de la littérature (basée essentiellement sur le cas de la réutilisation de batteries pour une nouvelle application), plusieurs caractéristiques ressortent. Parmi elles, de significatives corrélations peuvent être faites avec les caractéristiques des stratégies de réemploi et de remanufacturing. On peut noter parmi d'autres : le besoin pour un produit robuste, une phase de contrôle et de test, nécessaires pour une remise sur le marché, ou encore, l'accessibilité aux produits en FdU en quantité suffisante.

2.1.4 Synthèse des caractéristiques des stratégies de FdU issues de la littérature

La stratégie de repurposing entraîne de nombreuses implications à des niveaux différents. Les successions d'applications supposent que les caractéristiques du produit vont évoluer au cours de son CdV. Pour détailler davantage la stratégie de repurposing, les caractéristiques qui la composent ont été évaluées à partir de la littérature et mises en parallèle à celles des autres stratégies de FdU que sont le réemploi et le remanufacturing. De nombreuses similarités ont été mises en avant, confirmant le fait que toutes trois ont une base commune et des affinités, qui s'articulent logiquement autour des notions de circularité : besoin de collecte du produit, de diagnostic à l'issue de l'usage, de volumes suffisamment

conséquents pour initier le business, de mise en place de partenariats, etc.. Malgré cela, des dissemblances fortes existent. Par exemple, il faut que le produit soit physiquement adapté à l'application ultérieure, ou alors qu'il soit composé de modules standard, réutilisables. Les critères de retours sont également à considérer plus spécifiquement, car les performances du produit ne doivent pas être trop dégradées pour pouvoir être réutilisé. Enfin, la sécurité du produit doit être assurée pour l'ensemble des applications successives.

Les limites et manques actuels. Le repurposing est une stratégie de FdU naissante, en témoigne la revue de littérature qui n'est basée essentiellement que sur trois papiers (Bowler 2014 ; Bauer et al. 2016 ; Beverungen et al. 2017). De plus, tous trois établissent les caractéristiques d'une offre de produit repurposé en référence à un unique cas d'étude : la réutilisation de batteries de véhicules électriques pour des applications stationnaires. En parallèle à ça, les caractéristiques ne sont pas organisées, ce qui freine leur utilisation de manière efficace lors d'une activité de conception ou de reconception.

Au vu des manques de la littérature et du fait d'un positionnement de ces travaux en conception de produit, notre première question de recherche est reformulée en ce sens :

**'Comment définir et classer les caractéristiques
de la stratégie de repurposing pour un usage en conception ?'**

Hypothèses pour la suite. Toutes les caractéristiques de la stratégie de repurposing ne sont probablement pas mentionnées dans la littérature. Interroger l'ensemble des parties-prenantes de la chaîne de valeur d'une activité de repurposing devrait mettre au jour de nouvelles caractéristiques, essentielles à la stratégie de réutilisation en cascade. En parallèle, pouvoir les classer faciliterait leur interprétation et leur utilisation en conception.

Le point de vue adopté par ces études est essentiellement orienté autour de l'activité de conception mais ne s'ouvre que peu aux autres acteurs de la chaîne de valeur et, par extension, au CdV du produit. Il semble pourtant important de s'intéresser aux relations entre processus de conception et CdV, afin d'évaluer en quoi celles-ci influencent la stratégie de repurposing. Nous allons aborder ces points dans la suite de ce chapitre.

2.2 Les démarches de conception : une prise en compte de l'usage, de sa fin et des suivants

L'intégration des caractéristiques mises en avant dans la section précédente ne peut se faire qu'au moment de la conception du produit, mais nécessite une vision globale, de l'ensemble du cycle de vie (CdV). À l'origine, la conception de produits était uniquement orientée autour de l'usage, sans prise en compte aucune des parties-prenantes au-delà du client (l'utilisateur lui-même pouvant ne pas être consulté). Depuis plusieurs années néanmoins, une attention particulière leur est portée : c'est la conception intégrée. Par la suite, de nombreuses démarches de conception se sont développées pour intégrer notamment les problématiques des stratégies de fin d'usage (FdU) et de fin de vie (FdV). Après un rappel de ces démarches et de leurs implications en conception, nous nous interrogerons sur leurs applicabilités dans le cadre de la conception de produits pour des applications en cascade.

2.2.1 S'ouvrir pleinement à l'usage : la démarche de conception intégrée

Dans un premier temps, nous présentons la démarche de la conception intégrée, ce qu'elle implique et quelques méthodes pour son implémentation.

2.2.1.1 Présentation de la conception intégrée

Dans un précédent papier (Bauer, Brissaud et Zwolinski 2017), nous avons rapporté que de nombreuses améliorations ont déjà été apportées aux outils et méthodes de conception, notamment avec l'avènement de la conception intégrée (Brissaud et Tichkiewitch 2000). La conception d'un produit nécessite l'interaction de nombreux domaines d'expertise au sein d'une même entreprise et, cela, sur l'ensemble du CdV (Prudhomme, Zwolinski et Brissaud 2003). L'intégration des différentes parties-prenantes lors des premières étapes de conception facilite l'intégration des contraintes de conception. Sont entendus par parties-prenantes l'ensemble des personnes et des métiers interagissant avec l'offre au cours de son CdV. Il peut s'agir des clients, des différents métiers liés à la conception et la réalisation de l'offre, des logisticiens, des utilisateurs, des repurposeurs, des recycleurs, etc.. La définition des parties-prenantes est même considérée comme la première étape du processus de conception lors de la phase de définition du produit (Ullman 2003).

Cette intégration a nécessairement des répercussions lors de la conception du produit car cela signifie une prise en compte élargie de l'usage par rapport à la conception traditionnelle. C'est ce à quoi nous nous intéressons dans les sections suivantes.

2.2.1.2 Les étapes du processus de conception

Les processus de conception sont connus et étudiés dans la littérature depuis de nombreuses années (Tomiya et al. 2009). Nous les présentons ici d'une manière générale.

Un formalisme pour la conception. Le processus de conception est généralement précédé par la génération d'une idée. Il consiste en une suite itérative d'actions destinée à répondre à un besoin (Pahl et Beitz 2013). En règle générale, on y retrouve l'analyse des besoins, la conception préliminaire, la conception architecturale, la conception détaillée et les tests (ou l'implémentation) (Gericke et Blessing 2012). Ces actions, particulièrement connues des équipes de conception, sont représentées sur la Figure 8. Il y a quelques années de cela, en 1992, Ullman faisait déjà référence à ces étapes successives tout au long du processus de conception de produits. Avant lui, Blake (1966) mettait en avant 3 étapes principales et itératives qui y faisaient déjà écho. Elles étaient alors composées (a) d'une phase de définition des spécifications et d'initialisation de la conception, (b) de recherche de solutions alternatives et (c) de conception détaillée. Les méthodes de conception de produit ne sont pas figées dans le temps mais sans cesse en évolution pour s'adapter aux différents besoins (voir Pahl et Beitz (2013)). En revanche, les étapes suivies au sein du processus de conception ne varient que très peu d'une étude à l'autre. Elles sont parfois précisées, détaillées, mais rarement remises en question.

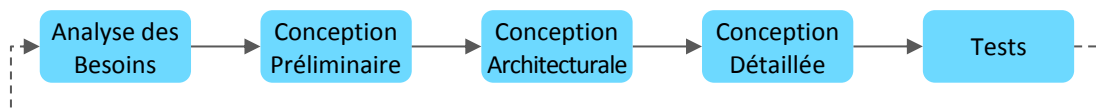


Figure 8 - Processus de conception classique

Description des différentes étapes. L'analyse des besoins permet la collecte d'informations relatives aux contraintes du produit, à la définition des fonctions et à leur priorisation en vue de l'établissement du Cahier des Charges (CdC). C'est la phase clef pour tout projet de conception car les besoins de tous les acteurs doivent y être clairement établis (Q. Zhang et al. 2016). La conception préliminaire met en avant des concepts généraux susceptibles de répondre au besoin. C'est le travail des concepteurs que de transposer les besoins clients en une solution viable (Eckert et Clarkson 2005). La conception architecturale cherche à élaborer une solution globale, à partir des concepts établis précédemment, pour répondre au besoin et correspondant au CdC. Les plans généraux du système sont établis à cette étape (Pahl et Beitz 2013). La conception détaillée permet la conception des sous-ensembles, la mise en plan de chaque sous-système et l'élaboration de la solution définitive (Pahl et Beitz 2013). Ces deux dernières étapes sont parfois confondues dans la littérature (Ullman 2003). Enfin, la phase de tests permet de vérifier si la solution proposée répond au besoin client (Ullman 2003). Ces étapes ne se succèdent pas

simplement les unes aux autres, mais sont itératives (Wynn et Clarkson 2005). Par souci de clarté, la Figure 8 ne présente qu'une seule itération pour chaque phase (en pointillé) et ne représente pas l'ensemble des cheminements possibles entre ces étapes, plusieurs allers-retours étant possibles.

2.2.1.3 Le rôle majeur des étapes préliminaires pour la conception intégrée

Nous venons de voir que la phase d'analyse des besoins était celle qui, plus que toutes les autres, a de l'importance en conception intégrée. Elle est détaillée ci-après.

Une identification claire des parties-prenantes pour mieux cerner les besoins. Lors du développement de nouveaux produits, les équipes de conception doivent s'appropriier l'ensemble des besoins pour permettre de satisfaire les exigences des clients (Pahl et Beitz 2013). Par la conception intégrée, la portée de ces besoins a été élargie. À l'origine, ils n'étaient orientés que par rapport à l'usage qui était fait des produits. Petit à petit, davantage d'aspects sont entrés en considération : l'intégration des différents métiers, des utilisateurs, de leurs comportements, etc. (Domingo 2013). Ainsi, l'identification et l'intégration de toutes les parties-prenantes et de leurs besoins est considérée comme nécessaire dès les premières étapes de la conception (Brissaud et Tichkiewitch 2000). La récolte des besoins est l'une des étapes primordiales en conception de produits car elle permet de définir quelles sont les attentes de chacune des parties-prenantes et, ainsi, spécifier clairement la réponse au besoin qui a été formulée en amont. Ullman (2003, p 144) l'illustre très clairement au travers de la Figure 9.

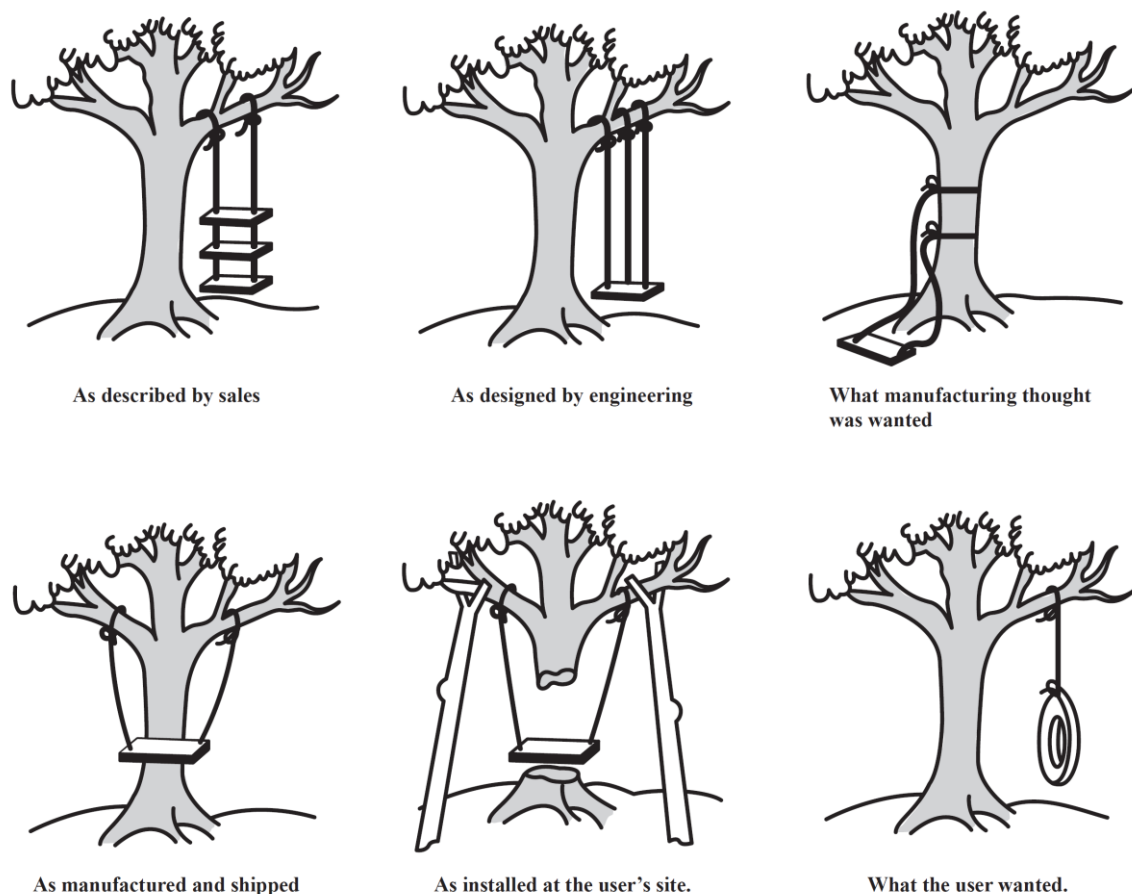


Figure 9 - Représentation de l'importance des besoins par Ullman (2003, p 144)

Formaliser les besoins par la définition de fonctions. Suite à l'établissement des besoins, la majorité des démarches de conception sont basées sur la définition des fonctions propres à l'offre considérée (Prudhomme, Zwolinski et Brissaud 2003). Erden et al. (2008) ont analysé différentes méthodes et outils en

lien avec les modélisations fonctionnelles (MF), c'est-à-dire le développement de produits, de systèmes et de processus à partir de leurs fonctions. Leur opinion des MF est qu'elles apportent une vue d'ensemble du système et clarifient 'les interactions de différents domaines d'ingénierie'. Faisons un bref récapitulatif de ce que sont les fonctions et des outils qui y sont associées pour les définir en conception.

Ce qu'est une fonction. De nombreuses définitions de ce que sont les fonctions coexistent dans la littérature (Vermaas 2009). D'après l'auteur, toutes sont justifiées parce qu'elles ne sont qu'une description simplifiée de la situation, admise en ingénierie. Erden et al. (2008) considèrent que les fonctions permettent de faire le lien entre les besoins et les solutions finales. En ingénierie, d'après la norme NF EN 1325, une fonction est définie comme 'l'action d'un produit ou de l'un de ses constituants' (AFNOR 2014). Les fonctions sont communément exprimées sous la forme 'verbe + objet' et visent la description d'un produit ou d'un système (Umeda et Tomiyama 1997). D'autres sémantiques sont également utilisées pour leur description (Erden et al. 2008). Nous pouvons citer par exemple la manière états-unienne qui diffère un peu en ne mentionnant que le verbe. Les fonctions permettent avant tout la description d'un système avec un haut niveau d'abstraction, notamment au cours des premières phases du processus de conception (Eisenbart et Kleinsmann 2017).

Avantages des fonctions pour la conception intégrée. Déjà en 1997, Umeda et Tomiyama déclaraient que les fonctions étaient 'le concept le plus important pour une meilleure conception et des produits plus innovants'. L'avantage est qu'elles permettent de ne pas spécifier de solution définitive à ce stade de la conception (Eisenbart et Kleinsmann 2017). Prudhomme, Zwolinski et Brissaud (2003) atténuent quelque peu ces propos car, malgré le caractère abstrait des fonctions, elles sont établies par des équipes de conception. Ces dernières y rattachent nécessairement des solutions physiques concrètes, ce qui 'pervertit' en quelque sorte leur utilité. Par la suite, une fois les fonctions définies, elles doivent être décomposées pour décrire l'offre de plus en plus précisément.

Synthèse sur les fonctions. Lors de l'activité de conception, la définition des besoins liés au produit est un élément incontournable. Une fois ceux-ci formalisés, les équipes de conception initient la conception de la solution. Pour ce faire, et à partir des variables de conception du CdC, ces dernières peuvent commencer par définir les fonctions du produit. Cela permet de décrire la solution finale tout en limitant la précipitation vers une solution technologique. Il existe d'ores et déjà plusieurs méthodes dans la littérature permettant de définir les fonctions d'offres produit.

2.2.1.4 Des exemples de méthodes pour l'analyse des besoins et des fonctions en conception

Plusieurs techniques ont été développées pour capturer les besoins et définir les fonctions dès les phases initiales de conception. Celles-ci sont présentées ci-après.

Des outils de récolte des besoins. Les techniques les plus reprises dans la littérature pour capturer les besoins sont les observations, les études de marché et d'utilisateurs, les groupes de discussion et de créativité, les entretiens, les scénarios et mises en situation, l'utilisation de persona, les ateliers pratiques ou encore l'évaluation d'un système existant ou concurrent (Kärkkäinen, Piippo et Tuominen 2001 ; Maguire et Bevan 2002 ; Ullman 2003). Mais la plupart de ces techniques sont uniquement axées sur la phase d'utilisation. De plus elles ont été développées pour identifier les besoins propres aux clients-utilisateurs et non ceux de l'ensemble des parties-prenantes. Par exemple, dans leur papier, Kärkkäinen, Piippo et Tuominen (2001) détaillent 4 outils dédiés aux enquêtes sur les besoins des clients. Ceux-ci visent à (a) assurer l'utilité de la collecte des besoins, (b) formaliser les opinions personnelles et (c) collectives, ainsi qu'à (d) les interpréter. Ils proposent un outil complémentaire, destiné à analyser les liens existant entre les clients et les différentes parties-prenantes, dans le but de mieux tracer et pouvoir illustrer leurs besoins. Mais, comme susmentionné, la seule prise en compte des besoins clients ne semble pas suffisante lors de la conception de produits pour des applications en cascade. Il est également nécessaire d'établir les besoins de chacune des parties-prenantes, sur l'ensemble du CdV ceci

pour éviter les adaptations tardives du produit (voir Figure 5, p. 26). D'autres outils, utilisés en analyse fonctionnelle (AF) et détaillés dans la norme NF X50-100 (AFNOR 2011), permettent également une description des besoins. Le diagramme d'expression du besoin rend compte de l'image globale du problème de conception (Figure 10) et le tableau de validation de ce besoin (But, Cause, Ce qui peut le faire disparaître, Ce qui peut le faire évoluer) permet de bien fixer le besoin global au niveau du projet de reconception.

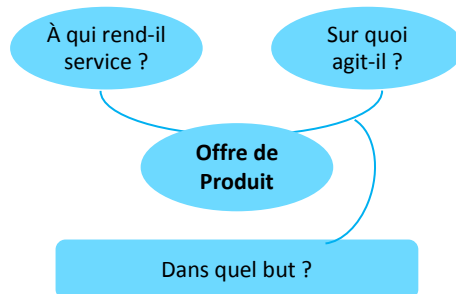


Figure 10 - Diagramme d'expression du besoin

Des méthodes pour définir les fonctions d'un produit. À l'instar des besoins, plusieurs méthodes existent pour définir les fonctions des produits au moment des premières étapes de la conception. Erden et al. (2008) passent en revue et comparent 18 approches basées sur la modélisation fonctionnelle afin d'en comprendre les tenants et aboutissants. Nous en détaillons quelques-unes ci-après. Mital et al. (2014), tout d'abord, ont mis au point une méthode basée sur des guidelines facilitant l'inclusion de fonctions aux prémices de la phase de conception. La difficulté des guidelines est qu'elles doivent être particulièrement précises, et donc très exhaustives, pour être utiles. En rapport au processus de conception (voir Figure 8 p. 39), Gero (1990) décrit son modèle 'Function-Behavior-Structure'³⁰ (FBS) comme la succession d'étapes 'de formulation, de synthèse, d'analyse, d'évaluation, de reformulation et de développement' (voir Figure 11). Il permet de passer des besoins à la conception de la solution. Le modèle FBS permet en premier lieu la description des fonctions principales du produit. Puis, la structure vise la description des composants et de leurs liens. Enfin, le comportement global du système 'décrit les caractéristiques qui découlent ou devraient résulter de la structure' (Cascini, Fantoni et Montagna 2013). Dans leur papier, ces derniers ont étendu le cadre modèle FBS de Gero pour inclure l'identification des besoins et la définition des exigences.

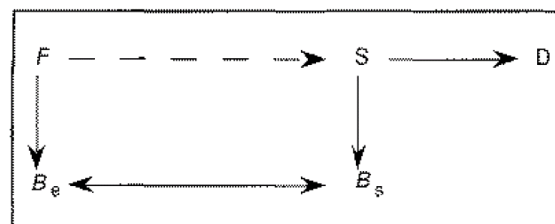


Figure 2. Model of Design as a Process.

B_e = Set of expected behaviors
 B_s = Set of actual behaviors D = Design description
 F = Set of functions S = Structure
 \rightarrow = Transformation
 \dashrightarrow = Occasional transformation
 \leftrightarrow = Comparison

Figure 11 - Description schématique du processus de conception par Gero (1990) au travers du modèle FBS

L'une des autres méthodes visant l'établissement des fonctions et leur description est l'analyse fonctionnelle (AFNOR 2011). Initialement, l'AF est une 'démarche qui décrit complètement les fonctions et

³⁰ Littéralement : Fonction-Comportement-Structure

leurs relations, qui sont systématiquement caractérisées, classées et évaluées' (AFNOR 2014). L'objectif est d'obtenir la description de la structure fonctionnelle du système, c'est-à-dire l'organisation et les interactions des fonctions entre elles. Elle permet à la fois d'identifier et de hiérarchiser les besoins de l'ensemble des parties-prenantes, mais également d'établir les fonctions de l'offre. Pour ce faire, les éléments du milieu extérieur (EME) sont définis au sein du graphe des interacteurs (voir Figure 12a). Ils correspondent à tous les éléments interagissant avec le produit au cours de son CdV, tels que des éléments auxiliaires à l'offre, des conditions de sécurité particulières, etc. (AFNOR 2011). Ces éléments des milieux extérieurs sont souvent directement reliés à une ou plusieurs parties-prenantes et doivent être décrits de la façon la plus précise possible. Ces éléments sont ensuite reliés au sein du graphe des interactions pour définir les fonctions (voir Figure 12b). Elles sont alors validées (But, Cause, Qu'est-ce qui peut la faire évoluer, Qu'est-ce qui peut la faire disparaître) puis décrites et précisées par rapport à différents critères, comme les performances visées, leurs flexibilités, la négociabilité de la réalisation de cette fonction, etc.. Ces critères servent également de base à leur hiérarchisation. Cette démarche permet de formaliser la solution de manière fonctionnelle sur l'ensemble de son CdV, et, ainsi, de supporter la chaîne de valeur dès les phases amont. L'AF a également l'avantage de pouvoir formaliser et décrire les fonctions d'une manière souple et flexible. Tous les critères peuvent ne pas être définis sans que cela ne bloque les étapes suivantes.

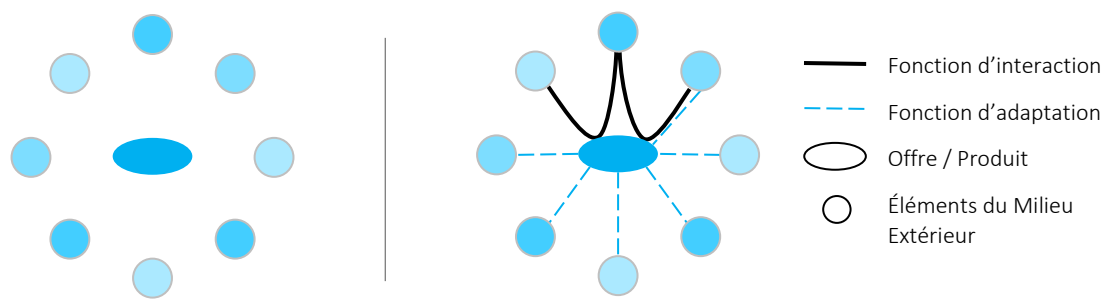


Figure 12 - Graphe des interacteurs (à gauche) et Graphe des interactions (à droite)

Une autre façon de décrire le produit est d'utiliser la modélisation fonctionnelle IDEF0³¹, basée sur la représentation SADT (voir Figure 13). Ross (1977) a développé cette représentation pour formaliser les fonctions et les étudier en décrivant les éléments d'entrée, de sortie, les flux entrants et les données échangées. L'un des points clés est la possibilité de les décomposer en sous-fonctions et, ainsi, de réitérer ce processus. Pour pouvoir mieux évaluer les fonctions, Brusa, Calà et Ferretto (2018) les ont classées en 3 catégories : fonctionnelles, opérationnelles et de construction. Elles sont alors décrites au travers de leurs différentes caractéristiques : robustesse, flexibilité, simplicité, fiabilité, interopérabilité, connectivité et sécurité. La plupart de ces critères d'appréciation et de caractérisation font écho à ceux de l'AF.

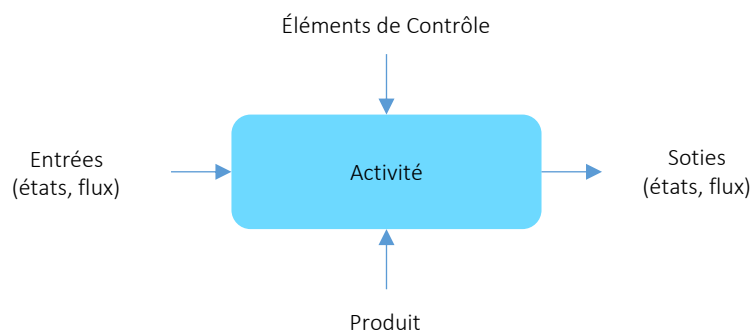


Figure 13 - Exemple de graphe IDEF0

³¹ Integration DEfinition for Function modeling

Hiérarchisation. Passée ces étapes de recueil, les besoins et les fonctions sont évalués en vue d'être hiérarchisés. L'enjeu est, là, d'établir le meilleur compromis en vue de la solution finale. Plusieurs méthodes permettent d'aboutir à cette hiérarchie. Pour les besoins, et dans un contexte multi-acteurs, Papageorgiou, Eres et Scanlan (2016) utilisent le 'Analytic Hierarchy Process'³² (AHP). Saaty (1987) décrit le AHP comme une méthode de hiérarchisation en vue d'une prise de décision. Les éléments sont comparés par rapport à différents critères et évalués les uns par rapport aux autres dans des matrices de comparaison par paire (Pairwise matrix). Pour chaque couple comparé, une note 'x' comprise entre 1 et 10 est attribuée à l'un. La note inverse (1/x) est attribuée à l'autre. Chaque élément est ensuite pondéré et la somme pour chaque solution permet d'établir la hiérarchisation.

Une autre méthode de résolution plus globale est le 'Quality Function Deployment'³³ (QFD), ou maison de la qualité (voir Figure 14). En premier lieu, le QFD permet une prise en compte détaillée des informations nécessaires à la compréhension du problème de conception (Ullman 2003). Décomposé en plusieurs étapes, cet outil permet la description successive (1) des parties-prenantes, (2) de ce que le produit doit faire et précise (3) qui pense ce que le produit doit faire. Ensuite, les équipes de conception précisent (4) comment le problème est actuellement résolu ainsi que (5) les critères et l'échelle d'évaluation de la satisfaction client. Puis, (6) comment les spécifications sont reliées aux besoins clients et (7) leur importance. Enfin, les équipes évaluent (8) les liens entre les spécifications. Cette méthode permet ainsi une description précise, étape par étape, des spécifications pour la conception.

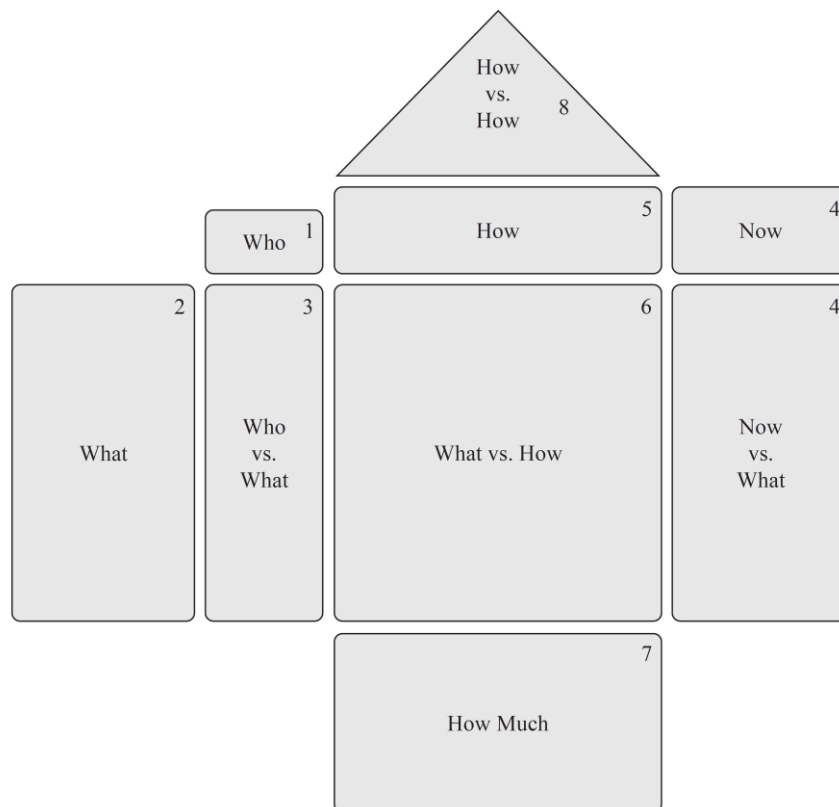


Figure 14 - Illustration du diagramme QFD, issu de Ullman (2003)

2.2.1.5 Conclusion

Nous avons vu qu'il était nécessaire d'intégrer au plus tôt un maximum de parties-prenantes au sein du processus de conception. Une fois celles-ci identifiées, il paraît primordial de formaliser, en amont, leurs

³² Littéralement : Processus d'Analyse Hiérarchique

³³ Littéralement : Déploiement des Fonctions Qualités

besoins. Plusieurs méthodes ont été identifiées dans la littérature pour récolter les besoins des parties-prenantes

Souvent décrits de manière qualitative, les besoins doivent, par la suite, être reformulés et quantifiés. Des fonctions pour y répondre sont ensuite définies, elles aussi caractérisées par des variables de conception quantitatives. On dispose alors du CdC produit préliminaire. Les étapes de conception visent alors l'intégration de ces fonctions en une solution fonctionnelle. Au cours de celles-ci, les équipes de conception peuvent établir les fonctions techniques liées au produit (Pahl et Beitz 2013). Cette transition du CdC aux fonctions est considérée comme 'critique' au regard du développement du produit (Cascini, Fantoni et Montagna 2013). Elle permet aux concepteurs de formaliser la description fonctionnelle du produit. Là encore plusieurs outils et méthodes issues de la littérature ont été décrits.

Dans une démarche de conception intégrée, ces différents outils trouvent toute leur place car ils permettent de supporter la formalisation des besoins clients vers l'activité de conception et leur transcription dans un langage d'ingénierie.

Néanmoins, lorsque l'activité de conception ne se limite pas qu'à l'usage mais vise l'intégration de problématiques de FdU avec des cycles de vie bouclés, certaines différences apparaissent. Nous les abordons dans la section 2.2.2 suivante.

2.2.2 Une prise en compte plus large du cycle de vie, pour l'inclusion de la fin d'usage

Au-delà de la phase d'usage, et souvent impulsée par les réglementations pro-environnementales (European Commission 2000; European Commission 2012), l'intégration de la fin d'usage et de vie des produits dès la conception est de plus en plus présente. Dans cette section nous détaillerons les intérêts de la démarche de conception intégrée pour la prise en compte de la FdU et ses répercussions sur le processus de conception. Dans un troisième temps nous détaillerons plusieurs approches pour la prise en compte de la FdU et de la FdV en conception.

2.2.2.1 Les intérêts de la conception intégrée pour la fin d'usage

La conception intégrée ouvre le spectre de l'usage aux différentes parties-prenantes. Lorsque les équipes de conception s'intéressent à la conception pour la FdU (réemploi ou remanufacturing), il 'suffit' d'intégrer à la conception classique de nouvelles étapes du CdV jusqu'ici non considérées : le transport vers le lieu de refabrication, les étapes de refabrication et l'acheminement vers le nouveau lieu d'utilisation.

Des besoins spécifiques aux stratégies de prolongement de l'usage. En théorie, l'intégration de nouvelles phases du CdV semble pouvoir être traitée à l'identique de ce qui se fait en conception intégrée : par l'implication des parties-prenantes. Dans le cas du remanufacturing, cela induit nécessairement davantage de besoins à prendre en compte, comme la gestion et le traitement du produit en FdU (Crul et Diehl 2009). Ces besoins doivent être inclus dès les étapes de conception. De plus, toujours pour le remanufacturing, Hatcher, Ijomah et Windmill (2011) soulignent que les besoins ne doivent pas uniquement se focaliser sur la phase d'usage, mais bel et bien inclure les étapes de remanufacturing. Il faut ainsi prendre en compte le besoin de démontage et remontage du produit, le fait qu'il soit nettoyé, refabriqué, contrôlé, etc.. Dès lors que les parties-prenantes liées au processus de remanufacturing sont intégrés dans les discussions, au moment de l'établissement des besoins, la stratégie de remanufacturing sera plus facile à mettre en œuvre. Si au contraire un produit est indémontable, il ne pourra pas être remanufacturé. C'est principalement en ce sens que la conception intégrée appuie les stratégies de FdU : en intégrant, dès la conception, les spécificités des phases du CdV qui ne sont traditionnellement pas incluses.

Nous faisons ici l'hypothèse que la conception pour la réutilisation peut être considérée comme de la conception intégrée classique, avec une attention particulière aux paramètres de FdU et notamment aux parties-prenantes (Bauer, Brissaud et Zwolinski 2017).

2.2.2.2 Une représentation différente du cycle de vie et ses conséquences en conception

Comme mentionné à la section précédente, les stratégies de FdU impliquent logiquement une prise en compte de ces étapes et donc l'intégration des besoins de nouvelles parties-prenantes. Dans celle-ci nous nous intéressons au processus de conception et au CdV de ces stratégies de FdU.

Processus de conception et CdV. La phase de conception ne doit pas être considérée comme un élément isolé dans la conception de produit, mais bien comme une étape du CdV. En toute logique, les étapes de conception se situent en amont du CdV du produit, entre l'expression du besoin et les étapes de fabrication, d'utilisation et de FdV (Ullman 2003; Pahl et Beitz 2013). La prise en compte des étapes du CdV au moment de la phase de conception est primordiale pour une réponse optimale au besoin. Q. Zhang et al. (2016) a mis en perspective plusieurs études spécifiques aux processus de conception. Ses conclusions vont dans ce sens, c'est-à-dire que la phase de conception n'est que l'une des composantes du CdV du produit. Chapotot (2009), qui propose une approche pour capitaliser les usages dans le but de générer des concepts innovants, estime que les approches 'Design for X' limitent l'innovation, contrairement aux interactions qui sont présentes tout au long du CdV. Elle précise que disposer d'une vision globale du produit au moment de sa conception est bien plus efficace. Cette notion se retrouve dans l'ingénierie concurrente qui veut que les informations liées au CdV du produit soient remontées et gérées dès les phases de conception (Prasad 1996 dans Chapotot 2009). Intégrées chronologiquement par rapport aux étapes du CdV du produit (voir Figure 2, p 21), le processus de conception reste inchangé (Figure 15). Il précède là aussi l'étape de fabrication, qui inclut les extractions de matières et les opérations manufacturières destinées à la mise en œuvre du produit. S'ensuit la distribution, relative à l'acheminement d'un produit d'un lieu à un autre. En pratique, la phase de transport intervient en général tout au long de la vie du produit. L'étape d'utilisation correspond à la phase de vie en œuvre. Elle peut être accompagnée de différents services à l'image de la maintenance, de la réparation, etc.. La dernière étape considérée est la FdV. Elle apparaît au moment où l'utilisateur se défait du produit car elle ne satisfait plus son besoin, ou du fait d'une obligation légale (European Commission 2008b).

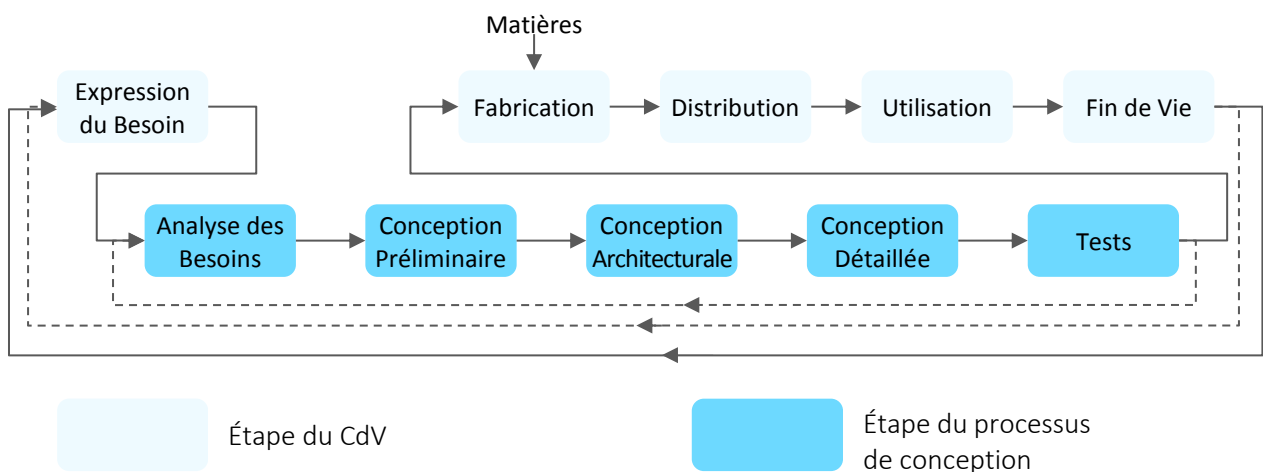


Figure 15 - Processus de conception au sein des étapes de vie d'un produit pour un usage

Conception et réutilisation. La problématique motivant ces travaux de thèse est intimement liée à la conservation de la valeur, ajoutée au moment des étapes de fabrication. Elle est conservée si l'offre est réemployée ou remanufacturée. Elle est détruite si l'offre est recyclée, incinérée ou mise en décharge. Pour ces raisons, pour les produits réutilisés, nous préférons davantage le terme 'fin d'usage' à 'FdV'. Cela marque une circularité dans l'utilisation du produit et le besoin d'intégration de cette circularité dès les phases de conception initiales et non a posteriori. En s'intéressant au processus de conception de produits ayant plusieurs phases d'utilisation, Gray et Charter (2008) notent que ceux-ci doivent être considérés, en premier lieu, égaux à d'autres produits manufacturés. Les phases de conception ne différenciant pas foncièrement entre des produits à un usage et des produits réutilisés ou remanufacturés.

Malgré cela, la question de l'intégration des paramètres permettant d'assurer la FdU, et donc l'usage suivant, est centrale pour de tels produits. En ce sens, Tolio et al. (2017) identifient plusieurs méthodes et outils destinés à faciliter l'intégration des spécificités liées au remanufacturing dès la phase de conception, en amont du CdV. Cela passerait par exemple par la prise en compte du désassemblage, de la collecte, de la réutilisation multiple, etc., mais aussi de guidelines à destination des équipes de conception. Bien que la situation ait pu évoluer en dix ans, Gray et Charter (2008) précisait qu'il n'y avait que 'peu de lien entre la conception du produit, l'ingénierie et le remanufacturing'. Ceci qui laisse à penser que ce n'est qu'une fois le produit collecté que se pose la question de son remanufacturing et pas initialement. Malgré tout, Hatcher, Ijomah et Windmill (2011) estimaient que c'est bel et bien 'la phase de conception de n'importe quel produit qui a le plus d'impacts sur les aspects de coûts, de fabricabilité mais aussi de traitements en fin de vie' et donc de remanufacturing. Prendre en compte les besoins de toutes les parties-prenantes du CdV sur les différentes phases d'utilisation, et ce avant même le premier usage, est donc la meilleure solution pour en établir une vision exhaustive.

2.2.2.3 Les approches développées pour la fin d'usage

De nombreux outils, méthodes et connaissances ont été développés en vue de la prise en compte de la fin d'usage en conception. Ceux-ci sont détaillés ci-après.

Une meilleure prise en compte des besoins. Pour mieux intégrer les besoins sur l'ensemble du CdV des stratégies de FdU, et palier au fait que certains peuvent ne pas avoir été exprimés lors des étapes de conception amont (besoin non identifié, besoin évolutif), Chong et Chen (2010) détaillent et discutent différentes approches pour minimiser les incertitudes engendrées par ces besoins évolutifs. Celles-ci sont classées en trois catégories. La première vise la compression du temps lié au cycle de développement. La seconde tend à diminuer la sensibilité relative aux changements en évaluant plus fréquemment les besoins des clients et utilisateurs finaux. La troisième cherche à prévoir les futurs besoins. Leur conclusion est que le QFD dynamique permet une collecte efficace des besoins, si ceux-ci sont exprimés par les clients. Lorsque les besoins sont flous, non décelés ou inconnus, cette méthode est inapplicable. À l'instar de Papageorgiou, Eres et Scanlan (2016), Chakraborty, Mondal et Mukherjee (2017) utilisent le AHP pour identifier les caractéristiques produit dans le but d'évaluer et de faciliter son remanufacturing (voir Figure 16). La particularité ici est l'ajout d'une composante 'floue' visant à éliminer les biais induits par le recours au jugement d'une 'expertise de remanufacturing'.

Définir les fonctions pour la FdU. En ce qui concerne plus spécifiquement les stratégies de FdU, Hatcher, Ijomah et Windmill (2011) répertorient et classent de nombreux outils de conception pour le remanufacturing en fonction des étapes du processus de conception. Parmi ceux-ci, les outils facilitant l'émergence et la définition du concept sont principalement basés sur les caractéristiques du produit et des processus de remanufacturing associés. À partir de là, il est facile de remonter aux fonctions des produits. Chakraborty, Mondal et Mukherjee (2017) utilisent une variante du AHP pour définir les caractéristiques remanufacturables de produits : le AHP flou. Cela leur permet d'identifier les alternatives de conception les plus appropriées pour le remanufacturing, à partir d'un produit existant. Tolio et al. (2017) estiment que les premières étapes d'un processus de dé- et remanufacturing visent à 'libérer les matériaux et les fonctions' du produit. Certaines caractéristiques sont considérées comme déterminantes pour le remanufacturing et induisent, en quelque sorte, des fonctions de base à préciser. Sont émis notamment : une stabilité du produit et du processus de remanufacturing ; une durée de vie supérieure pour les composants considérés comme critiques ; l'existence d'un marché pour la seconde utilisation, etc.. Enfin, en ce qui concerne les stratégies d'upgrading et de reconfiguration, Andersen et al. (2017) et den Hollander, Bakker et Hultink (2017) précisent que les fonctions liées à l'évolution des caractéristiques du produit sont amenées à évoluer. Cette évolution doit dès lors être considérée en conception.

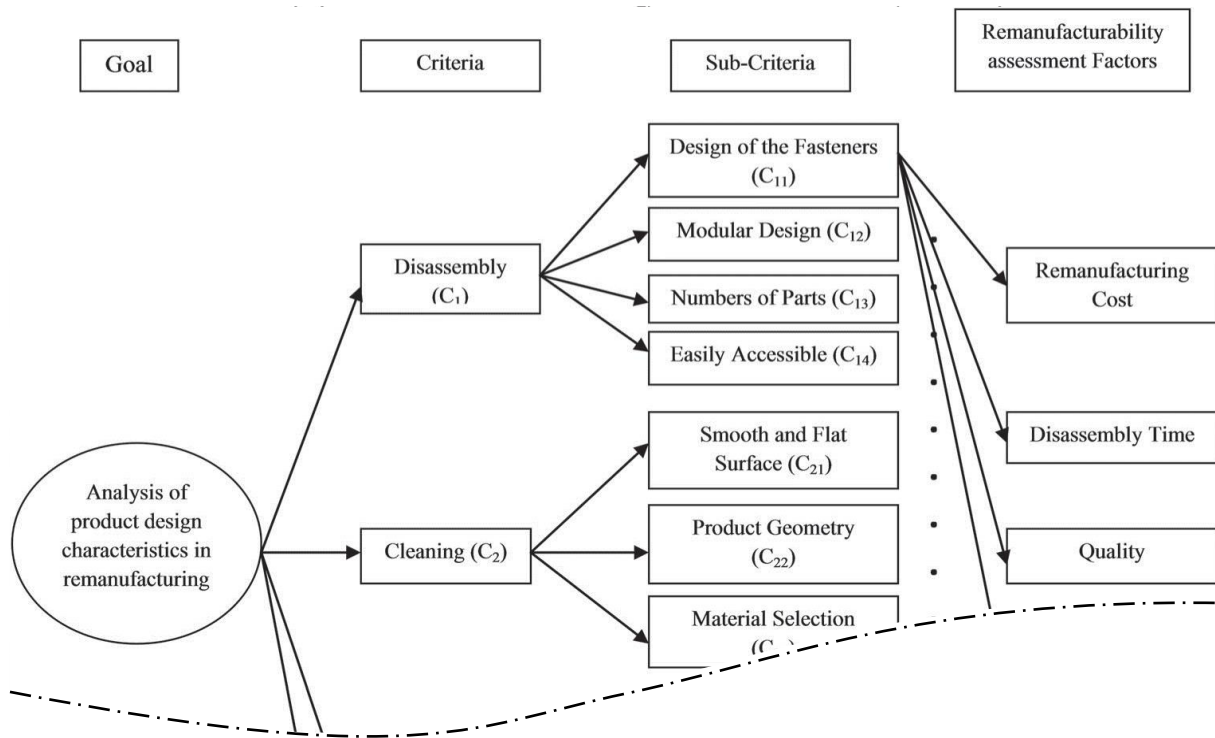


Figure 16 - Exemple de structure AHP dans une optique de remanufacturing, issue de Chakraborty, Mondal et Mukherjee (2017)

Une variété de démarches dès la FdU. Certaines méthodes de conception se veulent plus complètes. Elles sont souvent spécifiques à une stratégie de FdU et permettent aux équipes de conception d'intégrer certaines spécificités qui y sont propres. Celles-ci sont souvent reprises sous l'appellation 'Design for X'³⁴ (DfX). Pour la FdV, les approches de DfRecycling sont celles que nous retiendrons principalement. En ce sens, H. A. Peters et al. (2012) proposent un outil pour évaluer la recyclabilité d'un produit dès sa conception et au cours de sa vie. Plus classiquement, Worrell et Reuter (2014) mettent en avant une dizaine de règles, ainsi que des guidelines plus générales en vue de la conception pour le recyclage et la conservation des ressources.

Dans le cadre du DfRemanufacturing, de nombreuses études ont ce même objectif que de supporter les équipes de conception. En s'appuyant sur les caractéristiques des offres de produit remanufacturés, Hatcher, Ijomah et Windmill (2011) listent de nombreux conseils pour qui veut initier ou améliorer une activité de remanufacturing. D'autres identifient parmi l'ensemble des outils et méthodes existants, ceux qui permettent d'évaluer la remanufacturabilité d'un produit et ceux destinés à l'améliorer (Pigozzo et al. 2010 ; Goodall, Rosamond et Harding 2014).

D'autres approches sont plus transverses. Par exemple le DfDisassembly peut faciliter les étapes de recyclage comme celles du remanufacturing ou d'autres stratégies qui s'y apparentent (Go, Wahab et Hishamuddin 2015). Ces auteurs proposent également d'autres approches adaptées à différentes phases du CdV, comme le DfAssembly, DfReliability, etc.. Par ailleurs, le DfModularity, comprendre ici la mise en place d'une démarche de conception modulaire, permet aussi de supporter différentes stratégies telles que le remanufacturing et l'upgrading³⁵ (Bonvoisin et al. 2016).

Enfin, certaines méthodes utilisées en conception ont une portée plus globale et visent l'inclusion de critères de développement durable au sens large. C'est le DfSustainability. Dans cette optique, Crul et Diehl (2009) proposent une approche basée sur plusieurs éléments : une description des tenants et aboutissants pour une conception plus durable, la formalisation d'approches, méthodes et outils pour y parvenir et plusieurs illustrations au travers de différents cas d'études. Cette approche de DfSustainability vise l'intégration de l'ensemble de la chaîne de valeur de l'offre, de la conception à la fin de vie,

³⁴ Littéralement : 'Conception pour X'

³⁵ Stratégie visant à prolonger la vie du produit en intégrant une ou plusieurs phases d'améliorations en cours d'usage

en passant par l'usage et en incluant les diverses parties-prenantes. Arnette, Brewer et Choal (2014) intègrent eux aussi plusieurs des approches citées précédemment au sein du concept du développement durable. Ils précisent que ce n'est que lorsqu'elles sont utilisées conjointement qu'elles agissent sur les trois piliers du développement durable. Dans le même esprit, autour de la problématique proche qu'est l'économie circulaire, den Hollander, Bakker et Hultink (2017) visent l'intégration de différentes méthodes pour à la fois permettre d'augmenter la durée d'usage initiale (DfDurability), d'étendre l'usage (DfMaintenance, DfUpgrading) et de mieux gérer le produit en FdU et FdV (DfRepair, DfRemanufacturing, DfRecycling). La prise en compte de toutes les étapes du CdV est, ici, clairement représentée.

Bien que certaines méthodes de conception soient plutôt orientées sur des techniques de production (DfDisassembly), d'autres sur des aspects propres aux produits (DfReliability) ou sur l'offre de manière transverse (DfModularity), leur objectif principal est le même : apporter des connaissances aux équipes de conception sur une thématique spécifique, pour leur permettre de monter en compétences et d'élaborer des produits qui soient, dans le cas présent, plus respectueux de l'environnement. Plus généralement, on parle de 'Design for Environment' (DfE). Ces méthodes sont très souvent génériques et doivent être adaptées à chaque situation, à chaque produit.

Formaliser la connaissance. À l'inverse, il est parfois nécessaire de pouvoir formaliser, au sein de l'activité de conception, de nouvelles expertises pour les rendre accessibles à l'ensemble de l'équipe. Celles-ci peuvent être apportées avec de nouvelles personnes, la mise en place de nouveaux objectifs (prise en compte de l'environnement), l'émergence d'une nouvelle technologie (fabrication additive), etc.. En reprenant les travaux de Nonaka, Prudhomme et Wilson, Baouch (2016) définit la connaissance comme propre à un individu, basée sur les informations qu'il a reçues et qui s'expriment sous la forme de compétences. Dans ses travaux de thèse, Baouch propose différents outils destinés à identifier et formaliser les connaissances locales pour l'éco-conception. L'objectif étant de pouvoir les restituer dans un contexte multi-acteurs, au moment de la réalisation de l'analyse de cycle de vie (ACV). Dans la même veine, le projet de recherche G.EN.ESI a contribué à améliorer l'intégration de l'éco-conception dans l'industrie électromécanique. Ici, il n'est pas question d'expertise métier mais d'intégration de données environnementales directement au sein d'outils classiques, lors du processus de conception (Dufrene 2015).

Conclusion. Ces différents outils et méthodes permettent aux équipes d'un projet de pouvoir, dès les phases de conception, intégrer les connaissances et les compétences des diverses parties-prenantes, ainsi que les spécificités liées à la prise en compte de la FdU.

Le repurposing de produits en étant à ses balbutiements, il n'existe aujourd'hui rien de tel pour cette stratégie de FdU. Malgré tout, nous pouvons d'ores et déjà discerner de potentiels liens entre certaines méthodes présentées et la réutilisation pour des applications distinctes : DfDisassembly ou DfModularity. Celles-ci doivent être prises en compte dès la phase de conception du produit pour faciliter les étapes aval du CdV.

2.2.2.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons mis en avant les spécificités de la prise en compte de la FdU en conception de produit. Tout d'abord, il paraît évident de prendre en compte le maximum de parties-prenantes. Ceux-ci doivent représenter l'ensemble du CdV, depuis l'amont du premier usage et jusqu'à l'aval du dernier et la FdV du produit. Contrairement à des produits à application unique, les produits réutilisés ont un CdV 'bouclé' et certaines étapes sont parcourues plusieurs fois. Cette particularité induit des besoins différents lors de la conception des produits. De nombreuses méthodes, outils et connaissances se sont développés autour de cette problématique de FdU et ont été mis en avant dans cette section.

La stratégie de repurposing est, elle aussi, considérée comme une stratégie de FdU, la différence majeure étant que les applications qui se succèdent sont différentes. La section suivante met en avant les singularités de cette dernière en vue de sa conception.

2.2.3 Les démarches de conception pour le repurposing

Dans cette section, nous allons plus spécifiquement aborder les points de la littérature relatifs à la stratégie de réutilisation en cascade. Dans un premier temps, en nous appuyant sur la section 2.2.2, les singularités et les similitudes des phases de conception successives seront discutées. Ensuite, la gestion de l'information d'un usage à l'autre sera abordée. Enfin, nous discuterons des compromis à identifier lors des phases de conception.

2.2.3.1 Des phases de conception distinctes mais dépendantes

À l'instar de toute autre stratégie, concevoir des produits repurposés nécessite la prise en compte des besoins. Ces besoins pouvant se trouver tout au long du CdV, comme cela a déjà été mis en avant pour les stratégies de FdU. La différence majeure entre les précédentes stratégies de fin d'usage et le repurposing réside dans le fait que des applications différentes sont attendues au cours des cycles d'usage. Ce qui nous intéresse ici ce sont les implications que cela engendre en conception, ainsi que les verrous scientifiques et les limites actuelles.

Une reconception subie. Même a posteriori, la réutilisation de batteries de VE pour des applications stationnaires est possible. Dans leur étude respective, Klör et al. (2017a) et Tong et al. (2017) prouvent que repurposer de batteries de VE vers des applications stationnaires est possible en réalisant un démonstrateur. Actuellement, et à l'image de ces deux papiers, les produits qui sont repurposés n'ont pas été conçus dans cette optique. Lors d'une activité de repurposing, il est donc avant tout nécessaire d'évaluer les performances des produits, de définir l'application qui sera la plus adéquate et de 'recomposer' le produit avec un maximum de composants utiles à cette application (Klör et al. 2017b). En fonction du produit initial et de l'application suivante, le travail de reconception est plus ou moins conséquent. Tout dépend de l'état du produit et des similitudes entre les applications. Les phases de conception sont ici strictement séparées, bien que la conception pour la seconde application s'appuie forcément sur les choix de conception initiaux.

Nous avons pourtant vu précédemment qu'inclure les besoins de l'ensemble de la chaîne de valeur du produit, et donc ceux de toutes ses parties-prenantes, dès la phase de conception permettait d'optimiser le produit, de réduire les coûts et de maximiser sa réutilisation (Brissaud et Tichkiewitch 2000). Ne pas les prendre en compte au plus tôt induira nécessairement, et a minima, des surcoûts et des difficultés de réutilisation.

Vers une intégration des usages. Bowler (2014) cherche davantage à intégrer les différences de fonctionnalités entre les deux phases d'usage d'un produit, en évaluant en amont les écarts entre les deux applications. Elle propose également plusieurs recommandations à chacune des étapes du CdV d'une batterie destinée à être repurposée. Ses recommandations concernent les phases classiques du CdV (fabrication, utilisation, etc.) mais aussi celles du processus de conception.

Intégrer au plus tôt l'ensemble des usages semble être la solution qui, comme en conception intégrée, permette une meilleure gestion du produit tout au long de sa vie. En effet, cela permettrait de lier les différentes phases d'utilisation, comme cela se passe pour la majorité des autres produits sur le marché.

Des limites identifiées. Dans l'hypothèse d'une prise en compte au plus tôt des applications successives, deux problèmes majeurs se posent. Premièrement, d'une utilisation à l'autre, les besoins évoluent. Il est pourtant souhaitable de les intégrer dès le processus de conception initial (Bauer et al. 2016). Par ailleurs, cette évolution des besoins peut se traduire en une modification de la structure du produit (Beverungen et al. 2017). Deuxièmement, certains besoins peuvent être flous et difficiles à identifier lors des étapes les plus en amont (Q. Zhang et al. 2016). Cela peut être dû à la nature du produit (de nombreuses applications sont possibles à l'issue d'un même usage), à ses performances (la phase d'utilisation induit de la variabilité) ou à sa durée de vie (une longue durée de vie masque les possibilités de réutilisation). Ainsi, une certaine flexibilité est nécessaire pour inclure les besoins des usages successifs au cours du CdV des produits repurposés.

Synthèse. Parmi les papiers liés à la stratégie de repurposing, on remarque différents niveaux d'intégration de la stratégie de repurposing en conception. Cela va d'une simple évaluation des performances a posteriori à une conception intégrée dès le premier usage, en passant par une conception partielle des usages ultérieurs. Une gestion de l'information tout au long du CdV du produit devrait permettre de faciliter cette conception ultérieure.

Pour faciliter la mise en place de la stratégie de réutilisation en cascade, il est nécessaire d'avoir une large vision de son CdV et des besoins qui y attirent. Pour ce faire, nous faisons l'hypothèse que l'intégration d'un maximum de parties-prenantes, à l'instar de ce qui est préconisé par la conception intégrée, est bénéfique.

2.2.3.2 Une gestion de l'information inter-usage

Comme cela a déjà été abordé à la section 2.1, l'un des premiers éléments qui ressort lors de la mise en place d'une stratégie de repurposing est le suivi des performances du produit. Il peut en effet témoigner d'indications très utiles pour les équipes de conception. En premier lieu, comme retour d'expérience par rapport à l'usage en question, mais surtout pour faciliter sa réutilisation dans des applications ultérieures. Les performances ne sont pas la seule caractéristique concernée par ces besoins de capitalisation.

Un besoin d'évaluation post-usage. La majorité des études souligne la nécessaire évaluation des caractéristiques du produit. Sur le cas des batteries de VE, les travaux de DeRousseau et al. (2017) visent à déterminer la meilleure application de seconde vie possible, en accord avec plusieurs paramètres : opportunité économique (la réutilisation est-elle rentable ?), faisabilité technique (la réutilisation est-elle possible ?), technologique (les risques de réutilisation d'une application à l'autre sont-ils acceptables ?). En lien avec les aspects technico-économiques de la réutilisation de batteries, Assunção, Moura et de Almeida (2016) présentent un modèle pour en évaluer les spécificités en vue d'une seconde application. Klör et al. (2017b) ont, eux, développé un outil informatique d'aide à la décision. Ils alimentent leur outil d'après les caractéristiques techniques de la batterie à la fin de son premier usage (voir section 2.1.3). Ils peuvent alors préciser leur modèle d'aide à la décision pour vérifier que la réutilisation est faisable et définir le second usage le plus adapté à chacune des batteries en FdU. Avoir accès aux informations de l'usage précédent est la clef de leur outil d'aide à la décision car les performances à l'issue d'un usage sont confrontées aux besoins du suivant. Aujourd'hui, ils considèrent et évaluent plusieurs paramètres propres à la batterie en FdU et à l'application stationnaire. D'autres paramètres, propres à l'organisation globale de l'offre sont également évalués.

Comprendre pour mieux évaluer. Pour concevoir des batteries lithium-ion plus fiables, Eddahech (2013) a cherché à comprendre les effets de vieillissement de ces dernières pour pouvoir en prolonger l'usage. Ahmadi, Fowler et al. (2014) ont également étudié quelles étaient les influences de certains paramètres sur la possibilité de réutilisation d'une batterie lithium-ion d'un véhicule électrique (VE) vers une application stationnaire. Pour ce faire, ils ont analysé leur évolution (perte de capacité, efficacité énergétique, taux de défaillance, profil de charge / décharge) et évalué si un second usage était possible dans les conditions d'une application stationnaire. Pour prévoir la durée de vie restante de packs batterie, Rohr et al. (2017) s'intéressent et cherchent à quantifier les incertitudes de plusieurs paramètres pour remonter à l'usage qui en était fait.

Suivre au quotidien. Pour simplifier l'évaluation, Bowler (2014) préconise de stocker directement les informations relatives aux performances et à l'état de santé des batteries de VE au sein des différents modules avec les produits, ces paramètres étant jugés comme critiques. De plus, elle met en avant les éléments à suivre et à contrôler en priorité.

Synthèse. Les études actuelles se focalisent majoritairement autour de l'évaluation des performances des batteries de VE en cours et en FdU, ainsi que de leur remise en état pour une autre application. Malgré cela, on s'aperçoit que capitaliser les informations liées aux usages antérieurs doit permettre une réutilisation plus rapide, plus fiable et donc plus appropriée du produit, plutôt que de chercher à les évaluer a posteriori. Faciliter l'accès à ces informations devrait être l'un des objectifs de la conception. Au vu du trop faible nombre d'études concernant d'autres produits que les batteries de VE, nous ne pouvons que supposer qu'il en sera de même pour ceux-ci et que le suivi des performances et la gestion de l'information seront nécessaires. Si tel n'est pas le cas, le produit n'en sera que plus facile à concevoir.

2.2.3.3 *Des compromis à identifier avant le premier usage*

Que ce soit vis-à-vis de la conception ou la gestion des informations tout au long du CdV, certains compromis doivent être trouvés pour permettre de réaliser, tour à tour, les usages successifs.

Identifier les besoins pour faciliter les compromis. Bien que ce ne soit pas toujours le cas, cette volonté d'intégration 'au plus tôt' est elle aussi présente dans la littérature pour la réutilisation. La fondation Ellen MacArthur (2013) promeut une intégration des contraintes dès la conception pour favoriser une économie circulaire. Toujours vis-à-vis de l'économie circulaire, Singh et Ordoñez (2016) appuient cet argumentaire en estimant que la conception de produits doit nécessairement intégrer et anticiper les problématiques de développement durable, dont le repurposing fait partie. Pigosso et al. (2010) traitent d'une stratégie de FdU analogue, qu'ils nomment 'demanufacturing' et 'qui consiste à désassembler un produit en différentes parties pour les réutiliser dans différents usages'. Le besoin d'intégration des contraintes de désassemblage dès les phases amont du processus de conception est alors considéré comme un élément grandement facilitateur.

Dans le cadre de la reconfiguration de produits, Andersen et al. (2017) estiment que l'identification des besoins représente une étape importante. Les principales problématiques sont liées aux incertitudes quant à l'état du produit à la fin de son usage et la possibilité de le réaffecter à une nouvelle application. Par ailleurs, Klör et al. (2017a) et Tong et al. (2017) précisent que certaines caractéristiques (fonctionnelles ou non fonctionnelles) doivent être prises en considération pour chacune des applications. Par exemple, les contraintes de volume et de poids pour l'application ultérieure doivent être respectées dès l'application antérieure. Des opérations de démontage et d'évaluation des performances doivent être réalisables. Le système de gestion de la batterie (BMS) pour l'application suivante doit être développé en conséquence et intégré au nouveau pack. Toutes ces opérations et bien d'autres sont nécessaires. Toujours pour la conception de batteries, Beverungen et al. (2017) identifient de nombreuses exigences, transverses aux applications successives : des besoins fonctionnels, d'adéquation de l'usage, des contraintes de volume et de poids, de durabilité, de fiabilité et de faisabilité économique. Krystofik et al. (2017) soulèvent malgré tout un bémol à la mise en place de cette stratégie dès les phases les plus amont : elle ne sera pleinement possible que si ce sont les producteurs originaux qui gèrent la réutilisation du produit et non des tiers.

Des besoins aux fonctions. Définir les fonctions des produits repurposés doit permettre une meilleure gestion de l'ensemble de leur CdV. En effet, la prise en compte de l'évolution des fonctions d'une application à l'autre, dès la conception, doit faciliter les étapes de refabrication ainsi que l'application suivante. Dans la même veine, et dans le cadre des produits évoluant au cours de leur CdV, Morris et al. (2016) encouragent à une gestion coordonnée des usages et préconisent une gestion claire et proactive de l'information et du produit dès les étapes de conception et tout au long de sa vie. La prise en considération des fonctions est ici primordiale : elles doivent être définies dès la conception amont et redéfinies ou ajustées en cours de CdV.

Les travaux de thèse de Bowler (2014) intègrent ces précédents aspects dans une description de la chaîne de valeur globale des batteries de VE réutilisées pour des applications stationnaires. Après avoir

identifié les différences de fonctionnalités entre les usages successifs et en avoir évalué les écarts, Bowler propose de prendre en compte ces exigences aux étapes du CdV les plus opportunes. Idjis (2015), qui a modélisé la filière de valorisation des batteries de VE, met également en avant de nombreuses caractéristiques à intégrer lors de la conception et facilitant la gestion des batteries sur les différentes phases du CdV en vue de leur réutilisation. Il est essentiellement question d'aspects technico-économiques et de prise en compte de l'évolution du marché.

Synthèse. À l'instar d'autres stratégies de FdU, la prise en compte des usages successifs dès les étapes de conception préliminaires devrait profiter à l'ensemble du CdV (et, par rapport à ce qui se fait aujourd'hui, notamment aux phases de refabrication et d'usages ultérieurs). Ainsi, pour une meilleure intégration des besoins, l'ensemble des parties-prenantes doit être consultées et, ce, qu'elles soient liées à la première, à la seconde ou à toutes les applications. Dans le même esprit, les informations véhiculées par les usages ultérieurs doivent être remontées en conception le plus tôt possible. Par rapport à ces besoins, les équipes de conception établissent les fonctions du produit. Elles doivent dès lors faire des compromis par rapport à ces fonctions et en fonction des différents usages.

2.2.3.4 Conclusion

Plusieurs éléments ont été mis en avant dans cette section spécifique au repurposing. Tout d'abord, le fait qu'il existe aujourd'hui plusieurs niveaux d'intégration de cette stratégie. Bien souvent, elle n'est appliquée qu'a posteriori, une fois le premier usage passé et non dès les étapes amont pour tout le CdV. C'est en partie pourquoi les principales études, relatives aux batteries de VE, cherchent à caractériser des produits en FdU pour les réutiliser dans d'autres applications. C'est là que la capitalisation des informations liées aux usages antérieurs devient intéressante car elle facilite grandement les processus de refabrication et donc l'usage suivant. Cela doit être intégré en conception et, en faisant cela, la conception pour le repurposing commence réellement. La gestion de la temporalité est un élément particulièrement important à considérer pour le repurposing. En effet, la multiplicité des phases du CdV d'un produit repurposé entraîne davantage de parties-prenantes et donc davantage de besoins à considérer. Ces informations supplémentaires, potentiellement opposées, doivent être gérées par les équipes de conception au moment de l'établissement des fonctions. De plus, la gestion des priorités d'un usage sur l'autre est à prendre en compte pour établir les compromis nécessaires. D'autant plus que certains besoins, et donc certaines fonctions, peuvent être flous au moment de la conception initiale : nature du produit, performances, durée de vie.

2.2.4 Conclusion

Bilan de la littérature sur les démarches de conception. Au sein de cette seconde section, plusieurs éléments, tous en lien avec la conception de produits repurposés et issus de la littérature, ont été mis en avant. Tout d'abord, nous avons montré que les étapes de conception d'un produit 'classique' (suivant le modèle produire-consommer-jeter) et celles d'un produit réutilisé (hors repurposing) différaient peu et précédaient généralement la phase d'usage. De par sa réutilisation dans des usages différents, les étapes de conception d'un produit repurposé semblent toutefois plus complexes à intégrer.

Par ailleurs, les besoins des produits à 'application unique' sont généralement établis par rapport aux cinq étapes de leur CdV (matière première, production, distribution, utilisation, FdV), avec un focus sur l'usage. Ces besoins sont ensuite traduits par les équipes de conception dans un CdC et l'activité de conception qui s'ensuit permet au produit de prendre forme. Plusieurs outils existent pour passer des besoins au produit final et, parmi eux, l'utilisation de fonctions permet le passage de la caractérisation précise des besoins à l'établissement de la solution. Dans le cas des produits à 'usages multiples', les mêmes questions se posent. À ceci près que les étapes de leur CdV sont, encore une fois, plus complexes par nature. La prise en compte de l'ensemble des parties-prenantes est ici primordial, et les besoins sont plus nombreux, tout comme les fonctions qui en découlent. Lorsque les applications ultérieures ne sont que partiellement définies, un flou résiduel doit également être géré en conception, ce qui induit

des difficultés supplémentaires. Il est donc nécessaire que la démarche proposée soit suffisamment flexible pour s'adapter à la stratégie de repurposing.

Les manques identifiés. Lorsque l'on s'intéresse à la relation entre le processus de conception et les applications d'un produit repurposé, par rapport à son CdV, on s'aperçoit que ces phases sont traitées très chronologiquement et qu'il n'y a pas d'anticipation. Aujourd'hui, il n'existe pas d'exemple de conception de produit repurposé initiée lors des phases amont du CdV. La seule option consiste en un diagnostic des performances et une reconception a posteriori. Les caractéristiques des offres peuvent alors être tellement distinctes d'une application à l'autre que le repurposing en serait impossible. Par ailleurs, la stratégie de repurposing semble poser plusieurs difficultés au moment de la récolte des besoins. Certains peuvent être flous, d'autres non-identifiés lors des étapes initiales. Les fonctions qui en découlent ne sont pas clairement définies. De plus, une gestion des priorités d'un usage à l'autre doit être réalisée lors de l'établissement des fonctions. Cela nécessite une gestion particulièrement flexible des fonctions d'un usage à l'autre, notamment si l'application ultérieure change en tout ou partie par rapport à ce qui était prévu initialement. Certaines méthodes travaillent à l'intégration de ces problématiques, mais elles se limitent aujourd'hui essentiellement à la reconception et pas aux étapes de conception initiales.

Les manques mis en avant dans la littérature permettent là encore de réorienter notre seconde question de recherche, à savoir :

'Quel processus de conception pour le repurposing ?'

Par là nous entendons à la fois ce qui est lié à l'organisation globale de l'activité de conception et également à sa mise en œuvre par les équipes de conception.

Hypothèses. En prenant le parti que la reconception a posteriori limite les possibilités de réutilisation, il est nécessaire de maximiser l'intégration de la conception des différentes phases d'usage dès la conception amont. Or, le processus de conception classique n'est pas nécessairement adapté à la stratégie de repurposing car, comme l'a montrée la littérature. Il peut exister plusieurs phases de conception au cours du CdV d'une même offre. Quoiqu'il en soit, il est nécessaire de collecter un maximum de besoins liés à l'ensemble du CdV. Ainsi, les différentes parties-prenantes de l'offre doivent être identifiées et consultées. De plus, du fait de la spécificité de cette stratégie de réutilisation, une très bonne connaissance des offres est nécessaire. Il est donc important de pouvoir s'appuyer sur l'expertise métier. Il semble donc qu'il faille formuler des recommandations de conception qui permettent aux équipes de conception de clarifier les besoins, d'établir les fonctions sur l'ensemble du CdV et de développer des solutions pour différents usages et différentes applications. Par ailleurs, ces recommandations doivent être utilisables dans un contexte multi-acteurs et suffisamment souples pour pouvoir, en cours de conception, intégrer de nouvelles contraintes, de nouvelles fonctions et réévaluer les résultats en fonction de nouveaux objectifs. Par exemple, préciser l'application ultérieure au cours du CdV ne devrait pas poser de problème. Enfin, les potentielles fonctions floues doivent être prises en compte et gérées lors du processus de conception.

Dans le cadre de ces travaux de thèse sur la réutilisation de produits pour des applications en cascade, la minimisation des impacts environnementaux se veut être notre leitmotiv. Bien que cela ne se vérifie pas systématiquement pour tous les produits, prolonger la durée de vie d'un produit permet en général de réduire ses impacts environnementaux. Néanmoins, pouvoir apporter la preuve de ces améliorations environnementales est encore mieux. En ce sens, la partie 2.3 cherche à identifier dans la littérature comment mesurer l'impact environnemental d'un produit repurposé.

2.3 Les évaluations environnementales pour la fin de vie : quid des applications en cascade ?

Il est globalement admis qu'éviter de produire des déchets est meilleur pour l'environnement que réutiliser des produits. Que la réutilisation est elle-même meilleure que le recyclage, qui est, lui, préféré à l'incinération et à la mise en décharge (European Commission 2008b). Toutefois, il est précisé dans la directive que la solution de traitement 'produisant le meilleur résultat global sur le plan de l'environnement' doit être favorisée. Cela passe au besoin 'par une réflexion fondée sur l'approche de cycle de vie'. Une étude de Rossi et al. (2015) met en avant cette problématique en évaluant les impacts environnementaux d'un sac biodégradable en bioplastique : le PLA. Leur conclusion est que la valorisation énergétique est préférable au compostage. Dans une étude sur la durée de vie des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE), l'ADEME (2012) propose de travailler à la définition d'un cadre d'analyse commun aux DEEE, de limiter le remplacement prématuré et de favoriser la réparation et le réemploi tout en développant les connaissances sur les impacts environnementaux de ces produits. En d'autres termes, cela vise à 'évaluer les impacts du réemploi des EEE vs. recyclage'. L'analyse de cycle de vie (ACV) reste l'un des outils scientifiques les plus complets (multicritères, multi-étapes) pour comparer diverses solutions sur le plan environnemental.

2.3.1 La démarche d'ACV

Méthodologie d'ACV. Elle permet de comparer différentes solutions (produits ou services) afin d'identifier laquelle est la plus respectueuse de l'environnement. Elle permet ainsi d'estimer les impacts environnementaux potentiels de ces solutions (ISO 14040 2006). Pour ce faire, les flux matières et énergies entrants et sortants sont collectés et évalués par rapport à différents indicateurs environnementaux : effet de serre, eutrophisation, épuisement des ressources, etc.. C'est la raison pour laquelle elle est considérée comme une approche multicritère. Par ailleurs, dans l'absolu sont prises en compte l'ensemble des étapes du CdV (voir Figure 2, p 21, et Figure 5, p 26), 'du berceau à la tombe', d'où la dénomination d'approche globale. Il existe également des approches partielles dites 'de la porte à la porte'. Quatre étapes sont définies pour la réalisation d'une ACV (voir Figure 17) (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006).

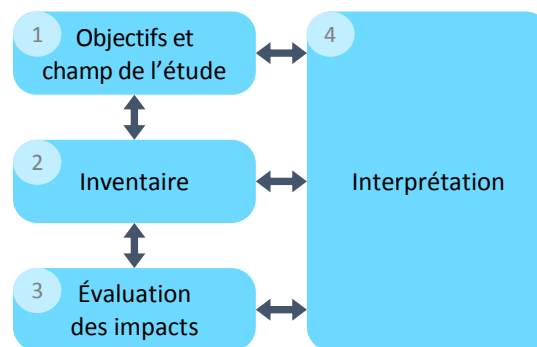


Figure 17 - Les étapes de l'analyse de cycle de vie (ISO 14040 2006)

Ces quatre étapes sont reprises et explicitées clairement dans l'annexe du livre d'Hélène Teulon (2014). La définition des objectifs et du champ de l'étude (étape 1) en est la plus critique car elle pose les bases de l'ACV : définition du périmètre, de l'unité fonctionnelle (UF), des règles d'allocation et de fin de vie (FdV) utilisées. L'inventaire (étape 2) n'est autre que le recueil des flux entrants et sortants. L'évaluation des impacts (étape 3) permet le lien entre les flux cités précédemment et les catégories d'impacts environnementaux. L'interprétation (étape 4) est l'analyse globale transverse qui en est faite par rapport aux objectifs définis au début de l'ACV.

Conclusion rapide. D'une manière générale, l'ACV est assez bien connue et utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux de produits et services. En revanche, comme mentionné par Plevin, Delucchi et Creutzig (2014), 'il n'existe pas de méthode unique, universellement acceptée et définie précisément

pour réaliser une ACV'. En fonction des objectifs, des frontières, du degré de précision, de la qualité des données, etc., les résultats diffèrent d'une étude à l'autre. Ceci est d'autant plus vrai pour la FdV car les modélisations de FdV et de fin d'usage (FdU) sont considérées comme complexes par nature (Record 2011 ; Aissani 2012).

2.3.2 *Considérations pour la fin d'usage et de vie en ACV*

La gestion de la FdU et de la FdV n'est pas une problématique nouvelle en ACV. Keoleian et Menerey identifient déjà en 1994 les mêmes stratégies que précédemment : réemploi, remanufacturing et recyclage, en dissociant boucles de recyclage ouvertes et fermées. Il n'est alors pas question de comparaisons entre celles-ci. Et pour cause, les frontières et les implications sont belles et bien différentes de l'une à l'autre, impliquant bien souvent des unités fonctionnelles différentes.

2.3.2.1 *Prérequis pour stratégies de fin d'usage et de vie*

Les subtilités concernant les stratégies de FdU et de FdV sont explicitées ci-après.

Recyclage. Le recyclage tout d'abord. Il fonctionne à l'inverse des processus de fabrication : par des opérations manufacturières, des matériaux sont produits à partir de produits. Cela permet de réinjecter de la matière secondaire sur le marché. Modéliser le recyclage en ACV nécessite de bien connaître le taux de recyclabilité³⁶ du produit, mais également les taux de récupération des produits en FdV (dépendant souvent des filières de récupération). D'eux dépend le taux de recyclage³⁷ qui sera repris dans la modélisation ACV. Le rapport Record (2011) précise que la multifonctionnalité du procédé de recyclage et le type de boucle de recyclage, ouvertes ou fermées, sont également à considérer. Prendre en compte la multifonctionnalité va induire une gestion des flux et des impacts différente, en fonction du type d'allocations défini. Il est dès lors nécessaire d'évaluer les potentielles différences au travers d'une analyse de sensibilité.

Réemploi. Ensuite, le réemploi. Dans cette stratégie, la valeur ajoutée est préservée. Là encore, il est important de connaître le taux de produits effectivement réemployés pour pouvoir apprécier les évolutions des impacts globaux des produits. Les allocations sont ici plus faciles à gérer. Pour l'exemple, du fait d'une perte de valeur au cours de l'usage, Pertl, Obersteiner et Salhofer (2011) préfèrent attribuer davantage d'impacts au premier cycle d'usage, à fonctionnalité équivalente.

Remanufacturing. Enfin, pour le remanufacturing, les mêmes remarques sont valables. Le taux de produits qui est remanufacturé doit être défini pour l'ACV. Le nombre de fois qu'un produit est remanufacturé est précisé. Différents types d'allocations peuvent être ensuite définis en fonction des objectifs de l'étude spécifiée dans la première étape. Pour mettre en avant les bénéfices environnementaux liés à un produit remanufacturé, K. Peters (2016) propose une approche dite du 'supporteur du remanufacturing'. Il met en avant qu'en définissant un champ de l'étude favorable, avec des UF restrictives, et en établissant des horizons temporels courts, un produit remanufacturé est avantagé au détriment d'un produit neuf.

Plus généralement. L'ILCD Handbook précise que, pour les processus et systèmes multifonctionnels comme le recyclage ou le remanufacturing, chacune des fonctions doit être décrite et spécifiée (European Commission, Joint Research Centre et Institute for Environment and Sustainability 2010). Une UF est alors définie pour chaque fonction, ce qui complexifie l'ACV et son interprétation. Par ailleurs, le choix des frontières est déterminant. En ce sens, K. Peters (2016) montre que les impacts environnementaux peuvent varier du simple au double en fonction du champ de l'étude et de la manière dont ces derniers sont alloués.

Les différents types d'approches et d'allocations sont exposés dans la section suivante.

³⁶ Pourcentage du produit qui est potentiellement recyclé, souvent exprimé par rapport à la masse.

³⁷ Pourcentage du produit qui est effectivement recyclé, souvent exprimé par rapport à la masse.

2.3.2.2 *Approches et gestion des allocations*

Type d'ACV, situation et stratégie de FdU et de FdV. En ACV, deux types d'approches sont distinguées : attributionnelles et conséquentielles. L'ILCD Handbook distingue trois situations relatives à ces dernières (European Commission, Joint Research Centre et Institute for Environment and Sustainability 2010) :

- o Situation A. Les études dites à l'échelle micro pour l'aide à la décision, n'ayant que peu de répercussions globales, sont traitées par une approche attributionnelle.
- o Situation B. Les études dites à l'échelle macro pour l'aide à la décision entraînant de larges modifications des infrastructures et moyens de production existants sont traitées par une approche conséquentielle.
- o Situation C. Les études comptables ou descriptives, dressant le bilan d'un produit, processus ou service, sont traitées par une approche attributionnelle.

En lien avec les stratégies de FdV et de FdU, et en accord avec l'ILCD Handbook, l'ADEME et al. (2015) précisent que l'ACV attributionnelle, dans une logique d'amortissement des impacts sur des cycles successifs, 'peut théoriquement s'appliquer au remanufacturing/réutilisation de produits ou composants multi-matériaux'.

Problèmes liés à la multifonctionnalité. Les difficultés arrivent lorsque les études ACV doivent gérer des problématiques de multifonctionnalité. Qui plus est, cette gestion varie selon la situation A, B ou C. L'ILCD Handbook précise que 'le problème de tels processus multifonctionnels est qu'en ACV [attributionnelle], il faut analyser un système unique pour déterminer les impacts environnementaux spécifiques, liés à son cycle de vie. En réalité, peu de systèmes existent de manière isolée' (European Commission, Joint Research Centre et Institute for Environment and Sustainability 2010). La seule réponse apportée aujourd'hui est une répartition des impacts environnementaux globaux du système entre les différentes co-fonctions (ou coproduits). Dans le cadre de la réutilisation et du recyclage cela fonctionne de la même manière : les impacts sont distribués entre les différentes phases du CdV (Record 2011). Autant que possible, cette répartition doit être définie par le demandeur, basée sur le CdV et en accord avec les objectifs de l'étude et la réalité de la situation (Record 2011 ; Allacker et al. 2014). Schrijvers, Loubet et Sonnemann (2016) soulignent l'importance des deux derniers points ainsi que le besoin de cohérence entre les différentes stratégies de fin de vie et d'usage.

Les solutions existantes. Pour répartir les impacts en fonction des co-fonctions, plusieurs documents, basés sur l'ISO 14040 et 14044, en établissent un ordre préférentiel (European Commission, Joint Research Centre et Institute for Environment and Sustainability 2010 ; European Commission 2013 ; Schrijvers, Loubet et Sonnemann 2016). Globalement, les problèmes de multifonctionnalité doivent être préférentiellement résolus par :

- o une subdivision (partielle ou virtuelle) du système,
- o une extension du système à un système plus large ou une substitution d'une partie du système par un système équivalent,
- o une allocation sur la base d'une relation physique sous-jacente (massique, énergétique, etc.),
- o une allocation sur la base d'un autre type de relation (économique, fonctionnelle, etc.).

La subdivision permet de répartir précisément les impacts globaux à chaque co-fonction. Elle est compliquée à appliquer lorsque les fonctions sont entremêlées, dépendent toutes d'un même processus et que les impacts qui y sont liés ne peuvent y être directement corrélés.

L'extension du système permet d'élargir les frontières définies à l'étape 1 de l'ACV pour inclure, au sein de l'étude, les fonctions présentes dans une partie des systèmes étudiés. Aucune déduction n'est faite par ailleurs.

Dans l'approche attributionnelle, le cas de la substitution n'est pas unanime, notamment parce qu'elle est conséquentielle par nature. Pratiquer des imputations (ou des substitutions) est surprenant car il n'existe 'pas de logique qui décrit correctement le lien entre les fonctions des systèmes à l'étude' (CI-RAIG 2011). Plevin, Delucchi et Creutzig (2014) estiment que la substitution est loin d'être parfaite car les effets indirects et d'échelles qu'elle entraîne ne sont pas négligeables. Ils prennent pour exemple

l'évitement des impacts liés aux carburants traditionnels dans le cas de la production de biocarburants et notent que cette substitution n'est pas appropriée car les jeux de marchés et leurs effets ne sont pas correctement établis. D'autres études sont plus ouvertes. De Camillis et al. (2014) estiment que, pour des produits en FdV, la substitution peut être tolérée si elle s'apparente à la subdivision. En d'autres termes, si le poids environnemental du produit en FdV est réparti entre les différentes phases. Le rapport Record (2011) établit que la substitution peut être utilisée lorsque 'la co-fonction non étudiée peut être absorbée par le marché et va réellement se substituer au procédé moyen représentatif du marché'. Dans le cas contraire, une ACV conséquentielle est plus appropriée. Transposé au cas d'une vache laitière, les impacts propres à la co-fonction 'production de viande' peuvent ici être substitués de l'étude 'production de lait', dans une ACV attributionnelle.

Les différents types d'allocations (massique, fonctionnelle, économique, etc.) permettent, en dernier recours, de répartir les impacts selon une clef généralement arbitraire. Elle peut être définie sur des critères physiques ou en fonction du marché. Par exemple, dans le cas du recyclage, les impacts peuvent être attribués :

- totalement au produit qui fournit la matière [100 : 0],
- totalement à celui qui reçoit la matière [0 : 100], c'est la méthode des stocks,
- aux deux de manière égalitaire [50 : 50].

Dans la majorité des cas, seules ces trois clefs sont utilisées par souci de simplification. À noter qu'appliquer un type d'allocation à certaines co-fonctions et un autre à d'autres co-fonctions entraînera des incohérences et des erreurs au niveau du bilan massique (Weidema 2013 cité par Schrijvers, Loubet et Sonnemann 2016). Il est là aussi nécessaire d'évaluer les différences au travers d'une analyse de sensibilité.

Conclusion. La littérature propose quatre moyens différents pour gérer la multifonctionnalité des produits. Ceux-ci sont liés à l'une ou l'autre des approches et situations et doivent être considérés selon l'ordre précité. Mais ces problématiques sont bien souvent axées autour du recyclage. Bien qu'elles soient théoriquement applicables au cas de la réutilisation, et par la même du repurposing, il est nécessaire d'évaluer ce qui est fait dans la littérature pour en déduire les problématiques sous-jacentes.

2.3.3 Les difficultés de la modélisation ACV pour le repurposing

Plusieurs exemples d'ACV de produits repurposés sont détaillés pour pouvoir identifier les principales problématiques de modélisation, notamment celles liées à la gestion de la multifonctionnalité. La majorité de ces exemples tourne autour de la réutilisation des batteries de VE.

2.3.3.1 Cas d'étude de la littérature

Faria et al. (2014) font partie des premiers à prendre en compte une succession d'usages différents en ACV. Leur étude est basée sur les batteries de VE repurposées dans des applications stationnaires. L'unité fonctionnelle n'est définie que par rapport au premier usage et les frontières sont étendues pour inclure le second. L'étape de refabrication complémentaire au second usage n'est pas incluse. Diverses hypothèses d'usage sont appréciées pour la première application. Deux scénarios sont évalués pour la seconde : le lissage du pic de consommation et le report de la charge. Il est décidé arbitrairement que les impacts de la production de la batterie sont attribués entièrement au premier usage étant donné que c'est celui pour lequel la batterie a été conçue (*allocation [100 : 0]*). Les impacts du premier usage sont donc équivalents à ce qui existe pour d'autres batteries de VE. La différence est donc évaluée sur le second usage uniquement. Étant donné que les étapes de refabrication ne sont pas incluses, on s'attend à ce que sur le second usage les impacts de la batterie repurposée soient bien meilleurs, or ce n'est pas ce qu'évaluent Faria et al. (2014) : en fonction du mix énergétique du pays considéré et de différentes applications de second usage, les impacts sont estimés être un peu plus faibles à bien plus importants pour le système repurposé.

Dans une étude de 2015, Richa et al. définissent un objectif et une UF par usage pour une batterie au lithium. Le premier dans la mobilité, le second dans le stationnaire. Ils raisonnent donc à deux niveaux.

Tout d'abord sur le premier usage en substituant les impacts liés à une batterie au plomb pour la seconde application (*substitution*). Diverses analyses de sensibilités sur les hypothèses prises sont testées et, globalement, le système 'repurposé' permet l'évitement de la production d'une partie des impacts. Dans un second temps, l'analyse précise les impacts liés au second usage. Une partie de la production, la refabrication et une partie du recyclage de la batterie sont allouées au système étudié en plus de l'usage stationnaire (*allocation [100 : 0], puis [50 : 50]*). Le tout est comparé à la batterie au plomb. Là encore les impacts sont favorables au système repurposé pour les hypothèses 'raisonnables'.

Ahmadi et al. (2015) détaillent une troisième étude et une troisième manière de procéder. L'unité fonctionnelle définie inclut les deux applications consécutives. Pour ce faire, l'UF tient compte de la capacité des batteries dans chacune des applications, sommée sur l'ensemble du CdV. La deuxième application est alors vue comme une co-fonction. Les résultats sont présentés de deux manières différentes. Par phase du CdV du produit (*subdivision*) tout d'abord. Ensuite, en se comparant à deux systèmes traditionnels : un véhicule thermique pour le premier usage et une production d'électricité via du gaz naturel pour le second (*extension du système*). L'usage en cascade est alors meilleur que les deux applications pour cinq des six indicateurs choisis.

Casals et al. (2015) évaluent le contenu carbone d'une solution de batteries en cascade d'une application VE à une application stationnaire. Plusieurs solutions sont envisagées : arbitrage énergétique, installation insulaire et utilisation autonome. Pour définir une unité fonctionnelle commune aux différentes applications, ils évaluent les UF de chaque application de manière séparée et digressent sur une UF pouvant convenir à toutes. Globalement, les résultats montrent que la réutilisation de batteries limite les impacts environnementaux en comparaison de la production d'une batterie plomb pour le même usage (*extension du système*).

Un projet de recherche financé par l'ADEME et al. (2015) met en perspective plusieurs méthodes de modélisation des impacts en FdU. Parmi celles analysées, on retrouve : l'*extension du système* et la répartition des impacts sur différents cycles d'usage selon l'ILCD Handbook, la *substitution* de la production d'un produit neuf et l'*allocation* en fonction de l'application (*[100 : 0], [50 : 50] et [0 : 100]*) selon le référentiel BPX30, et l'*allocation* en fonction de la performance fonctionnelle ou économique du produit. Trois produits distincts sont évalués : une batterie de VE repurposée dans le stationnaire, une box internet et un moteur de voiture diesel remanufacturés. Dans le cas de la batterie, l'UF associée est séparée entre les différents usages. Le CdV complet est pris en compte dans l'ensemble des cas. Les étapes amont au processus de repurposing ou remanufacturing sont considérées comme appartenant au premier usage. Celles en aval comme appartenant au second. Seule la phase de refabrication est traitée selon les répartitions émises précédemment. Les résultats finaux montrent de fortes disparités en fonction des modélisations. L'approche 'ILCD' apparaît comme la plus cohérente sur l'ensemble des trois cas étudiés alors que l'approche 'BPX30' rend compte de fortes disparités (tantôt des impacts importants pour l'application 1, tantôt pour l'application 2), voire donne la solution de référence meilleure que la solution en cascade.

Dans leur papier, Troussier et al. (2017) développent une méthodologie pour prendre en compte les problématiques liées aux usages successifs. Celle-ci se base sur des 'paramètres propres aux usages multiples' : capacité résiduelle en fin d'usage, produits récupérés, etc.. Ils montrent que les incertitudes liées à ces paramètres peuvent influencer fortement les résultats des ACV et qu'il est important de les réévaluer en cours de conception.

Un rapport de la Fondation pour la Nature et l'Homme et de la European Climate Foundation (2017) étudie les impacts environnementaux liés aux VE. Des options de prolongation d'usage par la réutilisation des batteries pour d'autres applications sont envisagées comme pistes de FdV. L'UF ne prend donc en compte que la première application, la seconde n'étant considérée que comme une maximisation de ses capacités (*extension du système*). Ainsi, les frontières sont élargies pour inclure cette option de FdV, mais il n'y a pas de volonté de répartition des impacts environnementaux du produit entre les applications successives. Plusieurs hypothèses sont évaluées et notamment les conséquences de la réutilisation pour un second usage. Par exemple les hypothèses suivantes sont formulées : 'chaque kWh déchargé vient en remplacement d'un kWh issu de la production électrique fossile' et 'la batterie se charge à l'heure où le mix électrique est le moins carboné en moyenne, et elle se décharge à l'heure où

le mix est le plus carboné'. Dans le même esprit que précédemment, les 'gains' environnementaux ne sont pas soustraits aux impacts globaux du système, mais évalués à part. Lorsque les frontières sont élargies à la réutilisation des batteries, et quelle que soit l'hypothèse retenue, le second usage permet de limiter les impacts environnementaux. En revanche, les nombreuses hypothèses retenues et testées ne permettent pas une compréhension claire de la situation. La multiplicité des scénarios induisant de la complexité dans l'étude.

Krystofik et al. (2017) détaillent le cas du remanufacturing d'équipements de bureau chez Davies. Ils le qualifient d'adaptatif car le produit 'remanufacturé' n'est pas exactement identique à celui d'origine, bien qu'il remplisse les mêmes fonctions. Ils comparent le produit initial à ses versions repurposées une et deux fois. L'UF est semblable pour toutes les applications mais les frontières diffèrent du fait de l'activité exclusivement remanufacturière de Davies. Aucune répartition des impacts n'est donc faite entre les différentes versions, l'étude se borne strictement à chaque phase de CdV liée à chaque usage : processus de (re)fabrications (incluant les matériaux), distribution, usage et FdV. Leurs conclusions sont que plus le produit est repurposé, moins mauvais sera son impact environnemental.

Enfin, au cours d'une présentation, Oliveira (2016) présente les résultats d'ACV du projet batteries2020. Une UF couvrant les deux applications est utilisée. Chaque phase du CdV est détaillée et différentes catégories d'impacts sont investiguées en fonction de différents pays d'utilisations. Les impacts résultants sont alors comparés pour chacune des applications.

De nombreux exemples d'ACV sont d'ores et déjà présents dans la littérature. Que les produits soient très similaires ou différents, les objectifs sont tous d'évaluer la pertinence environnementale de la réutilisation de produits. Mais ces modélisations divergent toutes les unes des autres dans leur manière d'être menée et ne sont donc pas comparables. Un état des lieux est mené dans la section suivante.

2.3.3.2 Synthèse des principales problématiques

L'ACV est un outil normé permettant d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux des produits répondant aux mêmes usages (ISO 14040 2006). La gestion des stratégies de FdU et de FdV est, bien que fortement documentée, assez compliquée à gérer du fait de la complexité des flux en jeu. Des parallèles peuvent être faits entre les stratégies de réemploi, remanufacturing et recyclage et le repurposing mais rien aujourd'hui n'est défini précisément pour cette dernière. Bien qu'il existe aujourd'hui dans la littérature un nombre grandissant d'ACV concernant des produits repurposés (essentiellement orientés autour du cas batterie), de nombreuses limites nous font dire qu'une réflexion amont spécifique à cette stratégie est nécessaire. Et, cela, dans le but de pouvoir être à même de faire des parallèles (mais pas nécessairement des comparaisons) entre ces études relatives au repurposing. Ces limites sont mises en avant ci-après.

Des unités fonctionnelles diversifiées. Les UF des études ACV de produits aux applications en cascade sont toutes différentes. Elles n'intègrent parfois que la première application, en élargissant ou pas ses frontières pour inclure la seconde (Faria et al. 2014 ; Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation 2017 ; Krystofik et al. 2017). D'autres fois, les UF sont définies communément, par rapport aux deux applications (Ahmadi et al. 2015 ; Casals et al. 2015). Enfin, d'autres études présentent une UF par usage, fractionnant ainsi le CdV (ADEME et al. 2015 ; Richa et al. 2015). De telles différences, dès cette première étape, induisent nécessairement de larges variations et une impossibilité de comparaison des études entre elles. Cooper (2003) précise qu'au-delà d'avoir la même fonction pour pouvoir être comparée, les sous-systèmes d'un produit doivent être comparés par rapport au même système global.

Des hypothèses sur un second usage générique ou spécifique. Le premier usage est globalement bien défini, rarement le second. Dans le cas des batteries, les études menées peuvent être classées selon deux catégories : les applications liées au second usage soit génériques, soit spécifiques. Dans le premier cas on parle de stockage stationnaire au sens large (Richa et al. 2015 ; Ahmadi et al. 2015 ; ADEME et

al. 2015). Dans le second, le lissage du pic de consommation, de report de la charge, d'arbitrage énergétique, d'installation insulaire ou encore d'utilisation autonome sont autant d'applications investiguées (Faria et al. 2014 ; Casals et al. 2015 ; Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation 2017). Cela influence directement ce à quoi les impacts peuvent être comparés et évalués. Dans le cas d'une application générique, cette évaluation se limitera uniquement aux aspects produits : la déduction des impacts liés à la production d'une batterie, par exemple. Dans le cas d'une application générique, elle peut davantage englober le système dans lequel la solution est intégrée. La comparaison se fera moins sur des aspects technologiques que de marché, telle que la réduction de la teneur en carbone d'une production électrique.

Des frontières et des allocations distinctes pour la prise en compte des usages. D'une manière générale, l'ensemble du CdV est intégré à l'étude. Soit dès les premières étapes de l'ACV, soit au moment de l'extension des frontières du système. Mais au-delà de cet aspect, les impacts liés à chacune des phases sont répartis très différemment. Trois manières de procéder apparaissent. La première est à l'échelle globale du système. Aucune phase du CdV n'est alors dissociée et les impacts environnementaux sont présentés dans leur globalité, sans distinction d'usage (Casals et al. 2015 ; Richa et al. 2015 ; Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation 2017). La seconde tend à répartir ces impacts en fonction de chacune des applications. Les impacts de chaque usage peuvent alors soit être strictement associés aux étapes auxquelles ils correspondent (Krystofik et al. 2017), soit les impacts des activités à l'intersection des applications sont répartis entre celles-ci. (ADEME et al. 2015 ; Richa et al. 2015). La troisième manière de procéder consiste en une analyse globale du CdV, où les impacts 'évités' par la réutilisation sont mis en avant. Les impacts d'un système hypothétique, qui aurait pu être produit en lieu et place de cette réutilisation sont alors déduits des impacts totaux (Ahmadi et al. 2015). Les méthodes basées sur la substitution de flux sont souvent décrites en ACV attributionnelle (Heijungs et Guinée 2007 ; ADEME et al. 2015). Bien que cela soit considéré comme tolérable par certains auteurs (De Camillis et al. 2014), déduire l'ensemble des flux non désirés pour ne garder que celui que l'on souhaite semble à la fois complexe et peu logique. Par ailleurs, en fonction des flux substitués et de la façon dont la substitution est réalisée, cela accroît l'incertitude et oriente fortement les résultats. Pour parer à cette substitution, une des possibilités est de présenter les 'gains' environnementaux à part de l'étude (Fondation pour la Nature et l'Homme et European Climate Foundation 2017). Ceci permet de mieux évaluer l'importance des hypothèses de substitution prises tout en préservant l'image environnementale globale. D'une manière générale, à l'instar des autres types de stratégie de FdU, il apparaît une préférence pour la subdivision (bien qu'elle ne soit jamais réellement applicable), l'extension des frontières du système, puis de l'allocation en fonction de critères physiques, des performances ou du marché. La substitution étant à réserver aux études conséquentielles. (ADEME et al. 2015 ; Schrijvers, Loubet et Sonnemann 2016).

Une problématique temporelle. Bien qu'elle ne transparaisse que peu dans les différentes études, la Fondation pour la Nature et l'Homme et la European Climate Foundation (2017) évoquent à demi-mots le besoin de prise en compte du temps dans leur ACV. Entre deux échéances, les perspectives peuvent différer et inverser la teneur des résultats. De Camillis et al. (2014) soulignent l'importance d'une prise en compte au plus juste des aspects temporels. Dans les ACV de produits repurposés, de nombreuses questions liées au critère 'temps' ressortent :

- Jusqu'à quand le produit sera utilisé dans la première application ?
- Quel pourcentage sera réutilisé ?
- Quelle sera l'évolution du mix énergétique au moment du second usage ?
- Quelles seront les évolutions technologiques d'ici au moment du second usage ?
- Quelles seront les évolutions réglementaires ?
- Quelles seront les évolutions du marché d'ici au second usage ?
- Quel produit sera comparé à la seconde application ?

Ces problématiques doivent être identifiées et détaillées au moment de la définition des objectifs pour influencer le moins possible les résultats.

Une lecture différente des résultats. En fonction de l'UF choisie, des hypothèses retenues, des frontières du système ou encore des aspects temporels, il est normal que les résultats diffèrent. Bien que d'une manière générale ces études montrent un bénéfice environnemental de la réutilisation pour d'autres applications (comme l'ont montré Sundin et Lee (2011) sur les produits remanufacturés), pour que ces tendances puissent être comparées, une étude préalable du système sur l'ensemble de son CdV devrait être systématiquement réalisée. Cette dernière aiderait à mieux apprécier où se situent les enjeux environnementaux, sans être influencé, entre autres, par les multiples hypothèses de répartition d'impacts. L'étude de Richa et al. (2015) va en ce sens.

Au vu des différences existantes, l'une des pistes pour faciliter la réalisation, la compréhension et la comparaison d'ACV de produits repurposés serait de leur donner un cadre.

De nombreux éléments semblent compliquer la définition du cadre des ACV pour les produits repurposés. Cela passe par une diversité d'UF (définie pour le premier usage, pour les deux usages de manière séparée ou sous un dénominateur commun), des hypothèses différentes sur les potentiels seconds usages (génériques ou spécifiques), des frontières et des allocations distinctes (sur l'ensemble du CdV, sur chaque usage, en tant qu'impacts évités), une problématique temporelle complexe et une analyse différente des résultats (analyse de sensibilité, critique des résultats). La Table 1 synthétise les particularités de chacune des études. Cela ne favorise pas la reproductibilité et encore moins la comparabilité des études. Une approche harmonisée doit être mise en place et des guidelines la supporter (Ruiz et al. 2016). Des éléments de réponses sont apportés par Amaya et al. (2015). Ils proposent de coupler et faire évoluer la définition du modèle d'affaire et le cadre de l'ACV pour intégrer une définition à plusieurs niveaux, multipartite et intégrant les impacts de l'ensemble du CdV.

Table 1 - Synthèse des particularités de chacune des études ACV traitant du repurposing

Publications	Mention des motivations	Mention de l'objectif	UF#1 + extension des frontières	UF #1 + UF#2	UF{1+2}	Générique	Spécifique	Présentation globale des impacts	Présentation des impacts en fonction des applications	Présentation des impacts évités	Analyse de sensibilité	Significativité des résultats
ADEME et al. 2015	✓	✓		✓		✓			✓		✓	
Ahmadi et al. 2014	✓						✓	✓	✓			✓
Ahmadi et al. 2015	✓				✓	✓			✓	✓	✓	?
Casals et al. 2015	✓			✓	✓		✓	✓				✓
Faria et al. 2014		✓	✓				✓		✓			
FNH et ECF 2017	✓	✓	✓				✓	✓			✓	✓
Krystofik et al. 2017	✓		✓				✓		✓		✓	✓
Oliveira, 2016					✓		✓		✓			
Richa et al. 2015	✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓	✓

Généralités	Unité fonctionnelle	Hyp. 2nd usage	Contribution des phases du CV aux impacts	Analyse des résultats
-------------	---------------------	----------------	---	-----------------------

2.3.4 Des recommandations pour l'ACV, spécifiées pour des applications successives

Définir un cadre d'évaluation pour des produits destinés à plusieurs applications consécutives ne peut se faire sans intégrer les éléments précédemment cités, ni ceux déjà présents dans la littérature. Peters (2016) émet cinq recommandations pour la réalisation d'ACV dans le cadre du remanufacturing :

- Définir clairement les objectifs et le cadre de l'étude, en accord avec les études précédentes,
- Aligner l'étape précédente avec ses propres motivations et, si plusieurs perspectives d'évolution sont possibles, réaliser des analyses de sensibilité,
- Définir le type de répartition des impacts choisis (en faveur de la stratégie de réutilisation ou pas), voire le caractère attributionnel ou conséquentiel de l'ACV,
- Préciser le but et le public visé par l'ACV,
- Qualifier les résultats de manière appropriée dans les rapports d'ACV.

Ces recommandations permettent de clarifier les frontières et la position adoptée lors de la réalisation de l'analyse environnementale. Ce sont les principaux éléments qui permettent aux ACVistes³⁸ de bien en définir le contour. Et à leurs lecteurs d'en interpréter facilement les résultats. Ceux-ci font d'ailleurs écho aux points avancés à la section 2.3.3.2. Plevin, Delucchi et Creutzig (2014) abondent également en ce sens. Ils affirment que les objectifs doivent être clairs et que l'ACV doit permettre d'y répondre. Pour éviter toute mauvaise interprétation, les limites et hypothèses de l'étude doivent être clairement établies et compréhensibles. De plus, il est bon de faire mention que les résultats ne sont généralement pas comparables sans une certaine harmonisation, qui n'est elle-même pas toujours réalisable.

En s'intéressant plus largement aux démarches d'éco-conception, telles que définies dans l'ISO 14062 (ISO 14062 2002), plusieurs étapes, calquées sur le processus de conception traditionnel (voir Figure 8, p 39), visent la minimisation des impacts environnementaux. En complément des choix environnementaux stratégiques, ces étapes permettent la récolte d'informations pour l'ACV et précisent quels en sont les moments opportuns. Par exemple, au moment de la planification, les aspects environnementaux sont questionnés, la pensée 'Cycle de Vie' développée et l'évaluation d'un produit référent permet de définir une base de comparaison pour la future ACV. La conception préliminaire permet d'établir les premiers résultats d'analyse ainsi que les spécifications pour les étapes aval de la conception. La phase de tests vise la confrontation des résultats définitifs avec les cibles visées.

2.3.5 Conclusion

L'ACV est une méthode pour évaluer les impacts environnementaux potentiels de produits ou de services. Il existe dans la littérature de nombreuses manières de modéliser les impacts environnementaux, notamment en ce qui concerne la phase de fin d'usage et de vie. Par ailleurs, comme le souligne SCORE LCA dans un rapport de l'Afep (2015) : il y a aujourd'hui un 'besoin d'approfondissements pour prendre en compte la perte de qualité [...] des produits' lors de leur réutilisation.

Les manques. Bien que la stratégie de repurposing n'en soit qu'à ses balbutiements, la littérature relative à l'ACV de tels produits met en avant plusieurs études qui questionnent sa pertinence environnementale. Or, ces études ne permettent pas toujours de se représenter de manière pertinente la teneur des résultats qu'elles mettent en avant car elles ne les présentent pas dans leur globalité. Par ailleurs, en amont de ces études, les objectifs et questions auxquels doit répondre l'ACV ne sont pas clairement toujours formulés. Ceci, ainsi que le manque d'informations (il n'y a généralement pas d'annexe aux études décrivant les données utilisées) font que ces études ne sont pas toujours reproductibles. De plus, elles ne sont pas comparables les unes aux autres alors que les objets d'étude sont, pour la plupart, relativement proches. Les objectifs peuvent être différents, mais ce sont plus généralement les UF qui sont définies sans consultation d'autres études et entraînent de fortes divergences.

³⁸ Personnes réalisant une analyse de cycle de vie

Dès lors, pour mieux répondre à ces manques, une dernière question vient alimenter ces travaux :

'Quel cadre donner à l'analyse de cycle de vie de produits repurposés ?'

Hypothèse. L'établissement d'un cadre commun aux études ACV de produits repurposés permet de simplifier leur évaluation. Ainsi, les aspects temporels, les frontières, la répartition des impacts, etc., seront plus facilement intégrés et la comparaison de systèmes s'en retrouve simplifiée. Par ailleurs, le remplissage de ce cadre doit pouvoir être réalisé de manière intuitive, par rapport à la conception du produit.

2.4 Conclusions

La stratégie de repurposing est de plus en plus étudiée dans la littérature. Bien qu'appliquée essentiellement aux batteries de véhicules électriques, la littérature détaille d'autres types de produits pouvant s'y prêter. Plusieurs auteurs se sont essayés à définir cette stratégie, celle qui est retenue dans le cadre de ces travaux de thèse est : l'utilisation de produits dans des applications successives et distinctes, dans le but de préserver leur valeur ajoutée. En revanche, et contrairement aux autres stratégies de réutilisation, la littérature ne permet pas de caractériser pleinement le repurposing. Il n'existe aujourd'hui que peu d'études traitant de la question. Ainsi, il n'est pas aisé d'apprécier les paramètres de conception pour les offres de produits qui y sont liés. De plus, la spécificité de la stratégie de repurposing est la réutilisation pour une autre application. Pour une meilleure prise en compte des usages successifs, il semble nécessaire de les définir dès la phase de conception, ce qui devrait induire certaines subtilités au cours du cycle de vie du produit. Étudier l'influence du CdV sur le processus de conception global en vue de la mise en place d'une démarche de conception doit permettre de lever ces zones d'ombre. Pour ce faire, nous avons montré qu'il est nécessaire de définir les besoins de l'offre sur l'ensemble du CdV du produit ainsi que les fonctions qui en découlent. Cadrer les étapes aval du processus de conception permettra de guider les équipes de conception dans leurs recherches de solutions. Nous avons également mis en avant la nécessité du recours à une démarche flexible, permettant de modifier les paramètres de conception au cours des différents usages du produit. Enfin, le repurposing étant considéré comme une stratégie pro-environnementale par nature, du fait de l'extension de la durée d'usage des produits. Il est nécessaire de pouvoir justifier cet argument en évaluant les impacts environnementaux. Or, la littérature témoigne d'études très différentes et souvent incomparables.

Suite à notre revue de la littérature, les problématiques initiales ont été révisées et précisées. Globalement, ces travaux de thèse s'intéressent à la question de recherche suivante :

Comment intégrer la stratégie de repurposing au sein d'une démarche de conception et évaluer ses performances environnementales ?

Pour y répondre, ces travaux s'intéressent plus précisément à trois questions :

- Comment définir et classer les caractéristiques de la stratégie de repurposing pour un usage en conception ?
- Quel processus de conception pour le repurposing ?
- Quel cadre donner à l'analyse de cycle de vie de produits repurposés ?

En réponse à ces questions de recherche, ces travaux de thèse s'appuient sur plusieurs hypothèses. Tout d'abord, nous supposons que les caractéristiques des produits repurposés sont fortement corrélées à celles d'autres stratégies de FdV de maintien de la valeur ajoutée. Nous faisons également l'hypothèse que d'autres caractéristiques, spécifiques à la stratégie de repurposing, existent. Pour confronter ces hypothèses, nous nous appuyerons sur la revue de la littérature menée dans ce chapitre ainsi

que sur des entretiens avec plusieurs acteurs de la chaîne de valeur d'un produit aux usages en cascade (décrits dans le Chapitre 4).

Par rapport à notre seconde question de recherche, nous établissons un postulat similaire à celui de la conception intégrée, c'est-à-dire qu'une reconception a posteriori limite les possibilités de réutilisation. Pour maximiser le succès de la stratégie de repurposing, une intégration au plus tôt de l'ensemble des contraintes liées au CdV doit être établie dès les phases amont, avant le premier usage. Nous proposons ici de retravailler le processus de conception pour permettre cette intégration. Nous confronterons cette vision avec diverses parties-prenantes pour la valider, tout comme la supposée nécessaire intégration de l'ensemble des contraintes dès le début du CdV du produit. En parallèle, des propositions pour une prise en compte des problématiques du repurposing en conception seront présentées.

Enfin, notre troisième question de recherche est motivée par le nombre d'études ACV qui fourmille dans la littérature, sans pour autant qu'elles soient comparables. La mise en place d'un cadre spécifique aux utilisations en cascade doit faciliter la description de telles ACV et en simplifier la comparaison. Ce cadre doit être testé pour s'assurer de sa pertinence.

Le Chapitre 3 suivant présente la démarche adoptée au sein de ces travaux de thèse pour répondre à nos questions de recherche.

Résumé. Ce chapitre rappelle tout d’abord le contexte global de ces travaux de thèse. Il présente ensuite brièvement la démarche de recherche-action. Par la suite, nous détaillons pourquoi nous avons fait le choix de suivre cette démarche autant que possible, précisons comment elle est appliquée ainsi que les limites observées.

Sommaire.

3.1	Contexte général de ces travaux de thèse.....	68
3.1.1	Études prospectives.....	68
3.1.2	Démonstrateurs.....	68
3.1.3	Présentation du cas d’étude ‘batterie’.....	68
3.1.4	Synthèse du contexte de recherche.....	70
3.2	La recherche-action comme support d’investigation.....	70
3.2.1	Présentation de ce qu’est la recherche-action.....	70
3.2.2	Application de la recherche-action à notre contexte de recherche.....	70
3.2.3	Brève discussion sur les premières limites apparues a posteriori.....	71
3.3	Conclusion.....	72

Ce troisième chapitre présente la démarche de recherche suivie dans le cadre de ces travaux de thèse. Après un rappel des éléments de contexte, nous présentons et justifions la démarche de recherche retenue.

3.1 Contexte général de ces travaux de thèse

En reprenant certains éléments avancés dans la littérature, nous retraçons ici le contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse et le caractère particulièrement récent lié à cette problématique de réutilisation en cascade. De fait, il existe aujourd'hui des études que nous qualifierons de 'prospectives' et d'autres visant le développement de démonstrateurs.

3.1.1 Études prospectives

Les premières études sur des thèmes qui s'apparentent à la stratégie de repurposing, où des produits, ou sous-produits, sont réutilisés dans une application autre que celle initiale, remontent à une petite dizaine d'années. Les travaux de (Prassler et al. 2009) et (Park 2009) cherchaient, en effet, à prolonger la durée de vie de sous-produit de robots et de téléphones portables.

Les études prospectives ultérieures auxquelles nous nous sommes intéressés concernent essentiellement la réutilisation de batteries de véhicules électriques (VE). Elles sont axées sur trois aspects principaux :

- la qualification des performances et de la faisabilité technique, notamment liées aux aspects de vieillissement (ADEME 2011 ; Bowler 2014 ; ELIBAMA project 2014 ; ABattRelife project 2015 ; Idjis 2015 ; Assunção, Moura et de Almeida 2016 ; Beverungen et al. 2017)
- l'évaluation environnementale (ADEME 2011 ; Faria et al. 2014 ; ABattRelife project 2015 ; Ahmadi et al. 2015)
- l'estimation de la viabilité économique (ADEME 2011 ; Standridge et Corneal 2014 ; ABattRelife project 2015 ; Idjis 2015 ; Assunção, Moura et de Almeida 2016).

3.1.2 Démonstrateurs

Les premiers aboutissements concrets issus d'une stratégie de réutilisation en cascade que nous avons pu soulever, dans le Chapitre 2, sont plus récents. En ce qui concerne les batteries des VE, on peut citer le projet du parc national de Yellowstone qui, en 2015, réutilisait d'anciennes batteries pour du stockage stationnaire (Toyota 2015). Plus récemment, Tong et al. (2017) ont développé un démonstrateur du même ordre à l'échelle d'une maison. Le projet de recherche UEX 2 vise, quant à lui, la construction d'une chaîne de valeur allant du diagnostic des batteries à leur seconde vie, d'ici 2019.

Des produits autres que les batteries font également l'objet de recherches pratiques en vue d'un repurposing. C'est le cas des alimentations d'ordinateurs réutilisés en chargeurs (Abuzed et al. 2016), de CDs en moules pour nanofils (K. Kim et al. 2017) ou encore d'ordinateurs en serveurs (den Hollander, Bakker et Hultink 2017). Ces études visent souvent à démontrer la faisabilité de la réutilisation en cascade et de la préservation de la valeur-ajoutée. Comme mentionné au préalable, ce sont les batteries de VE qui seront l'objet principal de notre étude.

3.1.3 Présentation du cas d'étude 'batterie'

Quelques généralités. Une batterie au lithium est avant tout un accumulateur rechargeable qui permet la conversion d'énergie électrique en énergie chimique, à la charge et l'inverse à la décharge. Il existe aujourd'hui, sur le marché, différentes chimies à différents stades de développement et destinées à différentes applications. Celles-ci ne possèdent pas toutes les mêmes caractéristiques en termes de densité d'énergie, de puissance, de coûts, de durée de vie, de sécurité et de performances (Battery University 2018). Malgré tout, les batteries au lithium sont celles qui possèdent une densité énergétique

parmi les plus hautes du marché : de 100 à 300 Wh/kg, contre 60 à 110 Wh/kg pour les batteries NiMH³⁹ ou encore 30 à 50 Wh/kg pour les batteries au plomb (Battery University 2018). Elles sont donc privilégiées pour les applications mobiles et ont tendance à remplacer d'autres types de batteries dans ce cas précis.

La composition d'un pack batterie. Dans les applications mobiles, justement, les mêmes constituants principaux se retrouvent souvent. Tout d'abord, les cellules lithium-ion, composées d'une anode, d'une cathode, d'un électrolyte et d'autres éléments permettant son fonctionnement sont considérées comme les éléments de base d'une batterie. Ces cellules sont groupées en modules pour augmenter significativement la tension et/ou la puissance, selon leur agencement (série et/ou parallèle) tout en restant sécuritaire pour les opérateurs (modules inférieurs à 60V). Les modules sont ensuite reliés en série pour composer le pack batterie. Par exemple, pour la Nissan Leaf (voir Figure 18), les modules sont composés de deux cellules en parallèle montées en série avec deux autres. Les modules sont ensuite reliés en série. S'ajoutent à ces éléments de base un système de gestion de la batterie (BMS), qui gère les sollicitations et conditions d'opération ; un système de refroidissement, qui permet de maintenir le pack à une température de fonctionnement idéale pour éviter un vieillissement prématuré des cellules ; et le packaging global qui permet d'isoler le pack en cas de problème.

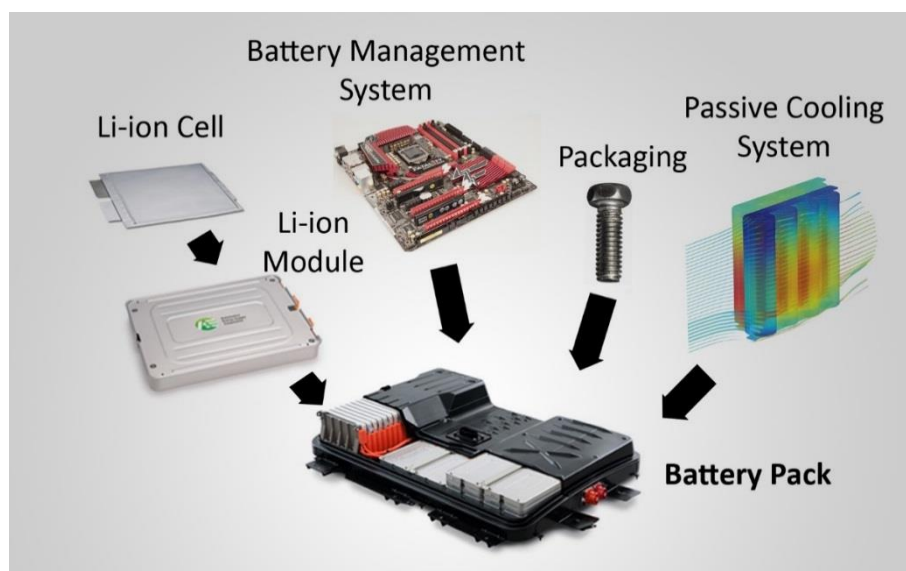


Figure 18 - Batterie d'une Nissan Leaf et éléments la constituant (Belchi Lorente 2016)

Le pourquoi de la réutilisation de batteries. Plusieurs raisons, dont certaines ont déjà été abordées, font que nous nous intéressons à la réutilisation des batteries pour des applications mobiles. Tout d'abord, parce que lorsque leurs performances diminuent de 20 à 30%, ces dernières sont jugées obsolètes pour leur application. Elles ne le sont pas nécessairement pour d'autres applications. Ensuite, parce que les fabricants sont tenus de gérer la fin de vie (FdV) de leur produits : c'est la responsabilité élargie des producteurs. Aujourd'hui, une fois démantelées, les batteries de VE sont recyclées. Ces opérations ont un coût économique élevé et un impact environnemental significatif. La réutilisation aurait l'avantage de les réduire. Enfin, parce que le marché des véhicules électriques est en plein essor. Cela signifie que de plus en plus de batteries, potentiellement réutilisables, sont recyclées sans avoir été réutilisées. Ces arguments sont également à mettre en perspective des problématiques plus larges de diminution des impacts environnementaux du secteur des transports à une échelle européenne (European Commission 2014).

³⁹ Technologie de batterie, voir la section Glossaire.

3.1.4 Synthèse du contexte de recherche

Les travaux concernant le repurposing de produits sont majoritairement orientés autour du cas d'étude 'batterie'. Les premiers résultats de ces activités de recherche mettent en avant certaines nécessités de caractérisation et d'évaluation des performances du produit en fin d'usage (FdU), des projections quant à la viabilité économique d'une telle activité et des différences dans leur évaluation environnementale. En outre, les premiers résultats de ces études sont particulièrement récents, datant tout juste d'avant nos travaux. Enfin, bien qu'il existe des éléments de réponse de manière disparate dans la littérature (besoin de diagnostic, de refabrication, de démonstrateurs, etc.) nous n'avons pas identifié d'études complètes traitant du sujet et encore moins au moment des étapes de conception initiales.

3.2 La recherche-action comme support d'investigation

Du fait du caractère récent de la stratégie de repurposing et de ses contours flous, et avec pour objectif la réponse à nos questions de recherche, nous avons cherché à orienter notre recherche de manière à construire les propositions en même temps que le terrain de recherche. Nous présentons tout d'abord la recherche-action, justifions de son intérêt et de ses limites dans le cas présent.

3.2.1 Présentation de ce qu'est la recherche-action

La recherche-action (RA) est un processus permettant au chercheur de tester et d'améliorer sa proposition en 'situation réelle', ce qui lui permet par la même occasion d'améliorer ses connaissances sur le sujet en capitalisant les informations émises (Checkland et Holwell 1998). En ce sens, ils citent les travaux de Foster (1972) mettant en avant les limites qui existent à l'étude d'un système complexe en laboratoire. La Figure 19, extraite de Checkland et Holwell (1998), décrit les différentes phases de la RA. Ces étapes sont également précisées ici. Tout d'abord, le besoin de définir le thème de la recherche en précisant quelles sont les 'idées liées' et quelle est la méthodologie d'investigation qui va supporter sa recherche. Ensuite il s'intègre dans les 'pratiques sociales' de la situation qui permet d'y répondre et confronte ses idées et sa méthode. Une réflexion est ensuite menée afin de les évaluer à et de les faire évoluer. Plusieurs itérations sont parfois nécessaires avant une capitalisation définitive. Plusieurs questions permettent de définir plus précisément la RA :

- quel est l'objet de recherche ?
- quel est le rôle de chacun ?
- comment savoir quand s'arrêter ?
- comment les résultats peuvent-ils être transmis à d'autres ou transférés à d'autres situations ?

(Checkland et Holwell 1998).

3.2.2 Application de la recherche-action à notre contexte de recherche

La RA doit permettre, à partir d'une proposition basée sur la littérature, d'investiguer un terrain de recherche en vue de l'amélioration de cette dernière. Nous reprenons ici les questions mises en avant par Checkland et Holwell (1998) pour justifier l'intérêt de l'utilisation de la RA dans le cadre de ces travaux de thèse.

L'objet de recherche. Il est en lien direct avec nos questions de recherche et vise à établir les caractéristiques et le processus de conception liés à un produit aux applications en cascade. Dans un premier temps, nous nous sommes appuyés sur la littérature relative aux stratégies de FdU pour identifier les caractéristiques similaires. Dans un second temps, nous avons décrit les interactions entre processus de conception et cycle de vie (CdV) pour un produit repurposé. Par la suite, nous avons confronté ces propositions à deux acteurs du cycle de vie, l'un en amont de la phase d'usage 1 et l'autre en aval. Cette confrontation visait à la fois à valider les propositions, mais aussi à les préciser et à les compléter, au besoin.

Le cas d'étude est présenté dans la section 4.1.2.

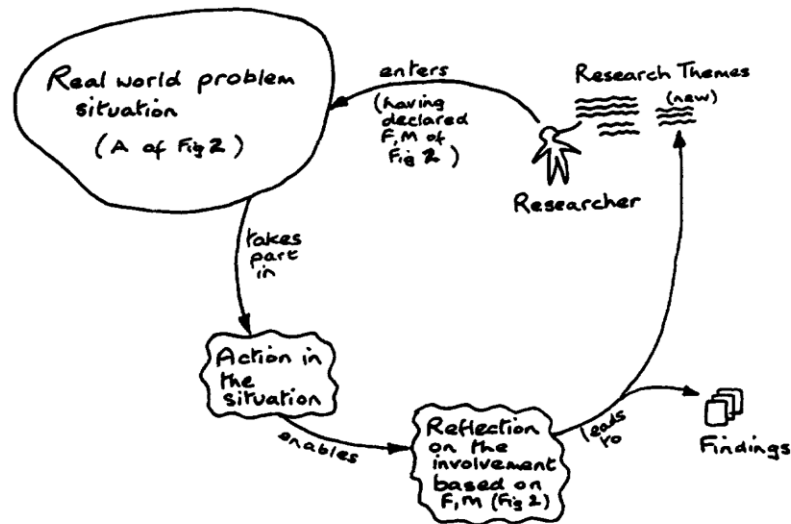


Figure 19 - Le cycle de la recherche-action selon Checkland et Holwell (1998)

Les parties-prenantes et leur rôle. Dans le cadre de ces travaux, deux entités ont été sollicitées. Comme nous allons le voir, celles-ci couvrent, à elles deux, les étapes du CdV d'une batterie aux applications en cascade qui nous intéressent prioritairement : étapes de conception, de repurposing et usages successifs.

La première est le CEA-LITEN, expert au niveau de la conception et de la fabrication de batteries pour diverses applications, mais également en termes de gestion lors de l'utilisation. Par ailleurs, ils ont déjà mené des réflexions quant à la réutilisation en cascade de batteries et les attentes quant aux processus de refabrication envisagés. Leurs travaux portent également sur la caractérisation du sur-vieillessement des batteries, c'est-à-dire le vieillissement au cours d'une seconde utilisation.

La seconde partie-prenante, qui gardera l'anonymat, recycle plusieurs technologies de batteries. De par ses activités historiques, elle intervient sur la chaîne logistique inverse et la FdV. En parallèle, elle initie une activité de repurposing de batteries à partir des produits qu'elle récupère. Elle tend ainsi à développer ses connaissances tant sur les opérations de refabrication que sur les aspects du modèle d'affaire.

Jusqu'où aller. On peut distinguer ici les caractéristiques et le processus de conception liés à un produit aux applications en cascade. Pour chacun d'eux, les itérations successives doivent s'arrêter lorsque les propositions regroupent les éléments convenant à l'ensemble des parties-prenantes. Dans notre cas : une caractérisation validée par l'ensemble des acteurs et une approche de conception comprise et également validée.

Le transfert vers d'autres situations. La généralité des propositions est un prérequis essentiel à ces travaux de thèse. Les caractéristiques et le processus de conception liés à un produit aux applications en cascade doivent pouvoir s'appliquer à différents produits et différentes situations. Les recommandations qui en découlent doivent l'être tout autant. Là aussi, il est possible de la vérifier a posteriori sur un nouveau cas d'étude.

3.2.3 Brève discussion sur les premières limites apparues a posteriori

La démarche de recherche-action semble adaptée à notre cadre d'étude. Néanmoins, certaines difficultés à sa mise en œuvre sont apparues au cours et à la fin de nos travaux.

Tout d'abord, pouvoir suivre a posteriori l'activité de conception telle qu'elle est réalisée dans chacune des deux structures aurait facilité la mise en place des propositions. Par exemple, connaître les outils

utilisés par les concepteurs à chacune des étapes aurait permis d'orienter les propositions en ce sens (voir section 4.2.3).

Ensuite, certaines hypothèses de départ n'ont pas pu être validées. La première est liée aux parties-prenantes : est-ce que leur représentativité est suffisante ? Il faudrait ici pouvoir prendre en compte la totalité des parties-prenantes, en affectant si possible un rôle unique à une personne lors des échanges. De plus, l'hypothèse établie à la section 2.4 et relative au fait qu'une reconception a posteriori limite les possibilités de réutilisation n'a pu être pleinement validée. Il manque pour cela une validation des propositions sur un nouveau cas d'étude. La dernière hypothèse relative au cadre de l'analyse de cycle de vie (ACV) doit, elle aussi, être confrontée. Cela peut être fait par la mise en œuvre de la proposition dans le cadre d'une étude ACV d'un produit aux usages en cascade.

Des allers-retours entre propositions méthodologiques et expérimentations n'ont pas toujours pu être réalisés autant que souhaité. Ce fut le cas pour les deux premières propositions (caractérisation de la stratégie de repurposing et organisation du processus de conception). Les recommandations de conception ainsi que la proposition sur l'ACV sont principalement issues de réflexions basées sur la littérature et les observations terrain.

Enfin, au niveau de la mise à l'épreuve des propositions de la section 4.2 (relatives à la conception de produits aux usages en cascade), comme susmentionné, il est nécessaire de confronter les propositions à un nouveau cas d'étude. En ce qui concerne la proposition d'un cadre pour l'ACV (section 4.3), sa mise à l'épreuve doit être réalisée. Pour ce faire, le cas batterie présenté à la section 4.1.2 peut être utilisé.

3.3 Conclusion

Pour formuler nos propositions nous nous sommes inspirés d'une démarche de recherche-action. Cela nous a permis de construire, à partir de la littérature et de terrains de recherche, nos différentes propositions. Ces dernières visent la conception d'un produit aux usages en cascade. Pour ce faire, nous avons investigué un terrain industriel et un terrain en recherche et développement, tous deux actifs quant au développement de batteries destinées à plusieurs applications successives. Nous avons réalisé plusieurs séries d'entretiens pour confronter et améliorer nos deux premières propositions relatives à la caractérisation des produits aux applications en cascade et à leur processus de conception. Notre dernière proposition repose, elle, essentiellement sur des réflexions basées sur la littérature. Elles sont toutes trois présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Propositions en vue de l'intégration de la stratégie de repurposing en conception de produits

Résumé du chapitre. Ce chapitre présente les propositions que nous avons développées dans le cadre de ces travaux de thèse. Tout d'abord, nous présentons une caractérisation de la stratégie de repurposing en vue d'un usage en conception. Dans un second temps, nous établissons les phases de conception et le cycle de vie d'un produit repurposé pour ensuite pouvoir proposer plusieurs recommandations visant à faciliter l'intégration du repurposing dès la phase de conception amont. Enfin, nous proposons un cadre générique destiné à l'évaluation environnementale de produits aux usages en cascade et formulons certaines recommandations à intégrer lors de la conception dans le but de faciliter la réalisation d'analyses de cycle de vie.

Sommaire.

4.1. Caractérisation de la stratégie de repurposing pour un usage en conception	74
4.1.1. Une caractérisation en triptyque, élargie pour les stratégies de fin d'usage	74
4.1.1.1. Classifier les caractéristiques de conception	74
4.1.1.2. Classer les caractéristiques de la littérature	75
4.1.1.3. Synthèse.....	79
4.1.2. Un terrain industriel pour confronter la littérature	79
4.1.2.1. Contexte, objectifs et déroulement des entretiens.....	79
4.1.2.2. Les caractéristiques issues des entretiens	80
4.1.2.3. Synthèse.....	81
4.1.3. Point de vue des acteurs sur les caractéristiques liées aux offres de produits repurposés	82
4.1.3.1. Illustration des points de vue des acteurs sur les caractéristiques des dimensions PPMA	82
4.1.3.2. Un besoin de prise en compte globale des caractéristiques par l'ensemble des acteurs	86
4.1.4. Conclusion sur les caractéristiques des offres de produits repurposés	87
4.2. Évolution du processus de conception.....	88
4.2.1. Une évolution sujette à différents besoins	88
4.2.2. L'organisation du processus de conception	90
4.2.2.1. Proposition de processus de conception pour des applications en cascade.....	90
4.2.2.2. Justification du processus de conception et conclusion	93
4.2.3. Conception pour le repurposing : recommandations et exemple d'implémentation	93
4.2.3.1. Faciliter l'intégration des parties-prenantes.....	94
4.2.3.2. Mieux considérer les phases du cycle de vie	94
4.2.3.3. Gérer et suivre l'information.....	96
4.2.3.4. Gérer les priorités inter-usages	97
4.2.3.5. Synthèse des éléments pour la conception.....	99
4.2.4. Conclusions sur l'activité de conception	99
4.3. Proposition d'un cadre pour l'ACV des applications en cascade	100
4.3.1. Un cadre générique pour l'analyse de cycle de vie de produits en fin d'usage	100
4.3.2. Des recommandations spécifiques à la réutilisation en cascade	105
4.3.2.1. Des besoins pour l'ACV tirés du cadre générique	105
4.3.2.2. Des adaptations à considérer lors de l'activité de conception, en vue de l'ACV.....	105
4.3.3. Synthèse et piste d'implémentation pour l'ACV	106
4.4. Conclusions.....	108

La revue de littérature a mis en évidence les besoins relatifs à une démarche de conception pour le repurposing. Ce chapitre regroupe plusieurs propositions visant à répondre à chacun de ces besoins.

4.1. Caractérisation de la stratégie de repurposing pour un usage en conception

Une partie des caractéristiques propres à la stratégie de repurposing a été mise en avant dans la section 2.1.4, en considérant d'autres stratégies de fin d'usage (FdU), comme le réemploi et le remanufacturing, ainsi que quelques études plus spécifiques sur le repurposing. Nous avons ainsi mis en évidence que la stratégie de repurposing dispose de nombreuses caractéristiques nous amenant à notre première question de recherche :

'Comment définir et classer les caractéristiques de la stratégie de repurposing pour un usage en conception ?'

Pour y répondre, nous proposons de définir un cadre générique décrivant les caractéristiques des offres de produits repurposés. Pour identifier et décrire ces caractéristiques, nous basons notre réflexion sur la littérature, que nous confrontons à différentes parties-prenantes de la chaîne de valeur d'une activité de repurposing. Nous allons également classer ces dernières afin d'en faciliter l'interprétation et leur utilisation en conception. Pour établir ce cadre générique propre au repurposing, nous proposons une démarche en deux temps. Le premier consiste à définir une structure type pour regrouper et classer les caractéristiques des stratégies de FdU. Les caractéristiques issues de la littérature y seront décrites. Le second vise à confronter, à partir de terrains industriels, les caractéristiques propres à une offre de produit repurposé afin de consolider la caractérisation précédemment proposée. Pour ce faire, des entretiens auprès de plusieurs acteurs d'une offre de produits à usage en cascade, ont été réalisés. Comme mentionné à la section 2.1.3, l'établissement de ces caractéristiques doit permettre une meilleure appréhension des offres et faciliter leur intégration dès les phases amont de la conception.

4.1.1. Une caractérisation en triptyque, élargie pour les stratégies de fin d'usage

Dans un premier temps, nous mettons en avant le modèle de classification proposé. Puis, les caractéristiques issues de la littérature sont reprises et explicitées par rapport à ce modèle.

4.1.1.1. Classifier les caractéristiques de conception

Dans un ouvrage couvrant de manière large l'ingénierie de la conception, Roucoules, Yannou et Eynard (2006) consacrent une partie à 'la modélisation des variables et des contraintes de conception', en soulignant qu'il y a un réel besoin d'un système décisionnel en parallèle au système technologique. En effet, les décisions à prendre en conception ne se limitent pas au seul produit, mais également au marché, à l'allocation de ressources, au développement de compétences, etc.. Les éléments de prises de décision, permettant de piloter un projet de conception, couvrent dès lors trois sphères : les produits, leurs processus de fabrication et l'organisation (Roucoules, Yannou et Eynard 2006). Pour inclure plus largement les composantes de l'organisation d'une offre de produit, le terme 'modèle d'affaire', défini par Lecocq, Demil et Warnier (2006), est préféré au terme 'organisation'. Il regroupe à la fois les ressources et les compétences nécessaires pour concevoir l'offre, mais également l'organisation interne et externe et l'offre en elle-même. En ce qui concerne le produit, sont concernés tous les paramètres de conception nécessaires à son développement, les caractéristiques qui lui sont propres, mais également l'architecture du produit. Le processus de fabrication, ou de refabrication dans le cas présent, inclut les étapes indispensables à la réalisation du produit, que ce soit les opérations industrielles en elles-mêmes, la chaîne logistique inverse ou encore la remise sur le marché. Le triptyque 'Produit - Processus de (re)fabrication - Modèle d'affaire' (PPMA) est formé (Figure 20). Le projet européen ERN reprend cette classification pour décrire plusieurs cas d'études industriels. Dans la suite de ces travaux de thèse, cette classification est utilisée pour identifier et répertorier les caractéristiques des stratégies de fin d'usage dont l'objectif est de conserver la valeur ajoutée.

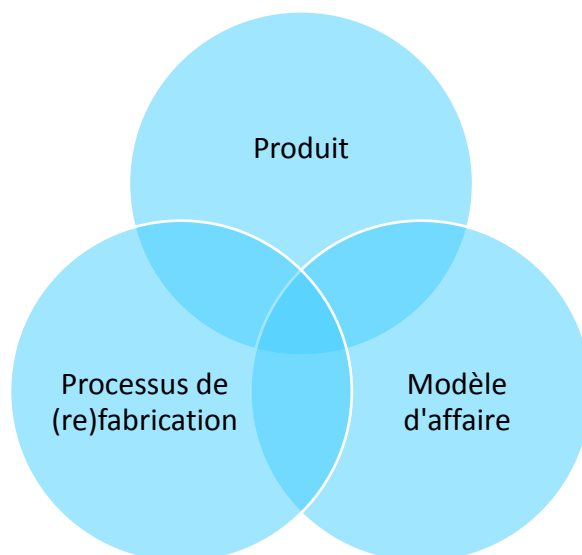


Figure 20 - Triptyque Produit - Processus de (re)fabrication - Modèle d'affaire

Dans le cadre du repurposing, cette classification se veut couvrir l'ensemble des éléments importants de l'offre pour un usage en conception. Voyons maintenant comment s'y répartissent les différentes caractéristiques identifiées lors de la revue de littérature.

4.1.1.2. Classer les caractéristiques de la littérature

En s'appuyant sur cette grille de lecture, les caractéristiques des stratégies de réutilisation peuvent être classées de manière plus fine. Les trois tables suivantes synthétisent celles mises en avant dans la revue de littérature, propres aux offres de produits réemployés (section 2.1.1) et remanufacturés (section 2.1.2).

Table 2 - Principales caractéristiques 'processus' d'une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)

Processus de (re)fabrication	Références
Chaîne Logistique Inverse	(Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Contrôle / Inspection	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Désassemblage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Nettoyage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Réassemblage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Remise sur le Marché	(Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Remanufacturing	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Stockage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Tests	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)

Table 3 - Principales caractéristiques 'produit' d'une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)

Produit	Références
Architecture globale	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015; Aziz et al. 2016)
Architectures particulières	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015; Aziz et al. 2016)
Critères de performance	(Zhao et al. 2010; Goodall, Rosamond, et Harding 2014; Aziz et al. 2016; Chakraborty, Mondal, et Mukherjee 2017)

Table 4 - Principales caractéristiques 'modèle d'affaire' d'une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)

Modèle d'affaire	Références
Législation	(Bakker et al. 2014; Tolio et al. 2017)
Partenariats	(Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Goodall, Rosamond, et Harding 2014; Gelbmann et Hammerl 2015)
Possession	(Sundin et Bras 2005; Sakao et Mizuyama 2014)
Prix	(Arnette, Brewer, et Choal 2014; Bakker et al. 2014)
Propriété intellectuelle	(Hartwell et Marco 2016)
Volumes suffisants	(Goodall, Rosamond, et Harding 2014; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)

Les caractéristiques issues de la littérature et relatives à la stratégie de réutilisation en cascade sont également regroupées et réparties entre les trois sphères PPMA dans les tables suivantes. Les caractéristiques nouvelles, propres à la stratégie de repurposing, sont écrites en gras. Pour chacun des termes employés, nous proposons ci-après une définition en accord avec ce que nous avons retenus de la revue de la littérature. Une synthèse de l'ensemble des caractéristiques est disponible en Annexe 1.

Table 5 - Principales caractéristiques 'processus' d'une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)

Processus de (re)fabrication	Références
Chaîne Logistique Inverse	(Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Bowler 2014; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Contrôle / Inspection	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Désassemblage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Nettoyage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Réassemblage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Remise sur le Marché	(Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Repurposing	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Bowler 2014; Beverungen et al. 2017)
Stockage	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)
Tests	(Sundin et Bras 2005; Gray et Charter 2008; Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011)

Table 6 - Principales caractéristiques 'produit' d'une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)

Produit	Références
Architecture globale	(Bowler 2014; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015; Aziz et al. 2016)
Architectures particulières	(Bowler 2014; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015; Aziz et al. 2016)
Aspects sécurité	(Bauer, Brissaud, et Zwolinski 2017; Beverungen et al. 2017)
Caractéristiques dimensionnelles	(Bauer, Brissaud, et Zwolinski 2017; Beverungen et al. 2017)
Critères de performance	(Zhao et al. 2010; Bowler 2014; Goodall, Rosamond, et Harding 2014; Aziz et al. 2016; Chakraborty, Mondal, et Mukherjee 2017)

Table 7 - Principales caractéristiques 'modèle d'affaire' d'une offre de produit réutilisé (réemploi & remanufacturing)

Modèle d'affaire	Références
Critères de retour	(Bowler 2014; Bauer et al. 2016)
Législation	(Bakker et al. 2014; Tolio et al. 2017; Beverungen et al. 2017)
Partenariats	(Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011; Bowler 2014; Goodall, Rosamond, et Harding 2014; Gelbmann et Hammerl 2015)
Possession	(Sundin et Bras 2005; Sakao et Mizuyama 2014; Bauer et al. 2016)
Prix	(Arnette, Brewer, et Choal 2014; Bakker et al. 2014; Bowler 2014; Beverungen et al. 2017)
Propriété intellectuelle	(Hartwell et Marco 2016)
Standardisation	(Bowler 2014)
Volumes suffisants	(Bowler 2014; Goodall, Rosamond, et Harding 2014; Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)

Au niveau du produit.

L'**architecture globale** englobe les éléments ayant une influence à l'échelle macro du produit et un impact sur l'ensemble de son cycle de vie. Par exemple, il s'agira ici de définir si et dans quelle mesure le concept de modularité est intégré au produit, ou encore la manière d'agencer les éléments composant le produit pour faciliter les opérations inter-usages. C'est au niveau de l'architecture globale que les critères tels que la fiabilité ou la durée d'usage seront évalués.

Les **architectures sous-jacentes** correspondent aux spécialités de chacune des équipes travaillant sur le produit. Il peut s'agir des éléments mécaniques (choix d'assemblage par exemple), électriques (agencement pour plusieurs utilisations par exemple), thermique, etc. du produit.

Les **aspects relatifs à la sécurité** du produit correspondent aux normes, réglementations, ou critères à respecter pour s'assurer que le produit ne causera pas de dommage à l'Homme et à l'Environnement. Ceux-ci doivent en général être respectés pour pouvoir mettre le produit sur le marché. Dans le cas du repurposing, l'évolution des réglementations peut contraindre le produit à être retiré du marché avant sa seconde utilisation.

Les **caractéristiques dimensionnelles** peuvent elles aussi évoluer au cours du cycle de vie d'un produit repurposé. Elles représentent le volume / l'espace nécessaire à l'agencement des éléments pour pouvoir fabriquer le produit.

Les **critères de performance** sont, eux, l'un des points clefs pour permettre le second usage. Ils sont en général définis dans le cahier des charges et correspondent à l'ensemble des éléments qui rendent compte de l'adéquation entre les besoins du client et le produit proposé.

Au niveau du processus de refabrication.

Ces étapes sont très similaires à celles du remanufacturing. Au sein du processus de remanufacturing, nous avons vu à la section 2.1.2 que l'ordre importait peu (Sundin et Bras 2005). Il en va de même pour le repurposing. Les étapes sont donc présentées par ordre alphabétique.

La **chaîne logistique inverse** (CLI) permet la collecte du produit en fin de vie. Différentes opérations peuvent alors avoir lieu : le stockage du produit à la fin de l'Usage 1, son acquisition, son démontage et son transport jusqu'au site de refabrication. Elle peut faire intervenir différentes parties-prenantes.

Le **contrôle, ou l'inspection** permet d'évaluer l'état du produit à l'issue du premier usage. Mettre en place une traçabilité des conditions d'utilisation à l'Usage 1 faciliterait cette étape. Par ailleurs, ce diagnostic peut être réalisé à différents niveaux : celui du produit, des sous-ensembles, voire des composants.

Le **désassemblage** du produit est également à considérer. On entend ici les opérations permettant d'accéder aux différents sous-éléments, qu'elles soient ou non destructrices.

Le **nettoyage** consiste à éliminer les traces liées au premier usage, que ce soit esthétique ou fonctionnel - *éliminer les traces de graisse pour la remplacer par un lubrifiant neuf*. Cette opération peut être nécessaire à réaliser en amont d'autres - *la refabrication peut nécessiter une surface propre*.

Le **réassemblage** des différents éléments du produit en vue de sa réutilisation dans une autre application est également à considérer.

L'étape de **repurposing** consiste en la reconfiguration du produit en vue de l'usage suivant. Elle peut impliquer la fabrication de nouvelles pièces, le réagencement de l'architecture du produit, des développements annexes - *refabrication de sous-ensembles, nouvelle notice d'utilisation*.

Le **stockage** du produit dans un lieu adapté et dans des conditions satisfaisantes pour ne pas le dégrader. Le stockage implique généralement la monopolisation d'un espace dédié.

Des **tests** doivent être réalisés, en cours ou en fin de processus de refabrication pour s'assurer que le produit au sortir de l'usine est apte à sa future utilisation, que ce soit en termes de performances visées, d'aspects liés à la sécurité, etc..

Enfin, la **remise sur le marché** (RsM) intervient dès la fin des étapes de refabrication. Elle regroupe différentes étapes, telles que la vente, le transport, l'installation. Au moment de la remise sur le marché, le repurposeur peut également proposer d'ajouter des services à l'offre - *maintenance, formation, interventions curatives, supervision, etc..*

Au niveau du modèle d'affaire.

Les **critères de retour** correspondent à toutes les conditions préalablement définies comme nécessaires pour permettre le second usage. Ils peuvent être liés au produit - *performances limitées* - au processus de refabrication - *mise en place d'une CLI* - ou au modèle d'affaire - *volumes suffisants*.

La **législation** comprend tous les textes contraignant les fabricants en favorisant, ou empêchant, la mise en place de la stratégie de repurposing. Par exemple, la Responsabilité Élargie du Producteur tend à la favoriser.

Partenariats. Ceux-ci peuvent s'avérer nécessaires pour satisfaire l'offre dans son ensemble et y intégrer des compétences qui ne sont pas du cœur de métier du repurposeur. Typiquement, la gestion du produit entre l'usage 1 et son arrivée chez le repurposeur peut ne pas être quelque chose d'habituel à gérer, d'autant plus si le produit est vendu lors du 1^{er} usage. Dès lors, il est important de penser ces relations partenariales dès les phases de conception pour faciliter la gestion du produit sur l'ensemble du cycle de vie.

La caractéristique propre à la **possession** est liée à la propriété du produit. Le repurposeur peut décider de vendre le produit ou son usage. Les implications, en termes de conception du produit, du processus de refabrication et de modèle d'affaire, en seront fortement influencées.

Le **prix** représente la valeur attribuée à l'offre, que le produit soit vendu ou loué. Contrairement à une stratégie de remanufacturing où le prix des produits remanufacturés est généralement inférieur au neuf, dans une stratégie de repurposing, comme l'application suivante est différente, le produit peut être aligné avec les prix du marché. Si le processus permet une baisse des coûts, il peut être intéressant de diminuer les prix pour augmenter ses parts de marché.

La **standardisation** vise à ramener des produits similaires à des caractéristiques communes. Parfois normée, la standardisation des produits n'est pas systématique et n'est souvent possible qu'une fois la technologie stabilisée. Cette caractéristique pourrait également être rattachée à la catégorie 'Produit'.

Enfin, pour permettre l'usage suivant, un **volume suffisant** de produits doit être fabriqué. On parle ici de volume et non de nombre de produits car, du fait d'applications différentes, les produits peuvent être recomposés - *10 produits issus d'une première application peuvent servir à la réalisation d'un unique produit lors de l'application suivante.*

4.1.1.3. Synthèse

Différents éléments sont à mettre en avant ici. Les trois sphères présentées dans le modèle PPMA sont très dépendantes les unes des autres. Par exemple, les éléments du processus de (re)fabrication ont une influence forte sur le produit, mais aussi sur l'organisation de l'offre au sens large. Ainsi, les caractéristiques présentes sont fortement corrélées les unes aux autres. C'est le cas au sein d'une même sphère : les aspects propres à la sécurité se rapportent également à l'architecture globale. C'est également le cas entre les sphères : les critères de performances, les opérations de repurposing et les critères de retour sont tous trois intrinsèquement liés entre eux. Par ailleurs, certaines caractéristiques ont été attribuées à l'une des catégories, alors qu'elles sont à cheval sur plusieurs et auraient pu être placées dans une autre sphère : la standardisation, par exemple, est intégrée aux aspects légaux mais peut également être vue comme un aspect stratégique ou une caractéristique du produit. Ceci souligne simplement le fait que cette classification peut être adaptée, au besoin, à chaque situation particulière. Malgré tout, elle permet de dresser le contour de la stratégie de réutilisation en cascade en dissociant les grandes familles de caractéristiques. Cela en donne une meilleure visualisation et a l'avantage de clarifier les attentes qu'il peut y avoir par rapport à l'offre. Ceci sera démontré dans la suite de ce chapitre. Étant donné que le repurposing est une stratégie naissante, ces travaux de thèse ont cherché à confronter ces caractéristiques issues de la littérature à plusieurs terrains industriels. L'objectif ici est d'affiner la proposition et d'identifier potentiellement de nouvelles caractéristiques. La section 4.1.2 suivante détaille les entretiens qui ont été réalisés dans ce cadre et les adaptations faites de la classification.

4.1.2. Un terrain industriel pour confronter la littérature

Pour confronter les caractéristiques des offres de produits repurposés issues de la littérature, deux terrains industriels ont été sollicités : un industriel, recycleur de batteries, et une équipe de conception de batteries du CEA. Dans un premier temps, un éclaircissement sur le contexte et le déroulement des entretiens est apporté. Dans un second temps, les résultats sont établis et présentés par rapport au triptyque PPMA. Pour permettre une meilleure lisibilité des résultats, seules les caractéristiques nouvelles sont détaillées. Le détail de chacune des autres est disponible en Annexe 1. Enfin, une synthèse globale résume ces premiers résultats.

4.1.2.1. Contexte, objectifs et déroulement des entretiens

Le premier terrain d'étude est un industriel en charge du recyclage de batteries. Il cherche à diversifier son activité en développant le réemploi de batteries pour d'autres utilisations. Cet acteur de la fin de vie (FdV) et du recyclage intervient également lors de la logistique, à l'issue de la phase d'utilisation. En vue de cette nouvelle activité, il a développé des compétences pour pouvoir caractériser les batteries à la fin du premier usage et mettre en place les phases de redistribution, d'installation, ainsi que les services associés à l'usage ultérieur. Il a donc été interrogé par rapport à diverses visions : logistique, repurposeur et recycleur. En revanche, n'ayant pas d'activité de conception de batteries initialement, la vision du recycleur se borne au repurposing des batteries à la fin de leur premier usage. Il n'est pas ici question de concevoir un produit pour plusieurs usages dès les phases amont du CdV. Pour formaliser sa vision et ses connaissances, un entretien semi-directif a été réalisé. Le questionnaire et les réponses sont disponibles dans l'Annexe 2. Les deux heures d'entretien ont été précédées d'une matinée de discussions plus générale relative à l'activité de recyclage, d'une part, et l'activité de repurposing d'autre part.

Pour compléter le cadre proposé, un second terrain d'étude a été investigué. Une série d'entretiens a été réalisée auprès de trois équipes d'experts en conception de batteries, réparties au sein du labora-

toire LITEN du CEA. La première équipe travaille principalement sur l'intégration et l'architecture électrique des batteries. La seconde sur l'architecture électronique et les aspects de gestion de puissance. La troisième sur le suivi et l'évaluation des performances des batteries en cours et en FdU. Ces équipes ont coutume de travailler sur des projets industriels et leurs connaissances dans le domaine vont au-delà du premier usage. Ils ont donc été interrogés par rapport à diverses visions : concepteurs et repurposers. Pour formaliser ces connaissances, plusieurs entretiens semi-directifs ont été réalisés sur la base du guide disponible en Annexe 3. En fonction des équipes rencontrées, une, deux ou trois personnes étaient présentes. La durée des entretiens était comprise entre deux et six heures, en fonction de l'équipe. Cette différence s'explique en partie par le nombre de personnes interviewées au même moment (de une à trois) et du degré de détails auquel nous descendions.

Différents objectifs ont été identifiés au préalable des entretiens avec le recycleur et les équipes de conception du CEA :

- Valider les étapes des cycles d'usage successifs d'un produit repurposé (voir Figure 5, p. 26) et apprécier le rôle des parties-prenantes,
- Confirmer, ou invalider, les paramètres issus de la littérature, qu'ils soient liés au produit, au processus de (re)fabrication ou au modèle d'affaire,
- Compléter ces derniers avec les nouveaux paramètres propres à la stratégie de repurposing, non-identifiés ou absents de la littérature.

La section suivante présente plus spécifiquement les résultats concernant les deux derniers points.

4.1.2.2. *Les caractéristiques issues des entretiens*

Caractéristiques produits. Tout d'abord, les caractéristiques propres aux produits font partie des aspects principaux ayant été abordés lors des entretiens. Et pour cause, ceux-ci étaient le cœur des offres. Sur ce point précis, les entretiens cherchaient à mieux comprendre en quoi les caractéristiques des produits étaient importantes pour la stratégie de repurposing et quelles étaient les conditions facilitatrices à sa mise en place. Toutes les caractéristiques préalablement identifiées dans la littérature ont été abordées. De plus, de nouvelles caractéristiques sont apparues et seules ces dernières sont décrites ci-après, mais toutes seront discutées dans la section 4.1.3.

Technologie. Parmi les différentes technologies de batteries disponibles sur le marché, toutes ne sont pas pertinentes pour être réutilisées dans des activités de seconde vie. La chimie de la batterie en est l'une des raisons. Soit car la technologie arrive en FdV pour des raisons règlementaires - *technologie NiCd⁴⁰ pour des applications portables* -, soit car elle ne correspond pas à l'application visée - *technologie NiMH⁴⁰ non pertinente pour du stockage stationnaire*. Certaines technologies abondent de métaux précieux ; les recycler permet un gain pécuniaire direct - *technologie Lco⁴⁰* -, même si les caractéristiques de tels produits semblent être satisfaisantes pour une seconde application - *technologie NMC⁴⁰*. Enfin, d'autres technologies sont fortement développées sur certains marchés - *LFP⁴⁰ présente dans l'automobile* - mais ont peu de matériaux à forte valeur, donc peu de gains possibles en FdV. Leur réutilisation serait intéressante. Dans le même esprit que le choix de la chimie, le type de cellule qui sera utilisé est un élément important. Il en existe aujourd'hui plusieurs types, ayant des avantages et inconvénients en fonction des cas d'applications.

Contraintes d'usage. Au cours des entretiens, différents critères couvrant les contraintes d'usage attendues ont été discutés. Par exemple, si une batterie est utilisée dans un véhicule électrique, il est nécessaire de déterminer son profil de puissance pour optimiser la conception de la batterie. Ce critère est dépendant de chacune des applications et des compromis sont à trouver pour que des batteries puissent être repurposées. Dans le même ordre d'idées, les sollicitations, ou régimes de charges-décharges, doivent être prises en compte et adaptées en fonction des usages successifs.

Suivi à l'usage. Enfin, lors de la dernière partie de l'entretien, la nécessité de suivre le produit lors de son usage est remontée. Un suivi des performances et des sollicitations à l'usage permettrait de faciliter les

⁴⁰ Technologies de batterie, voir la section acronymes

opérations de repurposing, notamment celles de contrôles et de diagnostics. Le suivi à l'usage vise à garantir plus facilement les performances des usages suivants.

Processus de (re)fabrication. Les entretiens ont permis de confirmer et préciser quelles activités étaient liées aux processus en jeu lors de la fabrication, mais surtout du repurposing de produits, en se basant sur le cas batterie. D'une manière générale, le processus de repurposing peut être divisé en 3 étapes distinctes, semblables à celles que l'on retrouve dans la littérature concernant le remanufacturing : la chaîne logistique inverse, les opérations de repurposing et la remise sur le marché. Les opérations de repurposing sont, elles, subdivisées en sept opérations : le contrôle / l'inspection, le désassemblage, le nettoyage, le réassemblage, le repurposing, le stockage, les tests, à l'instar de Sundin et Bras (2005). Toutes ces activités ont été retrouvées lors des entretiens. Elles sont détaillées en Annexe 1 et discutées dans la section 4.1.3 suivante.

Modèle d'affaire. De nombreux éléments liés au modèle d'affaire sont également ressortis des entretiens avec différentes parties-prenantes. Les caractéristiques de la littérature ont toutes été confirmées. Les nouvelles sont présentées ci-après et les exemples recueillis sur les autres sont reportés en Annexe 1.

Applications. L'un des premiers aspects abordés au cours de ces entretiens concerne les applications possibles en seconde vie. Le premier usage est généralement connu. Les applications suivantes ne le sont pas nécessairement très clairement. Or, il est nécessaire d'avoir une idée de ce qu'elles peuvent être et de définir, au moins partiellement, le second usage. Pour certains produits, comme c'est le cas pour les batteries, la durée de vie est telle que le marché pour le second usage semble difficile à prévoir de manière précise et rigoureuse dès les phases de conception initiales. Pour les batteries là encore, les applications envisagées en premier usage peuvent être : l'automobile, les engins de chantiers, les grues portuaires. En second usage, un choix devra être fait entre les applications de stockage d'énergie renouvelable, des appareils électroportatifs ou encore des chariots élévateurs. Les applications ultérieures devraient nécessiter ici de plus faibles sollicitations, en continu, avec un taux de décharge faible.

Image. Bien qu'elle reste à prouver en termes d'impacts environnementaux, l'image 'verte' associée aux produits réutilisés, émanant notamment de la préservation des ressources associées aux étapes de fabrication, doit permettre d'afficher et de communiquer sur les engagements pris par les industriels face aux enjeux actuels. La communication autour de l'éco-responsabilité des batteries repurposées est un élément important car elle peut être perçue comme un frein et non un levier, d'après le recycleur interrogé. Néanmoins, la volonté de mettre sur le marché un produit robuste et durable dans le temps, induisant de fait l'évitement d'impacts environnementaux liés à la production d'un nouveau produit, est considéré comme une valeur importante associée à l'offre repurposée. Par ailleurs, comme la majorité des activités de réutilisation, l'activité de repurposing devrait être développée localement. Dans ce cas, les retombées sociales sont également faciles à mettre en avant.

Niveau de repurposing. Enfin, le niveau de repurposing doit être défini au plus tôt, car de ce niveau découlent de nombreux choix de conception au niveau du produit et des processus de repurposing. Dans le cas de la batterie de véhicule électrique, on remarque plusieurs niveaux dans l'architecture du produit. Le premier se situe à l'échelle macro, au niveau du pack batterie. Les opérations de repurposing - *inspection, désassemblage, repurposing, etc.* - se limiteraient alors à l'échelle du pack, sans investiguer les éléments qui le composent. Le second est à une échelle intermédiaire, celle du module. La troisième implique un niveau de détail plus grand et se place à l'échelle des cellules. Le choix du niveau de repurposing visé entraînera différents coûts, différentes performances, permettra différentes recompositions des éléments, nécessitera des moyens différents, etc..

4.1.2.3. Synthèse

Au cours des entretiens, toutes les étapes décrites dans la Figure 5, p. 26, ont été abordées et jugées pertinentes au regard de la stratégie globale. La double vision (concepteur-repurposeur et repurposeur-recycleur) des acteurs interviewés permet de mettre en perspective leurs réponses, au niveau du rôle

des parties-prenantes notamment. En effet, pour la même activité, la gestion du produit et des partenaires associés à l'offre est radicalement différente. Alors qu'elle peut être intégrée si l'offre est pensée pour être repurposée, elle est subie lorsque l'activité est pensée a posteriori. Ceci reflète la réalité du terrain car, d'un fabricant à l'autre, l'offre et les parties-prenantes associées sont différentes.

Les caractéristiques d'une offre de produit aux usages en cascade sont synthétisées dans la Table 8. Les nouvelles caractéristiques, issues de la littérature et des entretiens, sont précisées en gras, celles issues uniquement des entretiens ont également un astérisque (*). Sans surprise, celles-ci sont fortement corrélées à la stratégie de repurposing en elle-même.

Table 8 - Principales caractéristiques d'une offre de produit repurposé, issues des entretiens

Produit	Processus de (re)fabrication	Modèle d'affaire
Architecture globale	Chaîne Logistique Inverse	Applications *
Architectures sous-jacentes	Contrôle / Inspection	Critères de Retour
Aspects sécurité	Désassemblage	Image *
Caractéristiques dimensionnelles	Nettoyage	Législation
Choix technologiques *	Réassemblage	Niveau de repurposing *
Critères de performance	Remise sur le Marché	Partenariats
Contraintes d'usage *	Repurposing	Possession
Suivi à l'usage *	Stockage	Prix
	Tests	Propriété Intellectuelle
		Standardisation
		Volumes suffisants

4.1.3. Point de vue des acteurs sur les caractéristiques liées aux offres de produits repurposés

Dans cette section, nous montrons le point de vue qu'ont les acteurs interrogés lors des entretiens, vis-à-vis des caractéristiques liées aux produits repurposés. Elles sont ainsi précisées et redéfinies de manière générique pour chacune des sphères questionnées (PPMA).

4.1.3.1. Illustration des points de vue des acteurs sur les caractéristiques des dimensions PPMA

Les éléments des trois sphères PPMA sont discutés à tour de rôle dans cette section.

La sphère produit. Les différentes caractéristiques liées au produit et en lien avec la stratégie de repurposing sont synthétisées dans la Table 9. Des illustrations issues des entretiens sont précisées par rapport au cas batterie. La Table 9 met en évidence que, globalement, les caractéristiques produit sont partagées par les acteurs interrogés. Malgré tout, nous observons des différences notables d'une caractéristique à l'autre. Les acteurs n'ont pas toujours la même vision de ce qui importe pour chacune des caractéristiques. Par exemple, au niveau des aspects sécurité, certains privilégieront un traitement curatif (élimination des batteries sujettes à problème) et d'autre des solutions plus préventives par le suivi de certains éléments. Par ailleurs, la majorité des caractéristiques sont communes à plusieurs usages. Or, les différences d'un usage à l'autre peuvent entraîner des besoins de reconception du produit : i.e. puissance différente d'une application à l'autre. Il sera important par la suite de préciser, parmi ces caractéristiques communes, quelles sont celles identiques aux différents usages et celles amenées à évoluer.

De nouvelles caractéristiques ont été soulevées lors de ces entretiens (en gras et suivies d'un astérisque dans la Table 9) ayant été jugées nécessaires au bon déroulement de la stratégie de repurposing. Pour chacune, nous proposons d'en donner une définition.

Tout d'abord, les **choix technologiques** correspondent aux alternatives possibles entre différentes familles de composants ou de sous-ensembles. Ceux-ci définissent le cœur du produit et ne peuvent être modulés au cours de son cycle de vie.

Ensuite, les **contraintes d'usage** sont, quant à elles, davantage centrées sur la phase d'utilisation. Elles englobent les paramètres particuliers sollicités tout au long de l'application et ne sont pas des caractéristiques physiques du produit.

Le dernier point concerne le **suivi à l'usage**. Dans de nombreux cas de figure, tracer l'usage du produit au cours de sa première utilisation peut permettre de recueillir de nombreuses informations facilitant les étapes du processus de refabrication, facilitant ainsi la reconception du produit et la mise en place du modèle d'affaire associé à l'offre.

Table 9 - Caractéristiques liées au 'produit' pour le repurposing

Produit	Illustration de la vision 'recycleur'	Illustration de la vision 'conception'
Architecture globale	Standardisation Conception modulaire	Environnement extérieur : pluie, neige, glace, sel, poussière, vibration, chocs, ... Modularité Faciliter les opérations inter-usages
Architectures sous-jacentes	Architecture électronique : Réutiliser vs reconcevoir le BMS Reconfigurer les algorithmes Récupérer des composants électriques et électroniques Architecture mécanique : Maximiser les pièces réutilisées Mettre en place des détrompeurs / indicateurs	Architecture mécanique : Faciliter le diagnostic en fonction de l'échelle choisie Choix d'assemblages (boulonnage, soudage) Architecture électrique : Équilibrer les cellules et les accumulateurs Agencement des cellules Architecture thermique : Plages de températures
Aspects sécurité	Éliminer les batteries à problème	Évolutions réglementaires Gonflement des cellules
Caractéristiques dimensionnelles		Volume libre dans la voiture Volume libre dans l'application suivante
Choix technologiques *	Choix de chimie NiMH Lco NMC LFP	Choix chimie Type de cellules
Critères de performance	Quantité d'énergie Puissance Puissance massique Nombre de cycles de charges/décharges Profil des sollicitations Plages de température	Densité énergétique Masse Puissance Influence des paramètres de fin de l'usage 1 au début de l'usage 2
Contraintes d'usage *		Profil de puissance du VE Sollicitations
Suivi à l'usage *	Avoir un historique de l'utilisation	Permettre le suivi des performances lors de l'usage

La sphère processus de (re)fabrication. Les différentes caractéristiques liées au processus de (re)fabrication et issues des entretiens, ainsi que les exemples abordés sur le cas batterie, sont groupés dans la Table 10. La prise en compte du repurposing du produit en amont des phases de conception, et donc des différentes étapes liées au processus de refabrication, a pour objectif de faciliter la démarche. Il faudrait dès lors définir tous ces éléments au moment du processus de conception, au même titre que ceux liés au produit et au modèle d'affaire.

Table 10 - Catégories de caractéristiques liées au 'processus de (re)fabrication' pour le repurposing

Processus de (re)fabrication	Illustration de la vision 'recycleur'	Illustration de la vision 'conception'
Chaîne logistique inverse	Transport Bonnes conditions de transports Bon conditionnement (niveau de charge) Stockage	Démontage Acquisition de la carcasse
Contrôle / Inspection	Contrôle visuel Pré-diagnostic Diagnostic poussé (bancs de charge, décharge, abaques,...)	Niveau de diagnostic Contrôle visuel Contrôle des aspects sécurité Évaluations de l'état de santé : Accès aux protocoles CAN (historique) Traçabilité de l'Usage 1 Évaluation du vieillissement
Désassemblage	Faciliter l'accès (liaisons mécaniques, identification des pièces) Maximiser la réutilisation des éléments (pas de casse au démontage)	Intégrer du D4Disassembly Comprendre l'architecture du produit
Nettoyage	Produit nettoyable avant son retour sur le marché	Produit nettoyable
Réassemblage	Faciliter le réassemblage (liaisons mécaniques)	Intégrer du D4Reassembly
Remise sur le Marché	Processus flexible Services après-vente, maintenance	Vente Transport Services associés
Repurposing	Reconception, nouveaux développements (casing, carte électronique, notice)	Reconception, nouveaux développements (casing, carte électronique)
Stockage	Bonnes conditions (charge, température, etc.) Coût	Conditions de stockage
Tests	Validation avant remise sur le marché	Adaptés à l'usage suivant

La sphère modèle d'affaire. L'organisation autour de l'offre est également importante pour l'activité de repurposing et les caractéristiques regroupées dans la Table 11 doivent être définies au plus tôt. Globalement, les acteurs interrogés ont mis en avant que certaines difficultés pouvaient résulter d'une mauvaise ou d'une non prise en compte de ces aspects. Certaines caractéristiques peuvent être gérées dès le premier usage : en organisant le flux de FdU par le développement de partenariats, en identifiant les critères de retours dès le premier usage, etc.. D'autres sont moins évidentes à intégrer aussi tôt mais doivent l'être avant la nouvelle application : performances des produits à l'issue du premier usage (difficulté de se projeter sur un marché à 10 ans, qui plus est dans un secteur dynamique comme celui des

batteries, innovation technologique pouvant desservir la future activité, etc.), prix d'achat des produits neufs plus faible que leur coût de démantèlement, etc..

Là encore, lors de l'expression des caractéristiques axées sur le modèle d'affaire et autour de l'offre batterie, les acteurs avaient une vision très différente de celles à définir, alors qu'au final, elles peuvent être intégrées sous les mêmes dénominations. Il est nécessaire de confronter les visions des différents acteurs par rapport à ces spécificités propres au repurposing, afin d'obtenir l'image la plus large possible de l'ensemble du CdV.

Table 11 - Catégories de caractéristiques liées au 'modèle d'affaire' pour le repurposing

Modèle d'affaire	Illustration de la vision 'recycleur'	Illustration de la vision 'conception'
Applications *	Sites isolés Hybride : solaire / éolien	Voitures électriques Couplage énergie renouvelable Appareils portatifs
Critères de retours	Conditions de stockage (environnement, charge,...)	Niveaux mini pour l'usage 2
Image *	Bénéfices environnementaux Bénéfices sociaux	Responsabilités Environnementales Responsabilités Sociales
Législation	Statut de déchet Déresponsabilisation du fabricant 1	REP Garantie
Niveau de repurposing *	Macro : pack Intermédiaire : modules Détailé : cellules	Macro : pack Intermédiaire : modules Détailé : cellules
Partenariats	Amont (usage1, marché diffus) En cours, pour la nouvelle activité Aval (casses)	Manque de compétences sur la chaîne logistique inverse
Possession	Vente Location	Vente Location Vente de l'usage
Propriété intellectuelle	Brevet / Labellisation	Accord du fabricant envers le repurposeur
Prix	Inférieur au prix du marché visé Coûts de traitement en FdV	
Standardisation		Standardisation des modules
Volumes suffisants	Volumes liés à l'usage 1 Gestion en fin d'usage Relations partenariales	Nombre de KWh stockés lors de l'usage 1

Les nouvelles caractéristiques liées au modèle d'affaire et soulevées lors de ces entretiens (en gras et suivies d'un astérisque dans la Table 11) sont rappelées ci-après. Une définition est proposée pour chacune.

L'**image** de l'activité de repurposing est sensée pouvoir être valorisée par l'entreprise et ses clients. L'utilisation de produits issus d'une seconde vie témoigne d'une conscience environnementale, sous réserve qu'une analyse de cycle de vie le prouve, et sociale, sous réserve des conditions de repurposing. Le **niveau de repurposing** correspond au degré d'interventions réalisées sur le produit et peut être défini en fonction de nombreux facteurs : sa nature, l'évolution de ses composants dans le temps, la facilité de désassemblage, etc.. On détermine arbitrairement 3 niveaux : (1) un niveau macro, à l'échelle du produit ; (2) un niveau intermédiaire, à l'échelle des sous-assemblages ; et (3) un niveau détaillé, à l'échelle des composants.

Les ‘**applications**’ caractérisent les types d’applications successives au cours des usages 1, 2, 3, etc.. Il est important de définir au plus tôt quelles applications sont visées pour définir correctement les fonctions et sous-fonctions qui sont liées au produit et à son offre.

4.1.3.2. Un besoin de prise en compte globale des caractéristiques par l’ensemble des acteurs

Des caractéristiques interdépendantes. Chacune des caractéristiques présentées ici n’est pas indépendante des autres. Toutes sont plus ou moins liées. Par exemple, au sein des caractéristiques rattachées à la sphère ‘produit’, les performances en FdU apparaissent comme un enjeu majeur pour l’usage ultérieur. Mais les performances seules ne sont pas suffisantes, une vision globale du produit est essentielle. En ce sens, il est nécessaire de juger des moyens à disposition des fabricants de produits repurposés pour diffuser leur offre sur un marché adapté au second usage. Ainsi, le choix de conception effectué sur l’une de ces caractéristiques va influencer les autres. Par exemple, concernant l’étape de diagnostic, différents niveaux peuvent être évalués : le pack, les modules et les cellules. En fonction du degré de diagnostic choisi, les moyens techniques, technologiques et économiques mis en œuvre seront différents. Les performances des produits au sortir du processus de repurposing le seront également. De plus, certaines caractéristiques sont davantage liées au premier usage, d’autres au second ou au troisième, voire d’une manière transverse à plusieurs applications en même temps. Ces caractéristiques ne doivent pas être considérées individuellement mais bien comme un ensemble multicritères où l’optimum global est le résultat d’un compromis. Pour une meilleure prise en compte, le processus de conception doit donc, autant que possible, intégrer ces différents aspects dès les phases amont. Ce qui n’est pas possible lorsque les applications ultérieures restent floues. Nous expliciterons les problématiques liées au processus de conception pour le repurposing dans la section 4.2 suivante.

Des parties-prenantes à considérer précautionneusement. Nous venons également de mettre en avant que les caractéristiques pouvaient avoir de nombreuses interprétations auprès des parties-prenantes lors d’un projet de conception pour le repurposing. La multiplicité des applications et des phases d’usages nécessite de confronter leurs points de vue au plus tôt. Il semble donc important d’avoir, dès les phases amont, une vision globale de l’ensemble de l’offre. À la fois par rapport aux applications successives, mais aussi par rapport aux différentes parties-prenantes. Au moment de la conception d’un produit repurposé, c’est en partie grâce à leurs interactions que ces dernières établiront le meilleur compromis pour l’ensemble des usages car, ainsi, la vision la plus large sera considérée.

Les valeurs associées. D’une manière plus générale, les entretiens ont mis en avant que la stratégie de repurposing était associée à une vision plus responsable de l’industrie. Au-delà des aspects financiers, qui restent indéniablement nécessaires à l’établissement d’une offre commerciale aujourd’hui, les problématiques environnementales et sociales sont perçues comme un vecteur fort lors de la (re)conception du produit. Il est ressorti au cours des entretiens, la volonté de mettre sur le marché un produit robuste, durable dans le temps. Changer d’application au cours du CdV est un moyen pour ne pas voir le produit recyclé prématurément, voire finir dans une décharge, alors qu’il est encore utilisable. Cet argument a été émis plusieurs fois lors des entretiens, sous différentes formes et avec différents acteurs. Pouvoir le valoriser au mieux, en prolongeant sa durée de vie par sa réutilisation, est la principale solution envisagée pour y parvenir. Dès lors, il semble que redéfinir les performances du produit et l’utilisation qui en est faite soit nécessaire pour permettre cette seconde utilisation, sur le cas batterie a minima. Cela induit de fait une gestion plus globale de l’offre car un maximum d’informations doit être extrait de l’application amont. Une gestion au fil de l’usage faciliterait grandement cette gestion et, ces nouvelles connaissances pourraient permettre d’influencer directement le comportement des utilisateurs. À l’autre bout du CdV, les répercussions sur les étapes de recyclage sont également appréciées. Sans aucun investissement, le repurposing contribue à les différer. Lorsque ces produits sont comparés à des solutions à application unique, les étapes de recyclage qui succèdent au dernier usage, ainsi que les coûts économiques et environnementaux qui y sont associés, peuvent être divisés, dans l’absolu, par le nombre d’usages. Ainsi, la satisfaction

de contribuer à l'émergence d'une activité pensée pour épuiser moins rapidement les ressources, en comparaison à ce qui existe aujourd'hui, ressortait de manière forte et positive lors des entretiens.

4.1.4. Conclusion sur les caractéristiques des offres de produits repurposés

Nous avons proposé un cadre générique classant et définissant les caractéristiques des offres de produits repurposés. Ce cadre est utilisable lors d'une activité de conception afin d'identifier et de décrire ces caractéristiques. Ces dernières sont classées en différentes catégories et restituées dans la Table 12, selon leurs affinités. À partir d'ici nous ne parlerons plus de caractéristiques, qui correspondent à des paramètres de conception, mais de dimensions d'une offre. Ce terme se veut plus large, incluant à la fois les paramètres de conception, les catégories qui les regroupent (en gras) ainsi que les autres éléments à considérer au moment de la conception du produit. La définition de chacun des termes est disponible dans l'Annexe 1. Comme mentionné précédemment, lors d'une activité de conception ces dimensions doivent être définies conjointement par toutes les parties-prenantes de l'offre. Cela permet de confronter leurs points de vue et de dresser, par rapport à ces dimensions spécifiques à la stratégie de repurposing, une image plus exhaustive de ce que devrait être l'offre tout au long de sa vie. D'une manière générale, les entretiens menés auprès de différents acteurs de la chaîne de valeur, dont certains ont plusieurs casquettes (concepteurs, repurposeurs, logisticiens, recycleurs), ont permis de confirmer que les caractéristiques issues de la littérature sur le repurposing, et présentées dans la Table 12, avaient une forte influence sur la mise en place de la stratégie. Ces entretiens ont également permis d'en soulever de nouvelles.

Table 12 - Principales dimensions d'un produit repurposé (synthèse)

Produit	Processus de (re)fabrication	Modèle d'affaire
Architecture Produit	Chaîne Logistique Inverse	Aspects règlementaires et normatifs
Architecture globale	<i>stockage</i>	Législation
<i>modularité</i>	<i>acquisition</i>	Propriété intellectuelle
<i>fiabilité</i>	<i>démontage</i>	Standardisation
<i>durée d'usage</i>	<i>transport</i>	
Architectures sous-jacentes	Processus de Repurposing	Stratégie
<i>mécanique</i>	<i>flexibilité</i>	Critères de retour
<i>électrique</i>	Contrôlable / Inspection	Image
<i>thermique</i>	Désassemblage	<i>environnementale</i>
Caractéristiques	Nettoyage	<i>sociale</i>
Choix technologiques	Réassemblage	Niveau de repurposing
Aspects sécurité	Repurposing	Possession
<i>normes / réglementations</i>	Stockage	
<i>évolutions possibles</i>	Tests	Marché
Caractéristiques dimensionnelles	Remise sur le Marché	Applications
<i>volume / dimensions physiques</i>	<i>vente</i>	Prix
Critères de performance	<i>transport</i>	Volumes suffisants
Contraintes d'usage	<i>installation</i>	
Suivi à l'usage		Partenariats

Concernant le triptyque PPMA, la distinction des caractéristiques selon les trois axes ‘produit’, ‘processus de (re)fabrication’ et ‘modèle d’affaire’ s’est avérée adaptée et utile à l’activité de conception tout comme à la gestion du produit au cours de son cycle de vie. Sur les sphères produit et modèle d’affaire, de nouvelles caractéristiques sont ressorties comme importantes. Pour le modèle d’affaire, celles-ci reflètent directement les nouvelles implications liées à la mise en place d’une activité de repurposing et distinctes des enjeux des stratégies de réutilisation habituelles (réemploi et remanufacturing). En ce qui concerne le produit, ces nouvelles caractéristiques semblent effectivement nécessaires au bon déroulement de la stratégie - *suivi à l’usage, critères de performances, contraintes d’usage*. En revanche, les caractéristiques liées au processus de (re)fabrication d’une activité de repurposing sont apparues comme très similaires à celles des autres stratégies de FdU : seule l’activité de repurposing (potentiellement équivalente au remanufacturing) se démarque. Le triptyque PPMA que nous proposons facilite la classification des caractéristiques d’un produit repurposé.

Ces caractéristiques doivent pouvoir être utilisées lors de la conception d’une offre de produits en cascade. Pour ce faire, dans la suite de ces travaux de thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement au processus de conception pour un produit aux applications successives et distinctes.

4.2. Évolution du processus de conception

Dans cette seconde partie, nous nous intéressons davantage aux aspects propres à la conception pour le repurposing. La revue de littérature a apporté des éclaircissements sur l’organisation des étapes de cycle de vie (CdV) d’un produit classique et de l’activité de conception qui y est liée (voir section 2.2.2). Il a été mis en avant que les deux font partie d’un même ensemble et sont interdépendants (voir Figure 15, p 46). Mais du fait d’applications successives, dans le cas du repurposing, une adaptation de la représentation des étapes du cycle de vie est nécessaire. De plus, la revue de littérature a souligné que la conception pour des applications en cascade nécessitait d’être encadrée dès l’étape d’analyse des besoins. Ainsi, la définition des besoins et la gestion des fonctions des offres doit être flexible et pouvoir être réalisée de manière dynamique sur l’ensemble du CdV. Ces éléments amènent notre seconde question de recherche :

‘Quel processus de conception pour le repurposing ?’

Pour y répondre, nous rappelons tout d’abord les besoins liés à la conception pour le repurposing, issus de la littérature et des entretiens. Ensuite, nous faisons des propositions sur le processus de conception au niveau du processus organisationnel et de l’activité en elle-même (sections 4.2.2 et 4.2.3).

4.2.1. Une évolution sujette à différents besoins

Suite à la revue de littérature (voir section 2.2), complétée avec les entretiens auprès des équipes de conception du CEA-LITEN et du recycleur (voir section 4.1), de nombreux besoins sont ressortis quant à la conception pour des applications en cascade.

Phases de conception. Les phases de conception doivent être adaptées aux spécificités de la stratégie de repurposing. Tout d’abord, comme les besoins évoluent d’un usage à l’autre, le produit doit être conçu pour tous les intégrer. Chacune des applications et des processus de refabrication doivent être pris en compte au plus tôt lors des phases de conception initiales. Mais toutes les étapes du processus de conception ne peuvent pas être réalisées en même temps. Par exemple, quand une batterie est conçue pour plusieurs usages successifs, la phase de tests pour l’application n°1 est réalisée à l’issue du processus de conception initial, alors que les tests pour les applications suivantes ne peuvent être faits que lorsque le pack batterie a vieilli et que ses performances ont évolué. Bien que des modèles de prédictions puissent se substituer à des tests réels pour ces usages, une évaluation des performances doit être faite a posteriori, en fin d’usage (FdU). Nous appellerons la première phase ‘conception primaire de produits repurposés’ car la conception des applications successives est initiée dès le processus de

conception, en amont du premier usage. Lorsque la conception est réalisée ultérieurement, nous parlerons de ‘reconception de produits repurposés’. Pour désigner l’ensemble du processus, sans distinction de ce qui est réalisé dans l’une ou l’autre des phases, nous utiliserons l’expression ‘conception pour le repurposing’ ou ‘conception pour des applications en cascade’.

Phases du cycle de vie. Toutes les phases du CdV doivent être définies par rapport à la stratégie de réutilisation en cascade et les entretiens ont fait ressortir que la prise en compte de chacune des étapes du CdV doit être faite le plus tôt possible. Par exemple, pour le cas batterie, en fonction de la gestion qui est faite lors de l’usage et de la FdU, les performances d’un produit à l’autre seront différentes. De plus, le besoin de considérer plus particulièrement le processus de refabrication et les opérations de recyclage apparaît. Celles-ci doivent être suffisamment flexibles pour s’adapter à un flux de produits pas toujours simple à maîtriser. En ce sens, faciliter les étapes de repurposing (diagnostic, démontage, remplacement de certains composants, etc.) est primordial car cela permet de s’assurer de la réutilisation du produit et donc du succès de la stratégie.

Gestion des priorités inter-usages. Prioriser les problématiques d’un usage à l’autre ressort également comme un besoin majeur à considérer. Lors d’une activité de repurposing, il est avant tout nécessaire de définir quelles sont les possibles applications successives tout au long du CdV du produit et, ce, dès la conception primaire. Or, du fait d’échéances temporelles trop larges, ces applications peuvent être difficiles à prévoir et les marchés qui y sont liés peuvent être flous. L’organisation des flux de produits d’un usage à l’autre et jusqu’à leur fin de vie (FdV) doit donc être organisée en conséquence. Par ailleurs, au cours de la vie du produit, une application peut être priorisée par rapport à une autre, pour des raisons techniques ou économiques. Ces problématiques de gestion des priorités sont également présentes lors des étapes de conception. Les applications successives peuvent être pensées et conçues de différentes manières :

- simultanément,
- séquentiellement mais avant le premier usage,
- séparément avant chaque application.

Elles peuvent également résulter d’un mix des possibilités précédentes. Pour gommer ces problématiques, certains auteurs proposent une conception plus flexible, modulaire, permettant un réagencement simplifié, chronologique.

Une gestion de l’information. L’une des autres problématiques concerne la gestion de l’information tout au long de la vie des produits. Lors des entretiens, nous avons mis en avant que deux batteries utilisées à l’identique mais étant stockées dans des conditions favorables pour l’une et non favorables pour l’autre auront des performances différentes. Il faut pouvoir prévenir ce genre de situation en gérant au mieux les produits sur l’ensemble de leur CdV. Par ailleurs, gérer de bout en bout certaines informations comme l’état de santé du produit, les contraintes réglementaires à l’instant T, les décisions prises lors de la conception, etc., est essentiel pour faciliter les usages successifs. Ainsi, au niveau des produits, mettre en place un suivi et une traçabilité au cours de l’usage amont devrait permettre de mieux les caractériser avant leurs usages ultérieurs.

Les parties-prenantes. Dans la conception pour le repurposing, la prise en compte des parties-prenantes est l’un des éléments principaux. Leur concertation est essentielle pour une définition claire de l’ensemble de la vie du produit. Lors des entretiens, et en fonction des personnes interrogées, les réponses différaient sur ce que devraient être les étapes des processus de conception. De plus, du fait de la nature plus complexe de cette activité, il est probable qu’elle implique davantage de parties-prenantes tout au long de son CdV. Celles-ci doivent être, autant que possible, identifiées et intégrées au groupe de conception.

Des éléments plus transverses. Les besoins relatifs au repurposing émis précédemment sont parfois corrélés les uns aux autres. Par exemple, les étapes du CdV peuvent évoluer en fonction de l’information

capitalisée au cours de ce cycle de vie, comme pour les évolutions de réglementations. En ce sens, lors d'un entretien avec le recycleur, il a été question des batteries au cadmium. Depuis décembre 2016, elles sont globalement interdites et ne peuvent plus être utilisées que dans certaines applications très spécifiques (systèmes d'urgence et équipements médicaux) du fait de la toxicité liée au cadmium. Si ces systèmes avaient été conçus pour être réutilisés dans une seconde application autre que celles précitées, il aurait fallu les recycler à l'issue du premier usage. Il y a donc des problématiques de temporalité spécifiques relatives à chaque produit qui doivent être prises en compte.

Synthèse. Ces différents besoins, propres à la stratégie de réutilisation en cascade, doivent être intégrés lors de la conception. La littérature et les entretiens menés jusqu'ici soulignent l'évolution nécessaire des pratiques de conception entre un projet de conception pour un ou plusieurs usages. Les étapes de conception doivent donc être intégrées différemment au sein du CdV. Ainsi, nous proposons des modifications globales quant à l'organisation du processus de conception (section 4.2.2). Ces propositions restent génériques au sens où rien n'est figé en matière de conception de produits et encore moins de produits repurposés (les processus de conception étant propres à chaque développement et chaque situation). Il est également clair qu'une simple étape de reconception en FdU1 limiterait trop les possibilités de réutilisation du produit. Il faut donc intégrer un maximum d'éléments avancés ci-dessus en phase initiales de conception, au moment de l'analyse des besoins (voir Figure 8, p 39) et considérer les fonctions génériques qui sont attendues d'un produit repurposé (section 4.2.3).

4.2.2. L'organisation du processus de conception

En conception, nous cherchons traditionnellement à considérer l'ensemble des étapes du cycle de vie avant la fabrication du produit. Mais dans une stratégie de repurposing, toutes les étapes ne sont pas forcément bien identifiées. En effet, bien que la reconception de produits repurposés puisse limiter les possibilités de réutilisation, le besoin de reconception en cours de CdV est très présent dans la littérature sur le repurposing et apparaît souvent comme nécessaire pour prendre en compte les spécificités propres aux phases d'usage. Ainsi, nous proposons un processus de conception spécifique au repurposing.

4.2.2.1. Proposition de processus de conception pour des applications en cascade

En réponse aux besoins cités précédemment, nous proposons un modèle de CdV dans lequel apparaissent les phases de conception successives, afin de mieux appréhender les questions d'usages successifs et de temporalité. Les implications de la stratégie de repurposing au niveau du CdV du produit sont détaillées phase par phase. Le CdV global d'un produit repurposé, incluant les étapes liées aux processus de conception, est représenté sur la Figure 21. Pour des raisons de praticité, seules deux applications sont considérées ici.

Processus de conception primaire de produits repurposés et fabrication initiale. Au sein du processus de conception primaire d'un produit repurposé, se retrouvent les étapes classiques d'analyse des besoins, de conception préliminaire, architecturale, détaillée, puis les tests du produit (voir Figure 8, p 39). Les définitions synthétisées de la littérature et données à la section 2.2.1.2 restent valables dans le cadre du repurposing. Il faut toutefois noter que pour une meilleure perception de l'activité de conception, ces étapes sont distinguées en fonction de l'application à laquelle elles appartiennent. Par exemple, les étapes d'analyses des besoins pour les applications n°1 et n°2 sont représentées séparément, bien qu'elles puissent avoir lieu au même moment, voire être définies conjointement. Cette représentation se justifie par la volonté de prise en compte de l'ensemble de l'activité de conception au moment des phases amont bien qu'elles puissent ne pas être totalement complétées. Les étapes du processus de conception liées à la première application doivent évidemment être définies en totalité, mais, en fonction des situations, la seconde application peut ne pas l'être. Le produit sera alors totalement ou partiellement défini pour l'application n°2 lors du processus de reconception de produits repurposés. Les étapes de fabrication, fortement liées aux étapes de conception, finalisent cette première phase en

concrétisant l'activité de conception. Ces étapes représentent les étapes de conception pour le repurposing (voir Figure 21).

Application n°1. À l'issue des étapes de conception primaire de produits repurposés, on retrouve la distribution du produit, son utilisation dans la première application et sa FdU1. Cette dernière représente l'arrêt de l'utilisation de l'offre dans son application en vue de la nouvelle utilisation ou, si le produit ne peut pas répondre au besoin suivant, de sa FdV. Cet arrêt peut être motivé par l'utilisateur ou le repurposeur, si ce dernier préfigure qu'une limite d'utilisation est nécessaire pour permettre au produit d'être réutilisé dans une autre application.

Processus de reconception de produits repurposés et fabrication ultérieure. En amont du processus de reconception de produits repurposés, la chaîne logistique inverse (CLI) vise à collecter le produit en FdU dans le but de le retourner vers le repurposeur. Différentes opérations peuvent alors avoir lieu : démontage et stockage du produit en FdU1, acquisition par le repurposeur et transport jusqu'au site de refabrication. S'ensuit le processus de reconception à proprement parler. Une étape spécifique au repurposing initie ce processus : l'étape de 'préparation'. Cette dernière a pour objectif d'évaluer les performances du produit en vue d'une nouvelle application, potentiellement non définie à ce moment du CdV. Cette étape peut être faite à la FdU1 ou au début du processus de reconception de produits repurposés. S'ensuivent de nouveau les étapes du processus de conception classique, en aval desquelles nous retrouvons les étapes de refabrication, également appelées 'repurposing' ou 'processus de repurposing'. Celles-ci se composent des opérations mentionnées à la section 4.2.2.1 : le contrôle / l'inspection, le désassemblage, le nettoyage, le réassemblage, le repurposing, le stockage, les tests. Le produit est alors redistribué sur le marché.

Application n°2. Identique à l'application n°1, les étapes de distribution du produit, d'utilisation et de FdU sont présentes, mais pour la seconde application. Dans le cas où une troisième application est prévue, ou possible, les phases nécessaires sont intégrées au cours du CdV.

FdV. Lorsque le produit n'est plus apte à un nouvel usage, il est retiré du marché et dirigé vers son ultime étape, la FdV. Le produit est alors, au mieux, recyclé et ses matériaux récupérés. D'autres stratégies peuvent être l'incinération, la mise en décharge ou l'enfouissement.

Des flux à plusieurs niveaux. Au sein de ce CdV aménagé, plusieurs types de flux interviennent. Tout d'abord il y a les itérations successives que l'on retrouve tout au long des étapes de conception, à l'instar d'un processus de conception classique. Pour des raisons de clarté, une seule flèche est représentée sur la Figure 21 à ce niveau. Par ailleurs, pour chaque application, un flux d'informations est présent pour permettre l'amélioration des étapes de (re)conception futures en fonction de l'utilisation qui est faite du produit. Enfin, un flux d'informations est également nécessaire au niveau du CdV, pour faire remonter des informations des applications ultérieures vers les applications antérieures dans un souci d'améliorations. Un suivi de l'information doit également être présent pour rendre compte de l'état de santé du produit tout au long du CdV, allant des applications antérieures vers les applications ultérieures.

Les points clefs. Cette représentation souligne à la fois l'importance de la prise en compte des usages successifs dès les premières étapes de conception d'un produit et la nécessité d'une phase de reconception précédant chaque nouvel usage du produit. Ces deux phases de (re)conception sont, l'une comme l'autre, importantes pour la stratégie de repurposing. La Figure 21 rend compte de la spécificité de la conception pour des applications en cascade (ou design for repurposing).

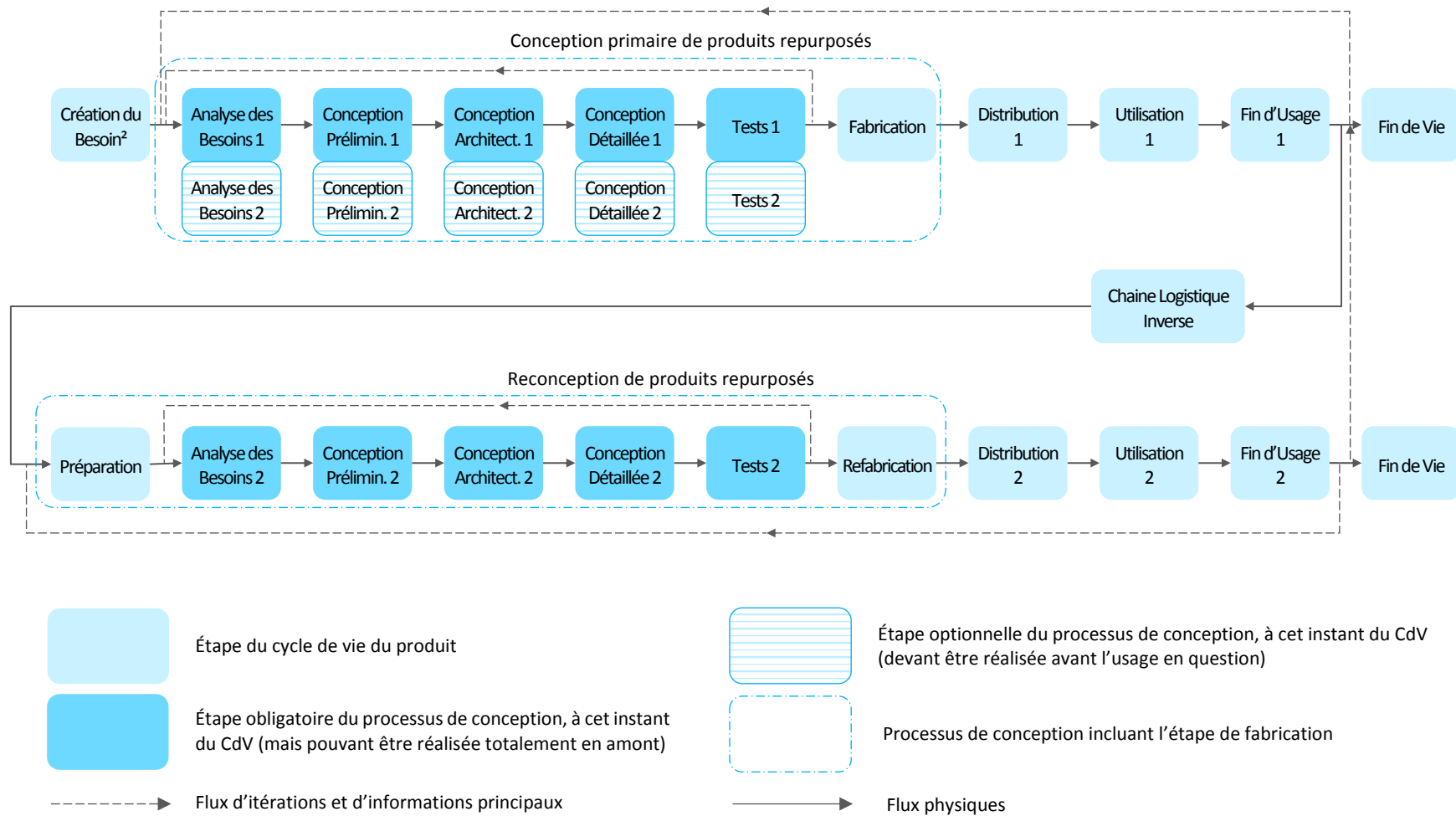


Figure 21 - Processus de conception au sein des étapes du cycle de vie d'un produit pour deux applications en cascade

4.2.2.2. *Justification du processus de conception et conclusion*

La proposition relative à la Figure 21 se justifie par rapport à plusieurs des besoins exprimés à la section 4.2.1 précédente et notamment en ce qui concerne la prise en compte des parties-prenantes et des phases de conception.

Parties-prenantes. Avec cette représentation, la quasi-totalité du CdV est représentée. Il manque en effet le détail de la case 'Refabrication', qui comprend les étapes du processus de repurposing telles qu'elles sont décrites à la section 4.2.2.1, c'est-à-dire les opérations de test, de désassemblage, de nettoyage, etc.. Avec ces éléments complémentaires, la Figure 21 facilite l'identification des acteurs en lien avec chacune des étapes. Par ailleurs, cette figure met bien en relief que le nombre de parties-prenantes est potentiellement bien plus important que lors du CdV d'un produit classique. En tout état de cause, les besoins liés à la conception pour des applications en cascade sont nécessairement plus nombreux.

Phases de conception. En complément, la Figure 21 met en avant la nécessité de prendre en considération le scénario du CdV, avant même la première application. Une meilleure intégration des usages successifs dès la première phase de conception est primordiale lors de la conception pour le repurposing car il permet de faciliter le passage d'un usage à l'autre : celles-ci ayant déjà été réalisées lors de la phase de conception primaire. Une seconde phase de conception reste malgré tout nécessaire. L'application suivante étant différente, des besoins de reconception peuvent apparaître au cours du premier usage. De plus, il se peut que la seconde application ne soit pas totalement définie avant le premier usage et qu'en fonction de l'usage, des modifications soient apportées.

Plus globalement. D'une manière plus transverse, la Figure 21 souligne l'importance du besoin de prise en compte de l'ensemble des phases du cycle de vie au moment de la conception, ainsi que de la gestion de l'information sur ces étapes. Une attention particulière doit être portée sur cet aspect de la capitalisation des informations de conception et de vie pour des applications en cascade.

Conclusion. La proposition de représentation du CdV et des étapes de conception pour un produit repurposé répond à plusieurs des besoins identifiés au préalable. Ainsi, la Figure 21 permet de :

- faciliter l'identification des acteurs présents tout au long du cycle de vie d'un produit repurposé (grâce à une meilleure identification des étapes du CdV),
- ramener autant que possible la conception des applications successives dès la phase de conception primaire,
- mettre en évidence une nouvelle phase de conception, complémentaire à la première, située avant la seconde application (bien en amont : conception primaire ; ou juste avant : reconception).

Deux temps forts marquent cette succession d'étapes. Le premier est la définition des besoins. Lors de cette étape, il est nécessaire de collecter un maximum d'informations quant aux besoins relatifs aux différentes applications. La description la plus exhaustive possible des applications successives, ou potentielles, permettra d'évaluer au mieux les besoins pour l'ensemble du CdV. Cela inclut une prise en compte de toutes les phases du CdV et de toutes les parties-prenantes. Cette étape donne lieu à l'établissement du CdC et est le fondement de l'activité de conception pour plusieurs usages. Une fois celui-ci établi, le second temps fort inclut les étapes de conception de la solution finale. Les équipes de conception doivent alors arriver au meilleur compromis pour chacune des applications (en fonction du recueil des besoins) et faciliter le passage de l'une vers l'autre.

4.2.3. *Conception pour le repurposing : recommandations et exemple d'implémentation*

Cette section se focalise davantage sur les activités de conception de produits aux usages en cascade. En réponse aux besoins formulés au Chapitre 2 et rappelés à la section 4.2.1, nous apportons ici des

éléments quant à l'activité de conception à proprement parler, en formulant différentes recommandations pour le repurposing. Chacune de ces recommandations est présentée, puis illustrée par un exemple d'implémentation au sein de la méthode d'analyse fonctionnelle (AF).

4.2.3.1. *Faciliter l'intégration des parties-prenantes*

Des échanges entre les clients, les équipes de conception, les utilisateurs, les (re)fabricants, les logisticiens, les recycleurs et les autres parties-prenantes permettent de mieux formaliser les besoins des offres de produits. Cela est d'autant plus valable pour le repurposing et doit permettre d'établir un cahier des charges (CdC) plus complet. Les identifier est la première étape. Nous proposons ici deux recommandations complémentaires

Recommandations parties-prenantes. En première approche, nous proposons aux commanditaires et aux équipes de conception de s'appuyer sur la proposition précédente : la Figure 21, p 92, qui clarifie les applications successives et les étapes du CdV. À chacune de ces étapes, l'objectif est de définir quelles sont les parties-prenantes qui y sont liées. Par exemple, par rapport à l'étape de fabrication, il est souhaitable d'associer les personnes (ou les métiers) sujettes à fabriquer le produit et, cela, dans le but de faciliter la récolte des besoins à venir. Les parties-prenantes auxquelles il convient de faire particulièrement attention sont celles situées à la jonction de différentes applications. Il y a plusieurs raisons à cela. La première est que l'activité de repurposing diffère d'un 'business-as-usual'⁴¹, les parties-prenantes classiques (et donc leurs besoins) peuvent ne pas être consultées si les commanditaires et équipes de conception estiment connaître suffisamment leurs contraintes, ce qui n'est plus le cas ici. La seconde raison est que ces étapes sont influencées à la fois par les phases d'usages amont et aval. Elles sont donc critiques au regard de l'ensemble du CdV.

En seconde approche, et pour préciser davantage les parties-prenantes déjà identifiées, nous proposons aux équipes de conception de s'appuyer sur la Table 12, p 87. Ce tableau décrit de manière générique les dimensions et caractéristiques principales des produits repurposés, ce qui donne une bonne vision des besoins qui y sont liés. Pour préciser ces besoins, il faut alors identifier les personnes et métiers qui en sont responsables. Le classement en triptyque facilite cette opération car il permet d'identifier le domaine de compétence associé à chaque dimension. Par exemple, les tests sont liés au processus de repurposing, les aspects législatifs sont davantage du ressort des commanditaires et les caractéristiques 'produit' du domaine des équipes de conception.

Exemple d'implémentation dans l'AF. L'analyse fonctionnelle prévoit d'ores et déjà de s'appuyer sur le CdV des produits pour définir l'ensemble des besoins (et donc des parties-prenantes) qui y sont liées. Nous proposons de considérer, logiquement, celui qui est propre aux produits repurposés pour n'oublier aucune étape. En complément, et sans modification particulière de cette étape, il est possible de s'appuyer sur la Table 12, comme indiqué précédemment.

4.2.3.2. *Mieux considérer les phases du cycle de vie*

Pour faciliter le repurposing de produits, les phases du CdV doivent également être prises en compte et définies lors de la conception primaire du produit. Là encore, nous émettons deux recommandations qui doivent permettre de faciliter la stratégie de repurposing.

Recommandations CdV. Tout d'abord, il est nécessaire de définir clairement les applications successives. Connaître le contexte lié à chacune des applications est primordial pour concevoir un produit. Mais, comme mentionné plusieurs fois, les applications ultérieures peuvent être floues au moment des étapes de conception primaires. Pour le repurposing, trois possibilités sont mises en avant :

- les applications ultérieures sont connues : elles sont alors brièvement décrites

⁴¹ Littéralement : activité routinière, habituelle

- o la première application est identifiée mais les suivantes sont floues et / ou le choix de la meilleure application ultérieure est influencé par la première utilisation, ce qui signifie que les applications ultérieures ne seront connues, au pire des cas, qu'à l'issue de l'évaluation des performances du produit : l'équipe de conception doit tenir compte des besoins de toutes les applications potentielles et les étapes de conception doivent permettre de faciliter la prise de décision quant à l'application ultérieure envisagée.
- o aucune application pour un second usage n'est identifiée, il semble souhaitable de s'orienter vers une autre stratégie, par ex. la modularité ou la servicisation car il pourrait être contre-productif (économiquement et/ou environnementalement) d'investir dans une stratégie de repurposing.

En tout état de cause, les applications successives seront probablement définies en fonction des opportunités de marché. Pour aider à la définition de cette étape, des questions directes concernant les diverses applications peuvent être posées au commanditaire de l'offre. D'autres outils, comme le brainstorming, incluant des parties-prenantes de l'ensemble du CdV, peuvent aider à identifier de potentielles applications.

Dans un second temps, lors des premières étapes de l'activité de (re)conception (description fonctionnelle notamment), nous recommandons aux équipes de conception de toujours garder une vue globale du système, ainsi qu'une vue spécifique à chaque phase d'usage. Cela est d'autant plus important lors des phases de revue de conception. Nous estimons qu'il est important, autant que possible, de ne pas dissocier les usages successifs. Le but étant de concevoir le produit comme répondant à un ensemble de besoins sur l'ensemble de son CdV avec un objectif d'optimisation globale. Dans un second temps, il est possible de décomposer les fonctions du produit en fonction de chacun des usages et spécifier quelles fonctions sont rattachées à quelle(s) phase(s) du CdV (applications ou processus de refabrication). Cela doit faciliter la compréhension de l'offre par les équipes de conception en apportant une image plus claire de ce qui sera attendu pour chacune des applications et faciliter la validation. L'interprétation du devenir de l'offre est simplifiée.

Exemple d'implémentation dans l'AF. La première des deux recommandations précédentes est en amont de l'AF et aucune adaptation n'est requise pour son implémentation avec cette méthode de conception. Les équipes de conception peuvent éventuellement utiliser des diagrammes d'expression des besoins (voir Figure 4, p 24) séparément et/ou conjointement selon leur préférence.

La seconde vise à décomposer les fonctions selon leurs liens avec les phases du CdV. Elles sont alors dissociées les unes par rapport aux autres et réparties selon leurs applications respectives ou le processus de repurposing. Le graphe des interactions est décomposé selon la

Figure 22. Il y aura donc au maximum quatre graphes pour un produit destiné à deux applications en cascade (un global, un pour le processus de refabrication et un pour chaque usage), six graphes pour trois applications en cascade, etc.. Les problématiques de fin de vie sont ici gérées au sein de chaque application. En fonction de la nature du produit et des applications, les phases de repurposing peuvent être groupées. Chacune des représentations est alors utilisée lors des mises en commun pour confronter les opinions des principales parties-prenantes.

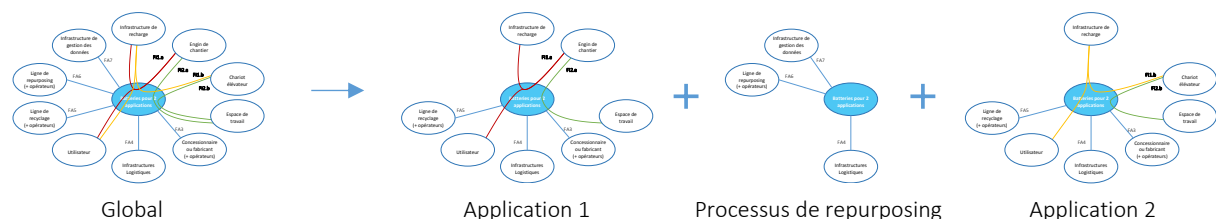


Figure 22 - Exemple de décomposition du graphe des interactions selon les phases du cycle de vie

4.2.3.3. Gérer et suivre l'information

La gestion et le suivi de l'information ont également été identifiés parmi les besoins primaires pour une meilleure gestion des offres de produits repurposés. En réponse, nous présentons ici les éléments spécifiques à considérer lors de la conception.

Recommandations information. Pour faciliter la gestion et le suivi de l'information d'une phase de conception à l'autre, nous proposons aux équipes de conception de s'intéresser aux solutions fonctionnelles de leurs offres. Tout d'abord, en décrivant les fonctions de leurs produits, à l'instar de ce que n'importe quelle activité de conception peut faire. La spécificité du repurposing veut que les fonctions soient décrites sur l'ensemble des usages successifs. Pour faciliter cette description, la Table 12, p 87, peut être utilisée, en complément d'une analyse classique, car ils représentent les dimensions principales et générales d'une offre de produits repurposés. Nous pouvons donc nous attendre à les retrouver lors des étapes de conception, tout au moins en partie. Une attention particulière doit être portée aux fonctions à l'interface des usages et à celles liées au processus de refabrication car elles ont une influence évidente sur l'ensemble du CdV du produit.

Une fois les fonctions établies, il est nécessaire de les préciser et de les caractériser. À cette étape, nous proposons aux équipes de conception de préciser quatre éléments spécifiques aux applications en cascade. Le critère 'flou' est destiné à apprécier le caractère incertain lié à la réalisation d'une fonction. En effet, lorsque les applications sont inconnues ou incertaines, il est important de pouvoir identifier cette caractéristique. À l'inverse, lorsque les critères d'évaluation et les fonctions sont clairement établis, il est important de pouvoir le formaliser. Le critère 'flou' est donc une indication du niveau de confiance vis-à-vis de la réalisation d'un critère d'appréciation et, par la même, d'une fonction. Ensuite, le critère 'critique' permet d'estimer la criticité d'un critère d'appréciation au regard de la stratégie de repurposing. Les équipes de conception doivent alors évaluer si ce critère remplit toutes les conditions suivantes :

- il est indispensable pour la réalisation de l'une des phases à minima,
- il a une influence sur plusieurs applications,
- il fait l'objet d'une attention particulière pendant le processus de refabrication.

La dégradation à l'usage, qui représente la dégradation potentielle des performances de la fonction au cours du temps, doit également être considérée. Elle permet de mieux apprécier les possibles pertes de performances pour évaluer au mieux le produit lors de sa réutilisation. Enfin, Les parties-prenantes sont précisées pour juger du lien plus ou moins fort qu'il peut y avoir sur certaines fonctions. Plus une fonction concerne de parties-prenantes, plus les compromis risquent d'être difficiles à trouver. Tous ces critères sont synthétisés dans la Table 13. Lors de la caractérisation des fonctions, il est recommandé de définir conjointement l'ensemble des critères présentés pour assurer un maximum de cohérence sur le CdV du produit. Cette caractérisation a été réalisée par plusieurs concepteurs de batteries du CEA-LITEN et est détaillée dans la section 5.2. Elle doit permettre de mettre en évidence certaines spécificités des fonctions qui sont propres à la stratégie de repurposing dans le but de mieux concevoir ces produits.

Table 13 - Définition des critères visant à caractériser les fonctions d'un produit repurposé

Critère	Définition
Critère 'flou'	Estimation par un expert de l'incertitude lié à la réalisation d'un critère d'évaluation d'une fonction, pour un usage donné. Varie de f0 (très incertain) à f3 (très confiant)
Critère 'critique'	Estimation de la criticité du critère au regard de la stratégie de repurposing (oui/non)
Dégradation à l'usage	Dégradation potentielle des performances de la fonction au cours du temps (%)
Parties-prenantes	Liste des parties-prenantes directement concernées par le critère

Exemple d'implémentation dans l'AF. La définition et la caractérisation des fonctions est l'une des étapes cruciales de l'AF. Au moment de cette étape, les critères propres au repurposing doivent être définis pour venir compléter cette description. En ce sens, le tableau représenté dans la

Figure 23 a été construit pour rassembler ces principaux éléments, en plus des éléments classiques à définir lors de la conception, et les définir conjointement sur les applications successives. Une version complète est disponible en Annexe 4.

Fonctions	Critères d'appréciation	Niveaux	Flexibilités* [Acteur i] (de 0 à 3)	Dégradation en cours d'usage (%)	Critère critique	Critère 'flou'
FI ou FA #1	1.1	Application #1	-			
		Application #2	-			
	1.2		-			
			-			
	1.3		-			
			-			
	1.4		-			
			-			

Figure 23 - Extrait du tableau de définition simultanée des fonctions pour des applications successives

4.2.3.4. Gérer les priorités inter-usages

Le dernier besoin identifié pour une activité de conception pour le repurposing est lié à la gestion des priorités entre les usages, ce qui se recoupe avec les besoins précédents. Pour cela nous proposons de travailler sur les besoins et les fonctions selon chacune des applications et d'intégrer une notion de flexibilité.

Recommandations pour la gestion des priorités inter-usages. Une fois l'ensemble des besoins pour chaque application décrit, et pour aider les équipes de conception à évaluer les priorités et dresser une image plus claire de la future offre, ceux-ci sont priorisés. Pour mieux évaluer la pertinence des besoins dans le temps, ils doivent être hiérarchisés par rapport aux applications successives. Pour mieux intégrer les spécificités de chacune des parties-prenantes, les besoins peuvent être évalués, dans un premier temps, par chacune d'entre elles. Par la suite, les écarts entre les points de vue sont gérés par les équipes de conception. À cette étape, pour établir une classification équitable, il est possible d'utiliser des matrices de comparaison 'Pairwise'⁴² (voir Figure 24) (Luczak, Gill et Sander 2007). Ainsi, chaque besoin est comparé aux autres dans le cadre d'une application spécifique. L'expertise des parties-prenantes oriente alors fortement les résultats. Ces dernières évaluent l'importance relative entre les besoins : plus, moins, ou d'égale importance. La hiérarchisation des besoins ne doit pas être établie entre les applications. L'offre évoluant d'un usage à l'autre au cours de son CdV, les priorités et les exigences sont amenées à évoluer. Enfin, les besoins sont réorganisés par ordre d'importance. Une première comparaison rapide peut alors être réalisée entre les différentes applications pour apprécier les corrélations entre les besoins tout au long du CdV du produit.

⁴² Littéralement, par pair. Les matrices Pairwise permettent une comparaison systématique des besoins, deux à deux.

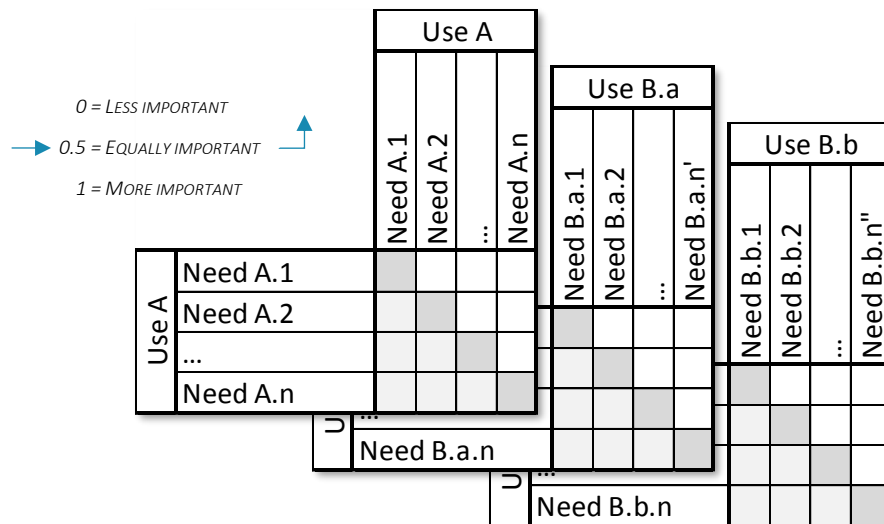


Figure 24 - Matrice de comparaison 'Pairwise' pour différentes applications

Dans le même esprit, les fonctions sont hiérarchisées. Pour ce faire, les équipes de conception peuvent les trier en fonction d'une ou plusieurs variables de décision définies lors de l'établissement des fonctions. Nous en avons mis en avant certaines, propres au repurposing, dans la Table 13. Elles peuvent être reprises et complétées par d'autres plus classiques. Elles sont récapitulées dans la Table 14. Ces variables peuvent ensuite être pondérées pour les différencier les unes des autres, par rapport à chacune des applications.

Table 14 - Variables de décision potentielles

Variables de décision potentielles
Coûts supérieurs à (%)
Critère 'critique'
Critère 'flou'
Dégradation maximale en cours d'usage (%)
Différence maximale entre 2 niveaux d'usage (%)
Externalités environnementales minimum (de E0 à E3)
Flexibilité (de F0 à F3)
Nombre maximum de parties-prenantes

Dans le cas où il existerait plusieurs applications floues pour le second usage, et une fois les fonctions priorisées, il est possible d'évaluer, à l'aide des variables de décision, quelles sont les applications les plus contraintes, celles qui vont nécessiter les changements les plus contraignants et celles qui permettront de maintenir le produit dans un niveau de performances suffisant pour qu'il soit réutilisé. Ainsi, il est possible de trancher entre les diverses applications pour choisir celles qui semblent les plus en phase avec la stratégie de repurposing. Malgré tout, il est essentiel de garder une certaine flexibilité au cours du CdV, notamment dans le cas où une reconception du produit soit nécessaire. L'évolution de la législation concernant les batteries au cadmium et en interdisant leur mise sur le marché illustre clairement que des événements non prévus peuvent venir perturber le scénario envisagé. Intégrer de la flexibilité doit permettre de parer à ces problématiques.

Ces étapes de priorisation permettent d'identifier quels sont les besoins et fonctions qui sont importants au regard de la stratégie de repurposing, pour chacun des usages. Ceci permet de mieux apprécier les attentes et le devenir du produit sur l'ensemble de son CdV.

Exemple d'implémentation dans l'AF. Ces recommandations sont d'ores et déjà présentes dans l'AF. Bien qu'aucun outil ne soit proposé pour décrire, formaliser et prioriser les besoins sur les applications successives, il est important de le faire pour avoir une image complète du système. Dans le cas contraire, on sort du cadre de la conception pour des applications en cascade. En ce qui concerne les fonctions, une fois établies, il est tout à fait possible de les hiérarchiser. L'intérêt d'utiliser les variables proposées est qu'elles ont déjà été définies et qu'elles intègrent certaines spécificités propres à la stratégie de repurposing.

4.2.3.5. Synthèse des éléments pour la conception

En réponses aux besoins identifiés pour la conception de produits repurposés, nous avons proposé plusieurs recommandations qui visent à mieux identifier, évaluer et accompagner la définition de cette stratégie. Tout d'abord, pour une meilleure identification des parties-prenantes et de leurs besoins, nous proposons au commanditaire et aux équipes de conception d'utiliser la Figure 21, p 92, et la Table 12, p 87. Ensuite, nous recommandons de préciser chacune des phases du CdV des produits. Dans un premier temps en définissant les applications successives prévues ou potentielles et, dans un second temps, en décrivant le produit fonctionnellement, comme une seule entité, sur l'ensemble de son CdV. Cette description doit également permettre de dissocier chacune des phases du CdV pour permettre de vérifier si le produit répond bien aux attentes pour chacune des applications. Nous proposons par ailleurs une gestion de l'information des aspects propres au repurposing pour faciliter les étapes du processus de reconception. Cela passe par la description des fonctions du produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Enfin nous recommandons de gérer les priorités d'un usage à l'autre en hiérarchisant et distinguant les besoins et les fonctions par rapport aux différentes phases de vie. Ces propositions visent la création de liens entre les différents usages, afin de faciliter la réutilisation de produits d'une application à une autre. Elles viennent donc bien en complément d'une activité de conception classique, propre à chaque structure.

4.2.4. Conclusions sur l'activité de conception

Cette seconde partie a mis en avant les propositions relatives à la conception de produits repurposés. En réponse aux différents besoins évoqués dans la littérature et plus spécifiquement à la section 4.2.1, nous avons investigué deux éléments qui relèvent de l'organisation de l'activité de conception pour l'un et de l'activité en elle-même pour l'autre.

Tout d'abord, concernant le CdV lié à une activité de repurposing, nous avons identifié plusieurs différences avec une activité de conception classique. En effet, le besoin de récupérer le produit en FdU, à l'instar des autres stratégies de réutilisation, est primordial pour le remettre sur le marché. Ensuite, plusieurs différences majeures au niveau de l'organisation du processus de conception sont à souligner. Bien que les applications doivent être définies le plus précisément possible pendant les étapes amont, lors de la phase de conception primaire, il se peut que les applications ultérieures ne le soient pas en totalité. Plusieurs raisons ont été évoquées : besoins flous, usage influant fortement sur les performances, faible visibilité économique, etc.. Une étape de reconception pour les produits repurposés devra donc être menée en amont du processus de repurposing pour optimiser les solutions ultérieures. En amont de cette phase de reconception, une étape dite de 'préparation' est ajoutée au CdV. Elle permet de dresser un état des lieux du produit par des diagnostics, avant un réemploi potentiel. Par la suite, et au même titre que la stratégie de remanufacturing, un processus de repurposing doit être mis en place pour adapter le produit à son nouvel usage. L'activité de conception pour le repurposing est centrée autour de la définition de l'ensemble des applications. Or, il est parfois impossible de prévoir certaines évolutions et une reconception est nécessaire. Le processus de conception proposé tient compte de cela. Lorsque les applications ultérieures ne sont pas totalement définies au moment de la conception initiale, il est nécessaire, en amont du processus de repurposing, de caractériser et de reconcevoir le produit.

Ensuite, nous avons formulé plusieurs recommandations pour la conception d'un produit repurposé. Ces recommandations ont pour objectif une meilleure intégration des spécificités propres à la stratégie de repurposing. Elles visent notamment à :

- pouvoir mieux identifier les parties-prenantes (et donc leurs besoins),
- permettre une meilleure prise en compte des phases du CdV des produits,
- faciliter la gestion de l'information pour davantage intégrer les étapes de repurposing,
- faciliter la gestion des priorités d'un usage à l'autre.

Ces différents éléments doivent permettre d'améliorer le produit dès les phases de conception primaire pour faciliter sa réutilisation dans une autre application. Pour chaque proposition formulée, un exemple d'intégration au sein de la méthode d'analyse fonctionnelle est décrit.

Bien que la stratégie de repurposing ait pour objectif de réduire l'empreinte environnementale des produits, les recommandations qui ont été formulées dans cette proposition ne relèvent en rien d'une stratégie d'éco-conception. C'est pourquoi l'évaluation des performances environnementales des produits repurposés est d'autant plus nécessaire pour s'assurer du bien-fondé de cette réutilisation. Mais, ici aussi, nous devons proposer des adaptations à la démarche d'ACV classique.

4.3. Proposition d'un cadre pour l'ACV des applications en cascade

Cette troisième partie s'intéresse davantage aux aspects environnementaux d'une stratégie de réutilisation en cascade. Et pour cause, l'étude de la littérature a mis en avant de nombreuses limites quant aux analyses de cycle de vie (ACV) réalisées sur des systèmes repurposés (voir section 2.3.3). Celles-ci témoignent notamment d'unités fonctionnelles différentes, d'hypothèses divergentes sur le second usage, de frontières et de dimensions temporelles distinctes alors que les sujets d'études sont les mêmes et les objectifs concordants. Par ailleurs, les résultats, également sujets à l'interprétation des auteurs, sont analysés différemment. Par rapport à tous ces éléments, nous avons formalisé notre troisième et dernière question de recherche :

'Quel cadre donner à l'analyse de cycle de vie de produits repurposés ?'

Nous proposons une approche en deux temps. Le premier vise l'établissement d'un cadre générique structurant la réalisation d'ACV de produits repurposés. La littérature apporte déjà des éléments de réponse sur ce premier point (voir section 2.3.4). En effet, la mise en place de cadres pour l'évaluation des impacts environnementaux des produits existe d'ores et déjà pour certaines stratégies de FdU. Ils peuvent être adaptés au repurposing pour permettre la réalisation d'ACV plus justes et plus facilement comparables. Nous montrons alors comment, dès la conception, la démarche et les outils doivent être adaptés pour faciliter la capitalisation des éléments utiles à la définition de l'ACV et au remplissage des différentes étapes de ces ACV d'applications en cascade.

4.3.1. Un cadre générique pour l'analyse de cycle de vie de produits en fin d'usage

Peters (2016) a mis en avant cinq recommandations pour la réalisation d'ACV de produits remanufacturés. Celles-ci permettent essentiellement de clarifier les étapes initiales de l'ACV décrites dans l'ISO 14040 (2006) et dans l'ISO 14044 (2006) : les motivations pour l'étude, le cadre, les contours ainsi que les principales hypothèses. Les étapes plus aval font également l'objet d'une attention de l'auteur, notamment ce qui relève de la répartition des impacts et de l'interprétation des résultats de l'étude ACV. Plevin, Delucchi et Creutzig (2014) émettent également un certain nombre de recommandations allant elles aussi dans ce sens. Les auteurs précisent que les motivations pour l'étude doivent être mentionnées dans le rapport d'ACV, tout comme les objectifs et le champ de l'étude. Enfin, ils ajoutent que la présentation des résultats doit autant que possible 'éviter toute mésinterprétation menant à une utilisation inappropriée' de ces derniers. La majorité de ces recommandations sont en lien avec les principales étapes des méthodologies plus générales sur l'ACV (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006; European

Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2010). Néanmoins, elles ont été complétées et adaptées à la stratégie de remanufacturing.

Les cinq recommandations de Peters (2016) et celles de Plevin, Delucchi et Creutzig (2014) ont été ré-adressées dans le cadre de l'ACV d'une offre de produits pour plusieurs usages. Nous proposons ici sept étapes pour définir le cadre, l'évaluation et la diffusion d'ACV de produits destinés à plusieurs usages. Chacune de ces étapes est décrites ci-après de manière générale. Nous précisons également, lorsque c'est possible, comment ces étapes peuvent être directement renseignées à partir des propositions précédentes. Ces précisions sont en italique.

1. Motivations initiales. Toute ACV est motivée par une ou plusieurs raisons. Connaître ces raisons permet de mieux apprécier le contexte de l'étude, ses objectifs, les diverses hypothèses qui ont été faites, mais surtout les intentions premières des commanditaires et/ou des ACVistes. Ainsi, il est plus facile de comprendre la démarche suivie et les résultats qui en découlent. Dans un système complexe où un produit est réutilisé pour d'autres applications, avoir une vision macro des motivations pour l'étude est nécessaire pour pouvoir comprendre les choix de modélisation opérés par la suite. Il est d'ores et déjà nécessaire de se renseigner sur les autres études ACV qui ont été réalisées, d'identifier les motivations qui ont poussé à leur réalisation, d'évaluer en quoi cela diffère de l'étude menée et quelles peuvent être les conséquences globales.

Pour l'aider à définir les motivations initiales, lorsque le commanditaire ne sait pas par où commencer, il peut s'appuyer sur les valeurs identifiées à la section 4.1.3.2 : mise en place d'une activité plus durable, prolongation de l'usage, préservation des ressources et intégration globale du CdV du produit.

2. Objectifs. Tout comme les ACV traditionnelles, il est nécessaire de définir les objectifs de l'étude, leurs buts, la question à laquelle les ACVistes doivent apporter un éclaircissement. Qu'il s'agisse simplement d'évaluer les impacts environnementaux, de comparer différentes versions d'un produit, d'un processus, des produits entre eux, etc., il est important de le préciser. Ici aussi, la prise en compte des études précédentes et semblables à celle en cours de réalisation est importante. Elle permet de mettre en avant les liens qui existent entre elles pour faciliter la comparaison des résultats à venir.

En accord avec les objectifs et les motivations, le premier choix à faire porte sur l'approche envisagée pour la réalisation de l'ACV : attributionnelle ou conséquentielle. Même si des parallèles peuvent être faits entre les deux méthodologies d'ACV, des différences fondamentales existent (voir section 2.3.2.2). Dans ces travaux de thèse, nous proposons de se focaliser essentiellement sur les besoins d'ACV attributionnelles pour le repurposing. L'ILCD Handbook note en effet que les ACV attributionnelles sont réalisées lorsque l'on considère un produit au sein d'une technosphère statique, ayant peu / pas de conséquences à une échelle plus large que la portée du produit étudié (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2010). Dans notre cas :

- la majorité des ACV réalisées pour des produits repurposés est aujourd'hui attributionnelle,
- la stratégie est très techno-centrée, les systèmes étudiés sont rarement plus larges que les produits dont il est question, voire ne sont qu'une partie d'un système plus large (ils composent un système ou sont inclus dans un service par exemple),
- il n'y a pas de bouleversement technologique attendu avec la stratégie de repurposing ; dans le cas contraire, cette dernière n'a plus lieu d'être car un saut technologique marquerait probablement la fin de l'utilisation de la technologie en question, ramenant l'objet de l'étude à un produit classique à un seul usage,
- la durée de vie totale des produits est courte à moyenne, soit de 3 à 15 ans selon les exemples de produits repurposés issus de la littérature,

- le caractère naissant de la stratégie fait qu'il n'y a pas de volumes de produits suffisants pour que les conséquences de la stratégie de repurposing influencent fortement le marché au point de devoir élargir les frontières de l'étude à une échelle macro ; l'étude restera donc à l'échelle du produit ou du système qui l'englobe et non au niveau d'un marché.

3. Champ de l'étude. Dans un troisième temps, les ACV de produits aux applications en cascade doivent préciser les éléments du champ de l'étude.

Il est question ici de définir le type de public visé, ce qui complète la définition du cadre général de l'étude et donne une direction de lecture lors de l'interprétation des résultats à venir. Il peut être précisé en accord avec les motivations initiales. En tout état de cause, les résultats d'ACV doivent à minima être accessibles aux parties-prenantes principales de l'offre.

Cette étape doit également permettre de justifier le choix quant aux indicateurs d'impacts environnementaux sélectionnés pour l'étude.

Le dernier point à définir, non moins important, concerne les frontières du système : les étapes du cycle de vie (CdV) considérées, la gestion des intrants et extrants et les règles de coupure. Les frontières sont d'autant plus importantes à définir que, pour le repurposing, diverses applications se succèdent. Une comparaison entre différentes alternatives et différentes études ne pourra se faire que sur la base de frontières identiques. Elles sont établies en fonction des objectifs préalablement définis.

En ce qui concerne le public visé par l'ACV, la réflexion s'appuie sur la définition des parties-prenantes, puis sur leur sélection. Il est nécessaire de s'appuyer en premier lieu sur la recommandation de la section 4.2.3.1 visant à faciliter l'intégration des parties-prenantes principales de l'ensemble du CdV. Pour les identifier, il est possible de s'appuyer sur la Figure 21, p 92, et la Table 12, p 87. La sélection se fait en fonction des motivations et des objectifs.

4. Référence quantifiée. Généralement incluse dans les étapes de définition des objectifs et du champ de l'étude, l'unité fonctionnelle (UF) est considérée comme le socle de toute ACV. Elle représente la 'performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence' (ISO 14040 2006). Au même titre que les ACV classiques, l'UF précise les conditions d'évaluation des impacts environnementaux et de leur comparaison. Elle rend compte des fonctions du système, de ses performances, de sa durée de vie et de son niveau de qualité. Dans le cadre des produits à usages en cascade, comme dans les ACV classiques, l'UF doit représenter le (les) service(s) rendu(s) par le système. Qualifier ce service rendu proprement n'est possible que si chaque application est décrite spécifiquement au sein de l'UF. Cette dernière doit donc être 'saucissonnée' en autant de morceaux que d'applications, dans l'hypothèse où les applications considérées ne rendent pas le même service. Dans l'esprit, il faut considérer les UF de chaque application de manière distincte, appelons celles-ci des UF de rang deux (UF_{rang2}). Prises séparément, les $UF_{\#2}$ doivent permettre l'ACV de chacune des applications. Lorsqu'elles sont agrégées les unes aux autres, elles composent l'UF du produit repurposé, appelons-la UF de rang un (UF_{rang1}). Cela peut se traduire sous la forme 'Permettre la réalisation de l' $UF_{rang2-A}$ ⁴³, puis de l' $UF_{rang2-B}$ ⁴³'. Ainsi, les impacts propres à l'ensemble des applications peuvent transparaître. Attention toutefois : la comparaison de deux produits singuliers et d'un produit repurposé doit être menée précautionneusement car les frontières peuvent évoluer (voir l'étape suivante).

L'établissement des UF repose sur différents éléments définis au cours de la conception. Cela débute par la définition de la fonction propre au système et passe par la précision de ses performances et de sa durée de vie. On retrouve les performances définies à la section 4.1.2.2 et la durée de vie qui fait nécessairement partie des objectifs définis précédemment. Les fonctions principales et les niveaux de

⁴³ Unité fonctionnelle de rang 2 représentant l'application A ou B

qualité associés sont des éléments définis lors des premières phases de conception. Les ACVistes peuvent s'appuyer sur ces phases, pour préciser les UF. À défaut, les différents éléments doivent être formalisés dans le cahier des charges fonctionnel.

- 5. Équivalence des systèmes.** Comme mentionné aux étapes 3 et 4, la comparaison de produits ne peut se faire que sur des bases identiques et, donc, des fonctions identiques. Celles-ci doivent être équivalentes en performance et en durée de vie, ou, à défaut, être adaptées à travers le flux de référence. La qualité du service rendu, plus difficile à apprécier au sein du flux de référence, doit également être précisée. Le flux de référence permet d'ajuster certaines différences entre des produits : comme le nombre de cycles d'utilisation, les écarts de performances, etc..
- Par ailleurs, les frontières doivent être équivalentes pour pouvoir comparer divers produits entre eux. À partir de la démarche classique de la littérature, il est précisé ici la manière dont cette équivalence est réalisée pour des produits repurposés. Dans le même esprit que la définition de l'UF, et pour les mêmes raisons intrinsèques à la stratégie de repurposing, la comparaison de tels produits est complexe et peut vite mener à des incohérences et/ou une manipulation des résultats si elle n'est pas réalisée de manière transparente. Plusieurs règles issues des cas généraux s'appliquent aux ACV attributionnelles de produits repurposés :
- Avoir les mêmes fonctions. Les fonctions des produits sont la base de toute comparaison en ACV, quel que soit le type d'ACV investigué. Étant donné que l'étude porte sur les impacts relatifs au service rendu par les produits, leurs fonctions sont les vecteurs de cette comparaison.
 - Délimiter l'étude. Pour pallier à une divergence de fonctions, les frontières peuvent être réajustées pour inclure ou exclure certaines spécificités du produit, rendre les systèmes fonctionnellement équivalents et donc comparables. En fonction des objectifs, les impacts environnementaux du produit peuvent être alloués par rapport à une variable prédéfinie (fonctions, application 1 ou 2, phase du CdV, etc.). Trois types d'allocations, issues de la littérature, peuvent être utilisés. Elles sont présentées par ordre de préférence.
 - a. La subdivision. Cela consiste à attribuer les impacts correspondant à chaque variable. Par exemple, les impacts liés aux flux de l'application 1 sont attribués à l'application 1 et ceux de l'application 2 à l'application 2. La difficulté ici est de pouvoir tracer ce qui appartient à qui, ce qui, a fortiori, n'est pas toujours possible. Cela est particulièrement mis en évidence pour la subdivision des impacts des phases de fabrication et de refabrication qui, pour de la conception pour du repurposing, ne peuvent pas être totalement dédiés à une application spécifique. Il est possible de se référer à la
 - b. Figure 22 p 95 pour une meilleure représentation de ce qui appartient à telle ou telle phase. À partir de là, les impacts des éléments n'appartenant qu'à l'une des phases peuvent y être rapportés. Pour les autres, voir les points suivants.
 - c. L'extension des frontières. Les frontières du système sont élargies pour inclure les fonctions manquantes. Des produits, ou des composants complémentaires sont ajoutés pour permettre une comparaison sur des bases équivalentes. La comparaison s'effectue alors sur le système aux frontières élargies. Il n'est pas question de déduire les impacts environnementaux de la partie ajoutée, bien que ce soit souvent le cas dans les études sur les produits repurposés. Par exemple, l'application 1 d'une batterie de véhicule électrique (VE) repurposée serait comparée aux impacts d'un véhicule thermique, moins les impacts d'une batterie stationnaire. Cette substitution n'est tolérée que pour des ACV consécutives. Alors, la comparaison des impacts d'une batterie de VE repurposée dans une application de stockage stationnaire, comparée à ceux d'un véhicule thermique ou hybride plus les impacts d'une batterie conçue spécifiquement pour du stockage stationnaire serait plus rigoureuse.
 - d. L'allocation selon des clefs spécifiques. Souvent basées sur des critères physiques, elles peuvent être liées à des critères fonctionnels, économiques, etc.. Les impacts sont alors répartis, au choix, en fonction de la durée de vie dans chacun des usages, de leur valeur économique pour chacune des applications, etc..

Pour des raisons évidentes de réutilisation du même produit, ou des mêmes composants, dans des applications différentes, la subdivision ne semble pas être applicable au repurposing car les fonctions des produits sont entremêlées d'un usage à l'autre. Dans la majorité des études de produits repurposés, il est nécessaire d'étendre les frontières ou d'allouer les impacts selon des clefs spécifiques qui peuvent être définies en fonction des spécificités des usages et/ou par rapport aux études précédentes. Ici aussi, l'attention portée aux études passées permet d'apprécier la manière dont a été réalisée la répartition des impacts et, éventuellement, de proposer des scénarios similaires qui faciliteront la comparaison entre les impacts.

Les traitements en fin de vie (FdV) sont gérés à l'identique des autres stratégies. Les bénéfices et impacts qu'ils génèrent sont répartis sur l'ensemble du CdV, à l'instar de ce qui a été décrit précédemment.

Pour évaluer la répartition des impacts environnementaux, les ACVistes doivent dans un premier temps comparer uniquement le système dans son ensemble. Par la suite, ils peuvent s'appuyer sur les frontières préalablement définies, le processus de repurposing (voir section 4.1.1.2) et les études ACV antérieures pour définir des clefs d'allocation cohérentes entre ces différentes études. Les frontières permettent d'évaluer quels sont les éléments qui appartiennent spécifiquement à l'une ou l'autre des applications (notamment au niveau des usages). Le processus de repurposing peut aider à évaluer les efforts spécifiquement déployés pour la seconde application et en déduire ceux liés à la première. Toutefois, nous préconisons de ne pas dissocier les impacts environnementaux en fonction des applications pour des raisons évidentes de représentativité des impacts du système. Il est préférable de rester global. Si toutefois les ACVistes et/ou commanditaires souhaitent plus de précisions quant aux impacts relatifs aux différents usages, nous conseillons une répartition en fonction des principales phases du CdV, comme par exemple : fabrication/refabrication, transport/utilisation 1, transport/utilisation 2, FdV. Ainsi, les phases 'spécifiques' à chaque application sont clairement dissociées des phases 'communes'.

- 6. Analyses de sensibilité et incertitudes.** Les études ACV classiques recourent à la réalisation d'analyses de sensibilité pour confronter les hypothèses prises tout au long de la modélisation. La stratégie de repurposing se doit de se conformer à cette règle de modélisation élémentaire, d'autant plus que la succession des usages induit davantage d'hypothèses et de variabilités qu'à l'accoutumée. Dès lors, il est nécessaire de faire varier ces hypothèses par rapport aux autres valeurs disponibles. Il est là encore possible de faire des parallèles avec les autres études ACV déjà réalisées pour faire évoluer les hypothèses prises établies lors des étapes précédentes (voir Troussier et al. 2017).

Les analyses de sensibilité peuvent s'appuyer sur les caractéristiques des fonctions définies lors des étapes aval de la conception, comme mentionné à la section 4.2.3.3. Il est alors possible de commencer par les éléments les plus importants au regard du système. En ce sens, la hiérarchisation aide. Bien que les fonctions soient caractérisées suffisamment dans le détail pour mener à bien les premières analyses de sensibilité et évaluer la réponse environnementale du système face à l'évolution de l'un ou plusieurs de ses paramètres, il est nécessaire de prendre en compte les aspects propres à la stratégie de repurposing. Pour ce faire, les ACVistes peuvent s'appuyer sur les critères visant à caractériser les fonctions d'un produit repurposé définis dans la Table 13, p 96.

- 7. Exploitation des résultats.** La finalité de toute ACV est de pouvoir répondre aux objectifs établis initialement pour rendre compte des impacts potentiels des produits étudiés, de la manière la plus transparente possible. La section du rapport restituant les résultats doit faire apparaître clairement les éléments précités ainsi que les limites de l'étude qui pourraient les remettre en question. Rien ne semble ici spécifique au repurposing. Par ailleurs, comme le précisent Plevin, Delucchi et Creutzig (2014), en référence à l'ISO 14044 (2006) : les ACVistes 'doivent également clairement préciser que les résultats d'études ACV ne sont généralement pas comparables sans une harmonisation préalable, pas toujours réalisable'.

Synthèse. La comparaison de produits repurposés, bien que très semblable sur le papier à celle des produits d'autres stratégies, n'est pas si aisée. Nous en voulons pour preuve la revue de littérature qui a montré des résultats forts différents selon les études (voir section 2.3.3.1). D'autant plus que Plevin, Delucchi et Creutzig (2014) précisent que, d'une étude à l'autre, les résultats doivent être harmonisés pour être comparés et que, malgré tout, cela ne suffit parfois pas à rendre une comparaison possible. Le cadre proposé ici se veut faciliter ces comparaisons et pallier aux difficultés actuelles.

Pour la plupart des étapes, des pistes sont proposées aux ACVistes pour recueillir les informations leur permettant la réalisation des ACV et en adéquation avec la réalité du CdV du produit. La majorité des informations a d'ores et déjà été définie lors des étapes de conception. Nous émettons plusieurs recommandations visant à adapter les outils des équipes de conception pour en faciliter la récolte par les ACVistes. Les besoins sont transcrits ci-après et des recommandations sont formulées.

4.3.2. Des recommandations spécifiques à la réutilisation en cascade

Dans un premier temps nous évaluons les besoins des ACVistes afin de faciliter la récolte d'informations en vue de l'évaluation des produits repurposés, avec autant de rigueur et de précision que possible. Ces besoins font écho au cadre proposé à la section précédente. Ensuite nous décrivons les modifications à apporter lors de la conception pour répondre à ces besoins.

4.3.2.1. Des besoins pour l'ACV tirés du cadre générique

Afin de compléter chacune des étapes présentées à la section précédente, plusieurs besoins d'adaptation des outils des équipes de conception remontent. Ceux-ci sont formalisés ci-après.

Formaliser les objectifs de l'ACV. En premier lieu, il convient de définir le but de l'ACV, les raisons pour lesquelles cette étude environnementale est réalisée, car de cela va dépendre son orientation.

De plus, il convient de préciser le type d'ACV réalisée (attributionnelle ou conséquentielle), bien que nous recommandions l'ACV attributionnelle pour des raisons évoquées à la section 4.3.1.

Définir le champ de l'étude. Lors de la définition du champ de l'étude, le public visé, les catégories d'indicateurs environnementaux retenues et les frontières doivent être définis. Les deux premiers points sont intrinsèques à l'étude ACV, le dernier est défini lors du processus de conception, mais n'est pas clairement formulé. Les frontières de chaque application doivent donc être précisées lors du processus de conception.

Réaliser des analyses de sensibilité et d'incertitudes. L'un des points clefs lors de toute ACV est la phase où les hypothèses sont testées. Celles-ci sont particulièrement nombreuses pour un système repurposé. Elles comprennent à la fois les hypothèses classiques de modélisation, mais également les hypothèses relatives aux phases d'usage et prises en cours de conception. Par exemple, nous entendons par là les influences quant aux choix d'applications, les hypothèses sur la quantité de produits repurposés, sur la dégradation à l'usage, etc.. Il faut également évaluer, comme pour toute ACV, le degré de sensibilité relatif aux hypothèses établies. Il est aussi important de préciser le niveau d'incertitudes propre à l'analyse réalisée et aux données collectées (voir Troussier et al. 2017).

Ces différents besoins nécessitent d'être mieux considérés dès les phases de conception pour qu'ils puissent être facilement définis au moment de la réalisation de l'ACV. Nous présentons nos recommandations ci-après.

4.3.2.2. Des adaptations à considérer lors de l'activité de conception, en vue de l'ACV

Dans cette section, plusieurs recommandations sont formulées. Celles-ci visent à adapter la démarche et les outils des équipes de conception pour simplifier certaines étapes de l'ACV, importantes dans le cadre d'un produit repurposé. Elles sont détaillées ci-après.

Objectifs. Les objectifs de l'ACV et ceux de la conception sont souvent corrélés et peuvent être définis en parallèle. Ainsi, lors de la définition des objectifs de conception, il est important de questionner les décideurs quant à leurs attentes environnementales vis-à-vis du produit. Les ACVistes n'auront alors qu'à reformuler ces objectifs dans le cadre de l'ACV.

Par ailleurs, en fonction de ces objectifs, les ACVistes déterminent si l'ACV est attributionnelle ou conséquentielle. Pour faciliter ce choix, certains des arguments avancés à la section 4.3.1 doivent ressortir lors des phases de conception, à savoir si :

- le système repurposé étudié est intégré dans un système opérant à large échelle (plutôt pro-conséquentiel), ce qui n'est pas notre cas vu l'ampleur des batteries réutilisées pour des applications en cascade,
- il existe une évolution technologique forte entre le système repurposé étudié et d'autres systèmes répondants aux mêmes besoins (plutôt pro-conséquentiel), ce qui n'est pas le cas ici car sinon la stratégie de repurposing n'est plus viable (voir section 4.3.1, point 2),
- la durée de vie totale du système repurposé est courte à moyenne, soit de 3 à 15 ans (plutôt pro-attributionnel).

Champ de l'étude. Pour une meilleure définition des frontières, il faut que, lors de l'activité de conception, chacune des phases du CdV soit décrite de la manière la plus fine possible. Cette recommandation est équivalente au second temps de celle faite à la section 4.2.3.2. Il est donc doublement important de bien spécifier chacune des phases du CdV (application 1, application 2, processus de refabrication, etc.). Décrire les différentes étapes du CdV à l'aide de la Figure 21, p 92, va permettre aux ACVistes d'évaluer plus précisément les éléments du CdV et de chacun des usages.

Analyses de sensibilité et incertitudes. Nous ne nous intéressons ici qu'aux hypothèses propres à la stratégie de repurposing, ce qui ne signifie pas que celles prises lors de la réalisation d'une ACV ne doivent pas être éprouvées. Nous exposons ici plusieurs pistes de réflexion à considérer en fonction des situations.

Tout d'abord, les ACVistes peuvent évaluer les paramètres jugés importants et ayant été considérés comme critiques au regard de la stratégie de repurposing. Ces éléments ont normalement dû être identifiés lors de la phase de définition des fonctions. Leurs valeurs limites doivent y être précisées.

Ensuite, les paramètres sujets à de fortes variabilités doivent également être intégrés au cours de l'analyse de sensibilités. En fonction des objectifs de l'ACV, les résultats finaux peuvent varier fortement par rapport aux hypothèses prises. Ceux-ci ont également été précisés lors de la définition des fonctions.

Enfin, lorsque l'ACV est réalisée a posteriori (ce qui est le cas le plus courant), il est important de pouvoir identifier quels sont les fonctions et les paramètres qui ont été les plus discutés par les parties-prenantes par rapport aux usages successifs. Il ne faut pas seulement alors avoir accès à la valeur finale consensuelle, mais également aux plages jugées comme acceptables par chacune des parties-prenantes, en fonction de l'usage. En effet, les décisions prises dans le cadre de la conception pour le repurposing peuvent être différentes de celles d'une conception pour un usage, ce qui amène les ACVistes à considérer davantage de possibilités, notamment lors de l'analyse de sensibilité. Ainsi, lors de l'établissement des fonctions et de leurs paramètres, il faudrait que les équipes de conception renseignent les desideratas de chacune des parties-prenantes. Cela peut être réalisé par l'ajout d'un critère dans la Table 13, p 96, ce qui signifie l'ajout d'une colonne dans le tableau de la Figure 23 p 97.

Par l'intégration de ces quelques recommandations, certains des points clefs de l'ACV de produits aux applications en cascade devraient être levés.

4.3.3. Synthèse et piste d'implémentation pour l'ACV

En réponse aux manques identifiés dans la littérature relative aux ACV de produits repurposés, un cadre en sept étapes est proposé. Celui-ci suit à la fois les travaux de Plevin, Delucchi et Creutzig (2014), les

recommandations de Peters (2016) et correspond plus généralement aux éléments à définir dans le cadre d'une ACV classique (ISO 14040 2006). Notre proposition ici vise à définir un référentiel inspiré de ces études et adapté à la réalisation d'ACV de produits repurposés. Les ACVistes pourront ainsi plus facilement tenir compte des spécificités qui sont propres à ces produits. En effet, la complexité des modélisations ACV pour les produits aux applications en cascade nécessite davantage de rigueur et de précisions que pour des produits à application unique.

Pour faciliter la récolte d'informations nécessaires au remplissage de ce cadre, nous avons émis trois recommandations à intégrer dès la conception du produit. Les deux premières, relatives à la définition des objectifs et du champ de l'étude, impliquent une meilleure formalisation de l'information au cours du processus de conception. Cette information sera réutilisée par les ACVistes de manière à préciser leur modèle. La troisième recommandation, liée à la définition des analyses de sensibilité, vise à tracer, au cours du processus de conception, les paramètres sur lesquels reposent des hypothèses fortes pour l'ensemble des usages. Certains peuvent être aisément identifiés, en accord avec les recommandations faites pour la conception (voir section 4.2.3). D'autres sont moins identifiables et nécessitent une attention particulière de la part des équipes de conception dès le début du projet.

Ces propositions visent la réalisation d'ACV de produits repurposés de manière plus juste. De plus, elles cherchent à améliorer la comparabilité entre les études. Un récapitulatif est présenté dans la Figure 25. Une première implémentation de ce cadre et des recommandations est réalisée au Chapitre 5. Elle a pour objectif de l'illustrer pour en donner une meilleure compréhension.

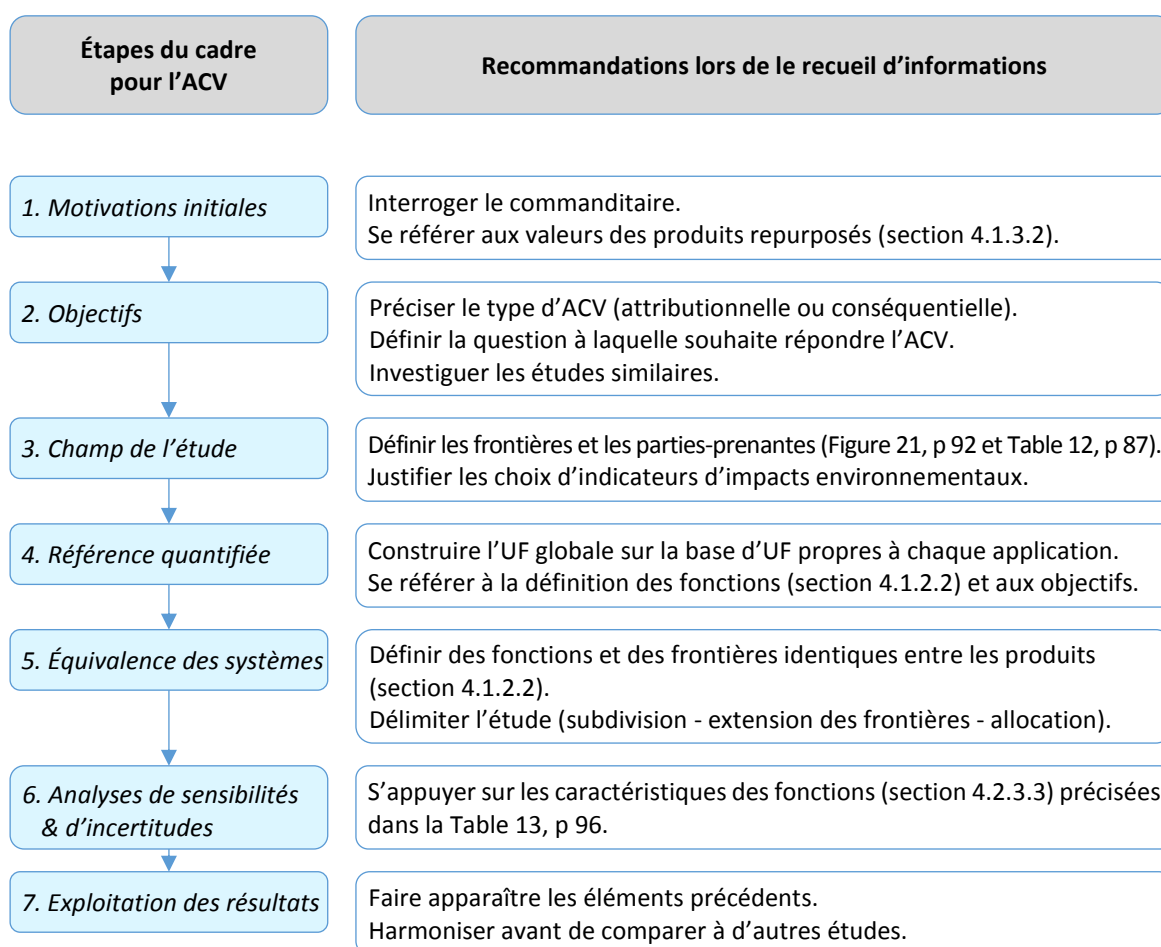


Figure 25 - Récapitulatif des actions et outils en support à l'ACV de produits repurposés

4.4. Conclusions

Le repurposing est une stratégie de fin d'usage à part entière. Les valeurs qui y sont associées sont essentiellement tournées autour d'un développement durable et d'une production responsable. De fait, la réutilisation du produit pour des applications en cascade permet de prolonger sa durée de vie et de limiter les pressions environnementales sur les ressources qui y sont liées. Dans la première partie de ce chapitre, sur la base de la littérature et d'entretiens et à partir du cas d'étude batterie, nous avons proposé une caractérisation de la stratégie de repurposing pour un usage en conception. Nous avons tout d'abord identifié les dimensions qui étaient propres aux produits, processus de (re)fabrication et modèles d'affaire des stratégies de repurposing. Par rapport à l'étude de la littérature relative aux stratégies de fin d'usage (voir section 2.1.2), de nouvelles dimensions ont été soulevées (voir section 4.1.3). Comme mentionné précédemment, ces dimensions dépendent les unes des autres. Les choix de conception effectués en faveur de l'une vont nécessairement en influencer d'autres. Ceci est d'autant plus important à prendre en compte que certaines dimensions sont axées sur la première application alors que d'autres sont spécifiques à une application ultérieure.

Par ailleurs, du fait d'un enchaînement d'usages pour des applications distinctes, les processus de conception qui y sont liés sont très spécifiques. L'organisation de ces processus de conception l'est tout autant. En ce sens, nous avons proposé une représentation de l'ensemble du cycle de vie (CdV) d'un produit repurposé, incluant les différentes séquences de conception possibles (voir section 4.2.2). Ainsi, que les applications ultérieures soient floues au moment de la conception initiale ou déjà bien identifiées, une phase de reconception semble très souvent nécessaire. A minima pour évaluer les performances du produit et son état de santé et préciser le processus de repurposing en vue de l'application suivante. En complément, nous avons proposé plusieurs recommandations pour faciliter l'activité de conception primaire et mieux intégrer les éléments liés à la stratégie de repurposing (voir section 4.2.3). Celles-ci tournent autour de l'identification des parties-prenantes et de leurs besoins, de l'intégration des différentes phases du CdV, d'une meilleure gestion de l'information tout au long du CdV mais notamment en vue des étapes de refabrication et enfin de la gestion des priorités inter-usages en conception. Elles sont exemplifiées par rapport à la démarche d'analyse fonctionnelle.

Du point de vue de l'évaluation des performances environnementales des offres de produits repurposés cette fois-ci, plusieurs différences apparaissent avec les autres stratégies de fin d'usage. La complexité du cycle de vie des offres en cascade, mis en avant dans la section 4.2, y contribue fortement. La littérature ayant mis en évidence des différences significatives lors de la réalisation d'analyses de cycle de vie (ACV) dans ce contexte, nous proposons un cadre pour en faciliter leur réalisation (voir section 4.3.1). Sept grandes étapes inspirées de la littérature classique et des spécificités des stratégies de réutilisation (remanufacturing notamment) le composent. Au-delà de ce cadre, plusieurs pistes sont émises pour la collecte des informations nécessaire à son remplissage (voir section 4.3.2). Ainsi, les ACVistes peuvent, en parallèle des étapes de conception du produit et lorsque son CdV est précisément défini, initier la première phase de l'ACV - *définition des objectifs et du champ de l'étude* - tout en préparant l'interprétation des résultats. Les étapes de conception doivent tantôt formaliser davantage certaines informations, tantôt en intégrer de nouvelles afin d'alimenter les étapes amont de l'ACV. Ceci devrait permettre de simplifier le travail des ACVistes, d'améliorer la compréhension des équipes de conception sur cette activité et, surtout, de faciliter l'établissement et la comparaison d'ACV entre elles, dans le cadre de la stratégie de repurposing.

Pour illustrer les propositions qui ont été faites dans ce chapitre, le chapitre suivant consiste en l'implémentation et la mise en usage des outils et recommandations proposés ici.

Résumé du chapitre. Ce chapitre rend compte de l'implémentation des propositions présentées au Chapitre 4, au sein d'une démarche de conception, et discute ensuite les résultats obtenus. Dans un premier temps, le contexte global est présenté. Ensuite, nous mettrons en usage les différentes propositions au sein de la démarche d'analyse fonctionnelle (AF) et le cadre pour l'analyse de cycle de vie (ACV) sera illustré sur deux exemples. Enfin, les différentes propositions seront discutées pour évaluer ce qui a fonctionné de ce qui a moins bien marché, ainsi que les éléments qui ont été jugés pertinents de ceux qui l'étaient moins. Tout au long de cette mise en usage, nous nous basons sur l'exemple des batteries.

Sommaire.

5.1	Contexte	110
5.1.1	L'activité de conception de batteries à application unique au CEA	110
5.1.2	Présentation des séances de travail sur la phase préliminaire de conception d'une batterie repurposée	111
5.1.2.1	Organisation des séances et intervenants	111
5.1.2.2	Un cas d'application pour la réutilisation	111
5.2	Mise en usage des propositions dans une démarche de conception	112
5.2.1	L'expérimentation des propositions relatives à la conception de produits repurposés	112
5.2.1.1	Étape 1. Expliciter l'application	112
5.2.1.2	Étape 2. Définir les objectifs	113
5.2.1.3	Étape 3. Rassembler les besoins	113
5.2.1.4	Étape 4. Prioriser les besoins	115
5.2.1.5	Étape 5. Établir les fonctions	117
5.2.1.6	Étape 6. Décomposer les applications	119
5.2.1.7	Étape 7. Caractériser les fonctions	120
5.2.1.8	Étape 8. Prioriser les fonctions	121
5.2.1.9	Conclusion sur l'expérimentation et les propositions qui s'y rattachent	121
5.2.2	Illustration de la dernière proposition : un cadre pour l'analyse de cycle de vie de produits aux applications en cascade	122
5.2.2.1	Évaluation à partir d'une seule application	122
5.2.2.2	Évaluation sur l'ensemble du CdV	125
5.2.2.3	Synthèse concernant le cadre pour l'ACV de produits repurposés	127
5.2.3	Conclusion sur la mise en usage des propositions	127
5.3	Discussions autour des propositions	128
5.3.1	Dimensions et caractéristiques d'un produit aux applications en cascade	128
5.3.2	Processus de conception d'un produit repurposé	130
5.3.3	Le repurposing cadré pour l'ACV	131
5.4	Conclusions	132

Le chapitre précédent a présenté les propositions de ces travaux de thèse. Celui-ci les illustre et les discute.

5.1 Contexte

Cette première section vise à présenter et contextualiser la démarche menée lors de la mise en usage des propositions. Nous présentons tout d'abord l'activité de conception de batteries telle qu'elle est menée aujourd'hui au sein du CEA. Ensuite, nous détaillons la mise en place de l'expérimentation menée dans le cadre de ces travaux de thèse et par rapport à la conception pour plusieurs usages.

5.1.1 L'activité de conception de batteries à application unique au CEA

Afin de pouvoir mieux évaluer les apports des propositions et de faciliter les discussions, nous présentons ici succinctement les principaux éléments relatifs à la conception de batterie pour une application unique, au sein des équipes du CEA.

Un peu d'histoire. Au CEA, organisme de recherche technologique, peu avant les années 2000, des travaux sur les accumulateurs ont été initiés, notamment au niveau des développements chimiques. Par la suite, les activités se sont principalement structurées autour du développement de grands projets en lien avec les véhicules électriques (VE) et les batteries au lithium. Celles-ci ont été impulsées par les premiers retours d'expériences sur les VE, la mise en place du Grenelle de l'environnement et aussi divers projets industriels.

La conception à proprement parler. Les équipes du CEA sont intégrées dans de nombreux projets visant l'électrification de véhicules. Il s'agit d'une part du développement des concepts et des architectures globales des systèmes, et d'autre part de la conception des architectures mécanique, électrique et thermique. Deux types d'équipes traitent ces problématiques. L'une est orientée 'applicatif' et vise le développement de solutions en réponse à un besoin client. L'autre est orientée 'exploratoire' et cherche à développer des solutions et des technologies de rupture.

De par leur activité, les équipes de conception du CEA s'intéressent à l'ensemble du processus de conception (voir Figure 15, p 46). Cela commence par les premières étapes, dès l'analyse des besoins, avec l'accompagnement du client dans la définition du cahier des charges (CdC) et la définition des spécifications techniques. Le besoin est précisé, voire redéfini avec le CEA. Par la suite, les principes généraux sont décrits (chimie, technologie de refroidissement, stratégie de gestion du BMS) et le concept émerge. Son architecture est détaillée (choix des types de technologies pour le BMS : microcontrôleur, micro-box). Il est lui-même détaillé en fonction de chaque métier (types d'accumulateurs, leur nombre et leur agencement). Une fois la conception détaillée achevée, une première boucle d'itération pour réinterroger les spécifications est réalisée à ce stade. À l'issue de cette phase, un prototype est réalisé et testé. Une seconde boucle d'itération vise alors à réinterroger le concept.

Parties-prenantes associées. Les équipes du CEA travaillent parfois de pair avec des industriels. Lorsque le projet est d'un TRL⁴⁴ de 3 ou moins, celles-ci peuvent travailler seules. Si le projet vise un développement au-delà d'un TRL 3, il est nécessaire d'intégrer un partenaire industriel.

Dans le cas présent, le client est associé à l'étape initiale d'analyse des besoins, avec l'équipe 'architecture système'. Cette même équipe gère seule l'ensemble des étapes de définition préliminaires jusqu'à la conception architecturale. Au moment de la conception détaillée et de la phase de tests, d'autres équipes 'métier' interviennent au niveau de l'architecture mécanique, électrique, thermique, des tests à réaliser, etc..

⁴⁴ Technology Readiness Level : niveau de maturité d'un projet

5.1.2 *Présentation des séances de travail sur la phase préliminaire de conception d'une batterie repurposée*

Plusieurs séances de travail ont été réalisées avec pour objectif la mise en usage des propositions présentées au Chapitre 4 dans le cadre du repurposing de produits. Elles sont axées sur les premières étapes du processus de conception. Nous présentons l'organisation de celles-ci et le cas d'étude retenu ci-après.

5.1.2.1 *Organisation des séances et intervenants*

Pour tester les propositions, nous avons organisé une séance de travail en groupe au sein de laquelle différentes personnes étaient présentes : deux industriels, dont un recycleur de batteries et un concepteur et fournisseur de batteries, et des experts en recherche et développement (R&D), venant du CEALITEN de Grenoble et Chambéry. Cette séance de 3h, précédée d'une phase de préparation, s'est tenue fin août 2017 à Grenoble. Elle a donc réuni :

- deux concepteurs de batteries en R&D, dont un expert en architecture électrique de batteries (R&DELEC) et un expert du système de gestion des batteries (R&DBMS),
- un intégrateur en R&D de batterie (R&DINTEG),
- une experte en éco-conception et éco-innovation en R&D (R&DECO²),
- un expert en R&D au niveau de la gestion et de l'instrumentation des batteries (R&DINSTRUM),
- un intégrateur et fournisseur de batteries représentant les intérêts du client et désireux de développer une stratégie de repurposing (INDUS.INTEG),
- un expert en R&D vis-à-vis du recyclage des batteries (R&DRECYCL), et
- un industriel, recycleur de batteries (INDUS.RECYCL), gérant les aspects logistiques de fin de vie (FdV) et souhaitant développer une stratégie de repurposing de batteries.

Les personnes présentes avaient une bonne vision de la majeure partie du CdV du produit et endossaient parfois plusieurs rôles. On note en effet la présence des intérêts du client (à travers INDUS.INTEG), d'équipes de conception, d'un logisticien, du recycleur, etc.. Selon leurs expériences, leur approche de la conception était différente.

L'objectif était ici d'initier la conception d'un produit aux applications multiples en formalisant les besoins successifs et en précisant les fonctions. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les premières étapes de la démarche d'analyse fonctionnelle (AF), comme présenté au Chapitre 3, sur lesquelles nous sommes venus implémenter nos propositions.

En complément, plusieurs séries d'entretiens individuels semi-directifs (EISD) ont été réalisés pour venir préciser les certains éléments de la séance en groupe. Certaines des recommandations ont pu y être testées. La première série d'entretiens a permis de repréciser les besoins apportés par les principaux experts : INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL. La seconde a permis de préciser les fonctions attendues sur les applications successives. Ces entretiens ont été menés avec : R&DELEC, R&DBMS, et R&DRECYCL. Tous se sont tenus du 20 octobre au 17 novembre de la même année, toujours à Grenoble, et ont duré entre 1h30 et 2h chacun.

5.1.2.2 *Un cas d'application pour la réutilisation*

À l'instar de la littérature, et dans le cadre de l'implémentation des recommandations de conception pour le repurposing, nous allons également nous intéresser aux batteries au lithium. Mais, contrairement aux études présentées, cela ne concerne ni l'application véhicule électrique en premier usage, ni les possibles applications de stockage d'énergie stationnaire en seconds usages. Notre cas d'étude est orienté uniquement autour d'applications de mobilité : les engins de chantier en première utilisation et les chariots élévateurs en seconde.

Les engins de chantier ont des applications nécessitant une densité d'énergie volumique très importante, de l'ordre de 100 Wh/kg et des tensions de fonctionnement allant jusqu'à 700 V. Elles sont soumises à un environnement extérieur potentiellement difficile (chocs, poussière, pluie, sel, etc.) et doivent fonctionner même si un défaut apparaît.

En comparaison, les chariots élévateurs ont des applications moins exigeantes. Les densités d'énergie requises sont souvent de l'ordre de 30 à 40 Wh/kg, ce qui signifie que la batterie au plomb suffit souvent et opère sous une tension allant jusqu'à 80V. Le plus souvent, il n'y a pas besoin de conditionner les batteries en température car elles opèrent en intérieur et ne sont que peu sollicitées.

5.2 Mise en usage des propositions dans une démarche de conception

Au sein de cette section, les propositions sont testées. Pour les propositions 1 et 2, l'objectif est de valider leur emploi au sein d'une démarche classique de conception et dans un objectif multi-applications. Pour ce faire, nous avons reconstitué, au travers différentes séances de travail, une démarche de conception basée sur l'analyse fonctionnelle (AF). Les résultats de ces séances sont présentés étape par étape. À chaque étape, nous précisons la (ou les) proposition(s) et/ou recommandation(s) utilisée(s) et mettons en avant son utilité. La validation de ces propositions s'est effectuée de deux manières. La première consiste en leur emploi effectif lors des séances de travail. La seconde par une appréciation subjective de la part des participants. Par la suite, nous exposons comment le cadre destiné à faciliter l'analyse de cycle de vie (ACV) de produits repurposés peut être utilisé. Ce dernier n'a pas été testé au cours des entretiens car il n'influe pas la conception. Nous utilisons en revanche les éléments des séances de travail pour le compléter. Sur ce second point, nous nous appuyons sur l'expérience d'AC-Viste de R&DECO² ainsi que des compétences disponibles dans le laboratoire G-SCOP.

5.2.1 L'expérimentation des propositions relatives à la conception de produits repurposés

L'activité de conception a débuté par la récolte des besoins des différents experts, couvrant ainsi l'ensemble du cycle de vie. L'objectif ici est d'en dresser un bilan exhaustif et de les prioriser.

5.2.1.1 Étape 1. Expliciter l'application.

Cette première étape vise la co-définition des applications successives avec la possibilité de définir différents scénarios prospectifs. En d'autres termes, l'application A est définie, les suivantes peuvent être floues.

Mise en usage, étape 1. INDUS.INTEG, étant à la fois fabricant et repurposeur, a proposé les applications sur lesquelles le cas d'étude a été construit. Celles-ci découlent principalement de son expérience avec différents clients. Comme mentionné, il a été décidé de travailler sur deux applications définies. L'application A cible les engins de chantier électriques; la B, les chariots élévateurs. Pour le second usage, les batteries au lithium sont amenées à remplacer la technologie de batteries au plomb, ce qui leur confère plusieurs avantages, dont notamment une plus grande souplesse d'utilisation.

Le rôle des propositions. Dès cette étape, les propositions 2 et 3 semblent partiellement pertinentes. Au niveau de la conception, nous recommandons de considérer l'ensemble du CdV dès la conception initiale, et donc dès la définition des différentes applications. Pour cela, nous proposons aux commanditaires de s'appuyer sur la représentation du CdV de Figure 21, p 92. Cela permet un rappel des différentes étapes nécessaires à la réutilisation du produit dans l'application suivante et donc en facilite le choix.

Préciser chacune des applications contribue à la définition des frontières de l'ACV, bien qu'en l'état cela ne soit pas suffisant. Il convient par exemple de préciser le contexte dans lequel chacune d'elles s'applique, ainsi que les décrire plus finement.

Un point d'amélioration. La définition conjointe des applications de l'offre (et notamment des applications ultérieures) peut être faite avec toutes les parties-prenantes (ou expertises disponibles). Lors de la séance de travail en groupe, il est apparu que limiter cette étape à la seule connaissance du fournisseur (ici INDUS.INTEG) contraint fortement la portée des possibilités. L'intégration de davantage d'exper-

tises (et/ou de parties-prenantes disponibles) peut être bénéfique pour la recherche d'applications. Notamment lorsque le fournisseur de l'offre n'a pas d'idées précises au sujet des applications ultérieures, ou ne serait-ce que pour recueillir davantage d'idées sur des applications potentielles.

5.2.1.2 Étape 2. Définir les objectifs.

Mise en usage, étape 2. Les objectifs initiaux avaient été établis lors de la phase de préparation de la séance en groupe avec INDUS.INTEG. Il était alors question de maximiser les valeurs économiques et environnementales de l'offre lors de la réutilisation de batteries pour une application différente. Au cours des discussions au début de la séance de travail en groupe, INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL considéraient tous deux l'environnement comme un puissant moteur de leur offre, tout comme leur responsabilité sociale. Les objectifs ont alors été reprécisés avec la volonté de maximiser la durée de vie des produits et limiter la quantité de déchets générés grâce à davantage de robustesse. Il était sous-entendu et acquis pour tous que c'était sous couvert d'une minimisation des coûts économiques.

Des précisions à apporter. Au cours de cette étape, les objectifs de conception ont été formalisés. En revanche, ceux propres à la définition du cadre de l'ACV ne l'ont pas été. Les définir dès cette étape, en parallèle des objectifs de conception, est recommandé. Une définition a posteriori peut compliquer la tâche. De plus, il serait intéressant de questionner les parties-prenantes sur leurs attentes vis-à-vis de l'ACV et de les formuler sous la forme d'une question. Pour savoir, par exemple, si la technologie en jeu est la plus adaptée.

5.2.1.3 Étape 3. Rassembler les besoins.

La suite du processus de conception vise la définition des besoins.

Mise en usage, étape 3. La récolte des besoins s'est déroulée via plusieurs étapes :

1. récolte des besoins des différentes parties-prenantes, individuellement,
2. interaction des parties-prenantes lors de la séance de travail en groupe et nouvelles émulations quant aux besoins, collectives cette fois-ci,
3. récolte des besoins des parties-prenantes principales (INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL) lors d'entretiens individuels semi-directifs (EISD1) afin de les formaliser plus précisément ; guide d'entretien disponible en Annexe 6.

Cette dernière partie est décrite ci-après. Il est nécessaire de garder à l'esprit que deux étapes incluant davantage de parties-prenantes ont d'ores et déjà été réalisées. Les besoins sont donc également issus d'un travail collectif préalable. Ces EISD1 ont été découpés en différentes phases :

- Phase a. description du résultat lié à chaque application,
- Phase b. description des besoins de chaque partie-prenante avec leurs propres mots,
- Phase c. précisions par rapport à l'ensemble du CdV,
- Phase d. confrontation avec ceux des autres parties-prenantes,
- Phase e. ouverture à d'autres modes de diffusion de l'offre.

Ces phases sont reprises dans la Table 15. À chacune d'entre elles, nous précisons le nombre de besoins qui ont été recueillis vis-à-vis les deux personnes interviewées. Les besoins sont distingués en fonction de leur appartenance aux applications A ou B spécifiquement, ou aux deux simultanément.

Le rôle des propositions. L'AF préconise de définir les besoins sur l'ensemble du CdV. Nos recommandations visent, en premier lieu, à 'substituer' la description traditionnelle (fabrication - utilisation - fin de vie (FdV)) par celle d'un produit repurposé, afin d'avoir une vision plus claire des différentes étapes de son CdV. En ce sens, la Figure 5, p. 26, et la Figure 21, p 92, conviennent toutes deux.

Par ailleurs, pour sélectionner les personnes présentes lors de la session de travail en groupe, ainsi que celles interrogées lors des EISD1, nous nous sommes appuyés sur la Figure 5, p. 26, pour vérifier que la majeure partie des métiers du CdV étaient représentés, en témoigne la Figure 26.

Table 15 - Nombre de besoins récoltés par phase et par industriel interrogé (INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL)

	Application A		Réunion A+B		Application B	
	INDUS.INTÉG	INDUS.RECYCL	INDUS.INTÉG	INDUS.RECYCL	INDUS.INTÉG	INDUS.RECYCL
Phase a.	-	-	-	-	-	-
Phase b.	7	3	1	1	5	4
Phase c.	9	1	6	2	5	4
Phase d.	1	13	4	12	7	9
Phase e.	-	-	4	-	-	-

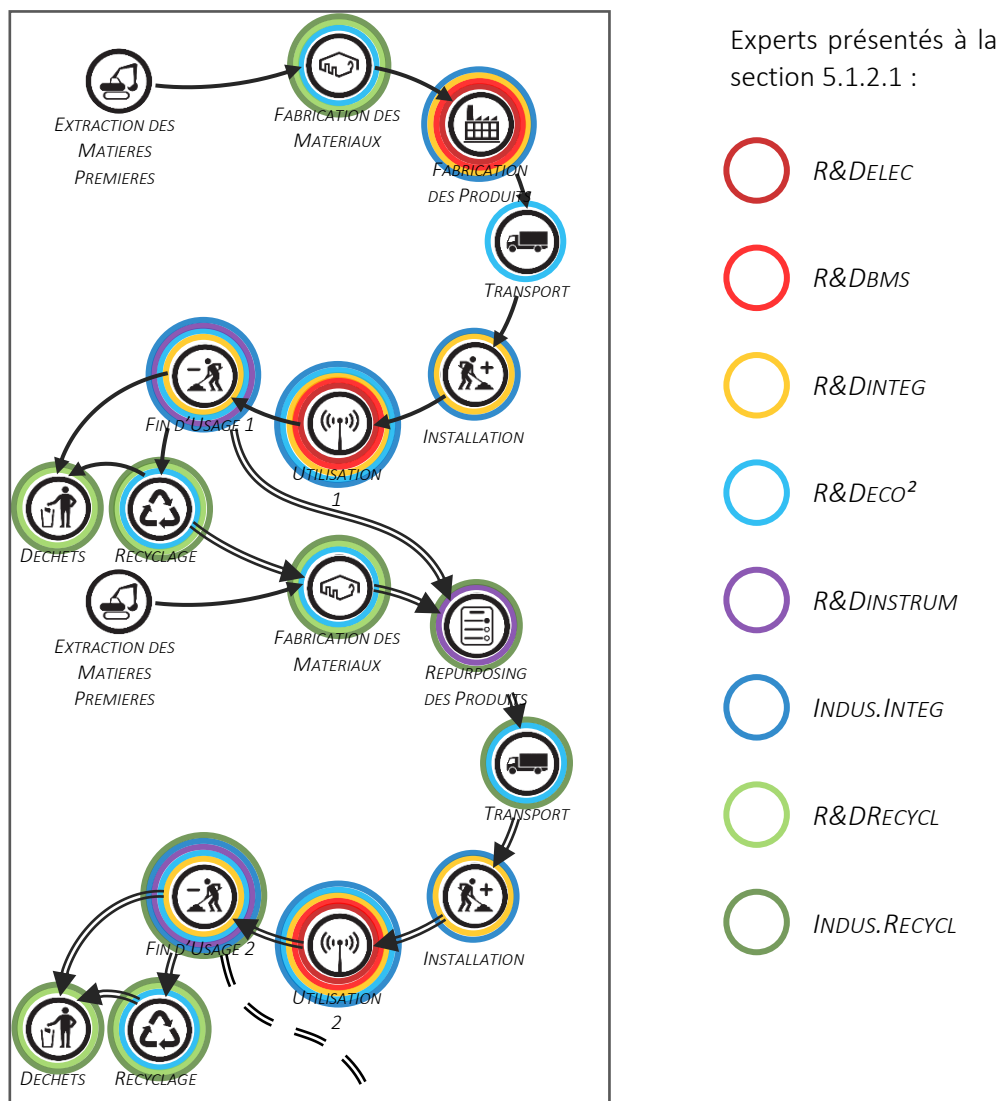


Figure 26 - Représentation des expertises des acteurs présents par rapport au cycle de vie du produit

Lors de la séance de travail en groupe, certaines personnes présentes se sont appuyées sur la Table 12 de la proposition 1, p 87, pour formuler certains besoins. Notamment pour tout ce qui concerne les problématiques du processus de réutilisation, comme les besoins de désassemblage, de nettoyage, les tests, etc., mais pas seulement. Lors de cette séance, d'autres besoins sont ressortis, davantage liés au produit et au modèle d'affaire. Nous notons par exemple les problématiques de modularité, de fiabilité

d'un usage à l'autre, les dimensions physiques qui doivent convenir aux deux applications ou encore le fait d'avoir un volume suffisant de produit pour pouvoir assurer le second usage.

Pour aller plus loin. Établir l'ensemble des besoins d'un produit pour différentes applications à partir du point de vue d'un seul des acteurs est limité. La complexité du CdV des produits repurposés complique quelque peu la réalisation de cette tâche. De plus, la Table 15, p 113, met en avant que plusieurs outils de collecte sont nécessaires pour faire ressortir un maximum de besoins. Par ailleurs, l'efficacité de ces outils diffère selon les experts interrogés. Identifier les principales parties-prenantes est donc essentiel et multiplier les outils de collecte également. Dans notre cas, nous avons été limités par le caractère novateur de la stratégie de réutilisation en cascade et, par la même, du trop faible nombre d'acteurs s'y intéressant (à notre connaissance tout du moins). De plus, comme souvent lorsqu'un nouveau produit (ou marché) se développe, ses initiateurs souhaitent en préserver le secret jusqu'au moment de sa mise sur le marché pour garder un certain monopole.

Pour compléter l'identification des parties-prenantes, il est également possible de s'appuyer sur la Table 12, p 87, car elle représente les dimensions d'une offre de produit repurposé. En partant de ces spécificités, certaines parties-prenantes peuvent être identifiées. Par exemple, les personnes qui testent le produit entre les deux applications, celles qui gèrent les aspects propres à la sécurité du produit, ou encore certains partenaires de la chaîne de valeur.

5.2.1.4 Étape 4. Prioriser les besoins.

Une fois les besoins décrits, ils peuvent être triés par importance.

Mise en usage, étape 4. INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL ont évalué la priorité des besoins à l'aide de matrices 'Pairwise' (voir Figure 27). INDUS.INTEG l'a fait pour les deux applications ; INDUS.RECYCL ne l'a fait que pour l'application B, n'ayant pas suffisamment de connaissances de la A. Pour ces deux acteurs et pour les applications visées, les besoins relatifs aux problèmes de sécurité sont ressortis comme étant les plus importants. Les besoins établis et hiérarchisés par INDUS.INTEG, pour les deux usages successifs, sont synthétisés dans la Table 16. La Table 17 reprend ceux d'INDUS.RECYCL pour l'application B. Les plus importants sont situés dans la partie haute, les autres dans la partie basse

	Use A										Lifecycle A				
	Temps de fonctionnement = 10h	Temps de recharge <= 1h	Rechargeable sur le réseau	Environnement : conditions extérieures,	Sécurité des opérateurs	Densité volumique élevée	Maintenable facilement	Vente de la batterie (ou location ?)	Coût minimum	Respecter les normes engins	Fabrication : assemblage (nb d'outils, nb & type)	Transport : non dangereux	Recyclage : désassemblage (nb d'outils, nb &)	Recyclage : extraction et valorisation de la BM	Recyclage : extraction des matériaux à forte
Use A	Temps de fonctionnement = 10h	1	1	0.5	0.5	0.5	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	Temps de recharge <= 1h	0	0	0	0	0	1	0.5	1	0	0.5	1	0.5	1	1
	Rechargeable sur le réseau	0	1	0	0	0.5	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	Environnement : conditions extérieures,...	0.5	1	1	0	0	0.5	1	1	0	1	1	1	1	1
	Sécurité des opérateurs	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	1	1
	Densité volumique élevée	0.5	1	0.5	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
	Maintenable facilement	0	0	0	0.5	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	Vente de la batterie (ou location ?)	0	0.5	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	Coût minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Respecter les normes engins	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 27 - Extrait de la matrice 'Pairwise' liée à l'usage A, remplie par INDUS.INTEG

Table 16 - Résumé de la hiérarchisation des besoins pour des applications successives, par INDUS.INTEG

Résultats	Application A	Application B
≥ 50%	<ul style="list-style-type: none"> - Problématiques de sécurité - Caractéristiques techniques principales (normes, usage) - Processus de fabrication (assemblage) - 1 aspect de FdV (déchets toxiques) 	<ul style="list-style-type: none"> - Problématiques de sécurité - Processus de repurposing (disponibilité, évaluation des produits) - Caractéristiques techniques (modularité) - 1 aspect de FdV (déchets toxiques)
< 50 %	<ul style="list-style-type: none"> - Spécification du modèle d'affaire (traçage du produit) - Caractéristiques techniques optionnelles (extension d'autonomie) - Autres aspects de FdV (recyclage, séparation des matériaux) 	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques techniques (temps d'opération, état de santé) - Autres aspects de FdV (recyclage, séparation des matériaux)

Table 17 - Résumé de la hiérarchisation des besoins pour des applications successives, par INDUS.RECYCL

Résultats	Application B
≥ 50%	<ul style="list-style-type: none"> - Problématiques de sécurité - Processus de repurposing (disponibilité, évaluation des produits, désassemblage, état de santé) - 5 aspects de FdV (recyclage & déchets finaux)
< 50 %	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques techniques (temps d'opération et de recharge, usages) - Processus de repurposing (modularité, normes, standardisation)

Les besoins hiérarchisés par INDUS.INTEG ont été soumis à R&DELEC, R&DBMS, R&DRECYCL lors des entretiens individuels semi-directifs #2 (EISD2). Ces trois personnes n'ont pas vu de manque au premier abord et étaient globalement d'accord avec la hiérarchisation proposée, estimant que les enjeux principaux étaient respectés. Suite à ces priorisations, il est essentiel de réaliser une étape de mise en commun et d'uniformisation pour évaluer, à plusieurs, de l'intérêt de tel ou tel besoin par rapport aux autres. L'avantage de cette hiérarchisation est qu'elle permet d'initier les discussions et d'identifier tout de suite les besoins les plus importants pour tous les acteurs et ceux étant davantage optionnels. Pour tous les autres, une concertation est préférable.

Le rôle des propositions. Deux des recommandations faites au Chapitre 4 et relatives aux aspects de conception sont pertinentes à cette étape.

Tout d'abord, la considération des parties-prenantes (ou plutôt expertises dans notre cas). Inclure leurs besoins est important pour une meilleure intégration des problématiques de l'ensemble du CdV dès la conception du produit. Inclure également ces derniers au moment de la hiérarchisation peut certes paraître redondant, mais cela rend surtout compte de la situation de chacun et facilite la communication entre elles. Un besoin jugé primordial par le recycleur peut ne l'être que par lui et être ainsi sous-estimé. Le fait d'avoir interrogé INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL a fait remonter des besoins similaires et a permis d'en identifier d'autres contradictoires, ce qui appuie la thèse qui veut que l'intégration des parties-prenantes est nécessaire.

Ensuite, la gestion des priorités d'un usage à l'autre. Nous recommandons à la fois d'avoir une approche globale de l'ensemble des usages, mais aussi spécifique à chaque application. Au moment de la priorisation des besoins, il est nécessaire d'avoir cette vision spécifique car les équipes de conception doivent s'assurer que chaque application répondra effectivement à tous les besoins émis.

5.2.1.5 Étape 5. Établir les fonctions

L'AF propose une recherche et une description des fonctions en deux temps. Tout d'abord en définissant les éléments du milieu extérieur (EME), puis en les liants à l'offre au travers des fonctions.

Mise en usage, étape 5.

Définir les EME. En AF, la définition des fonctions passe par l'identification des EME de l'offre, tout au long de son cycle de vie. C'est le graphe des interacteurs (voir Figure 28). Lors de la conception pour des applications en cascade, cette étape doit inclure les applications successives mais aussi le processus inter-applications. L'avantage de l'utilisation des EME est que, même lorsque les applications ne sont pas définitives, il est possible de décrire l'environnement dans lequel les produits vont évoluer.

Cette étape est définie dans l'AF comme un moyen d'initier la formulation de fonctions. Il n'y a dès lors aucune obligation de la réaliser, notamment lorsque les équipes de conception sont habituées à la méthodologie, à leur produit (dans ce contexte d'applications successives) et/ou en définissent facilement les fonctions. En tout état de cause, cette cinquième étape aide à visualiser l'environnement global où évolue le produit.

Dans le cadre de notre mise en application, les EME ont été définis en trois temps. Ils ont tout d'abord été suggérés par les plusieurs des personnes présentes en phase de préparation amont (voir Annexe 5), puis définis au cours de la séance de travail en groupe. Ils ont enfin été retravaillés et réorganisés avec l'aide d'un expert en AF. La Figure 28 rend compte de cette réorganisation. Lors des EISD2, R&DELEC, R&DBMS et R&DRECYCL ont convenu que la Figure 28 contenait tous les éléments ayant été mentionnés jusqu'alors.

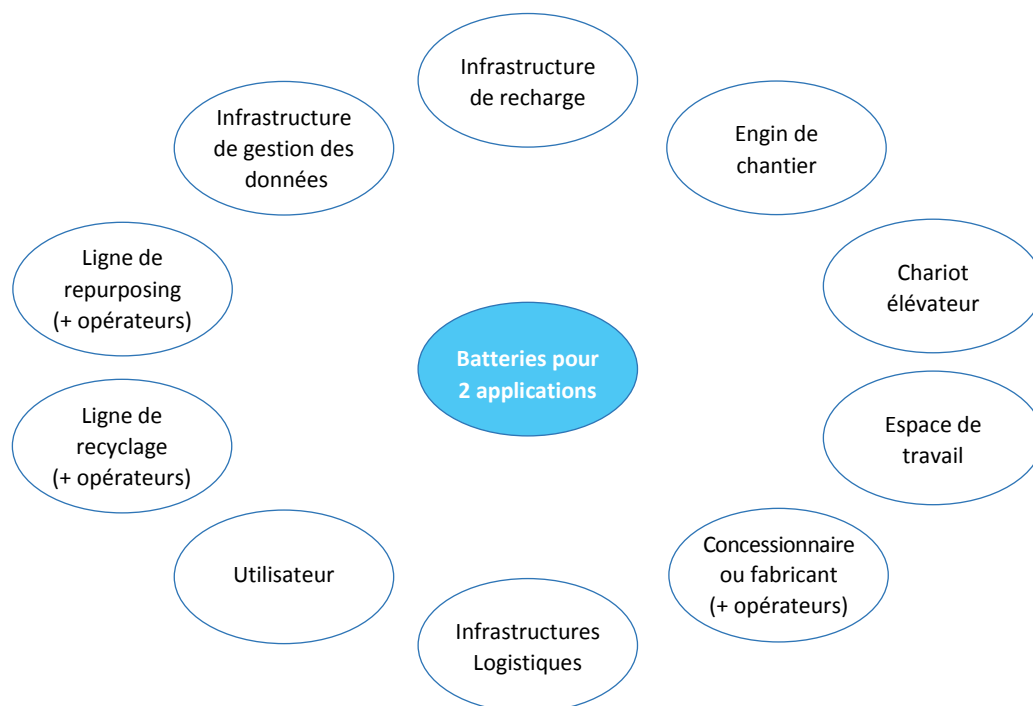


Figure 28 - Éléments du milieu extérieur pour une batterie à deux applications en cascade

Définir les fonctions. Sur la base des EME définis dans la Figure 28, des discussions ont eu lieu quant à la définition des fonctions pour les applications successives. Plusieurs fonctions ont été détaillées, certaines correspondant à l'application A, d'autres à la B, et les dernières étaient communes aux deux. Avec l'aide du même expert en AF, nous avons rassemblé les fonctions des deux applications émises en amont et durant le workshop. Une synthèse de celles-ci est donnée sous deux formats : tout d'abord, en liant les EME, démarche qui est propre à l'AF (voir Figure 29) ; ensuite, en en donnant une description

(voir Table 18). Tout comme lors de la définition des EME, durant les EISD2, R&DELEC, R&DBMS et R&DRECYCL se sont prononcés positivement par rapport à la reformulation des fonctions : tous les éléments mentionnés durant la séance de travail en groupe étant représentés. L'Annexe 7 retrace l'établissement des fonctions présentées ici en clarifiant les liens entre les EME établis au cours de la séance de travail en groupe (Figure 29) et ces fonctions (Table 18). La colonne 'spécificité' est explicitée à l'étape suivante.

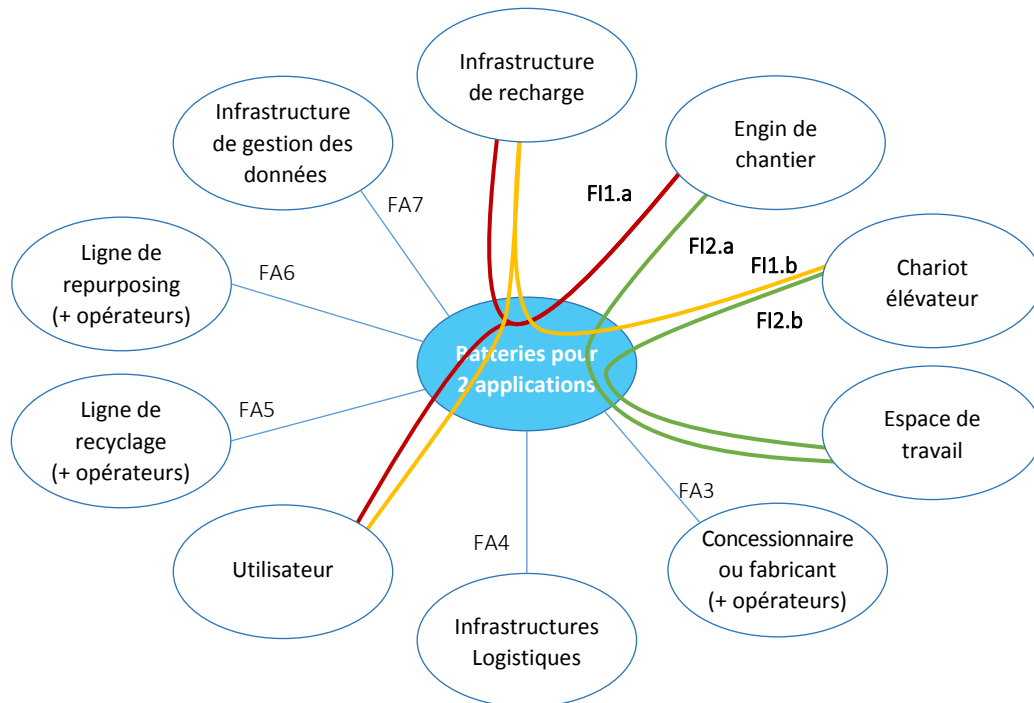


Figure 29 - Graphe des interactions pour une batterie aux applications en cascade pour l'ensemble du cycle de vie

Table 18 - Description des fonctions et de leurs liens avec les différentes applications

Fonction	Spécificité	Description
FI1	A+B	Stocker l'énergie de l'infrastructure pour une application 'engin de chantier' ou 'chariot élévateur'
FI2	A+B	Restituer l'énergie stockée pour une application 'engin de chantier' ou 'chariot élévateur' dans l'espace de travail
FA1	A	Être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs de l'application A
FA2	B	Être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs de l'application B
FA3.1	A+B	Être maintenable par le concessionnaire ou le fabricant
FA3.2	A	Être sécuritaire pour les opérateurs du fabricant
FA4	A+B	Être transportable jusqu'au recycleur et au repurposeur avec les infrastructures existantes
FA5.1	A+B	Être valorisable
FA5.2	A+B	S'adapter au processus de recyclage
FA5.3	A+B	Être sécuritaire pour les opérateurs du recyclage
FA6.1	A↔B	S'adapter au processus de repurposing
FA6.2	A+B	Être reconfigurable d'une application à l'autre
FA6.3	A↔B	Être sécuritaire pour les opérateurs du repurposing
FA7	A+B	S'adapter à une infrastructure de gestion de données

Le rôle des propositions. À cette étape de l'AF, les EME sont définis et les fonctions établies pour l'ensemble du CdV. Les deux premières propositions émises au Chapitre 4 vont dans ce sens et tendent à faciliter leur définition dans le cadre du repurposing.

Définition des EME et des fonctions. La Table 12, p 87, rappelle les principales dimensions en lien avec la stratégie de repurposing. En premier abord, les équipes de conception peuvent s'appuyer sur celles-ci afin d'identifier les EME spécifiques à la stratégie de repurposing. Ce lien est d'autant plus fort au niveau des fonctions. Nous pouvons remarquer que certaines sont fortement corrélées aux dimensions présentées. Notamment lorsqu'il s'agit d'éléments propres au processus de conception. Par exemple : 's'adapter au processus de repurposing' et 'être reconfigurable d'une application à l'autre'.

Prise en compte du CdV. Une fois de plus, et comme pour les besoins, notre recommandation visant à intégrer l'ensemble des étapes du CdV semble évidente. Il est ici nécessaire d'intégrer les différentes applications et les phases inter-applications. La Figure 21, p 92, permet là encore d'ouvrir quelques perspectives sur la prise en compte de l'ensemble du CdV.

Lors de la séance de travail en groupe, le mélange des applications a provoqué de la confusion auprès des personnes présentes, bien qu'elle fût nécessaire pour établir certains liens d'une application à l'autre. À l'issue de cette phase, il devient primordial de décomposer ces fonctions selon chacune des phases du CdV.

5.2.1.6 Étape 6. Décomposer les applications.

Cette étape n'est pas habituelle dans la démarche d'AF. Pour la bonne raison que plusieurs applications ne sont jamais décrites au même moment. Malgré tout, avec l'AF, la décomposition des fonctions peut être réalisée de deux manières différentes : graphiquement et textuellement.

Mise en usage, étape 6.

Représentation graphique. Pour décomposer les applications, nous sommes partis de la représentation des fonctions (Figure 29), que nous avons scindée selon les différentes phases. La Figure 30 en est le résultat. Elle est composée des mêmes EME que ceux de la Figure 29 et représente les fonctions propres à l'application A (Figure 30.a), l'application B (Figure 30.c) et le processus de repurposing (Figure 30.b).

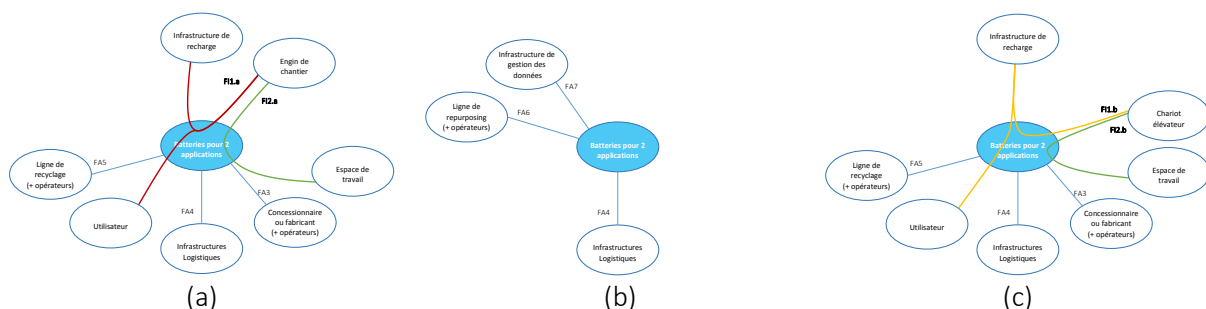


Figure 30 - Graphes des interactions pour (a) l'application A, (b) le processus de repurposing et (c) l'application B

Ces différentes représentations (Figure 29 et Figure 30) ont été proposées aux personnes interrogées lors des EIDS2. La version agrégée (Figure 29) a été appréciée pour sa complétude et sa synthèse, alors que la Figure 30 l'a été car elle permet une perception plus claire de chaque application. En outre, elle est apparue comme facilitant la compréhension de l'offre pour les trois personnes interrogées lors des EIDS2 et comme un moyen d'expliquer l'offre au moment de la revue de conception, par exemple. Cette étape contribue à l'identification des fonctions similaires d'une utilisation à une autre, même si elles ne le sont jamais exactement. Elle met en avant le fait qu'il faudra faire des compromis lors des phases aval.

Représentation textuelle. Une autre manière de gérer les fonctions par rapport aux applications peut être directement à partir de la Table 18 précédente. Elles sont alors distinguées par rapport aux différentes phases du CdV du produit. Ainsi, lorsqu'une seule application est concernée par la fonction, elle

est notée seule (par exemple 'A' ou 'B'). Si les fonctions couvrent les deux applications, qu'elles soient identiques ou très différentes, l'annotation 'A + B' est utilisée. Enfin, lorsque les fonctions sont à l'interface des applications, ou qu'elles font partie du processus de repurposing, elles sont symbolisées par 'A \leftrightarrow B'. Ainsi, il est plus facile d'identifier quelles fonctions dépendent d'une application, de l'autre, des deux ou du processus de réutilisation inter-applications.

Le rôle des propositions. Deux des recommandations énoncées au Chapitre 4 font sens à cette étape. L'une est davantage axée conception, l'autre ACV.

En ce qui concerne le besoin de prise en compte de l'ensemble du CdV, nous remarquons que cette sixième étape contribue à une meilleure définition des attentes propres à chaque usage. Discrétiser le CdV en fonction des phases successives permet aux équipes de conception de vérifier la définition de toutes les fonctions.

En ce qui concerne la mise en place du cadre de l'ACV, et plus particulièrement la définition du champ de l'étude, cette étape est primordiale. Elle permet d'affiner la description du CdV de l'offre et de mieux spécifier ce qui appartient à telle ou telle phase (application 1, application 2, processus de refabrication, etc.), à l'instar de ce qui est fait lors de la description des différentes étapes du CdV (Figure 21, p 92).

5.2.1.7 *Étape 7. Caractériser les fonctions.*

Cette septième étape a pour objectif la caractérisation précise de toutes les fonctions.

Mise en usage, étape 7. Cette caractérisation a été réalisée lors des EISD2, avec R&DELEC, R&DBMS et R&DRECYCL. Ce dernier n'étant pas concepteur, il lui fût plus difficile de se prêter à l'exercice. Tous ont détaillé deux à trois fonctions, avec pour consigne l'obligation de traiter a minima la fonction d'adaptation : 'être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs', pour les applications A et B. Il leur aura fallu entre 10 et 40 minutes pour définir une fonction. Tout dépendait de la complexité de la fonction et des compétences de la personne interrogée. Les résultats de ces entretiens sont disponibles dans l'Annexe 8. La spécificité ici est que les personnes interrogées sont amenées à définir, pour les fonctions partagées par plusieurs applications au cours du CdV, les critères pour chacune d'elles en même temps. Comme le montrent les résultats (voir Annexe 8), les personnes interviewées ont défini plusieurs critères d'appréciation pour une même fonction. Pour les réponses de R&DELEC et R&DBMS, des similitudes sur ces derniers sont constatées, notamment en ce qui concerne FA1 et FA2, par exemple : prévention du risque chimique, électrique et mécanique, problèmes d'ergonomie, etc.. Parmi les critères spécifiques au repurposing que nous avons avancés dans la Table 13, p 96, certains ont été précisés par les personnes interviewées. C'est le cas de la dégradation en cours d'usage, qui a été précisée dès que les performances du produit évoluaient sur son CdV. Certains critères ont été considérés d'emblée comme critiques au regard de la stratégie par les experts interrogés et, ce, pour diverses raisons : problèmes de sécurité, majoritairement, mais aussi de rentabilité. Les parties-prenantes ont été renseignées la plupart du temps. Ce critère a été très peu utilisé par la suite. L'objectif étant de créer des liens au moment de la conception, cette information peut être réutilisée lors des étapes aval de conception en cas d'itération. Enfin, le critère de 'flou', lié à la certitude de la réalisation d'une fonction, a été intégré à l'issue des entretiens et n'a donc pas été renseigné.

Le rôle des propositions. Les trois propositions faites au chapitre précédent, que ce soit en partie ou en totalité, influencent cette étape de la démarche d'AF.

Tout d'abord, les dimensions d'une offre de produits repurposés permettent de préciser certaines fonctions et, dans le cas présent, certains critères d'appréciation. Les points qui sont ressortis lors des EISD2 concernent notamment les caractéristiques du produit et le processus de repurposing. En ce sens, la première proposition facilite la description, la comparaison et la discussion d'une application à l'autre. Ensuite, nous avons recommandé de gérer et de suivre les informations de conception sur l'ensemble du CdV. Pour faciliter ce suivi, le tableau utilisé classiquement a été modifié pour inclure des critères

spécifiques à la stratégie de repurposing (voir Annexe 4). Par ailleurs, la définition conjointe des applications permet de mieux visualiser les attentes tout au long du CdV. Cette vision double 'application A - application B' (voir Annexe 4) force les concepteurs à prendre en compte les usages successifs. Enfin, par rapport à notre dernière recommandation relative à la prise en compte de critères de sensibilité, cette étape en permet l'initialisation. En effet, ici est discuté l'ensemble des fonctions et des critères propres aux produits repurposés. Les valeurs de ces critères, plus ou moins flexibles, y sont définies et appréciées par les équipes de conception. À partir de là, il est possible de définir la plage à évaluer lors des analyses de sensibilité. De plus, les critères les moins consensuels, les plus discutés et sur lesquels les valeurs ont une flexibilité élevée doivent être pointés en vue d'une analyse de sensibilité.

5.2.1.8 *Étape 8. Prioriser les fonctions.*

Mise en usage, étape 8. Au cours du workshop et des entretiens, trop peu de fonctions ont été caractérisées pour pouvoir les hiérarchiser. Les personnes rencontrées dans le cadre des EISD2 ont néanmoins jugé intéressant de prendre en considération les variables de la Table 13, p 96, en vue d'une hiérarchisation. Les différences d'une application à l'autre étant clairement spécifiées, les équipes de conception pourront prioriser les fonctions pour une application mais aussi entre applications.

Le rôle des propositions. Bien qu'elles n'aient pas été testées, deux recommandations sont liées à cette étape.

La première vise une meilleure gestion des priorités d'un usage à l'autre. Comme pour les besoins, la priorisation des fonctions doit se faire pour chacune des applications, afin de s'assurer de la juste réponse à chacune d'elles. Néanmoins, il est nécessaire de le faire en considérant l'ensemble du CdV.

La seconde cherche, en complément de l'étape 7, à faciliter l'identification des variables en vue d'une analyse de sensibilité, suite à une ACV. Les fonctions considérées comme les plus importantes doivent alors être davantage considérées.

5.2.1.9 *Conclusion sur l'expérimentation et les propositions qui s'y rattachent*

L'expérimentation au travers de l'AF. La première partie de cette expérimentation visait l'établissement et la hiérarchisation des besoins par les différentes personnes (étapes 1 à 4). Pour ce faire, les personnes interviewées au cours des séances de travail ont défini quels étaient les objectifs à atteindre et les besoins dans le cadre des applications de batteries destinées à des engins de chantier puis des chariots élévateurs. Une fois ces besoins hiérarchisés par chacun des industriels présents, il est nécessaire d'établir la priorisation finale, se voulant être un consensus entre ces dernières. Dans notre cas, cette dernière étape n'a pas été réalisée totalement. Les besoins relatifs à la sécurité, aux caractéristiques techniques et au processus de (re)fabrication des produits sont toutefois apparus comme prioritaires. Dans une seconde partie (étapes 5 à 9), les fonctions ont été établies et hiérarchisées par différents intervenants. Pour ce faire, les personnes interviewées au cours des séances de travail ont défini, à partir des besoins, quels étaient les fonctions d'une batterie destinée à des engins de chantier puis à des chariots élévateurs. Certaines fonctions ont ensuite été caractérisées et les points spécifiques au repurposing ont été définis. La hiérarchisation des fonctions, étape suivante de la méthodologie d'AF n'a pas été réalisée par manque de temps. Il n'a donc pas été possible d'évaluer la pertinence des critères propres au repurposing à cette étape.

Mise en usage des propositions. Au cours des séances de travail autour du cas d'étude batterie, les propositions en lien avec l'expérimentation présentées au chapitre 4 ont été testées.

Tout d'abord, la première proposition. Nous avons fait plusieurs fois référence aux dimensions d'un produit aux applications en cascade lors des séances de travail dédiées à la conception amont. Notamment aux étapes 3, 5 et 7 de l'AF, telles que décrites précédemment. Cette proposition supporte la définition des besoins, l'établissement des fonctions, ainsi que leur caractérisation sur différents usages. Les éléments sont liés aux différentes sphères que sont le produit, le processus de (re)fabrication et le modèle d'affaires. Bien que ceux-ci semblent enfoncer une porte ouverte, leur formalisation permet

avant tout de s'assurer que les dimensions principales, propres à une offre de produit repurposé, sont belles et bien prises en compte, notamment lors de l'initialisation de cette activité. Et nous l'avons vu lors des entretiens avec INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL, il est compliqué de penser à toutes les caractéristiques d'un produit. D'autant plus lorsque celui-ci est destiné à plusieurs applications consécutives et distinctes. Notre première proposition permet de parer à de potentiels oublis en proposant un cadre d'analyse pour la définition d'un produit aux usages en cascade.

Ensuite, la seconde proposition est scindée en deux parties, fonctionnant conjointement. La première est la représentation du CdV d'un produit aux applications en cascade, incluant les phases de développement successives (voir Figure 21, p 92). Cette représentation permet avant tout une prise de conscience des étapes du CdV par lesquelles va passer le produit. Lors des séances de travail, la Figure 21, p 92, a également supporté les étapes 1 et 3 de l'AF. La seconde partie de notre deuxième proposition consiste en quatre recommandations. Celles-ci ont été intégrées dans une démarche d'AF. Elles visent la prise en compte des parties-prenantes, du suivi de l'information, la gestion des priorités entre les usages et des différentes phases du CdV. Sur ce dernier point, la Figure 21, p 92, tend à faciliter leur prise en considération.

Lors des entretiens individuels semis-directifs, les personnes interrogées ont majoritairement appuyé l'utilité des propositions dans le cadre d'une conception de produit pour des applications en cascade. Davantage de détails sont apportés lors des discussions, section 5.3.2.

La troisième proposition est également composée de deux parties. D'une part, nous formulons trois recommandations pour une meilleure définition de certains éléments de l'ACV, particulièrement délicat dans le cadre de la réutilisation de produits en cascade. Ces recommandations impliquent de préciser les étapes initiales de définition des applications et des objectifs, mais aussi certaines étapes plus en aval qui permettent de préciser les frontières de chacune des applications ainsi que les fonctions pour l'ensemble du CdV. D'autre part, nous proposons de formaliser la démarche d'ACV de produits repurposés au travers d'un cadre pour guider les ACVistes pas à pas. Ce cadre n'était pas l'objet des séances de travail. En revanche, à partir des travaux et entretiens menés jusqu'ici, il est complété dans la section suivante.

5.2.2 Illustration de la dernière proposition : un cadre pour l'analyse de cycle de vie de produits aux applications en cascade

Comme mentionné précédemment, cette section vise à illustrer la proposition relative à l'analyse de cycle de vie (ACV) présentée à la section 4.3. La définition des premières étapes de l'ACV s'appuie sur les étapes de conception. Deux cas sont présentés ici. Le premier est issu des réflexions et entretiens avec INDUS.RECYCL autour de la réutilisation de batteries de véhicules électriques (VE) vers des applications stationnaires. Le second est lié au cas d'application précédent, présenté dans la section 5.1.2.2. Bien que les résultats de cette étude soient incomplets pour une définition précise des premières étapes de l'ACV, nous les utilisons comme cas applicatif, avec toutes les limites que cela comporte. Par ailleurs, ne travaillant pas sur un produit existant, il ne nous est pas possible de réaliser l'ACV dans son ensemble mais uniquement d'en poser le cadre.

5.2.2.1 Évaluation d'un produit repurposé a posteriori

Nous présentons dans un premier temps le cadre ACV pour la réutilisation de batteries de VE vers des applications stationnaires alors que celles-ci n'étaient pas prévues à l'origine. Il s'agit là d'une activité de reconception de produit en vue d'un second usage.

1. Motivations initiales. Lors de la définition des objectifs de conception, INDUS.RECYCL a promu l'environnement comme l'une des variables importantes de son offre : une activité de conception a posteriori. Il cherche avant tout à minimiser la quantité de déchets générés. De par la nature de son activité il est davantage intéressé par le second usage que l'ensemble du CdV. L'une de ses volontés est donc de caractériser les impacts environnementaux du produit dans son deuxième applicatif uniquement, en

‘déduisant’ tout ce qui se rapporte au premier usage (incluant donc, dans le cas présent, les étapes de production et de recyclage que l’on sait être très polluantes).

2. Objectifs. Lors de la définition des applications et des objectifs de conception, il n’est pas apparu qu’INDUS.RECYCL voulait mettre sur le marché un produit drastiquement différent de ce qui existe actuellement, il n’y a pas de bouleversement technologique avec l’offre proposée. La différence majeure avec des produits classiques est uniquement liée à la réutilisation d’un produit en fin d’usage (FdU) pour s’en servir comme d’une ‘matière secondaire à valeur-ajoutée’ dans une autre application. Dans ce cas précis, l’application initiale concerne les batteries de VE et la suivante est celle du stockage d’énergie stationnaire. Comme il n’y a pas aujourd’hui de bouleversements technologiques par rapport à ces applications et que leur durée de vie n’est pas très longue, nous faisons le choix d’une ACV de type attributive.

La question qui nous intéresse ici est : quels sont les impacts environnementaux de la réutilisation d’une batterie de véhicule électrique dans une application stationnaire, à partir de la fin de son premier usage ? Comme précisé à la section 4.3.1, il est préférable de rester global, au moins dans un premier temps. Ensuite il est possible de dissocier les impacts selon les phases d’usages en fonction des situations spécifiques. C’est ce qui est souhaité ici.

Dans le cas d’une ACV de produits réels, une évaluation des autres études ACV en lien avec les applications considérées aurait été souhaitable mais n’a pas été réalisée par manque de temps.

3. Champ de l’étude. La définition du champ de l’étude, dans le cadre de la reconception de batteries a posteriori, permet d’en préciser les frontières. La Figure 21, p 92, rappelle quelles sont les phases à prendre en considération lors d’une activité de repurposing. Dans ce cas précis, INDUS.RECYCL s’intéresse essentiellement au second usage. Or, pour mettre en avant les bénéfices environnementaux potentiels liés à l’activité de repurposing, il est nécessaire de considérer l’ensemble des applications. Premièrement car cela représente le CdV du produit. Et deuxièmement car, sans cela, le produit repurposé ne pourra être comparé qu’à des produits à application unique, au rôle et aux frontières équivalents. Ce qui signifie que le report des étapes de recyclage et le processus de refabrication ne seront pas pleinement considérés. Nous ne rentrerons pas ici dans une description des intrants et extrants de l’ACV, ni les règles de coupure. Ces éléments sont fortement corrélés à la phase d’inventaire et ne seront pas abordés ici.

Suite aux différents entretiens menés auprès d’INDUS.RECYCL, nous considérons que l’ACV devrait être réalisée pour une diffusion externe à l’entreprise, a minima à destination de ses clients. Cela a été décelé lorsque nous avons abordé les questions de stratégie et d’image de l’entreprise, où la dimension environnementale est ressortie comme un élément favorisant. Communiquer sur cet aspect est dès lors nécessaire.

Enfin, au cours de cette étape, les catégories d’impacts environnementaux doivent être déterminées, en lien avec le produit et les désidératas du commanditaire. Au moment de la définition des objectifs de conception, la volonté de limiter la production de déchets est apparue clairement chez INDUS.RECYCL. Il est donc important de considérer une catégorie d’impact lié à l’épuisement des ressources. En complément, et au vu du produit, l’étude doit a minima porter sur le changement climatique, pour la prise en compte des impacts sur l’air, les radiations, du fait de l’utilisation d’un produit électrique dans un mix énergétique à dominance nucléaire, et une catégorie d’impact lié à la toxicité ou à l’écotoxicité, du fait de la nature des composants de la batterie.

4. Référence quantifiée. À cette étape, l’unité fonctionnelle (UF) doit être définie. Bien que nous n’ayons pas détaillé la conception pour l’application envisagée par INDUS.RECYCL, ce qui aurait été plus facile pour définir l’UF_{rang2}, nous proposons de définir les unités fonctionnelles suivantes :

Application A. Permettre de stocker et de restituer l’énergie électrique nécessaire au déplacement d’un véhicule électrique à hauteur de 150'000 km pendant 10 ans selon la norme en vigueur, dans les conditions de sécurité des normes ISO 12405 et ISO 6469.

Application B. Permettre de stocker et de restituer l'énergie électrique d'une installation de production vers une application stationnaire autonome, d'une puissance de 100kW, pendant 5 ans.

Plus globalement, l'UF de cette étude environnementale vise à : 'Permettre la réalisation de l'UF_{rang2-A}, puis de l'UF_{rang2-B}'.

5. Équivalence des systèmes. La comparaison des impacts environnementaux avec d'autres systèmes ne peut se faire que sur les mêmes bases. Le flux de référence est alors défini en fonction des caractéristiques du produit pour correspondre au service rendu par l'UF (variations des performances et de la durée de vie du système par rapport à un produit classique). Par ailleurs, il doit tenir compte de la spécificité du repurposing. Par exemple, si dix batteries de VE sont nécessaires à la fabrication d'une batterie stationnaire, cela devra être pris en considération.

Il faut également tenir compte des flux de produits eux-mêmes. Dans ce premier cas, nous considérons qu'il n'y a pas de différence lors de l'application A. Pour l'application B, il faut tenir compte du flux de produit qui sera directement recyclé. Certaines batteries étant accidentées ou hors du circuit de collecte, elles seront recyclées directement (30%). D'autres seront récupérées, testées (différents grades de tests peuvent être réalisés), pour également finir recyclées (55%). Enfin la part restante sera récupérée, testée et effectivement réemployée (15%). Les estimations présentées sont issues des discussions avec INDUS.RECYCL.

En ce qui concerne l'évaluation des impacts environnementaux, nous préconisons de ne pas dissocier les applications et de ne pas répartir les impacts en fonction de l'une et de l'autre. Ici, comme les commanditaires le souhaitent, une étude complémentaire doit être réalisée en ce sens. Ainsi, et pour répondre à l'objectif de l'étude et à la question posée, nous considérons que tous les impacts liés à l'application A doivent y être rattachés. Il n'y aura donc pas de répartition des impacts de l'application A car la conception primaire n'a pas pris en compte la possibilité de réutilisation. Au besoin, pour les autres phases du CdV, la clef d'allocation choisie est le flux de produit, seule information pertinente à laquelle nous avons accès.

Fabrication A. Cette étape est entièrement liée à l'application A.

Transport et usage A. Concernent uniquement l'application A.

FdU A. Cette étape est liée aux applications A et B. On peut allouer les impacts liés directement au flux de produits recyclés (30%).

Préparation B. Les impacts des tests réalisés sont tous dédiés à l'application B, les impacts des produits recyclés à l'issue de ces tests peuvent être alloués à l'application A1 (55%).

Fabrication B. Concerne uniquement l'application B.

Transport et usage B. Concernent uniquement l'application B.

FdU B. Cette étape est liée aux applications A et B. Vu que notre UF considère un même volume de produit tout au long du CdV, on peut éventuellement allouer les impacts de manière équitable entre les applications.

Nous nous rendons bien compte que la complexité de cette opération ne permet pas de donner une image claire des impacts environnementaux. La comparaison avec un produit à application unique est donc très limitée.

- 6. Analyses de sensibilité et d'incertitudes :** Plusieurs variables nécessitent davantage d'investigations :
- Comment évoluent les impacts environnementaux en fonction de la variation des flux de produits destinés au recyclage direct, aux tests et au repurposing ? (respectivement 30%, 55%, 15%)
 - Au-dessus de quels seuils d'évaluation et de réutilisation la stratégie de repurposing est-elle bénéfique pour l'environnement ? Pour chaque catégorie d'impacts et par rapport à l'ensemble d'entre elles.
 - Comment évoluent les impacts environnementaux si l'application A et les valeurs correspondantes au sein de l'UF_{rang2-A} varient ? (100 kW et 5 ans)
 - Comment évoluent les impacts environnementaux si l'application B et les valeurs correspondantes au sein de l'UF_{rang2-B} varient ? (100 kW et 5 ans)

La robustesse des hypothèses établies lors de l'ACV est ainsi évaluée au travers d'analyses de sensibilités. Les incertitudes doivent elles aussi être évaluées pour apprécier le degré de pertinence des résultats présentés. Par exemple, les critères et fonctions ayant été jugés comme 'flous' lors des phases de conception doivent être investigués (voir section 4.2.3.4).

7. Rapport d'ACV. Tous les éléments précités doivent être mentionnés dans le rapport d'ACV pour permettre au lecteur d'analyser objectivement les résultats proposés.

Conclusions. Cette première approche vise à dresser le cadre d'une ACV réalisée en vue du repurposing d'une batterie de véhicule électrique vers une application stationnaire. Malgré le manque d'informations sur les applications (la conception n'ayant pas été pleinement investiguée lors de nos travaux de recherche), nous avons pu dresser un premier bilan des éléments à intégrer.

5.2.2.2 Évaluation sur l'ensemble du CdV

Dans cette seconde partie, nous illustrons le cadre pour l'évaluation des impacts d'un produit repurposé sur les batteries utilisées en premier usage dans des engins de chantier et en second dans des chariots élévateurs. Nous utiliserons en plus les données exprimées lors de la phase d'analyse des besoins (section 5.2.1). Certains éléments, similaires au cas précédent, ne seront pas détaillés.

1. Motivations initiales. INDUS.INTEG a dit vouloir mettre sur le marché des produits robustes qui maximiseraient leur durée de vie d'une manière générale. Pour ce faire, il souhaite fabriquer des batteries pour plusieurs applications en cascade, ne lui faisant pas préférer une application à l'autre. Une approche globale de l'offre, incluant les usages successifs, est ici recherchée.

2. Objectifs. Comme précédemment, il n'est pas apparu qu'INDUS.INTEG proposait un produit en rupture technologique avec le marché actuel et les offres existantes. Cela est souligné par la Table 16, p 116, représentant les besoins sur les usages successifs. Ceux-ci ne diffèrent finalement que peu de ceux pour une application. Par ailleurs, le produit est destiné à deux applications d'une durée de vie de cinq à dix ans chacune. Les différences majeures avec des produits à application unique sont uniquement liées aux usages en cascade. Ces raisons nous motivent également à pencher vers une ACV de type attributionnelle.

Là aussi, des analogies avec d'autres études seraient importantes dans le cadre d'une ACV réelle. En revanche, la question à laquelle nous souhaitons répondre est différente car elle considère plus largement les applications successives : existe-il un intérêt environnemental à concevoir des batteries pour des applications en cascade ?

3. Champ de l'étude. Dans le cadre de la conception de batteries destinées à plusieurs applications, il est d'autant plus logique de prendre en compte toutes les étapes du CdV : de l'extraction des matières premières de l'application A au recyclage à l'issue de la B (voir Figure 21, p 92). Pour les mêmes raisons qu'à la section 5.2.2.1, nous ne rentrerons pas dans une description des intrants et extrants de l'ACV, ni des règles de coupure.

Dans ce second cas, nous considérons que l'ACV devrait être réalisé pour une diffusion externe à l'entreprise, pour les mêmes raisons de stratégie et d'image de l'entreprise.

Enfin, les catégories d'impacts environnementaux sont considérées équivalentes à précédemment : épuisement des ressources, changement climatique, radiations et toxicité ou écotoxicité.

4. Référence quantifiée. Malgré le fait qu'elle n'ait pas été réalisée totalement (par exemple, la hiérarchisation des fonctions aurait permis une identification directe des fonctions principales du système), la section 5.2.1 apporte plusieurs éléments de réponse pour la définition de l'UF. Nous considérons en premier lieu que la fonction pour les deux applications consiste à stocker et restituer l'énergie électrique emmagasinée (fonctions d'interactions soulevées, voir section 5.2.1.5). L'Annexe 8 apporte également

plusieurs éléments facilitant la définition des UF. La puissance étant semble-t-il un critère majeur, nous l'utiliserons comme critère de performance, soit 300kW pour les engins de chantier et 10kW pour les chariots élévateurs (voir section 5.2.1.7). La durée de vie pour chacune des applications n'a pas été précisée. Nous prendrons arbitrairement 5 ans et 10 ans pour les applications A et B, respectivement, à raison de 8h par jour et 5 jours d'utilisation par semaine. Ces batteries doivent a minima être aussi efficaces que les systèmes en place actuellement (moteur à explosion pour les engins de chantiers et batterie au plomb pour les chariots élévateurs), en considérant néanmoins qu'elles perdent 20% de leurs capacités de stockage au terme de la première application. Ainsi, nos UF_{rang2} sont :

Application A. Stocker et restituer l'énergie électrique du réseau pour opérer un engin de chantier d'une puissance de 300 kW pendant 5 ans à raison de 8h d'utilisation par jour et 260 jours par an.

Application B. Stocker et restituer l'énergie électrique du réseau pour opérer un chariot élévateur d'une puissance de 10 kW pendant 5 ans à raison de 8h d'utilisation par jour et 260 jours par an.

5. Équivalence des systèmes. Si nous supposons que toutes les batteries sont réutilisées dans une seconde application, cela signifie qu'une seule batterie de l'application A permet la réalisation de 24 batteries pour la B (comprenant une dégradation de 20% des capacités initiales). Le flux de référence doit en tenir compte.

Pour l'évaluation des impacts environnementaux, nous préconisons cette fois encore de ne pas dissocier les applications et de ne pas répartir les impacts en fonction de l'une et de l'autre. Une étude complémentaire peut être menée pour répartir les impacts environnementaux en fonction des différentes phases d'usages si cela est demandé par le commanditaire. Par exemple, il serait possible de subdiviser chaque processus en fonction d'une clef d'allocation choisie arbitrairement et pouvant être 50/50. Dans ce cas, nous aurions :

Fabrication A. Cette étape est liée aux applications A et B. On considère que 50% des impacts sont propres à chaque application.

Transport et usage A. Concernent uniquement l'application A.

FdU A. Cette étape est liée aux applications A et B. On considère que 50% des impacts sont propres à chaque application.

Préparation et fabrication B. Dans ce cas, les produits sont conçus pour les usages successifs, les impacts de cette phase sont donc répartis équitablement entre les deux applications.

Transport et usage B. Concernent uniquement l'application B.

FdU B. Cette étape est liée aux applications A et B. Les impacts sont alloués de manière équitable entre les applications.

Ici, on considère que le produit est conçu pour les deux applications et que les impacts de certaines phases sont répartis équitablement entre ces dernières (ce qui est plus ou moins vrai dans la réalité). Ceci vient en effet du caractère 'idéal' de la situation considérée et du fait que tous les produits soient réutilisés. On peut dès lors supposer que lorsque des éléments sont considérés en fin de vie, leurs impacts sont eux aussi répartis équitablement entre les deux applications. Les problèmes de performances étant du ressort du système global. Les limites de cette étude complémentaire doivent être précisées dans le rapport d'ACV.

6. Analyses de sensibilité et d'incertitudes. Là encore différentes hypothèses doivent être testées pour évaluer la véracité de l'ACV réalisée. Dans le cas présent, il est nécessaire d'investiguer la FdU 1 et d'évaluer la performance du processus de refabrication. Cela permettra de mieux cerner le flux de référence, facteur important de l'étude. Par ailleurs, les durées de vie des différents systèmes doivent être mieux cernées et comparées à celles des produits sur le marché. Enfin, faire varier le lieu et les conditions d'utilisation des équipements peut avoir une réelle influence car la provenance de l'électricité utilisée et le rendement des machines (notamment pour les engins de chantiers) en seront modifiés.

7. Rapports d'ACV. Tous les éléments cités précédemment doivent être rapportés dans le rapport d'ACV de manière suffisamment précise pour permettre au lecteur d'analyser objectivement les résultats présentés.

Conclusion. Cette seconde approche vise à établir le cadre pour l'ACV de batteries destinées à des applications d'engins de chantier et repurposées dans des chariots élévateurs. Les éléments principaux du cadre ont été définis. Il restera quelques précisions à apporter lorsque l'activité de conception permettra de fournir les dernières informations manquantes, comme les éléments de l'analyse de sensibilité.

5.2.2.3 Synthèse concernant le cadre pour l'ACV de produits repurposés

Dans cette seconde section, notre objectif était d'illustrer le cadre relatif à l'ACV de produits aux usages en cascade, présentée à la section 4.3.1 et appliqué à deux cas différents. Le premier est relatif aux batteries de VE repurposées dans des applications de stockage d'énergie stationnaire. Le second porte sur les batteries d'engins de chantier repurposées dans des chariots élévateurs. À partir des informations à notre disposition, nous avons pu établir les éléments principaux tels que présentés dans la proposition. La troisième proposition a permis de préciser le cadre amont à l'ACV, en s'appuyant sur les éléments définis lors des étapes de conception (ou, à défaut, lors d'entretiens relatifs à cette même thématique). Les recommandations pour l'ACV, présentées et illustrées dans la section 5.2.1 ont contribué à fournir des informations permettant de compléter ce cadre. La recherche d'informations est une étape souvent longue et laborieuse pour un ACViste. Lorsqu'il est isolé, il lui est très difficile d'accéder aux informations dont il a besoin pour réaliser l'analyse environnementale. En l'incluant dès les étapes de conception, nous remarquons qu'il peut d'ores et déjà formaliser celles qui formeront la base de l'ACV. Il n'est nul besoin d'attendre la fin du processus de conception pour ce recueil, l'important est qu'équipes de conception et ACVistes parlent le même langage. En ce sens l'interfaçage de ces deux activités semble important et utile.

Une fois les produits conçus, il sera nécessaire de repréciser les informations renseignées ici pour s'assurer de la correspondance avec le terrain. En effet, suite aux étapes de conception, le produit a pu quelque peu évoluer.

5.2.3 Conclusion sur la mise en usage des propositions

Les propositions faites au Chapitre 4 ont été mises en usage au cours de plusieurs séances de travail relatives à la conception d'une batterie destinées à deux applications. Ces séances étaient basées sur une démarche de conception existante : l'analyse fonctionnelle. La Figure 31 donne un éclaircissement quant aux implémentations des propositions par rapport à la démarche d'AF. Toutes sont reprises, à l'exception de la démarche pour l'ACV.

La section suivante vient discuter les propositions et leur mise en usage présentée ici.

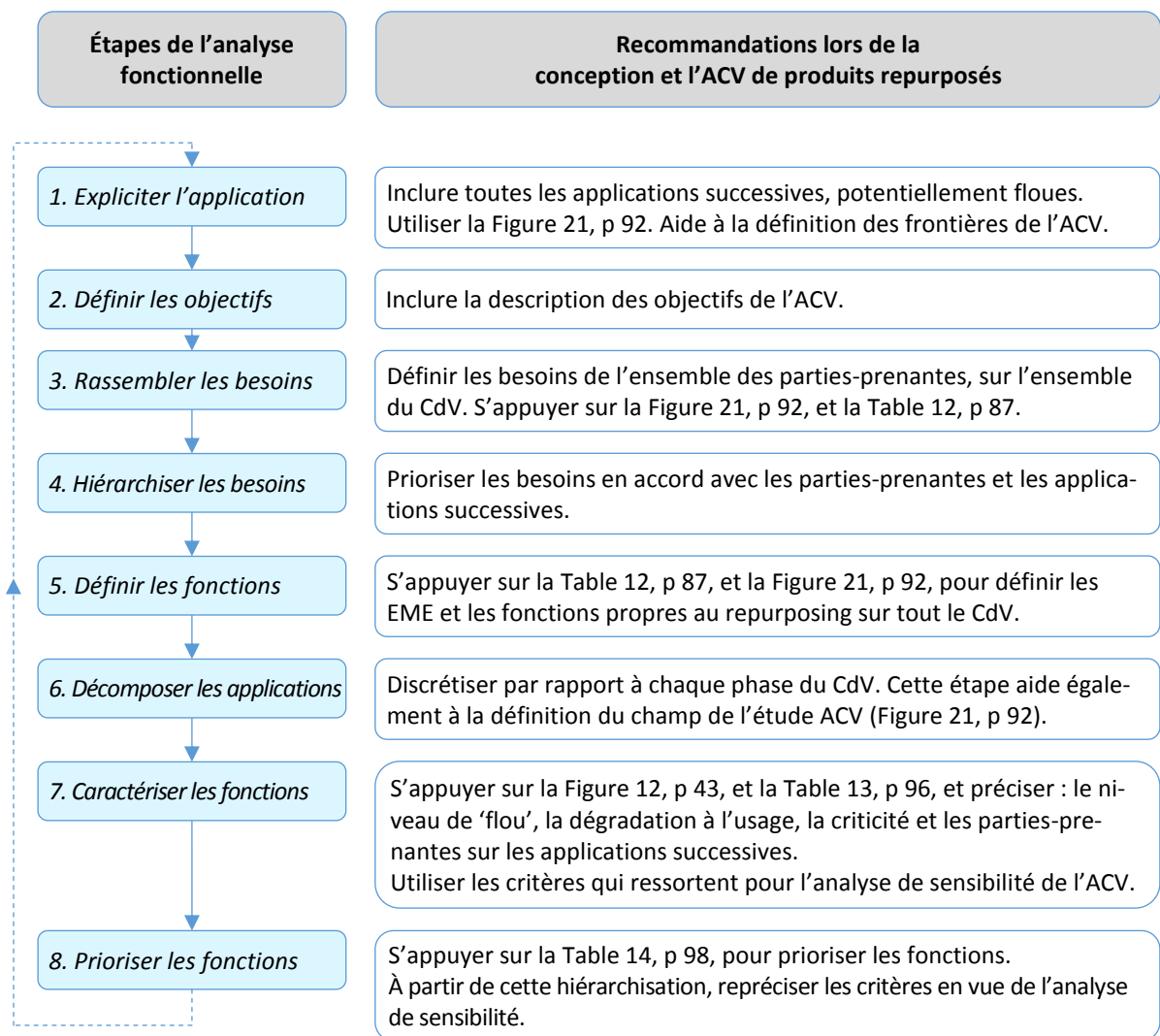


Figure 31 - Synthèse de l'intégration des recommandations pour la conception et l'ACV de produits repurposés lors d'une démarche d'analyse fonctionnelle

5.3 Discussions autour des propositions

Cette section vise à évaluer la pertinence des propositions faites au Chapitre 4 et mises en usage précédemment au sein de la démarche d'analyse fonctionnelle. Suite à la revue de littérature, nous avons identifié trois questions de recherche. Nous discutons ici de la pertinence des propositions émises en réponse.

5.3.1 Dimensions et caractéristiques d'un produit aux applications en cascade

Rappel du contexte. La stratégie de repurposing n'existe et n'est étudiée que depuis peu. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous n'avons que peu d'informations dans la littérature la concernant. Parmi celles-ci, celles utilisables en conception de produit n'en représentent qu'un faible pourcentage. Suite à la revue de littérature, nous avons défini une première question de recherche (QR) qui est : 'Comment définir et classer les caractéristiques de la stratégie de repurposing pour un usage en conception ?'

En réponse, la littérature et des entretiens ont permis de formuler notre première proposition, mise en usage lors de séances de travail ultérieures.

Rappel des propositions :

Notre première proposition dresse les dimensions d'un produit aux applications en cascades selon les trois sphères : le produit, le processus de (re)fabrication et le modèle d'affaire. Nous avons illustré au travers de ce chapitre comment ces dimensions pouvaient être utiles aux équipes de conception lors des étapes amont de définition du produit.

La seconde proposition supporte pleinement l'activité de conception. Elle décrit toutes les imbrications possibles du processus de conception au sein du CdV et formule des recommandations de conception pour le repurposing. Dans l'illustration présentée, Figure 21, p 92, a également permis de supporter la troisième proposition. Les recommandations ont contribué à clarifier la définition des étapes amont du processus de conception de produits repurposés.

Notre troisième proposition, visant la facilitation de l'ACV de produits repurposés, a été abordée en deux temps. Les recommandations ont été intégrées au moment des étapes de conception et, ensuite, la démarche ACV a été illustrée à partir des informations recueillies.

Des éléments qui confortent la première proposition. Au travers de la mise en usage, il ressort que les dimensions liées au produit sont apparues comme très pertinentes lors de la définition des besoins et des fonctions d'une offre de produit repurposé. Les 'caractéristiques produit' sont fortement ressorties lors des étapes amont du processus de conception et la majorité a été émise par les experts. On peut citer les problématiques liées à la sécurité du produit et aux règlementations, les caractéristiques dimensionnelles qu'il est nécessaire de respecter d'une application à l'autre, les critères de performance qui sont les caractéristiques auxquelles les concepteurs semblent attacher le plus d'importance, mais également les contraintes propres à chaque usage et la nécessité d'un suivi à l'usage pour évaluer le maintien des performances tout au long des usages. Néanmoins, certaines dimensions liées au modèle d'affaires sont ressorties. Nous pouvons citer par exemple les critères de retour, conditions sine qua non d'une réutilisation du produit, la définition des applications successives, le besoin d'un nombre suffisant de produits à l'issue du premier usage pour pouvoir assurer les suivants et des ententes par-tenariales en cas de manque de compétences sur une partie de la chaîne de valeur.

En revanche, nous avons observé lors des séances de travail que le matériel en support (Table 12, p 87) n'a pas été utilisé de manière systématique par les personnes présentes. Celles-ci s'appuyant davantage sur leur expérience métier. Malgré tout, de fortes similitudes entre la Table 12, p 87, et les résultats ont été observées. Du fait de ces ressemblances, il est encore plus clair maintenant que s'appuyer sur ces dimensions propres aux produits repurposés semble simplifier l'établissement des premières étapes du processus de conception.

La Table 12, p 87, se veut autant complète que possible. Malgré tout, certaines caractéristiques peuvent avoir été omises car elles n'étaient pas identifiées dans la littérature et ne sont pas ressorties lors des entretiens. Si un manque majeur apparaît, les travaux menés ici et les grilles d'entretiens ayant servis à établir cette table (voir Annexe 2 et Annexe 3) peuvent être réutilisées pour aider à leur identification et à leur intégration au sein du triptyque produit-processus de (re)fabrication-modèle d'affaires (PPMA).

Quelques limites. Lors de la mise en usage de cette première proposition, certaines dimensions ne sont pas du tout ressorties au cours des séances de travail. Il s'agit principalement de celles liées au processus de (re)fabrication et à certaines dimensions propres au modèle d'affaires. Sur ce dernier point, nous supposons que certaines d'entre elles doivent et ne peuvent être définies que par le commanditaire, en amont de la conception du produit, au moment de la définition et de la caractérisation de l'offre. C'est notamment le cas des critères de possession du produit au cours de sa vie (location, vente,...), de la définition des dimensions légales liées à l'offre ou encore des aspects d'image. En ce qui concerne le processus de (re)fabrication, peu d'éléments sont apparus alors que ces étapes semblent incontournables en vue d'une réutilisation du produit. Néanmoins, l'étape jugée comme prioritaire par rapport au cas batterie (les tests des performances) est ressortie au moment de la définition des besoins et de l'élaboration des fonctions.

Nous notons toutefois que les résultats liés à notre première question de recherche sont essentiellement centrés autour du cas d'étude batterie, que ce soit les données issues de la littérature ou des

entretiens. De plus, une large partie des personnes interrogées dans le cadre de la mise en usage avait préalablement été interviewée pour l'établissement de cette proposition. Cela constitue une des limites de cette première partie.

Conclusion. La proposition de la Table 12, p 87, permet de répondre à notre première QR. La classification selon le triptyque PPMA et les dimensions au sein de chaque sphère recouvre l'activité de conception. Bien que les différents éléments n'aient pas été utilisés directement lors de la mise en usage, ils se retrouvent tout au long du processus de conception amont.

5.3.2 *Processus de conception d'un produit repurposé*

Rappel du contexte. Dans le cadre du repurposing, nous ne retrouvons que très peu de démarches d'intégration des spécificités de la stratégie, dès les étapes amont du processus de conception. Les produits sont reconçus a posteriori, après leur première phase d'utilisation. C'est pourquoi, notre seconde QR porte sur la spécification du processus de conception pour le repurposing. Pour y répondre, nous avons cherché à décrire toutes les phases de ce processus et émettre des recommandations pour en faciliter la démarche.

Ce qui appuie la proposition. En premier lieu, concernant la Figure 21, p 92. Au cours des entretiens ayant supporté l'établissement de la première proposition, nous avons confronté les visions des parties-prenantes d'une démarche de conception pour le repurposing à cette figure. Il leur a été très facile de détailler les actions entreprises (ou à entreprendre) dans le cadre du repurposing d'une batterie, par rapport à leurs activités quotidiennes. Elles ont alors pu préciser quelles étaient les étapes sur lesquelles elles intervenaient, à quel moment du CdV et dans quel contexte. Plusieurs cas de figure se sont alors distingués, et notamment la nécessité d'une reconception à l'issue du premier usage, lorsque rien n'a été prévu pour un second. En cherchant à appliquer la Figure 21, p 92, à d'autres stratégies de réutilisation, comme le remanufacturing, il suffit de considérer que toutes les étapes de conception ont été réalisées en amont, et que l'application suivante est identique à la précédente.

En ce qui concerne la stratégie de repurposing, nous avons émis certaines recommandations à intégrer dès le processus de conception amont. Tout d'abord, en lien avec la Figure 21, p 92, nous insistons sur le besoin d'intégration et de co-définition des usages successifs, comme tout autre produit. Néanmoins, une description en scindant de manière temporelle les phases d'usage a permis de faciliter la récolte des besoins et la représentation des fonctions pour chaque application. La compréhension de chacune des applications s'en est retrouvée améliorée. Cela a permis de mettre en avant les fonctions spécifiques à chacune des applications, celles ayant de fortes interactions sur les usages successifs et celles qui étaient propres au processus de refabrication inter-usage. Mais, cette séparation par usage ne doit être réalisée qu'une fois l'offre décrite globalement, au risque d'omettre la définition des conditions de passage d'un usage à l'autre. Indus.intég et Indus.recycl ont ainsi pu exprimer leurs besoins sur l'ensemble du CdV, avec une vision plus large que celle qu'ils avaient au départ. La prise en compte des étapes du CdV inhabituellement prises en compte est apparue comme importante, dès la conception. Un autre point consiste en la prise en compte des parties-prenantes. Lors de la séance de travail en groupe, la diversité de personnes et de métiers représentés et interagissant ensemble a influencé positivement l'expression des besoins. Par la suite, lors des entretiens, INDUS.INTEG et INDUS.RECYCL ont jugé utile et important de prendre en compte les besoins des autres parties-prenantes. De plus chacun d'eux a validé les besoins formulés par l'autre et aucun n'a estimé que ceux émis par l'autre étaient inappropriés. Au contraire, ils permettaient de compléter la vision globale. Enfin, quant au suivi de l'information sur les usages successifs, les critères propres au repurposing proposés ont à minima été décrits la majorité du temps.

Les limites rencontrées. Nous venons de citer une première limite à cette seconde proposition. En effet, la mise en usage présentée dans ce Chapitre 5 est limitée au processus de conception amont. L'activité

de conception n'étant pas complète, il est difficile de s'avancer sur la pertinence de certaines des recommandations émises, comme c'est le cas des variables de conception proposées dans la Table 13, p 96. Il est nécessaire d'avancer davantage dans les étapes de conception pour se rendre pleinement compte de leur validité.

La démarche de conception pour le repurposing se veut par nature intégrer autant d'éléments que possible au moment des phases les plus amont. Les entretiens apportent un bémol à cette affirmation en mettant en avant l'impossibilité, en fonction des situations, de réaliser certaines étapes au cours du processus de conception initial. Malgré tout, en extrapolant à d'autres situations et produits potentiels, les étapes de la Figure 21, p 92, semblent couvrir l'ensemble des cas que l'on peut rencontrer dans la stratégie de repurposing.

Conclusion. Pour répondre à notre seconde question de recherche visant l'établissement du processus de conception pour le repurposing, nous proposons plusieurs éléments. Nous avons établi les étapes successives du processus de conception d'un produit repurposé, par rapport à l'ensemble de son CdV. Par rapport à ce dernier, il semble qu'il ne soit pas toujours possible d'intégrer la totalité des étapes de conception dès les phases initiales, même si cela représente notre cas idéal. À partir du moment où l'un des usages est inconnu, ou simplement non-défini en totalité, il paraît difficile d'aller très loin dans la conception de ce dernier. De plus, pour des produits où le premier usage dure dans le temps, prévoir la conception détaillée du second est dangereux du fait de l'évolution probable du marché et des conséquences qui en découlent. Dans le cas des batteries de véhicule électrique par exemple, une application stationnaire peut être considérée comme la seule option viable et le produit peut être conçu en ce sens, mais un doute peut subsister sur la puissance de l'application en question. La conception n'est alors pas réalisable complètement dès la phase de conception primaire. Plusieurs recommandations ont été émises pour favoriser l'intégration de spécificités liées à cette stratégie, dès la conception primaire et sur l'ensemble du CdV du produit. Elles ont ensuite été mises en application dans une démarche de conception.

5.3.3 *Le repurposing cadré pour l'ACV*

Rappel du contexte. L'évaluation environnementale de produits repurposés est apparue dans la littérature comme particulièrement confuse. Notre troisième et dernière QR cherche à améliorer cette situation :

'Quel cadre donner à l'analyse de cycle de vie de produits repurposés ?'.

Nous avons donc proposé plusieurs étapes, en accord avec d'autres études, pour clarifier les éléments à définir lors de la réalisation d'ACV de produits repurposés dans le but d'uniformiser les démarches. Trois recommandations, adressées aux équipes de conception, visent à mieux formaliser certains éléments de ce cadre.

Les éléments de validation et les limites. N'ayant ni réalisé, ni conçu de produits pour plusieurs applications, cette dernière proposition n'a pu être testée que partiellement. Avec les informations issues des entretiens et des séances de travail, nous avons pu compléter le cadre proposé, au moins dans les grandes lignes. Il aurait été nécessaire d'aller plus loin dans la conception pour le préciser. En ce qui concerne l'analyse de sensibilité, il faudrait davantage regarder comment la priorisation des besoins et des fonctions en conception permet d'identifier les champs d'investigations. Pour cela, il est nécessaire d'aller plus en avant dans la conception. Concernant les autres recommandations émises, il est important de les présenter clairement au moment des étapes de conception, chose qui n'a pas suffisamment été faite et qui a nécessité un travail complémentaire a posteriori.

Conclusion. Par rapport à notre dernière QR, nous avons proposé un cadre et plusieurs recommandations visant à faciliter son remplissage. Nous avons ensuite complété ce cadre au travers de deux cas d'études 'batterie', bien que les informations à notre disposition ne soient pas complètes. Les premiers résultats montrent que de nombreuses informations sont effectivement disponibles dès les étapes de

conception, bien avant que le produit ne soit fabriqué. S'appuyer sur ces étapes semble essentiel pour une meilleure définition des éléments du cadre de l'ACV. En intégrant nos recommandations, cela devrait être d'autant plus simple.

5.4 Conclusions

Démarche globale. Ce chapitre a permis de confronter les trois propositions à la réalité du terrain. Chacune d'elles (à l'exception du cadre pour l'ACV) a été intégrée au sein d'une démarche d'analyse fonctionnelle et mise en usage au cours de différentes séances de travail visant à initier la conception d'une batterie pour plusieurs applications. Différentes parties-prenantes ont pris part à ces séances. Les métiers représentés couvraient l'ensemble du cycle de vie (CdV) d'un produit repurposé.

Le cadre visant la définition des premières étapes d'une analyse de cycle de vie (ACV) de produits repurposés sur deux cas d'applications distincts a également été présenté. Il a été complété à partir des informations recueillies lors des séances de travail.

Contributions. Parmi les propositions issues de ces travaux de thèse, nous avons contribué à améliorer l'état des connaissances quant aux caractéristiques des offres de produits aux applications en cascade. Notre première proposition renseigne par la même occasion quels sont les éléments à définir au moment de la conception de produits repurposés. Lors des séances de travail, plusieurs échos à cette proposition sont apparus lors des discussions (établissement des besoins, des éléments du milieu extérieur, des fonctions, etc.).

Notre seconde proposition vise l'établissement du processus de conception pour le repurposing. Nous avons présenté les différentes étapes de ce processus, représentées au sein du CdV. Ces étapes sont génériques et doivent être adaptées à chaque produit et chaque activité. Elles ont été validées lors des séances de travail auprès des différentes parties-prenantes. Tout au long des étapes de conception nous avons également émis plusieurs recommandations pour une meilleure intégration de la stratégie de repurposing, à destination des équipes de conception : prise en compte du CdV intégral des produits dès la conception, prise en compte de toutes les parties-prenantes, la gestion des priorités entre les usages et la gestion de l'information sur les applications successives. Par ailleurs, ces recommandations se sont aisément intégrées au sein de la démarche d'analyse fonctionnelle, ce qui tend à renforcer l'efficacité de leur utilisation.

En ce qui concerne le cadre pour l'ACV, les différentes étapes ont pu être remplies avec les informations disponibles, notamment lors des étapes de conception. Les recommandations faites pour l'ACV, et à intégrer lors de la conception, permettent une meilleure définition de certaines étapes du cadre. En séquençant l'approche telle que nous l'avons fait, l'établissement des impacts environnementaux devrait être simple et probablement plus facilement comparable à d'autres produits et études.

CONCLUSION GENERALE

Ces travaux de thèse s'intéressent à une stratégie de fin de vie (FdV) visant à réutiliser des produits dans d'autres applications : le repurposing, aussi appelé réutilisation en cascade. L'objectif principal de cette stratégie est la prolongation de la durée de vie des produits, dans le but d'exploiter leur valeur-ajoutée. Tout au long de ces travaux, nous illustrons la stratégie et nos propositions par rapport à un cas d'étude très présent dans la littérature : la réutilisation de batteries de véhicules électriques pour des applications stationnaires. Celui-ci constitue également notre terrain d'étude. Alors que les principales études se focalisent sur la réutilisation de produits à partir de produits usés, en fin d'usage, nous proposons de l'intégrer dès la conception initiale. Les principaux apports sont présentés ci-après puis des perspectives à ces travaux sont émises.

Les apports relatifs à la stratégie de repurposing

D'une manière générale, ces travaux de thèse visent l'intégration de la stratégie de repurposing au sein d'une démarche de conception et dans une optique d'économie circulaire. En ce sens, nous avons formulé trois questions de recherche complémentaires, permettant de mieux comprendre et mieux décrire cette stratégie au moment des étapes de conception, ainsi que de mieux évaluer les produits repurposés d'un point de vue environnemental.

Dans un premier temps, nous avons proposé un cadre générique décrivant les dimensions des produits aux usages en cascade. Ce cadre est utilisable lors d'une activité de conception pour faciliter la prise en compte de toutes ces dimensions lors de l'établissement de compromis par l'équipe de conception. Cette proposition est le fruit d'une étude relative aux stratégies de FdV identifiées dans la littérature (réemploi et remanufacturing principalement), d'études autour du repurposing et d'entretiens auprès de différents terrains. Les hypothèses faites en ce sens à la fin de la section 2.1.4 ont bel et bien été confirmées au cours de ces études par la découverte de nouvelles caractéristiques propres à la stratégie de réutilisation pour des applications en cascade. Trois sphères sont définies pour faciliter la lecture de ce cadre. Les dimensions sont ainsi rattachées à l'une de ces sphères : 'produit', 'processus de (re)conception' ou 'modèle d'affaire'. Cependant, nous avons aussi montré qu'il existait des ponts entre ces différentes sphères et entre ces dimensions. Cette proposition permet de prendre du recul par rapport à la stratégie de repurposing et d'évaluer globalement et rapidement quelles sont les dimensions qui profitent à l'offre et éventuellement de prendre conscience de certains aspects nécessaires à son bon déroulement. Il peut s'agir par exemple du suivi à l'usage, de la prise en compte de certains critères de performance, des différents aspects du processus de repurposing, des critères de retours, etc.. Ces dimensions ont été confirmées par des parties-prenantes représentant l'ensemble du cycle de vie (CdV) d'une offre de repurposing.

Dans un second temps, nous nous sommes davantage intéressés au processus de conception des offres aux applications en cascade. Nous avons fait l'hypothèse, en suivant les principes de conception intégrée, que la prise en compte des parties-prenantes et des différents cycles de conception dès les phases amont (et ceci dès la conception primaire, voir Figure 21, p 92) facilitait la mise en place d'une stratégie en cascade. Une réponse a été apportée en deux temps, permettant de mieux apprécier les spécificités de la stratégie : l'étude de l'organisation de l'activité de conception autour du cycle de vie d'un produit aux usages en cascade et l'activité de conception en elle-même.

En ce qui concerne l'organisation du processus de conception d'un produit repurposé, la littérature et les entretiens ont contribué à mettre en avant l'existence de plusieurs moments propices à l'activité de

conception. Ils diffèrent en fonction du type de produit, de la visibilité au moment de la conception primaire, des parties-prenantes, etc.. Des étapes de conception peuvent ainsi être intégrées tout au long du CdV, en amont ou en aval des usages qui les précèdent. Ainsi, bien que nous recommandions de définir les applications le plus tôt possible (pour une meilleure intégration des unes par rapport aux autres), les applications ultérieures ne peuvent pas nécessairement l'être. Plusieurs raisons ont été évoquées : besoins flous, usage influant fortement sur les performances, faible visibilité économique, etc.. S'ajoute à cela une étape dite de 'préparation'. Elle permet de diagnostiquer le produit avant un réemploi potentiel. Ainsi, pour ces différentes raisons, la conception intégrée, bien qu'elle soit un idéal pour faciliter l'intégration des problématiques de conception sur l'ensemble du cycle de vie, ne semble pas applicable de manière systématique et en totalité.

Pour pallier à cela, plusieurs recommandations visant la conception d'un produit repurposé dès les phases amont ont été formulées en parallèle. Comme mentionné, elles contribuent à l'intégration des spécificités de la stratégie de réutilisation en cascade. L'accent est porté sur l'identification des parties-prenantes et de leurs besoins, la considération de l'ensemble des phases du CdV des produits, la gestion de l'information tout au long de ce CdV et la gestion des priorités inter-usages des offres. Intégrées au plus tôt, ces recommandations visent à faciliter la réutilisation des produits d'une application à l'autre.

Dans un troisième temps, nous nous sommes intéressés à l'évaluation environnementale de ces produits, les analyses de cycle de vie (ACV) de la littérature en lien avec les produits aux usages en cascade étant trop peu comparables. Nous avons émis l'hypothèse que l'établissement d'un cadre commun aux études ACV de produits aux usages en cascade permettait de simplifier leur évaluation et leur comparaison. Notre proposition consiste en deux éléments complémentaires : l'établissement de ce cadre et la mise en place de recommandations à intégrer en conception pour faciliter sa mise en œuvre.

En s'appuyant sur ce qui existe dans la littérature classique et celle traitant de la fin de vie, nous avons pu proposer un cadre pour la réalisation d'ACV de produits repurposés. Différentes suggestions d'investigation doivent permettre aux ACVistes de tenir plus facilement compte des spécificités qui sont propres à ces produits. Il leur sera plus facile d'accéder aux informations recherchées et disponibles dès la conception du produit, bien avant sa fabrication.

Pour supporter ce cadre, trois recommandations à destination des équipes de conception sont émises. Ces propositions doivent effectivement permettre la réalisation d'ACV de produits repurposés de manière plus juste afin d'améliorer la comparabilité entre les études.

Ces trois propositions supportent à la fois les équipes de conception et les ACVistes qui souhaitent initier la conception et l'évaluation d'un produit aux applications en cascade dès les phases amont du processus de conception. Différents exemples de mise en usage sont apportés par rapport au cas d'étude 'batterie'. D'une manière générale, les propositions apportent une vision globale du cycle de vie et des éléments à considérer tout au long de ce dernier, en soulignant les points très spécifiques aux offres de produits repurposés.

En s'intéressant à de nouvelles problématiques de réutilisation, ces travaux de thèse apportent une brique quant aux possibilités de prolongation de l'usage des produits, notre objectif étant de limiter autant que possible leurs impacts sur l'environnement. Enfin, notre démarche contribue plus largement à la prise de conscience des possibilités quant aux stratégies de réutilisation. Jackie Seddon (Envirolink Northwest) le disait: 'pour accroître la pratique du remanufacturing, il est essentiel de vulgariser ce qu'est le remanufacturing'⁴⁵ (Gray et Charter 2008). Cette réflexion s'applique pleinement au repurposing.

⁴⁵ Phrase originale : 'The key to increasing [the practice of remanufacture] is to improve awareness of what re-manufacturing is'.

Vers où mener de futures investigations ?

Ces travaux de thèse ouvrent plusieurs perspectives de recherche à plus ou moins long terme. Nous les décrivons ci-après.

La première d'entre elles consiste en la pleine validation des propositions qui ont été faites. La mise en usage faite au Chapitre 5 permet de les illustrer mais n'est pas une validation à proprement parler. Pour ce faire, chacune des propositions doit être testée et évaluée lors d'une activité de conception d'un produit pour plusieurs usages. Cette validation peut être faite en deux temps. Un premier où les équipes de conception ne sont pas guidées lors des étapes préliminaires du processus de conception. Un second où les propositions sont apportées et pèsent lors de ces mêmes étapes. Les parties-prenantes doivent être libres d'utiliser les outils et recommandations qui en découlent. Leur utilité et leur pertinence pourront alors être pleinement évaluées. Cela concerne principalement les deux premières propositions, axées sur le processus de conception, ainsi que les recommandations de la troisième proposition concernant l'ACV. Pour le cadre de l'ACV, elle peut être testée par des ACVistes sur le cas d'un produit repurposé. Là encore en deux temps. Le premier où rien n'est fourni en support. Le second où le cadre décrit est suggéré et les résultats des recommandations fournis. Plus particulièrement, en ce qui concerne l'ACV, il serait intéressant de davantage investiguer de manière pratique comment la priorisation des besoins et des fonctions faites lors des étapes de conception permet l'identification de champs d'investigations pour l'analyse de sensibilité.

Ces propositions doivent être expérimentées par de nouvelles parties-prenantes, n'étant pas au fait de nos travaux. Par ailleurs, pour évaluer l'influence du cas d'étude, il faudrait que ce dernier diffère du cas de la batterie repurposée qui a servi à l'établissement de nos propositions.

Par la suite, il serait intéressant d'intégrer ces propositions au sein d'une méthode de conception pour le repurposing. Celle-ci pourrait inclure des propositions d'outils supportant les équipes de conception dans leur travail. Les avantages des propositions actuelles sont leur flexibilité et leur généralité. Elles doivent ainsi pouvoir s'adapter à différentes démarches, déjà en place dans les entreprises. La contrepartie est qu'elles peuvent paraître compliquées à intégrer ou floues en substance, parce qu'elles doivent être réappropriées par chaque équipe. Une proposition de méthodologie, supportée par des outils concrets, aurait l'avantage de pouvoir être déroulée par n'importe quelle équipe dans n'importe quelle situation. Elle pourrait par exemple s'appuyer sur des outils de PLM (Product Lifecycle Management) pour suivre et gérer l'évolution du produit tout au long de son CdV. Les problématiques temporelles et la gestion de l'information seraient alors mieux encadrées. Cette méthodologie devrait souligner également les éléments nécessaires à une meilleure définition du cadre de l'ACV.

L'un des points sur lesquels nous n'avons que peu insisté dans ces travaux et qui mérite néanmoins une attention particulière concerne la difficulté potentielle à définir les applications ultérieures. Nos propositions prévoient de prendre en compte des usages supposés flous, mais, lors de leur mise en usage, nous n'avons pas été concernés par cet aspect car toutes les applications étaient définies. Or, dans le cadre d'un projet avec le réseau EcoSD, la question de la définition des applications successives s'est présentée comme une barrière majeure. Nous avons dit au préalable que si aucune application n'était identifiée, la stratégie de repurposing semblait ne pas être appropriée. Au cours de ce projet, Hesham Abouzeid⁴⁶ est reparti des entretiens des Annexe 2 et Annexe 3 ainsi que de notre première proposition pour permettre aux équipes d'Orange d'identifier plus facilement quelles applications étaient les plus pertinentes pour la réutilisation de la carte électronique d'une box internet (Abouzeid 2018). Une seconde étape plus opérationnelle peut venir compléter

⁴⁶ Stagiaire au sein du laboratoire G-SCOP en 2017-2018.

ces travaux. Il s'agirait, par exemple, de proposer au préalable une description des offres qui permette de corrélérer les pistes identifiées par Hesham Abouzeid aux applications ultérieures. Par ailleurs, ces travaux se voulant génériques, il peut être intéressant de les appliquer à d'autres cas que les box internet.

Enfin, dans la continuité de ces travaux de thèse, il serait également intéressant d'accompagner l'activité de conception plus aval, de manière pratico-pratique. Pour ce faire, nous pouvons repartir du cadre de notre première proposition et proposer pour chaque point des recommandations de conception⁴⁷. Par exemple, en ce qui concerne l'architecture globale du produit, nous pouvons conseiller aux équipes de conception de :

- tenir compte du cahier des charges établi à l'issue de l'analyse des besoins,
- adapter l'architecture en fonction des différents milieux auxquels le produit sera confronté,
- adapter l'architecture au processus de repurposing défini,
- mettre en place une architecture standardisée, qui facilite les opérations de repurposing, mais également la conception et la réalisation des usages suivants,
- mettre en place une architecture modulaire, lorsqu'elle est possible, car elle facilite les opérations de désassemblage et de réassemblage, ainsi que le remplacement des composants et le réemploi des sous-systèmes,
- fiabiliser le produit pour limiter les interventions durant les phases d'usages,

Une proposition plus complète de guidelines est disponible en Annexe 9 à titre informatif. Chaque dimension de notre première proposition est investiguée. Celles-ci n'ont pas été confrontées à une pratique de conception et il serait intéressant qu'elles le soient.

Pour conclure ces travaux, j'aimerais finir sur les 'sages' paroles de l'un des penseurs moderne et par rapport auxquelles nous avons apporté des éléments de réponse :

*'Mais qu'est-ce qu'on va en faire ?
De toutes ces vieilles affaires ?
Si moches et encombrantes.
Le monde est une brocante.*

*Mais qu'est-ce qu'on va en faire ?
De toutes ces vieilles affaires ?
Pour que le monde avance,
Vive l'obsolescence !' (Oldelaf 2014)*

⁴⁷ Plus souvent appelées 'guidelines'.

BIBLIOGRAPHIE

- ABattRelife project. 2015. <http://www.vehiculedefutur.com/abattrelife/>.
- Abouzeid, Hesham. 2018. *Conception pour le repurposing : aide à identification d'usages en cascades potentiels*. Grenoble, France: Laboratoire G-SCOP - UGA.
- Abuzed, S. A., C.-W. Tsang, M. P. Foster, et D. A. Stone. 2016. « Repurposing ATX Power Supply for Battery Charging Applications ». In , 5 .-5 . Glasgow, UK.
- ADEME. 2011. « Étude de la seconde vie des batteries de véhicules électriques et hybrides re... » Benchmark. ADEME.
- ADEME. 2012. « Étude sur la durée de vie des équipements électriques et électroniques », juillet.
- ADEME. 2015. *Réduire le gaspillage et faire des déchets une ressource 9 nouveaux projets industriels d'économie circulaire soutenus par le Programme des Investissements d'Avenir*. Paris: Commissariat général à l'Investissement.
- ADEME. 2017. *Déchets 2017 - Les 10 chiffres clés*. 10268. Paris.
- ADEME, D. Millet, E. Meurville, J. Garcia, M. Vautier, P. Tonnelier, S. Vaija, S. Richet, et S. Le Pochat. 2015. *Remanufacturing : prise en compte de la seconde vie dans le calcul des impacts environnementaux de la première vie avec l'ACV - Rapport PRC 15 3 ecosd format ADEME version finale.pdf*.
- Afep. 2015. *Les entreprises s'engagent pour l'économie circulaire, Rapport des entreprises de l'Afep*.
- AFNOR. 2011. *NFX 50-100 - Management par la valeur - Analyse fonctionnelle, caractéristiques fondamentales*.
- AFNOR. 2013. *NF E01-005 - Produits mécaniques — Méthodologie de réduction des impacts environnementaux à la conception et au développement des produits*.
- AFNOR. 2014. *NF EN 1325*.
- Ahmadi, Leila, Arthur Yip, Michael Fowler, Steven B. Young, et Roydon A. Fraser. 2014. « Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries ». *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 6 (juin): 64-74.
- Ahmadi, Leila, Steven B. Young, Michael Fowler, Roydon A. Fraser, et Mohammad Ahmadi Achachlouei. 2015. « A Cascaded Life Cycle: Reuse of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Packs in Energy Storage Systems ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, septembre, 1-14.
- Aissani, Lynda. 2012. « ACV fin de vie - Enjeux, méthodes et limites ». présenté à RMT E&E ACV, juin 21.
- Allacker, K., F. Mathieux, S. Manfredi, N. Pelletier, C. De Camillis, F. Ardente, et R. Pant. 2014. « Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives ». *Resources, Conservation and Recycling* 88 (juillet): 1-12.
- Amaya, Jorge, Katy Cabaret, Fabienne Picard, Tatiana Reyes-Carrillo, Nathalie Rodet-Kroichvili, et Nadège Troussier. 2015. « Coupling business models with Life Cycle Assessment for second life applications: advantages and limitations ».

- Andersen, Ann-Louise, Thomas Ditlev Brunoe, Kjeld Nielsen, et Carin Rösiö. 2017. « Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems: Analysis and synthesis of current design methods and evaluation of supportive tools ». *Journal of Manufacturing Systems* 42 (janvier): 179-195.
- Armijo, A., J. Zuloaga, A. Vega, et M. Sorli. 2015. « Eco-Process Engineering System for Composition of Services to Optimize Product Life-Cycle (EPES) ». *Procedia Engineering*, MESIC Manufacturing Engineering Society International Conference 2015., 132 (janvier): 1081-1088.
- Arnette, Andrew N., Barry L. Brewer, et Tyler Choal. 2014. « Design for Sustainability (DFS): The Intersection of Supply Chain and Environment ». *Journal of Cleaner Production* 83 (novembre): 374-390.
- ARTE France. 2013. *Planned Obsolescence Documentary*.
- Assunção, André, Pedro S. Moura, et Aníbal T. de Almeida. 2016. « Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy ». *Applied Energy* 181 (novembre): 120-131.
- Aziz, N. A., D. A. Wahab, R. Ramli, et C. H. Azhari. 2016. « Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review ». *Journal of Cleaner Production* 112, Part 1 (janvier): 282-290.
- Bakker, Conny, Feng Wang, Jaco Huisman, et Marcel den Hollander. 2014. « Products that go round: exploring product life extension through design ». *Journal of Cleaner Production* 69 (avril): 10-16.
- Baouch, Yacine. 2016. « Améliorer les démarches d'écoconception en prenant en compte les connaissances locales ». Phdthesis, Université Grenoble Alpes.
- Battery University. 2018. « Types of Lithium-ion Batteries ». http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- Bauer, Tom, Daniel Brissaud, et Peggy Zwolinski. 2017. « Design for High Added-Value End-of-Life Strategies ». In *Sustainable Manufacturing*, édité par Rainer Stark, Günther Seliger, et Jérémy Bonvoisin, 113-128. Cham: Springer International Publishing.
- Bauer, Tom, Guillaume Mandil, Élise Naveaux, et Peggy Zwolinski. 2016. « Lifespan Extension for Environmental Benefits: A new Concept of Products with Several Distinct Usage Phases ». In *Procedia CIRP*, 47:430-435. Product-Service Systems across Life Cycle.
- Bauer, Tom, Guillaume Mandil, Peggy Zwolinski, et Élise Monnier. 2017. « Conception de batteries repurposées : Quels paramètres de conception et comment les définir ? » In *15ème Colloque National AIP-Primeca*. La Plagne, France.
- Belchi Lorente, Daniel. 2016. « Proposition d'un Modèle Produit Agile pour l'Ecoconception: application aux batteries Li-ion ». Soutenance de thèse de doctorat, Grenoble, France, septembre.
- Beltramo, Daniel, Sara Tepfer, Wesley Thompson, et Perrin Wright. 2011. « Redefining Waste: Repurposed post-consumer bags as Vapor barriers ». *University of Oregon - student report*.
- Beverungen, Daniel, Sebastian Bräuer, Florian Plenter, Benjamin Klör, et Markus Monhof. 2017. « Ensembles of Context and Form for Repurposing Electric Vehicle Batteries: An Exploratory Study ». *Computer Science - Research and Development* 32 (1-2): 195-209.

- Bi, Z.M., Yanfei Liu, Blane Baumgartner, Eric Culver, J.N. Sorokin, Amanda Peters, Blaine Cox, Jessica Hunnicutt, John Yurek, et Stephen O'Shaughnessey. 2015. « Reusing Industrial Robots to Achieve Sustainability in Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) ». *Industrial Robot: An International Journal* 42 (3): 264-273.
- Blake, L. R. 1966. « Design Techniques ». In *Engineering Design*, édité par T. F. Roylance, 11-45. Pergamon.
- Bonvoisin, Jérémy, Friedrich Halstenberg, Tom Buchert, et Rainer Stark. 2016. « A systematic literature review on modular product design ». *Journal of Engineering Design* 27 (7): 488-514.
- Bowler, Melissa. 2014. « Battery Second Use: A Framework for Evaluating the Combination of Two Value Chains ». Clemson University. http://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/1378.
- Brissaud, Daniel, et Serge Tichkiewitch. 2000. « Innovation and manufacturability analysis in an integrated design context ». *Computers in Industry* 43 (2): 111-121.
- British Standards. 2009. *BS 8887-2:2009 - Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE). Terms and definitions*.
- Brusa, Eugenio, Ambra Calà, et Davide Ferretto. 2018. « Systems, Customer Needs and Requirements ». In *Systems Engineering and Its Application to Industrial Product Development*, 69-113. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham.
- Bureau Veritas. 2012. « Formation à l'ACV et à l'éco-conception ». avril.
- Casals, Lluç Canals, Beatriz Amante García, Frédéric Aguesse, et Amaia Iturrondobeitia. 2015. « Second Life of Electric Vehicle Batteries: Relation between Materials Degradation and Environmental Impact ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, juin, 1-12.
- Cascini, G., G. Fantoni, et F. Montagna. 2013. « Situating needs and requirements in the FBS framework ». *Design Studies* 34 (5): 636-662.
- Chakraborty, Kaustov, Sandeep Mondal, et Kampan Mukherjee. 2017. « Analysis of product design characteristics for remanufacturing using Fuzzy AHP and Axiomatic Design ». *Journal of Engineering Design* 28 (5): 338-368.
- Chapotot, Emilie. 2009. « Proposition d'une approche Usage Lifecycle Management (ULM) pour capitaliser les usages et favoriser la génération de concepts innovants de produits et services ». Bordeaux 1.
- Checkland, Peter, et Sue Holwell. 1998. « Action Research: Its Nature and Validity ». *Systemic Practice and Action Research* 11 (1): 9-21.
- Chong, Yih Tng, et Chun-Hsien Chen. 2010. « Customer Needs as Moving Targets of Product Development: A Review ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 48 (1-4): 395-406.
- CIRAIG. 2011. *Analyse du Cycle de Vie environnementale et sociale de deux options de gestion du matériel informatique en fin de vie*. Montréal.
- Cooper, Joyce Smith. 2003. « Specifying Functional Units and Reference Flows for Comparable Alternatives ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (6): 337.
- Crul, Marcel, et Jan Carel Diehl. 2009. *Design for Sustainability: A Step by Step Approach*. UNEP, United Nation Publications.

- De Camillis, C., M. Brandão, A. Zamagni, et D. Pennington, éd. 2014. « Sustainability Assessment of Future-Oriented Scenarios : A Review of Data Modelling Approaches in Life Cycle Assessment : Towards Recommendations for Policy Making and Business Strategies.. » *Publication Office of the European Union*, European Union, , janvier.
- Decreuse, Christophe, et Daniel Feschotte. 1998. « Ingénierie simultanée ». *Ref : TIPO83WEB - « Conception et Production »*, janvier 10.
- den Hollander, Marcel C., Conny A. Bakker, et Erik Jan Hultink. 2017. « Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms ». *Journal of Industrial Ecology* 21 (3): 517-525.
- DeRousseau, Mikaela, Benjamin Gully, Christopher Taylor, Diran Apelian, et Yan Wang. 2017. « Repurposing Used Electric Car Batteries: A Review of Options ». *JOM* 69 (9): 1575-1582.
- Domingo, Lucie. 2013. « Méthodologie d'éco-conception orientée utilisation ». Université de Grenoble.
- Dufrene, Maud. 2015. « Proposition d'un cadre méthodologique comme support aux approches d'éco-conception en entreprise : exigences et conceptualisation pour une plateforme logicielle ». Grenoble Alpes.
- Eckert, Claudia, et John Clarkson. 2005. « The Reality of Design ». *SpringerLink*, 1-29.
- Eddahech, Akram. 2013. « Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride ». Phdthesis, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- Eisenbart, Boris, et Maaïke Kleinsmann. 2017. « Implementing shared function modelling in practice: experiences in six companies developing mechatronic products and PSS ». *Journal of Engineering Design*, novembre, 1-34.
- ELIBAMA project. 2014. *ELIBAMA WHITE PAPER*.
- Ellen MacArthur Foundation. 2013. « Towards the circular economy ». *J. Ind. Ecol*, 23-44.
- Ellen MacArthur Foundation. 2016. « The Circular Design Guide ».
- Erden, Mustafa Suphi, Hitoshi Komoto, T.J. van Beek, V D'Amelio, E Echavarria, et Tetsuo Tomiyama. 2008. « A review of function modeling: Approaches and applications ». *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 22 (mars): 147-169.
- European Commission. 2000. *Directive 2000/53/EC of 18 September 2000 on end-of-life vehicles*.
- European Commission. 2008a. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - 20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity*.
- European Commission. 2008b. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*.
- European Commission. 2009. *Directive 2009/125/EC of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, OJEU n°285 of 31 October 2009, Brussels, Belgium*.
- European Commission. 2011. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Roadmap to a Resource Efficient Europe*. COM (2011) 571 final.

- European Commission. 2012. *Directive 2012/19/EU of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), OJEU n°197 of 24 July 2012, Brussels, Belgium.*
- European Commission. 2013a. *Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations Text with EEA relevance.*
- European Commission. 2013b. *Directive 2013/56/EU of 20 November 2013 amending Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators as regards the placing on the market of portable batteries and accumulators containing cadmium intended for use in cordless power tools, and of button cells with low mercury content.*
- European Commission. 2014. *Règlement (UE) n ° 333/2014 du Parlement européen et du Conseil du 11 mars 2014 modifiant le règlement (CE) n ° 443/2009 en vue de définir les modalités permettant d'atteindre l'objectif de 2020 en matière de réduction des émissions de CO 2 des voitures particulières neuves. OJ L. Vol. 103.*
- European Commission. 2015a. « Boucler la boucle: la Commission adopte un nouveau train de mesures ambitieux sur l'économie circulaire en vue de renforcer la compétitivité, de créer des emplois et de générer une croissance durable ».
- European Commission. 2015b. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Closing the Loop - An EU Action Plan for the Circular Economy.* Bruxelles, Belgique.
- European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2010. « International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance. » In *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook.* Luxembourg: Publications Office.
- Faria, Ricardo, Pedro Marques, Rita Garcia, Pedro Moura, Fausto Freire, Joaquim Delgado, et Aníbal T. de Almeida. 2014. « Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective ». *Journal of Power Sources* 262 (septembre): 169-177.
- Fondation pour la Nature et l'Homme, et European Climate Foundation. 2017. *Quelle contribution du véhicule électrique à la transition écologique en France ? - Enjeux environnementaux et perspectives d'intégration des écosystèmes Mobilité et Energie.*
- Foster, Meaghan, Paul Isely, Charles Robert Standridge, et Md Mehedi Hasan. 2014. « Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries ». *Journal of Industrial Engineering and Management* 7 (3).
- Gelbmann, Ulrike, et Barbara Hammerl. 2015. « Integrative re-use systems as innovative business models for devising sustainable product-service-systems ». *Journal of Cleaner Production, Special Volume: Why have 'Sustainable Product-Service Systems' not been widely implemented?*, 97 (juin): 50-60.
- Gericke, Kilian, et Lucienne Blessing. 2012. « An analysis of design process models across disciplines ». In *Proceedings of International Design Conference, DESIGN.*
- Gero, John. 1990. « Design prototypes: a knowledge representation schema for design ». *AI magazine* 11 (4): 23-36.
- Global Reporting Initiative. 2013. « G4 Sustainability Reporting Guidelines - Reporting Principles and Standard Disclosures ». Global Reporting Initiative.

- Go, T. F., D. A. Wahab, et H. Hishamuddin. 2015. « Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward ». *Journal of Cleaner Production* 95 (juin): 16-29.
- Goodall, Paul, Emma Rosamond, et Jenifer Harding. 2014. « A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility ». *Journal of Cleaner Production* 81 (octobre): 1-15.
- Gray, Casper, et Martin Charter. 2008. « Remanufacturing and product design ». *International Journal of Product Development* 6 (3-4): 375-392.
- Grenoble IN'Press. 2018. « Une nouvelle jeunesse pour les batteries lithium ion ». *Grenoble INP*, mars 19.
- Hartwell, Ian, et James Marco. 2016. « Management of Intellectual Property Uncertainty in a Remanufacturing Strategy for Automotive Energy Storage Systems ». *Journal of Remanufacturing* 6 (1): 3.
- Hatcher, G. D., W. L. Ijomah, et J. F. C. Windmill. 2011. « Design for remanufacture: a literature review and future research needs ». *Journal of Cleaner Production* 19 (17-18): 2004-2014.
- Heijungs, Reinout, et Jeroen B. Guinée. 2007. « Allocation and 'what-if' scenarios in life cycle assessment of waste management systems ». *Waste Management, Life Cycle Assessment in Waste Management*, 27 (8): 997-1005.
- Idjis, Hakim. 2015. « La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie : contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence ». Phd thesis, Université Paris-Saclay.
- INSEE. 2016. « Déchets banals de l'industrie manufacturière en 2012 ». <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015936#tableau-Donnes>.
- Institut National de l'Audiovisuel. 2018. *Tout jetable : le choucho des années 1970*.
- ISO 14040. 2006. *14040. ISO 14040:2006*.
- ISO 14044. 2006. *ISO 14044:2006*.
- ISO 14062. 2002. *14062 - Integrating environmental aspects into product design and development. ISO/TR 14062:2002*.
- Jeantet, Alain. 1998. « Les objets intermédiaires dans la conception. Éléments pour une sociologie des processus de conception ». *Sociologie du Travail* 40 (3): 291-316.
- Kärkkäinen, Hannu, Petteri Piippo, et Markku Tuominen. 2001. « Ten tools for customer-driven product development in industrial companies ». *International Journal of Production Economics, Strategic Planning for Production Systems*, 69 (2): 161-176.
- Keoleian, Gregory A., et Dan Menerey. 1994. « Sustainable Development by Design: Review of Life Cycle Design and Related Approaches ». *Air & Waste* 44 (5): 645-668.
- Kim, Kyunghun, Jinhwi Cho, Heesauk Jhon, Jongwook Jeon, Myounggon Kang, Chan Eon Park, Jihoon Lee, et Tae Kyu An. 2017. « Repurposing Compact Discs as Master Molds to Fabricate High-Performance Organic Nanowire Field-Effect Transistors ». *Nanotechnology* 28 (20): 5304-5304.
- Kim, Sunyoung, et Eric Paulos. 2011. « Practices in the Creative Reuse of e-Waste ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2395-2404. CHI '11. New York, NY, USA: ACM.

- Klör, Benjamin, Markus Monhof, Daniel Beverungen, et Sebastian Bräuer. 2017a. « Recommendation and Configuration of Value-Added Services for Repurposing Electric Vehicle Batteries: A Vertical Software Prototype ». In . Thessaloniki.
- Klör, Benjamin, Markus Monhof, Daniel Beverungen, et Sebastian Bräuer. 2017b. « Design and Evaluation of a Model-Driven Decision Support System for Repurposing Electric Vehicle Batteries ». *European Journal of Information Systems*, septembre, 1-19.
- Krystofik, Mark, Allen Luccitti, Kyle Parnell, et Michael Thurston. 2017. « Adaptive remanufacturing for multiple lifecycles: A case study in office furniture ». *Resources, Conservation and Recycling*, août.
- Lasjaunias, Aude. 2013. « “Des millions de gens pratiquent le “do it yourself” sans le savoir” ». *Le Monde.fr*, novembre 19, sect. M le mag.
- Lecocq, X., B. Demil, et V. Warnier. 2006. « Le business model, un outil d’analyse stratégique ». *L’Expansion Management Review* 123: 96-109.
- Lieder, Michael, et Amir Rashid. 2016. « Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry ». *Journal of Cleaner Production* 115 (mars): 36-51.
- Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. 2015. 2015-992.
- London, Bernard. 1932. *Ending the Depression through Planned Obsolescence*, New York.
- Luczak, Holger, Christian Gill, et Bernhard Sander. 2007. « Architecture for Service Engineering — The Design and Development of Industrial Service Work ». In *Advances in Services Innovations*, édité par Professor Dr-Ing Dieter Spath et Professor Dr-Ing habil Dipl-Math Klaus-Peter Fähnrich, 47-63. Springer Berlin Heidelberg.
- Lund, Robert T. 1984. « Remanufacturing ». *Technology review* 87 (2): 19-29.
- Maguire, Martin, et Nigel Bevan. 2002. « User Requirements Analysis ». In *Usability*, 133-148. IFIP — The International Federation for Information Processing. Springer, Boston, MA.
- Mital, Anil, Anoop Desai, Anand Subramanian, et Aashi Mital. 2014. « Designing for Functionality ». In *Product Development (Second Edition)*, 269-334. Oxford: Elsevier.
- Morris, Ashley, Marc Halpern, Rossi Setchi, et Paul Prickett. 2016. « Assessing the challenges of managing product design change through-life ». *Journal of Engineering Design* 27 (1-3): 25-49.
- Oldelaf. 2014. *Qu’est-ce qu’on va en faire ?* Dimanche.
- Oliveira, Luis Miguel. 2016. « Environmental Life Cycle Assessment – First Life and Second Life Analysis ». Brussels, Belgium, mai 23.
- Pahl, Gerhard, et Wolfgang Beitz. 2013. *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer Science & Business Media.
- Papageorgiou, Evangelos, Murat Hakki Eres, et James Scanlan. 2016. « Value Modelling for Multi-Stakeholder and Multi-Objective Optimisation in Engineering Design ». *Journal of Engineering Design* 27 (10): 697-724.
- Park, Miles. 2009. « Product Life: Designing for Longer Lifespans ».
- Pertl, A., G. Obersteiner, et S. Salhofer. 2011. « Life cycle assessment aspects of reuse products ». In *LCM 2011*. Berlin, Germany.

- Peters, Harm AR, Marten E. Toxopeus, Juan M. Jauregui-Becker, et Mark-Olof Dirksen. 2012. « Prioritizing 'Design for Recyclability' Guidelines, Bridging the Gap between Recyclers and Product Developers ». In *Leveraging Technology for a Sustainable World*, 203–208. Springer.
- Peters, Kristian. 2016. « Methodological issues in life cycle assessment for remanufactured products: a critical review of existing studies and an illustrative case study ». *Journal of Cleaner Production* 126 (juin): 21-37.
- Pialot, O., D. Millet, E. Cor, et J. Bisiaux. 2015. « A Method Helping to Define Eco-innovative Systems Based on Upgradability ». *Procedia CIRP*, 7th Industrial Product-Service Systems Conference - PSS, industry transformation for sustainability and business, 30 (Supplement C): 185-190.
- Pigosso, Daniela C. A., Evelyn T. Zanette, Américo Guelere Filho, Aldo R. Ometto, et Henrique Rozenfeld. 2010. « Ecodesign methods focused on remanufacturing ». *Journal of Cleaner Production*, The Roles of Cleaner Production in the Sustainable Development of Modern Societies, 18 (1): 21-31.
- Plank, Bernhard, Florian Ellert, Jürgen Gruber, et et al. 2013. « Detektion von Fehlern in kohlenstoff-faserverstärkten Kunststoffen mittels Sichtprüfung, Ultraschallprüfung, Radioskopie, aktiver Thermografie und Röntgen Computertomografie ». In *ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung. DGZfP-Jahrestagung 2013. CD-ROM*, 9.
- Plevin, Richard J., Mark A. Delucchi, et Felix Creutzig. 2014. « Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers ». *Journal of Industrial Ecology* 18 (1): 73-83.
- Prassler, Erwin, Herman Bruyninckx, Klas Nilsson, et Azamat Shakhimardanov. 2009. *The Use of Reuse for Designing and Manufacturing Robots*.
- Prudhomme, G., P. Zwolinski, et D. Brissaud. 2003. « Integrating into the Design Process the Needs of Those Involved in the Product Life-Cycle ». *Journal of Engineering Design* 14 (3): 333-353.
- Record. 2011. *Mode de prise en compte de la fin de vie lors de la réalisation d'analyses de cycle de vie (ACV) « produits »*. 10-1019/1A.
- Richa, Kirti, Callie W. Babbitt, Gabrielle Gaustad, et Xue Wang. 2014. « A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles ». *Resources, Conservation and Recycling* 83 (février): 63-76.
- Richa, Kirti, Callie W. Babbitt, Nenad G. Nenadic, et Gabrielle Gaustad. 2015. « Environmental Trade-Offs across Cascading Lithium-Ion Battery Life Cycles ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, août, 1-16.
- Rogers, D., J. Green, M. Foster, D. Stone, D. Schofield, S. Abuzed, et A. Buckley. 2013. « Repurposing of ATX computer power supplies for PV applications in developing countries ». In *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 973-978.
- Rohr, S., S. Müller, M. Baumann, M. Kerler, F. Ebert, D. Kaden, et M. Lienkamp. 2017. « Quantifying Uncertainties in Reusing Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles ». *Procedia Manufacturing*, 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 3-5 October 2016, Stellenbosch, South Africa, 8: 603-610.
- Ross, D. T. 1977. « Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas ». *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-3 (1): 16-34.

- Rossi, Vincent, Nina Cleeve-Edwards, Lars Lundquist, Urs Schenker, Carole Dubois, Sebastien Humbert, et Olivier Jolliet. 2015. « Life cycle assessment of end-of-life options for two biodegradable packaging materials: sound application of the European waste hierarchy ». *Journal of Cleaner Production* 86 (janvier): 132-145.
- Roucoules, Lionel, Bernard Yannou, et Benoît Eynard. 2006. *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*. Paris; Lavoisier: Hermes Science.
- Ruiz, Vanesa, Lois Boon-Brett, Marc Steen, et Luc Van den Berghe. 2016. *Putting Science into Standards - Driving Towards Decarbonisation of Transport: Safety, Performance, Second Life and Recycling of Automotive Batteries for E-Vehicles*. Petten.
- Saaty, R. W. 1987. « The analytic hierarchy process—what it is and how it is used ». *Mathematical Modelling* 9 (3): 161-176.
- Sakao, Tomohiko, et Hajime Mizuyama. 2014. « Understanding of a product/service system design: a holistic approach to support design for remanufacturing ». *Journal of Remanufacturing* 4 (janvier): 24.
- Schrijvers, Dieuwertje L., Philippe Loubet, et Guido Sonnemann. 2016. « Critical Review of Guidelines against a Systematic Framework with Regard to Consistency on Allocation Procedures for Recycling in LCA ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (7): 994-1008.
- Singh, Jagdeep, et Isabel Ordoñez. 2016. « Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy ». *Journal of Cleaner Production* 134A (octobre): 342-353.
- Standridge, Charles R., et Lindsay M. Corneal. 2014. *Remanufacturing, Repurposing, and Recycling of Post-Vehicle-Application Lithium-Ion Batterie*. San José, CA.
- Sundin, Erik, et Bert Bras. 2005. « Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing ». *Journal of Cleaner Production* 13 (9): 913-925.
- Sundin, Erik, et Hui Mien Lee. 2011. « In What Way Is Remanufacturing Good for the Environment? » In *Proceedings of the 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign-11)*, 551-556. Kyoto, Japan.
- Teulon, Hélène. 2014. *Le guide de l'éco-innovation*. Eyrolles. ADEME. /Entreprise/Livre/le-guide-de-l-eco-innovation-9782212559910.
- Tolio, Tullio, Alain Bernard, Marcello Colledani, Sami Kara, Guenther Seliger, Joost Duflou, Olga Battaia, et Shozo Takata. 2017. « Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66 (2): 585-609.
- Tomiyaama, T., P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, Ch. Kind, et F. Kimura. 2009. « Design methodologies: Industrial and educational applications ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2): 543-565.
- Tong, Shijie, Tsz Fung, Matthew P. Klein, David A. Weisbach, et Jae Wan Park. 2017. « Demonstration of reusing electric vehicle battery for solar energy storage and demand side management ». *Journal of Energy Storage* 11 (juin): 200-210.
- Toyota. 2015. « Toyota Flips the Switch to Sustainable Power at Yellowstone National Park | Corporate ».
- Troussier, Nadege, Natalia Sirina, Pierre-Antoine Adragna, Jorge Amaya, et Tatiana Reyes. 2017. « Methodology for Multiple Life Cycles Product Ecodesign ». In *DS 87-1 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 1: Resource Sensitive Design, Design Research Applications and Case Studies, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017*.

- Tukker, Arnold. 2004. « Eight Types of Product–service System: Eight Ways to Sustainability? Experiences from SusProNet ». *Business Strategy and the Environment* 13 (4): 246-260.
- Ullman, David G. 2003. *The Mechanical Design Process*. 4th éd. McGraw hill.
- Umeda, Y., et T. Tomiyama. 1997. « Functional reasoning in design ». *IEEE Expert* 12 (2): 42-48.
- Vermaas, Pieter D. 2009. « The Flexible Meaning of Function in Engineering ». In *ICED 09*, 2:113-124. Stanford, CA, USA: Norell Bergendahl, M.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad, P.; Lindemann, U.
- Worrell, Ernst, et M. A. Reuter, éd. 2014. *Handbook of recycling: state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists*. Amsterdam ; Boston: Elsevier.
- Wynn, David, et John Clarkson. 2005. « Models of Designing ». *SpringerLink*, 34-59.
- Zhang, Feng. 2014. « Intégration Des Considérations Environnementales En Entreprise : Une Approche Systématique Pour La Mise En Place de Feuilles de Routes ». Grenoble, France: Université de Grenoble.
- Zhang, Qiang, Ioana Deniaud, Christophe Lerch, Claude Baron, et Emmanuel Caillaud. 2016. « Process modeling of innovative design using Systems Engineering ». *IFAC-PapersOnLine*, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016, 49 (12): 1579-1584.
- Zhao, Yuan, Vijitashwa Pandey, Harrison Kim, et Deborah Thurston. 2010. « Varying Lifecycle Lengths Within a Product Take-Back Portfolio ». *Journal of Mechanical Design* 132 (9): 10.
- Zwolinski, Peggy, Miguel-Angel Lopez-Ontiveros, et Daniel Brissaud. 2006. « Integrated Design of Remanufacturable Products Based on Product Profiles ». *Journal of Cleaner Production* 14 (15-16): 1333-1345.

ANNEXES

Sommaire.

- Annexe 1. Synthèse de la définition des termes permettant de caractériser les stratégies de Fin d'Usage et exemples
- Annexe 2. Grille d'entretien suivie avec le recycleur et réponses
- Annexe 3. Grille d'entretien suivie avec le CEA et réponses
- Annexe 4. Tableau de définition des critères propres aux fonctions dans le cadre du repurposing
- Annexe 5. Document de préparation au workshop
- Annexe 6. Récolte des besoins pour le repurposing
- Annexe 7. Tableau d'explicitation des fonctions par rapport aux critères et caractéristiques de conception
- Annexe 8. Tableaux de caractérisation des fonctions par R&Delec, R&Dbms et R&Drecycl
- Annexe 9. Guidelines pour la conception de produits repurposés

Annexe 1. Synthèse de la définition des termes permettant de caractériser les stratégies de Fin d'Usage et exemples

A 1.1. Définitions des caractéristiques 'Produit'

Les paramètres relatifs aux produits sont considérés comme l'un des trois points essentiels à définir lors de l'activité de repurposing et plus particulièrement au cours du processus de conception. On distingue 3 sous-catégories : les éléments liés à l'architecture du produit, Les caractéristiques communes aux différents usages et celles particulières à chacun d'eux.

A 1.1.1. Architecture produit

L'architecture du produit correspond aux concepts et aux éléments physiques utilisés pour la réalisation du produit, ainsi que leur agencement. On distingue ici l'architecture globale des architectures sous-jacentes.

L'**Architecture globale** englobe les éléments ayant une influence à l'échelle macro du produit et un impact sur l'ensemble de son cycle de vie. Par exemple, il sera ici de définir si et dans quelle mesure le concept de modularité est intégré au produit, ou encore de la manière d'agencer les éléments composant le produit pour faciliter les opérations inter-usages. C'est au niveau de l'architecture globale que les critères tels que la fiabilité ou la durabilité seront évalués.

L'architecture globale du produit est un paramètre important lors de la conception d'une batterie. Différents éléments la composent. Que ce soit pour une ou plusieurs applications, il est important de prendre en considération l'environnement extérieur au produit dès les phases de conception - pluie, neige, glace, sel, poussière, vibration, chocs, etc.. De plus, l'architecture conçue à l'échelle du produit doit être assez souple pour permettre les différentes opérations intervenant entre chacun des usages - contrôle, chaîne logistique inverse (CLI), nettoyage, opérations de repurposing, etc. (voir section A 1.1). L'architecture globale peut être influencée par des réglementations, des normes ou des accords visant la standardisation des batteries. Dans le même esprit, il est ressorti que l'adoption d'une architecture modulaire simplifierait significativement les opérations de repurposing. En effet, il suffirait dès lors de remplacer les modules défectueux par d'autres, viables, pour prolonger la durée de vie du produit. Ceci permettrait également de recomposer des batteries en vue d'autres applications nécessitant des performances différentes.

Les **Architectures sous-jacentes** correspondent aux spécialités de chacune des équipes travaillant sur le produit. Il peut s'agir des éléments mécaniques (choix d'assemblage par exemple), électriques (agencement pour plusieurs utilisations par exemple), thermique, etc. du produit.

En fonction des produits, on peut détailler l'architecture globale par rapport aux architectures sous-jacentes - mécanique, électrique, thermique, etc.. Au niveau de l'architecture mécanique par exemple, il est important de pouvoir faciliter le diagnostic des différents composants de la batterie et, ce, en fonction du niveau de repurposing choisi (voir section A 1.2). Les choix d'assemblage - boulonnage, soudage, sertissage, rivetage, etc.- influencent fortement certaines opérations de repurposing envisagées - contrôle, désassemblage, nettoyage, réassemblage. Pouvoir désassembler les différentes sous-parties est essentiel pour les réutiliser, mais toutes les pièces ne sont pas récupérables, tout au moins en l'état. Dans le cas des batteries, au niveau de la partie électronique, il existe aujourd'hui une réelle difficulté à réutiliser le BMS (système de gestion de la batterie). Deux raisons principales sont citées : soit il n'est tout simplement pas présent lorsque la batterie est récupérée ; soit il est trop spécifique à la première application et inutilisable en l'état. Le BMS doit donc être reconçu. En ce qui concerne l'architecture électrique d'une batterie, il faut que les cellules soient agencées au mieux pour chacune des applications. Les choix de conception qui en découlent doivent tenir compte des usages successifs. Pour les batteries, l'architecture

thermique est, elle aussi, importante. Respecter les plages de températures couvrant l'ensemble des usages est nécessaire pour assurer le fonctionnement de la batterie dans de bonnes conditions et ne pas dégrader les cellules prématurément. D'une manière plus générale, certains éléments peuvent être conservés et réutilisés pour minimiser les coûts - les nervures⁴⁸, les cellules, voire les modules complets, certains composants électriques et électroniques, etc.. D'autres sont en revanche considérés systématiquement comme non valorisables - les emballages, les polystyrènes, les pièces trop fortement marquées ou estampillées pour le premier usage, etc..

A 1.1.2. Caractéristiques produit

Les caractéristiques liées aux différents usages peuvent influencer très fortement l'ensemble du cycle de vie. Leur définition doit donc être faite précautionneusement.

Les **Choix technologiques** correspondent aux alternatives possibles entre différents composants. Ceux-ci définissent le cœur du produit et ne peuvent être modulés au cours de son cycle de vie.

Parmi les différentes technologies de batteries disponibles sur le marché, toutes ne sont pas pertinentes pour être réutilisées dans des activités de seconde vie. La chimie de la batterie en est l'une des raisons. Soit car la technologie arrive en FdV pour des raisons règlementaires - technologie NiCd⁴⁹ pour des applications portables -, soit car elle ne correspond pas à l'application visée – technologie NiMH⁴⁰ non destinée à du stockage stationnaire. Certaines technologies abondent de métaux précieux ; les recycler permet un gain pécuniaire direct - technologie LCo⁴⁰ -, même si les caractéristiques de tels produits semblent être satisfaisantes pour une seconde application - technologie NMC⁴⁰. Enfin, d'autres technologies sont fortement développées sur certains marchés - LFP⁴⁰ présente dans l'automobile - mais ont peu de matériaux à forte valeur, donc peu de gains possibles en FdV. Leur réutilisation serait intéressante. Dans le même esprit que le choix de la chimie, le type de cellule qui sera utilisé est un élément important. Il en existe aujourd'hui plusieurs types, ayant des avantages et inconvénients en fonction des cas d'applications - $\phi 18 \times 650$, $\phi 26 \times 650$ mm, prismatiques, sachets souples, etc..

Les **Aspects relatifs à la sécurité** du produit correspondent aux normes, réglementations, ou critères à respecter pour s'assurer que le produit ne causera pas de dommage à l'Homme et à l'Environnement. Ceux-ci doivent en général être respectés pour pouvoir mettre le produit sur le marché. Dans le cas du repurposing, l'évolution des réglementations peut contraindre le produit à être retiré du marché avant sa seconde utilisation.

Les aspects liés à la sécurité des batteries sont des paramètres qui contraignent fortement leur conception. De plus, ils sont difficilement quantifiables : soit les conditions sont remplies, soit non, mais il n'existe actuellement pas de gradation possible entre ces extrêmes. A contrario, à l'issue du premier usage il est nécessaire de pouvoir évaluer l'ensemble des paramètres. Dans la conception de batteries au lithium, la précontrainte des cellules, les valeurs liées à l'échauffement, le gonflement des cellules, etc., sont des aspects de sécurité à considérer, évaluer et qui peuvent varier en fonction de l'usage.

Les **caractéristiques dimensionnelles** peuvent elles aussi évoluer au cours du cycle de vie d'un produit repurposé. Elles représentent le volume / l'espace nécessaire à l'agencement des éléments pour pouvoir fabriquer le produit.

Les dimensions constituent un paramètre à part entière. Il est primordial que la batterie soit physiquement adaptée à chacun des usages successifs.

Les **critères de performance** sont, eux, l'un des points clef pour permettre le second usage. Ils sont en général définis dans le cahier des charges et correspondent à l'ensemble des éléments qui rend compte de l'adéquation entre les besoins du client et le produit proposé.

⁴⁸ Pièces qui séparent les cellules/modules dans les boîtiers

⁴⁹ Technologies de batterie, voir la section acronymes

Les critères de performance des produits sont l'un des points majeurs pour mener à bien l'activité de repurposing. Dans le cas des batteries, la densité d'énergie constitue un élément essentiel pour les applications portables et de mobilité, car elle influe directement sur les performances du système - géométrie et volume, masse, etc.. La puissance de la batterie est également importante car d'elle dépend le bon fonctionnement du système qui y est lié. Parmi les critères de performance visés, on retrouve les plages de températures à respecter, ou encore la masse du produit. Autre point non moins important : la durée de vie résiduelle du produit dans l'usage suivant. Elle doit être évaluée au mieux. En d'autres termes les performances du produit doivent être caractérisées. Pour cela, avoir l'historique de l'usage peut s'avérer utile - nombre de cycles de charges / décharges subis, profil des sollicitations rencontrées, etc.. Si l'état du produit est trop altéré, il ne pourra pas être réutilisé pour une autre application.

Les **contraintes d'usage** sont davantage centrées sur l'utilisation. Elles englobent les paramètres particuliers sollicités tout au long de l'application et ne sont pas des caractéristiques physiques du produit. *Au cours des entretiens, différents critères couvrant les contraintes d'usages attendues ont été discutés. Par exemple, si une batterie est utilisée dans un véhicule électrique, il est nécessaire de déterminer son profil de puissance pour optimiser la conception de la batterie. Ce critère est dépendant de chacune des applications et des compromis sont à trouver pour que des batteries puissent être repurposées. Dans le même ordre, les sollicitations, ou régimes de charges-décharges, doivent être prises en compte et adaptées en fonction des usages successifs.*

Le dernier point concerne le **suivi à l'usage**. Dans de nombreux cas de figure, tracer l'usage du produit au cours de sa première utilisation peut permettre de recueillir de nombreuses informations facilitant les étapes du Processus, et ainsi le Produit et le Modèle d'affaire associés à l'offre.

Enfin, lors de la dernière partie de l'entretien, la nécessité de suivre le produit lors de son usage est remontée. Un suivi des performances et des sollicitations à l'usage permettrait de faciliter les opérations de repurposing, notamment celles de contrôles et de diagnostics. Le suivi à l'usage vise à garantir plus facilement les performances des usages suivants.

A 1.1. Définitions des caractéristiques 'Processus de fabrication'

L'identification des étapes du Processus de refabrication au plus tôt, de préférence donc dès les phases amont de conception, permet une meilleure prise en charge du produit au moment du processus de repurposing à proprement parler. Dans le cas de la batterie, la conception peut faciliter les opérations de démontage et de diagnostic par exemple. Trois phases sont distinguées ici : la chaîne logistique inverse, qui permet de récupérer le produit à partir de sa fin de vie et jusqu'au site de repurposing ; le processus de repurposing, qui inclut les opérations menées sur le produit pour lui permettre d'être réemployé dans une autre application ; et la phase de remise sur le marché.

A 1.1.3. Chaîne Logistique Inverse

La **Chaîne Logistique Inverse** permet la collecte du produit en fin de vie. Différentes opérations peuvent alors avoir lieu : le stockage du produit à la fin de l'Usage 1, son acquisition, son démontage et son transport jusqu'au site de refabrication. Elle peut faire intervenir différents acteurs.

Au niveau de la CLI, il faut s'assurer pouvoir démonter, acquérir, transporter et stocker le produit jusqu'au lieu de refabrication. Dans un souci de préservation des performances des batteries, le stockage, au même titre que le transport, peut fortement dégrader les batteries. Il est nécessaire de s'assurer qu'il soit fait dans de bonnes conditions et dans un bon état de charge. La CLI dépend en partie du modèle de mise sur le marché pour le premier usage - vente, location, etc. -, de la dispersion des produits sur ce marché et des partenariats qui peuvent être tissés pour en récupérer un maximum, si le repurposeur n'est pas apte à le faire.

A 1.1.4. Processus de Repurposing

Le processus de repurposing est composé d'au maximum 7 opérations, fortement inspirées du remanufacturing, et dont l'ordre est spécifique à chaque produit. Ce processus doit être suffisamment flexible pour pouvoir se satisfaire d'un flux de produits discontinu.

Le **contrôle, ou l'inspection** permet d'évaluer l'état du produit à l'issue du premier usage. Mettre en place une traçabilité des conditions d'utilisation à l'Usage 1 faciliterait cette étape. Par ailleurs, ce diagnostic peut être réalisé à différents niveaux : celui du produit, des sous-ensembles, voire des composants.

Le contrôle apparaît comme un élément majeur de la stratégie de repurposing. Il nécessite plusieurs choses. Tout d'abord une connaissance des caractéristiques et de l'état initial du produit. Ceci peut être obtenu directement des constructeurs, ou via l'étude d'une grande quantité de batteries. Le but de cette opération est de maximiser les batteries à fortes capacités pour proposer des produits finaux les plus fiables possibles. Trois étapes principales ont été mises en avant :

- *un contrôle visuel, pour effectuer un premier tri et éliminer les produits visuellement endommagés, réhabilitaire pour un second usage,*
- *un pré-diagnostic rapide pour éliminer les batteries à problème, et notamment évaluer les aspects liés à la sécurité des produits,*
- *un diagnostic poussé comprenant différents tests - bancs de charge, décharge, abaques, etc. pour les batteries- pouvant nécessiter du démontage et visant à identifier l'élément limitant et à évaluer les performances résiduelles des produits.*

L'accès à l'historique faciliterait cette étape. Pour la batterie, il faudrait : soit tracer cet usage grâce à l'ajout d'éléments dès les phases de conception de l'usage aval ; soit avoir accès aux protocoles CAN de la batterie. Ceci pourrait également être mis en place au second usage si un troisième était envisagé.

Le **désassemblage** du produit est également à considérer. On entend ici les opérations permettant d'accéder aux différents sous-éléments, qu'elles soient ou non destructrices.

Dans le processus de refabrication considéré lors des entretiens, des opérations de désassemblage apparaissent comme incontournables au vu de la stratégie envisagée - casing, modules, composants électriques et électroniques, etc.. Pour faciliter le désassemblage du produit, des méthodes et guidelines existent d'ores et déjà dans la littérature. De fait, l'intégration du 'Design for Disassembly' lors des étapes de conception faciliterait cette étape - liaisons séparables, accessibles, etc.. Si ce n'a pas été le cas, il est nécessaire de comprendre l'architecture du produit pour accéder aux différents sous-ensembles et éléments les constituant.

Le **nettoyage** consiste à éliminer les traces liées au premier usage, que ce soit esthétique ou fonctionnel - *éliminer les traces de graisse pour la remplacer par un lubrifiant neuf*. Cette opération peut être nécessaire à réaliser en amont d'autres - *la refabrication peut nécessiter une surface propre*.

Le produit dans son ensemble, mais également les éléments le constituant, va subir des opérations de nettoyage. Le produit doit y résister. Là encore des guidelines existent.

Le **réassemblage** des différents éléments du produit en vue de sa réutilisation dans une autre application est également essentiel.

À la suite du désassemblage, le produit doit être assemblé pour l'usage ultérieur. Par exemple, les cellules et/ou les modules sont recombinaisonnés pour optimiser la durée de vie globale du produit et correspondre à la nouvelle application. Si possible, les choix de conceptions doivent en tenir compte en intégrant du 'Design for (Re)Assembly'. Un bémol toutefois : en fonction des contraintes de la seconde application, l'architecture du produit peut être modifiée et ce qui vaut pour l'assemblage lié au premier usage ne prévaut pas forcément pour le second.

L'étape de **repurposing** consiste en la reconfiguration du produit en vue de l'usage suivant. Elle peut impliquer la fabrication de nouvelles pièces, le réagencement de l'architecture du produit, des développements annexes - *notice d'utilisation*.

L'opération cœur pour la réutilisation en cascade est celle de **repurposing** du produit à proprement parler. Lors de celle-ci, le produit est adapté à l'usage suivant. Se voulant aussi simple que possible pour minimiser les surcoûts, l'étape de repurposing doit potentiellement intégrer une phase de reconception, dans le cas où elle n'a pas été prévue initialement. Sur l'exemple batterie, il est nécessaire de développer certains sous-systèmes - casing, carte électronique, etc. - mais également d'éliminer les références liées aux précédents usages, ou encore de proposer un conditionnement adéquat. Le fait que le produit soit destiné à une autre application implique également l'établissement d'une nouvelle notice d'utilisation, d'entretien, et une mise en adéquation avec l'évolution des normes.

Le **stockage** du produit dans un lieu adapté et dans des conditions satisfaisantes pour ne pas le dégrader. Le stockage implique généralement la monopolisation d'un espace dédié. Dans le cas des batteries, les conditions de stockage - *niveau de charge, température ambiante* - peuvent être des facteurs décisifs pour le second usage.

Comme susmentionné, les conditions des phases de stockage sont importantes pour le repurposing, notamment de batteries. En plus du coût financier lié à l'espace nécessaire pour le stockage, il est important qu'il se fasse dans de bonnes conditions, générant elles aussi des coûts. Dans le cas contraire, les performances des batteries peuvent se dégrader rapidement. Que ce soit à la fin de l'usage 1 ou lors du processus de repurposing, le stockage est une variable à considérer précautionneusement. Les conditions dans lesquelles les batteries sont stockées doivent, autant que possible, être définies en amont pour s'assurer que cette phase ne pénalisera pas la future activité.

Enfin, des **tests** doivent être réalisés, en cours ou en fin de processus pour s'assurer que le produit au sortir de l'usine est apte à sa future utilisation, que ce soient les performances visées, les aspects liés à la sécurité,... Par rapport aux batteries, il est par exemple possible de modéliser leur sur-vieillessement, dans le but d'avoir une vision plus précise de leurs performances en seconde vie.

Différents tests sont réalisés lors de ces opérations. Ils doivent être adaptés à l'usage suivant et ne pas endommager le produit. Tout au long du processus, un contrôle qualité rigoureux est nécessaire pour certifier que le chaque produit sorti du site de (re)production est conforme aux attentes. Avant sa remise sur le marché, une étape de validation doit permettre de s'assurer que les fonctions attendues par la batterie seront remplies et que les performances seront respectées.

A 1.1.5. Remise sur le Marché

La **remise sur le marché** intervient dès la fin des étapes de refabrication. Elle regroupe différentes étapes, telles la vente, le transport, l'installation. Au moment de la remise sur le marché, le repurposeur peut également proposer d'ajouter des services dans l'offre - *maintenance, formation, interventions curatives, supervision,...*

En vue de la remise sur le marché, plusieurs aspects ont été identifiés. En premier lieu la nécessité d'être flexible par rapport au marché. En parallèle, développer des offres spécifiques, complétées par des services personnalisés - maintenance, après-vente, gestion au quotidien, formation, etc. - pour supporter l'activité des clients. Une réflexion sur le modèle d'affaire doit également être menée, entre autre en ce qui concerne le modèle économique envisagé - vente, location longue ou courte durée, etc..

A 1.2. Définitions des caractéristiques 'Modèle d'affaire

Lorsque l'on s'intéresse davantage aux modèles d'affaires facilitant la stratégie de repurposing, il est nécessaire de penser aux moyens permettant de maximiser la valeur ajoutée des batteries. On distingue 4 catégories qui sont les aspects légaux, la stratégie liée à l'offre proposée, le marché et les partenariats à mettre en place pour permettre l'activité.

A 1.1.6. Aspects Légaux

Les aspects légaux incluent tous les éléments pouvant être juridiquement contraignant. On détaille ainsi la législation, la propriété intellectuelle et la standardisation.

La **législation** comprend tous les textes contraignant les fabricants en favorisant, ou empêchant, la mise en place de la stratégie de repurposing. Par exemple, la Responsabilité Élargie du Producteur tend à la favoriser. En revanche, si la batterie est considérée comme un déchet à la fin de son premier usage, le repurposeur ne peut la réutiliser que s'il parvient à la faire quitter son statut avant de la remettre sur le marché.

Les aspects liés à la législation doivent être considérés. Dans le cas des batteries, et du fait de la REP, c'est le premier fabricant qui est responsable de la gestion et du traitement du produit en FdV. Par ailleurs, des évolutions de la réglementation ne sont pas exclues car on peut supposer que celle-ci pousse autour de la dynamique de l'économie circulaire bien qu'il n'y ait aujourd'hui que peu de clarté quant aux conditions de sortie du statut de déchet. Par exemple, en 2015 en France, il était nécessaire d'être certifié ISO9001. L'année suivante, la seule mise en place d'une démarche qualité (sans certification) au sein de l'entreprise était suffisante, d'après le recycleur. D'une manière générale, les évolutions réglementaires pourraient contraindre les producteurs à se tourner en premier lieu vers des solutions alternatives au recyclage, en prolongeant la durée de vie de la batterie. Mais, si après 10 ans d'utilisation dans une première application la réglementation évolue et n'autorise plus l'utilisation du produit, pour des raisons de dangerosité par exemple, le repurposing ne pourra avoir lieu. Enfin, la notion de garantie associée à l'offre est un élément nécessaire à déterminer. La durée de vie des sous-éléments doit être estimée au plus juste pour satisfaire à la fois les attentes du client et l'activité du fournisseur.

La **propriété intellectuelle** d'un produit correspond aux droits relatifs à sa protection et à son monopole d'exploitation. L'usage du produit est limité à celui qui le met sur le marché.

La gestion de la propriété intellectuelle peut s'avérer problématique pour la mise en place d'une offre de produits repurposés, d'autant plus si le fabricant initial et le repurposeur sont deux entités différentes. Le produit étant de la responsabilité du fabricant, ce dernier peut s'opposer à sa réutilisation pour une autre application. Sur un autre aspect, breveter ou labelliser tout ou partie du produit pour le second usage peut permettre une meilleure visibilité de l'offre, bien que ce ne soit pas systématiquement perçu comme un gage de qualité et/ou de robustesse.

La **standardisation** vise à ramener des produits similaires à des caractéristiques communes. Parfois normée, la standardisation des produits n'est pas systématique et n'est souvent possible qu'une fois la technologie stabilisée. Cette caractéristique pourrait également être dans la catégorie 'Produit' > Architecture globale.

Pour les Batteries, la standardisation des produits permettrait de faciliter grandement l'activité de repurposing. Ceci permettrait de traiter des batteries de différentes provenances de manière identique. Les bénéfices seraient multiples : augmentation des volumes de produits, simplification des opérations de contrôle, de désassemblage et de repurposing, architecture globale simplifiée pour le second usage (car tendant vers une architecture modulaire), ou encore des aspects sécurité plus clairs. Or, seuls des accords entre les États et les industriels seraient en mesure de supporter ce point. De plus, la standardisation est un processus long à mettre en place et à faire respecter. Dans le cadre des batteries, la question des éléments couverts par la standardisation est un vaste sujet. Doit-elle concerner le pack en entier, les modules, les cellules, les éléments annexes ? Des pistes de réflexions en ce sens ont été initiées récemment au niveau européen (Ruiz et al. 2016).

A 1.1.7. Stratégie

La stratégie mise en place pour l'offre est caractérisée ici au travers de 4 éléments que sont : les critères de retour, l'image, le niveau de repurposing et l'ownership. La stratégie se définit comme l'ensemble des éléments de l'offre requis pour faciliter le business lié au second usage.

Les **critères de retour** correspondent à toutes les conditions préalablement définies comme nécessaire pour permettre le second usage. Ils peuvent être liés au produit - *performances limitées* - au processus de refabrication - *mise en place d'une CLI* - ou au modèle d'affaires - *volumes suffisants*.

L'une des questions majeures qui se pose par rapport à l'activité de repurposing est : « À partir de quel moment faut-il retirer la batterie de l'usage 1 pour permettre de la repurposer dans une seconde application ? ». La notion que l'on retrouve derrière est liée aux critères de retour. Ils sont à définir en fonction des conditions techniques, économiques et environnementales et visent à faciliter la réutilisation du produit à la fin de l'usage initial en donnant une meilleure visibilité des étapes de repurposing à suivre. Par ailleurs, ces critères de retours permettront de fixer des limites d'usages à ne pas dépasser - nombre de cycles de charges / décharges, état de santé, profondeur de décharge, etc.. Un autre point consiste à identifier et influencer sur la FdU1, notamment, pour les batteries, sur les conditions de stockage.

L'**image** de l'activité de repurposing est sensée pouvoir être valorisée par l'entreprise et ses clients. L'utilisation de produits issus d'une seconde vie témoigne d'une conscience environnementale, sous réserve qu'une analyse de cycle de vie le prouve, et sociale, sous réserve des conditions de repurposing. Bien qu'elle reste à prouver en terme environnemental, l'image 'verte' associée aux produits réutilisés, émanant notamment de la préservation des ressources associées aux étapes de fabrication, doit permettre d'afficher et de communiquer sur leurs engagements face à ces enjeux. La communication autour de l'éco-responsabilité des batteries repurposées est un élément important car elle peut être perçue comme un frein et non un levier, d'après le recycleur interrogé. Néanmoins, la volonté de mettre sur le marché un produit robuste et durable dans le temps, induisant de fait l'évitement d'impacts environnementaux liés à la production d'un nouveau produit, est considéré comme une valeur importante associée à l'offre repurposée. Par ailleurs, comme la majorité des activités de réutilisation, l'activité de repurposing devrait être développée en local. Dans ce cas, les retombées sociales sont également faciles à mettre en avant.

Le **niveau de repurposing** correspond au degré d'interventions réalisées sur le produit et peut être défini en fonction de nombreux facteurs : sa nature, l'évolution de ses composants dans le temps, la facilité de désassemblage, etc.. On détermine arbitrairement 3 niveaux : (1) un niveau macro, à l'échelle du produit ; (2) un niveau intermédiaire, à l'échelle des sous-assemblages ; et (3) un niveau détaillé, à l'échelle des composants.

Dans le cas de la batterie de véhicule électrique, on remarque plusieurs degrés d'architecture. Le premier se situe à l'échelle macro, au niveau du pack batterie. Les opérations de repurposing - inspection, désassemblage, repurposing, etc. - se limiteraient alors à l'échelle du pack, sans investiguer les éléments qui le composent. Le second est à une échelle intermédiaire, celle du module. La troisième implique un niveau de détail plus grand et se place à l'échelle des cellules. Le choix du niveau de repurposing visé entraînera différents coûts, différentes performances, permettra différentes recompositions des éléments, nécessitera des moyens différents, etc..

Enfin, le paramètre de **possession** est lié la propriété du produit. Le repurposeur peut décider de vendre le produit ou son usage. Les implications, en termes de conception du produit, du processus de repurposing et de modèle d'affaires, en seront fortement influencées.

Pour pallier aux problématiques liées à la gestion en FdU - CLI, marché diffus, etc. - la question de la propriété du produit, ou possession, a été abordée au cours des entretiens. Différents modèles existent : la vente classique d'un produit, la vente accompagnée de services, la location sur une courte durée, la location sur une longue durée, la vente de l'usage du produit, etc.. En fonction de la stratégie adoptée par l'entreprise, l'offre peut s'en retrouver fortement modifiée, tout comme le produit. D'autant plus que cela permet un revenu régulier, l'assurance d'un service - maintenance, évolution de l'offre, etc. - avec les produits que l'on souhaite (et pas ceux voulus par le client), ou encore la fidélisation du client. En revanche, ce dernier peut être réticent à ce type de stratégie. Qui plus est l'amortissement du produit est beaucoup plus long pour le repurposeur.

A 1.1.8. *Marché*

Les paramètres de conception qui se trouvent sous cet intitulé sont davantage en lien avec le marché. On retrouve ainsi les applications visées lors des différents usages, le prix des offres, les volumes de production attendus pour chacune d'elles.

Le critère '**applications**' caractérise les types d'applications successives au cours des usages 1, 2, 3, etc.. Il est important de définir au plus tôt quelles applications sont visées pour définir correctement les fonctions et sous-fonctions qui sont liées au produit et à son offre.

L'un des premiers aspects abordé au cours des entretiens concerne les applications possibles en seconde vie. Le premier usage est généralement connu. Les applications suivantes ne le sont pas nécessairement très clairement. Or, il est nécessaire d'avoir une idée de ce qu'elles peuvent être et de définir, au moins partiellement, le second usage. Pour certains produits, comme c'est le cas pour les batteries, la durée de vie est telle que le marché pour le second usage semble difficile à prévoir de manière précise et rigoureuse dès les phases de conception initiales. Pour les batteries là encore, les applications envisagées en premier usage peuvent être : l'automobile, les engins de chantiers, les grues portuaires. En second usage, un choix devra être fait entre les applications de stockage d'énergie renouvelable, des appareils électroporatif ou encore des chariots élévateurs. Les applications ultérieures devraient nécessiter ici de plus faibles sollicitations, en continu, avec un taux de décharge faible.

Le **prix** représente la valeur attribuée à l'offre, que le produit soit vendu ou loué. Contrairement à une stratégie de remanufacturing où le prix des produits remanufacturé est généralement inférieur au neuf, dans une stratégie de repurposing, comme l'application suivante est différente, le produit peut être aligné avec les prix du marché. Si le processus permet une baisse des coûts, il peut être intéressant de diminuer les prix augmenter ses parts de marché.

Toute offre commerciale doit répondre à un marché et, au cœur de ce dernier, le prix est souvent un critère déterminant pour le client. Bien que la réglementation puisse influencer en ce sens, il est important que le coût d'acquisition pour les utilisateurs du second usage soit inférieur, ou à minima équivalent, à celui d'un produit neuf à fonction égale. L'offre proposée, pouvant être perçue comme basée sur des produits d'occasions, se doit d'être concurrentielle aux offres existantes.

Enfin, pour permettre l'usage suivant, un **volume suffisant** de produit doit être fabriqué. On parle ici de volume et non de nombre de produits car, du fait d'applications différentes, les produits peuvent être recomposés - *il serait cohérent d'utiliser conjointement 10 batteries de véhicules électrique de 24 kWh pour former une batterie de 200 kWh à destination du stationnaire.*

Le repurposing n'est possible que si des volumes suffisants de produits sont accessibles. Dans le cas contraire, il serait impossible d'assurer l'offre. Plusieurs éléments permettraient d'augmenter ces volumes : le nombre de véhicules électriques vendus ; l'amélioration de la gestion des batteries en FdU et notamment de leurs conditions de stockage ; ou encore le renfort des relations partenariales qui bloquent parfois le repurposeur dans ses velléités de réutilisation des produits de certains fabricants.

A 1.1.9. *Partenariats*

Le dernier paramètre à prendre en compte et issu de la littérature comme des entretiens concerne les **partenariats**. Ceux-ci peuvent s'avérer nécessaire pour satisfaire l'offre dans son ensemble et y intégrer des compétences qui ne sont pas dans le cœur de métier du repurposeur. Typiquement, la gestion du produit entre l'usage 1 et son arrivée chez le repurposeur n'est pas quelque chose d'habituel à gérer, d'autant plus si le produit est vendu lors du 1^{er} usage. Dès lors, il est important de penser ces relations partenariales dès les phases de conception pour faciliter la gestion du produit sur l'ensemble du cycle de vie.

Pour parer au manque de compétences possible face à la mise en place de cette nouvelle activité de repurposing, l'établissement de partenariats peut s'avérer utile pour, par exemple, récupérer le produit à la fin du premier usage ou développer les éléments spécifiques au second usage - qualification du gi-

sement, mise au point du produit, fabrication d'un nouveau BMS, etc.. Les partenariats peuvent également permettre une meilleure gestion des aspects relatifs à la propriété intellectuelle. Par ailleurs, certaines parties-prenantes en amont et en aval peuvent influencer sur le second usage. Pour les batteries par exemple, des partenariats amont avec les logisticiens et les concessionnaires seraient intéressants pour une meilleure gestion du stockage.

Annexe 2. Grille d'entretien suivie avec le recycleur et réponses

A 2.1. Contexte de l'entretien

Présentation des objectifs et des activités du recycleur.

A 2.1.1. Objectifs

Global. Développer une méthodologie de conception pour les produits destinés à être réemployés pour dans des applications distinctes. L'étude vise à mettre en avant les caractéristiques de conception requises par les produits, les enjeux liés aux processus et l'organisation nécessaire à mettre en place pour permettre le succès de cette stratégie d'augmentation de la durée de vie.

De la réunion. Déterminer les implications de ce nouveau marché lié aux produits à plusieurs usages, notamment de l'organisation de l'activité, que ce soit en interne, avec les différents acteurs de la chaîne de valeur,

A 2.1.2. Activités du recycleur

Ses activités consistent en le **recyclage d'accumulateurs portables et industriels** (de types NiCd, NimH, Li-ion, alcaline saline et déchets de production). Ces accumulateurs varient de quelques grammes à 500kg et sont originaires de partout (monde). Les 2 principaux fournisseurs de piles et accumulateurs sont : - des approvisionneurs,
- des éco-organismes.

Plusieurs processus permettent leur recyclage : tri, démantèlement, démontage mécanique et manuel, recyclage pyro/hydrométallurgique.

A 2.2. Questions

A 2.2.1. Design-2-Life : contexte

1. Que comprenez-vous de l'expression "Design-2-Life"⁵⁰ (D2L)?
2. Où en êtes-vous dans le développement de votre offre ?
3. Pouvez-vous décrire l'offre que vous (souhaitez) proposez(er) ?
Précisons sur le produit.
4. Cela s'applique-t-il à d'autres de vos produits ?
5. Quels sont les avantages pour vos clients ?

⁵⁰ Équivalent aux termes 'repurposing', 'réutilisation en cascade', etc..

A 2.2.2. Processus en vue d'un D2L

6. Depuis la fin de l'usage 1 jusqu'à l'usage 2, lister les étapes nécessaires au réemploi d'un produit :

- (récupération de fin de vie / logistique inverse,)
- stockage,
- nettoyage,
- test,
- désassemblage,
- dépollution
- reconfiguration,
- réassemblage
- (remise sur le marché / trouver de nouvelles applications)

Pour le remanufacturing :

- Inspection
- Nettoyage
- Désassemblage
- Stockage
- Refabrication
- Réassemblage
- Test

7. Quels moyens permettent de réaliser chacune de ces différentes étapes ?

- variété des sources (contrat de service, crédit sur produit, rachat, apport volontaire, ...),
- outils,
- tests réalisés,
- compétences requises,...

8. Quelles sont les étapes clefs ?

A 2.2.3. Stratégie développée en vue de la seconde vie

9. - (BM canevas → voir Annexe 2.3)

10. Quelles sont les principales raisons qui motivent ce business ?

11. Quels sont les principaux challenges de cette activité ?

12. Selon vous, comment les réglementations influencent votre activité ? (REP, VHU, batteries)

13. Comment mesurez-vous ces influences ?

14. Selon vous, quelle serait l'influence d'une labellisation de produits D2L ?

15. Qu'en est-il du gisement de produits disponible ?

- facilité d'accès,
- connaissance des volumes,...

A 2.2.4. Relations inter-acteurs

16. Faire la liste de toutes les partie-prenantes.

Pour chacune d'elles, préciser :

- le type d'échange (partenaire, sous-traitant, client,...)
- la nature des échanges (ce qui est échangé (produit, €, info,...),
- leur fréquence,
- l'influence qu'a cet échange au regard du produit
- Les limites de cette collaboration.

Partenaires de la chaîne amont :

- concepteurs,
- producteurs,
- distributeurs,
- utilisateurs 1,
- reconditionneurs,
- utilisateurs 2

17. Avez-vous différents types de clients pour l'usage 2 ? Pour la FdV ?

18. Influence de la double casquette "reconditionneur-recycleur"

Partenaires de la chaîne aval :

- distributeurs,
- **clients** / utilisateurs 2,
- recycleurs,

A 2.2.5. Problématiques diverses

19. Avez-vous fait l'évaluation économique de ce marché ?
20. Avez-vous fait l'évaluation environnementale de ce marché ?
21. Quel est votre ressenti par rapport à la cannibalisation d'un marché par rapport à l'autre (D2L vs recyclage)
22. Avez-vous des difficultés à trouver ce nouveau marché de D2L (partenariat, réseau,...) ?
23. Quels seraient vos besoins immédiats / à moyen terme pour faciliter cette activité ?
 - outils de design, de gestion
 - méthode,
 - gisement,
 - partenariat,...

A 2.2.6. Business idéal (caractéristiques techniques des batteries, organisation de la filière,...)

24. Comment voyez-vous ce business dans votre cadre idéal ?
 - Organisation de la filière (récupération des produits en fin d'usage
 - Caractéristiques techniques (performances,...) des produits
 - Caractéristiques physiques (assemblage, ...) des produits
 - Réglementation
 - Marché de second usage

A 2.2.7. Batteries en fin d'usage 1 – Activité de seconde vie

25. Quels différents types de technologies traitez-vous ?
26. Quelle est la quantité de produits entrants / sortants ?

Quel est le pourcentage de produits D2L par rapport au nombre total de produits ?
27. Quelles parties du produit se prêtent à la stratégie D2L, quelles autres ne s'y prêtent pas ?
28. Quels sont les paramètres les plus importants pour le produit par rapport à son second usage ?

Lister les caractéristiques techniques

 - contraintes liées aux étapes identifiées précédemment
 - voir guidelines (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
29. Comment arbitrer la fin de l'usage 1 pour permettre l'usage 2 ?

A 2.2.8. Batteries en fin d'usage 2 – Activité de recyclage

30. Quels différents types de technologies traitez-vous ?
31. Quelle est la quantité de produits sortants ?

Quel est le pourcentage de produits D2L par rapport au nombre total de produits ?
32. Quelles parties du produit se prêtent à la stratégie D2L, quelles autres ne s'y prêtent pas ?
33. Quels sont les paramètres les plus importants pour le produit par rapport à son recyclage ?

Lister les caractéristiques techniques

 - contraintes liées aux étapes identifiées précédemment
 - voir Annexe 2.7
34. Comment arbitrer la fin de l'usage 2 ?

A 2.2.9. Manques de l'entretien

35. Quelque chose à rajouter ? Des manques ?

A 2.3. Synthèse globale des réponses apportées par le recycleur

A 2.3.1. Offre proposée – organisation du Business Model

Offre de batteries reconditionnées en réemployant des batteries issues du secteur automobile pour le marché du **stationnaire de moyenne puissance** (100-300 kWh, voire 1MWh) des batteries pour des **applications industrielles spécifiques**. Ces applications seraient vraisemblablement hybrides : solaire-éolien. Des lettres d'intentions ont été signées auprès de clients potentiels, ce qui marque un premier intérêt pour cette activité.

Tels qu'ils sont envisagés aujourd'hui, les futurs systèmes seraient vendus dans de petits containers. Les applications possibles devraient nécessiter de faibles sollicitations, en continu, avec un taux de décharge faible et des sollicitations lissées. Parmi les applications envisagées, il pourrait y avoir du petit stationnaire pour des modèles hybrides (PV/éolien + groupe électrogène) à destination de l'Afrique pour permettre du lissage de pic ou des applications isolées. Il est également envisagé de vendre du KWh et non les systèmes en eux-mêmes.

Les principaux clients des offres D2L seraient :

- les institutions achetant de la 2^{nde} vie au lieu du neuf,
- vendeur de neuf à qui on propose de vendre des produits d'occasion.

Les avantages mis en avant et favorisant ce marché sont économiques et environnementaux :

- la **diminution du coût de recyclage** pour les approvisionneurs,
- la **diminution du coût d'achat** pour les usagers N°2,
- la **valorisation** en termes **d'image** (attention à ce que ça ne soit pas perçu comme un sous-produit),
- **l'amélioration environnementale** (utilisation de l'ACV à faire),

Volonté de trouver la juste allocation d'impacts entre les différents business,

- Déresponsabilisation du producteur 1,
- facteurs sociaux : "Repurposé-en-France ?".

Il est important de trouver des **partenaires ayant un intérêt commun et un rôle bien défini** pour que chacun trouve sa place dans le business. Notamment en ce qui concerne :

- la **conception de la partie électronique**,
- la fabrication de la partie électronique,
- la **qualification du gisement** : le développement de compétences en interne,
- la **mise au point du produit** : recherche de compétences externes à internaliser (électromécaniciens / électro-chimistes / électrotechniciens).

Ci-après, nous avons identifié les parties-prenantes (amont et aval) qui pouvaient influencer sur la seconde vie des batteries.

En amont, le recycleur a accès à :

- l'utilisateur 1 (faibles probabilités),
- le **logisticien**, permet d'influer sur la partie stockage amont,
- la concession (via accord de partenariat ?).

En aval, on doit avoir accès :

- au **développeur informatique (sous-traitance / partenariat)** pour :
 - * la carte électronique (le BMS étant la valeur ajoutée de la batterie),
 - * l'interface CAN,
- aux logisticiens,
- aux **clients**
- au recycleur.

Pas d'intention de breveter ou de labelliser tout ou partie de l'offre de batteries de 2nd usage, principalement pour ne pas être copié. La labellisation en particulier n'est pas perçue comme un gage de qualité et de robustesse et le marché ou le client ne semblent pas prêts à acheter des produits conçus à partir de "produits de seconde main".

Volonté en revanche de communiquer sur l'éco-responsabilité du produit. Bien que cela puisse être perçu comme un frein, et non un avantage.

A 2.3.2. Processus en vue d'un D2L

À l'instar du remanufacturing, dont les étapes du process sont dans l'encart, nous avons détaillé les étapes du process liées aux reprocessing d'un produit D2L (les **étapes nécessaires** sont en gras, les **étapes clefs** sont soulignées) :

- **stockage**, qui intervient à 2 moments :
 - * **en amont** où il est particulièrement important : il peut dégrader fortement les performances de la batterie, au même titre que les **conditions de transport**,
 - * **en cours de processus**, dans l'usine, de la même manière que le stockage en amont,
- nettoyage (y veiller lors du reconditionnement),
- **désassemblage** des différents éléments (modules, casing, électronique,...) pour maximiser les gains,
- **inspection**, en 3 étapes :
 - * **contrôle visuel**, pour effectuer un premier tri, éliminer les batteries visuellement endommagées,
 - * **pré-diagnostic** rapide pour éliminer les batteries à problème,
 - * **diagnostic poussé** : différents tests (bancs de charge, décharge, abaques,...) pouvant nécessiter du démontage, à faire sur le pack voire les module et pas les cellules (cout trop élevé) pour trouver l'élément limitant -> recherche de l'origine du défaut,
- **développement** des sous-systèmes (e.g. carte électronique),
- **réassemblage**, avec nécessité de combiner les différentes cellules / modules pour optimiser leur durée de vie,
- test (**contrôle qualité**, processus de validation et de **certification du produit**),
- **casing / packaging** + éliminer les inscriptions des précédents usages, faire un emballage propre,
- établir une **notice**,
- mettre en place une **traçabilité de fin de ligne** pour connaître le devenir de l'utilisation en usage 2 et faciliter les étapes de diagnostic en fin d'usage 2,
- développement de services de maintenance, de service après-vente.

Possibilité de réutiliser quasi intégralement le produit (après diagnostic) s'il s'y prête (par exemple si c'est un problème électronique. Cela complexifie le modèle car il complexifie le gisement possible : **besoin de tracer le défaut**.

Influer sur l'arbitrage de la fin de l'usage 1 faciliterait la mise en place du Business de batteries D2L et augmenterait le gisement de batterie pour l'usage 2. Actuellement si :

- la batterie arrive **accidentée** → **recyclage**,
- la batterie arrive encore **sous garantie ou en FdU** (Fin d'Usage) : il faut faire tous les **tests nécessaires** (température, chute de tension,...) pour déterminer son état.

Pas de possibilité d'arbitrer la FdV d'une batterie. En revanche, il serait **possible d'influer la FdU**. Notamment sur les conditions de stockage en FdU1 car celles-ci peuvent fortement dégrader les capacités des batteries.

A 2.3.3. Les éléments liés au produit

Différentes technologies de batteries sont recyclées, mais toutes ne sont pas pertinentes pour être ré-employées dans des activités de seconde vie. On trouve notamment :

- Li-Ion :
 - * LCO (Lithium Cobalt) : présence de Cobalt et gain à récupérer en FdV (recyclage),
 - * NMC (Lithium Nickel Manganèse Cobalt Oxyde) : présence de Cobalt et gain à récupérer en FdV, bon produit pour 2nde vie
 - * LFP (Lithium Iron Phosphate) : valeur sur l'électrolyte, pas de gain possible en FdV, peu de valeur sur les matières, par contre très développée en Automobile,
- Nickel :
 - * NMH (Nickel métal-hydrure) : Pour des applications spécifiques (hybridation mais pas pour du stockage
 - * NiCd (Nickel Cadmium) : techno en FdV, pas compétitive en 2^{ème} vie. Gisement issu du stationnaire

De plus, seulement **une très faible quantité est apte à la seconde vie**. L'état des batteries est souvent **trop altéré pour permettre un réemploi**. De plus, toutes les pièces ne sont pas récupérables, il faut retirer / ne pas considérer :

- les emballages
- les plastiques polystyrènes,
- les pièces fortement marquées (des solutions existent dans le remanufacturing)
- celles estampillées par le fabricant 1, (des solutions existent dans le remanufacturing)
- les cartes et éléments élect(ron)iques,
- les logiciels.

En revanche, pour faciliter les aspects business, il sera important de **maximiser la valeur de plusieurs sous-systèmes physiques**. On retrouve ici :

- le **pack** de la batterie (les cellules et les modules),
- les **casings** (contenant),
- les **nervures** (qui séparent les cellules/modules dans les boîtiers),
- les éléments élect(ron)iques

Dans le même esprit, les éléments techniques favorisant/étant moteurs et nécessaires à l'activité de D2L sont :

- la **connaissance des caractéristiques et de l'état initial du produit**, ce qui implique d'étudier une grande quantité de batteries (ou d'avoir les infos des constructeurs),
- de pouvoir retracer ses conditions d'utilisation lors du premier usage :
 - * **transport** dans de bonnes conditions (de charge et de conditionnement),
 - * **stockage** chez le client avant l'envoi pouvant détériorer la batterie,
 - * **nombre de charges/décharge** dans tel type d'utilisation,
 - * les **types de sollicitations rencontrées**,
 - * le **nombre de kW passés**,

- la modification du profil de sollicitation devrait influencer positivement sur la batterie,
- la **flexibilité** de l'entreprise est importante (« il faut savoir faire un lot de 10 batteries »),
- le **tri en amont** pour :
 - * maximiser les batteries à fortes capacités,
 - * Pouvoir identifier différents types de cellules (Excellent Etat, Très bon Etat et Bon état).
- la mise en place de **détrompeurs / indicateurs** pour déterminer la technologie de la batterie, au moins pour la 2^{de} vie (permettre de recycler / réemployer en 3^e usage plus efficacement).

En parallèle, des réflexions sont menées pour déterminer si un type de technologie en particulier s'avère plus pertinent pour les activités de D2L, et ce en fonction :

- de **l'endurance**,
- du **coût** (de la main d'œuvre) pour la fabrication une batterie D2L,
- de la **quantité d'énergie emmagasinée** dans la batterie (KWh),
- de la **puissance massique** (W/kg).

Actuellement, la première génération de batteries de VE arrive en FdV. Des informations peuvent être renvoyées vers les équipes de conception, lors de la délivrance des certificats de recyclage.

A 2.3.4. Les freins actuels de l'offre

Plusieurs limites ont déjà été identifiées par rapport à la mise en place de cette offre D2L. On note différents éléments liés au produit :

- le **gisement** qui :
 - * n'augmente pas aussi vite que prévu,
 - * ne parvient pas toujours jusqu'au recycleur (collecte uniquement de ce qui passe par les concessions, pas de ce qui va en casse),
- la **durée de vie des produits de 2nd usage** (difficile à prévoir),
- les batteries arrivent avec ou sans BMS, impossible à savoir à l'avance,
- la **difficulté de réutiliser les composants** (relais, carte électronique,...),
- le BMS doit être refait : il devrait néanmoins être moins complexe que pour un système embarqué,
- pas de standardisation des produits en amont,
- l'augmentation technologique peut être un frein fort du futur business, si les capacités (W/kg) augmentent trop vite, les batteries en fin d'usage ne seront plus assez performantes pour répondre au besoin.

Mais également différents éléments liés au processus :

- besoin de **processus souples** (notamment de recyclage) car la FdV est différée
Prévoir la logistique, le stockage des produits en Fd2^{ème}V pour les traiter par batch et le maintien des installations de traitement + coût du stockage (si climatisation, ce coût sera élevé),
- méthodes d'industrialisation : gestion de la production pour l'assemblage (effacer les traces du premier usage (marquage, n° de lot, nomenclatures produits,...) et MEP d'une référence,
- déterminer la limite des différents usages pour bien répondre au besoin.

Ainsi que les éléments liés à l'organisation de l'offre :

- la mise en place d'une nouvelle filière,
- définition du rôle de chacun des partenaires pour une juste répartition des gains,
- possible **perte de certains fournisseurs** (et le gain de nouveaux),
- pas de clarté sur la **sortie du statut de déchet** (en 2015 : nécessité d'être iso9001 ; en 2016 : MEP d'une démarche qualité mais pas de certification obligatoire),
- manque d'organisation du flux de FdV (pas de retour des casses par exemple – marché diffus),

- coût : si le prix d'achat des batteries neuves est plus faible que le coût de démantèlement, le marché s'effondre + levée de fond pour initier le business (influence du prix du kWh/kg, exemple de Tesla),
- ouverture vers de nouveaux marchés = **nouveaux concurrents** (constructeurs automobiles qui veulent créer leurs solutions),
- mise en place d'un **SAV + formation** du personnel,
- développer une force de vente,
- catalogue de produits,
- développer un service de facturation,
- monter une autre entité pour distinguer les 2 business : i.e. faire de l'écologie industrielle.

Annexe 3. Grille d'entretien suivie avec le CEA et réponses

A 3.1. Contexte de l'entretien

A 3.1.1. Présentation

Présentation générale

Présentation de chacune des personnes

A 3.1.2. Objectifs

L'objectif global des entretiens menés au CEA est d'établir un Cahier des Charges (CdC) générique nécessaire à la conception d'une batterie dans différents contextes (stationnaire, mobile, les 2 successivement). Ce cahier des charges va avant tout permettre de préciser les pratiques de conception liées aux produits repurposés que la fabrication d'une batterie en tant que tel. + Cf. extrait de la norme ci-après. Les objectifs de cet entretien sont :

- de comprendre le fonctionnement des processus de conception au CEA et au sein d'une équipe de conception spécialisée,
- de définir les interactions avec les autres équipes lors d'un processus de conception,
- d'avoir une première vision de la conception de batteries repurposés.
-

A 3.1.3. Déroulement de l'entretien

La conception des batteries au CEA

La conception des batteries au sein d'une équipe spécialisée

La conception de batteries pour 2 applications

A 3.2. Questionnaire

A 3.2.1. La conception des batteries au CEA

Dans cette partie, nous nous plaçons dans un contexte global, à l'échelle du CEA, pour avoir une vision plus large du déroulement des projets.

1. Avant tout, savez-vous comment les activités liées à la conception de batteries ont été initiées au CEA ?
Comment votre équipe / labo y a pris part ?
2. D'une manière générale, comment se présente l'activité de conception de batteries au CEA ?
 - Qui sont les parties-prenantes ? Le chef de projet ?
 - Comment se répartissent les tâches ?
 - Quelles technologies de batteries sont concernées ?
 - Pour quelles applications ?
3. Quels processus de conception retrouve-t-on lors de la conception de batteries ?



4. Quelles sont les parties-prenantes / compétences associées à chaque étapes ?

5. En amont de ces étapes on retrouve généralement le CdC du produit / système. Comment se présente-t-il lors d'un projet de conception de batterie au CEA ?
 - Qui le définit ?
 - Quelles infos contient-il ?
 - Pour quelles performances ?
 - Avec quelles contraintes ?

A 3.2.2. La conception des batteries au sein d'une équipe spécialisée

À présent, à l'échelle de votre équipe de conception.

Par rapport au CdC dont nous venons de parler :

6. Quel est votre rôle dans son élaboration ?
7. À quel point interfère-t-il dans votre activité de conception ?
8. Quelles sont les applications sur lesquelles vous intervenez ?

Par rapport aux mêmes étapes que précédemment (Q3) :

9. Quel est votre rôle dans chacune d'entre elles ?
Quel est votre cœur de métier et comment intervenez-vous dans chacune de ces étapes ?
10. Quelles activités mettez-vous face à chacune de ces étapes ?
11. Quelles étapes / activités de conception impliquent d'autres équipes du CEA ?
12. Comment se passe cette collaboration ?
13. Quels paramètres de conception se trouvent derrière celles-ci (étapes / activités) ?
Quels outils permettent de les caractériser ?
14. Comment sont choisis les paramètres les plus importants au sein de votre équipe de conception ?
Quels sont-ils ?
Pourriez-vous les hiérarchiser ?
15. Quels sont les paramètres de conception les plus importants si on se place au niveau du projet cette fois-ci ?
Pourriez-vous les hiérarchiser ?

A 3.2.3. La conception de batteries pour 2 applications

On considère ici une nouvelle activité de conception relative aux batteries : le cas du repurposing. Les batteries seront utilisées successivement pour une application mobile, puis stationnaire.

16. Comment pensez-vous que ce concept pourrait faire évoluer vos pratiques de conception ?

On retrouve 2 cas de figures :

- une activité de 'repurposer', à partir de la fin de la 1^{re} utilisation
- une activité de conception pour le repurposing, dès la 1^{re} vie

Pour chacun de ces 2 cas de figures :

17. Quelles seraient les étapes de vie du système ?

18. Comment se présenterait le CdC ?
19. Quelles étapes retrouverait-on dans le processus de conception du produit ?
20. Quelles activités seraient celles de votre équipe pour un tel système ?
21. Quelles seraient les paramètres clefs liés à ce système ?
En quoi diffèreraient-ils de ceux évoqués précédemment ?
22. Un manque quelconque ?

Plan-type selon la norme AFNOR NF X50-151 – Élaboration d'un CdCF

- **1. Présentation générale du problème**
 - **1.1 Projet**
 - 1.1.1 Finalités
 - 1.1.2 Espérance de retour sur investissement
 - **1.2 Contexte**
 - 1.2.1 Situation du projet par rapport aux autres projets de l'entreprise
 - 1.2.2 Études déjà effectuées
 - 1.2.3 Études menées sur des sujets voisins
 - 1.2.4 Suites prévues
 - 1.2.5 Nature des prestations demandées
 - 1.2.6 Parties concernées par le déroulement du projet et ses résultats (demandeurs, utilisateurs)
 - 1.2.7 Caractère confidentiel s'il y a lieu
 - **1.3 Énoncé du besoin**
(finalités du produit pour le futur utilisateur tel que prévu par le demandeur)
 - **1.4 Environnement du produit recherché**
 - 1.4.1 Listes exhaustives des éléments (personnes, équipements, matières...) et contraintes (environnement)
 - 1.4.2 Caractéristiques pour chaque élément de l'environnement
- **2. Expression fonctionnelle du besoin**
 - **2.1 Fonctions de service et de contrainte**
 - 2.1.1 Fonctions de service principales (qui sont la raison d'être du produit)
 - 2.1.2 Fonctions de service complémentaires (qui améliorent, facilitent ou complètent le service rendu)
 - 2.1.3 Contraintes (limitations à la liberté du concepteur-réalisateur)
 - **2.2 Critères d'appréciation (en soulignant ceux qui sont déterminants pour l'évaluation des réponses)**
 - **2.3 Niveaux des critères d'appréciation et ce qui les caractérise**
 - 2.3.1 Niveaux dont l'obtention est imposée
 - 2.3.2 Niveaux souhaités mais révisables
- **3. Cadre de réponse**
 - **3.1 Pour chaque fonction**
 - 3.1.1 Solution proposée
 - 3.1.2 Niveau atteint pour chaque critère d'appréciation de cette fonction et modalités de contrôle
 - 3.1.3 Part du prix attribué à chaque fonction
 - **3.2 Pour l'ensemble du produit**
 - 3.2.1 Prix de la réalisation de la version de base
 - 3.2.2 Options et variantes proposées non retenues au cahier des charges
 - 3.2.3 Mesures prises pour respecter les contraintes et leurs conséquences économiques
 - 3.2.4 Outils d'installation, de maintenance ... à prévoir
 - 3.2.5 Décomposition en modules, sous-ensembles
 - 3.2.6 Prévisions de fiabilité
 - 3.2.7 Perspectives d'évolution technologique

A 3.3. Réponses apportée par les équipes de conception

Pour faciliter la lecture des réponses, les questions sont rappelées également dans cette partie.

A 3.3.1. La conception des batteries au CEA

1. Avant tout, savez-vous comment les activités liées à la conception de batteries ont été initiées au CEA ?

Avant 2000 : Travaux sur les accumulateurs (développement chimique)

À partir de 2000 : Grands projets structurants autour des VE - retours d'expériences sur les VE

- Grenelle de l'environnement
- projets industriels

2. D'une manière générale, comment se présente l'activité de conception de batteries au CEA ?

Le CEA est intégré dans de nombreux projets d'électrification de véhicules au niveau :

- concept et architecture système (grands choix)
- puis archi méca, élec, thermique

2 types d'équipes au CEA :

- applicatives (écoute client, réponse au besoin)
- technologiques (développement techno, techno-push)

3. Quels processus de conception retrouve-t-on lors de la conception de batteries ?

Globalement tous :

- Analyse des besoins, émane du client et donne lieu à un CdC
- Spécifications, issues de l'analyse du CdC par le 'fournisseur', donne les spéc technique
- Concept = grands choix / principes généraux.
- Conception architecturale, (formaliser les spéc. à chacune des sous-étapes)
- Conception détaillée, par métier (besoin de formaliser les spéc. à chacune des sous étapes Dans un document) + boucle d'itération avec 'Spécifications'
- Tests, opérés également au CEA + boucle d'itération avec 'Concept'

Le CEA n'intervient que sur la 1re boucle d'itération globale (Test → Spécifications) au niveau d'un projet. Dans l'automobile il y en a plusieurs jusqu'à l'industrialisation.

Si le projet vise le développement d'un TRL 3, possibilité de faire tout seul, au-delà nécessité de travailler avec un industriel, voire seulement de l'accompagnement d'industriel

4. Quelles sont les parties-prenantes / compétences associées à chaque étapes ?

Spécifications / Concept / Conception architecturale : équipe 'architecture système'

Conception détaillée / Tests : équipes architecture mécanique, électrique, thermique, tests,...

5. En amont de ces étapes on retrouve généralement le CdC du produit / système. Comment se présente-t-il lors d'un projet de conception de batterie au CEA ?

Généralement, le CdC est co-défini au moment de l'analyse des besoins entre l'industriel et le CEA. Le besoin est précisé voir redéfini avec le CEA.

Dans tous les cas la partie 1 est globalement complétée.

Dans le cadre d'applications 'sensibles', l'expression du besoin (partie 2) est détaillé.

A 3.3.2. La conception des batteries au sein d'une équipe spécialisée

Par rapport au CdC dont nous venons de parler :

6. Quel est votre rôle dans son élaboration ?

Cf. Q5 et :

Accompagnement des clients sur la définition de leur CdC, précisions des points importants n'étant pas forcément du domaine de leurs clients et mise en avant des problématiques incontournables.

Par exemple :

- aide au choix de la cellule
- mise en adéquation avec l'usage réel de la batterie / le profil de la mission
- intervention également à un niveau stratégique

7. À quel point interfère-t-il dans votre activité de conception ?

Possibilité de précisions et redéfinitions, mais nécessaire pour le développement du projet, notamment lorsque cela ne concerne qu'une partie seulement du produit, il faut alors remettre en perspective les travaux par rapport au projet global

8. Quelles sont les applications sur lesquelles vous intervenez ?

Les applications vont de la cellule individuelle jusqu'à des puissances de 1MWh et concernent différentes technologies : plomb, nickel, batteries haute températures, lithium (incluant les différentes chimies)

De faibles à fortes puissances en techno Li-ion pour des engins électriques

Par rapport aux mêmes étapes que précédemment (Q3) :

9. Quel est votre rôle dans chacune d'entre elles ?

Quel est votre cœur de métier et comment intervenez-vous dans chacune de ces étapes ?

Cf. Q3 pour l'activité générale, en ce qui concerne l'activité de diagnostic :

Généralement, l'équipe d'INES intervient en tant que support dans un projet de conception de batterie. Elle est motrice principalement sur les phases amont (CdC, Analyse des besoins), support lors du dimensionnement et des tests :

- Le CdC : accompagnement à la définition des caractéristiques en fonction de l'usage
- l'analyse des besoins : définitions de scénarios d'usages, du profil de la mission (durée de vie calendaire, performances adaptées, perf à froid, phases de repos, prise de recul par rapport aux performances,...)
- les spécifications : conseils sur les choix de technologie, le dimensionnement, la gestion sur le cycle de vie (température environnante, état de charge lors des phases de pauses,...)
- Conception architecturale / détaillée : travaux sur la conception d'algorithmes de contrôle et d'utilisation de la batterie dans de bonnes conditions (BMS) ☐ ceux-ci seront retravaillés et réintégrés dans le BMS par d'autres équipes
- les tests : évaluations des performances face à la tenue (garanties sur la durée de vie en fonction des modèles de vieillissements), des questions de sécurités

10. Quelles activités mettez-vous face à chacune de ces étapes ?

Cf. Q3

11. Quelles étapes / activités de conception impliquent d'autres équipes du CEA ?

Les développements conjoints entre différentes équipes au niveau :

- des spécifications : choix de technologie, le dimensionnement (niveau de charge, sur les besoins d'équilibrages), la gestion sur le cycle de vie, problématiques de sécurité (Tc limites de fonctionnement,...)
- de la conception architecturale / détaillée : travaux sur la conception d'algorithmes de contrôle et d'utilisation de la batterie dans de bonnes conditions, d'indicateurs d'états de charge, d'état de santé (BMS) → ceux-ci seront retravaillés et réintégrés dans le BMS par d'autres équipes
- des tests : validation / caractérisation, notamment électrique (cyclage, durée de vie,...)

12. Comment se passe cette collaboration ?

/

13. Quels paramètres de conception se trouvent derrière celles-ci (étapes / activités) ?

Il en existe plusieurs, à différente échelles :

- niveau de diagnostic (?)
- densité d'énergie (paramètre système)
- puissance (paramètre système)
- géométrie et volume (paramètre système)
- masse (paramètre système)
- plage de température (paramètre système)
- plage de courant (?)
- la tension à l'échelle cellule (?)
- profil de puissance (paramètre système)
- sécurité (difficile à quantifier, pas d'échelles pour l'instant)
- fiabilité / probabilité de défaillances
- disponibilité / continuité de service
- environnement extérieur (pluie, neige, glace, sel, poussière, vibration, chocs) influe sur la conception en elle-même

14. Comment sont choisis les paramètres les plus importants au sein de votre équipe de conception ?

Utilisation de diagramme araignée pour évaluer les jeux de paramètres

15. Quels sont les paramètres de conception les plus importants si on se place au niveau du projet cette fois-ci ?

Cf. Q13

A 3.3.3. La conception de batteries pour 2 applications

On considère ici une nouvelle activité de conception relative aux batteries : le cas du repurposing. Les batteries seront utilisées successivement pour une application mobile, puis stationnaire.

16. Comment pensez-vous que ce concept pourrait faire évoluer vos pratiques de conception ?

Le CdC change, il est nécessaire d'adapter les étapes en conséquence

Les évolutions contraignantes :

- connaître l'état de santé du pack/ l'historique (via le BMS) et sur plusieurs paramètres
- difficulté de connaître l'élément limitant (P/M/C)
- concevoir pour réutiliser et recycler vs concevoir pour jeter
- définir le critère de retour
- modéliser le sur-vieillessement
- définir les critères d'optimisation pour passer de l'usage 1 à l'usage 2.

Les évolutions non contraignantes / transparentes :

- la réutilisation semble facile
- des mêmes cellules existent déjà pour plusieurs usages différents (Samsung)
- définir les meilleures applications

Les évolutions potentiellement positives :

- les aspects recyclages
- fin de la REP pour le fabricant 1
- possible rachat des carcasses en FdU1 si accès aux infos du BMS
- alimenter 2 marchés : VE d'occasion et stationnaire, fonction de la qualité des P/M/C.
- standardiser (mécanique à minima) pour faciliter le passage de U1 à U2

On retrouve 2 cas de figures : - une activité de 'repurposer', à partir de la fin de la 1^{re} utilisation
- une activité de conception pour le repurposing, dès la 1^{re} vie

Pour chacun de ces 2 cas de figures :

17. Quelles seraient les étapes de vie du système ?

Les étapes envisagées ici :

- collecte
- diagnostic (niveau Pack/Module/Cellule), accès à l'historique ou à l'état de santé
- reconception : modification de l'architecture pour ne pas être limité par l'élément le plus faible (applications basses tensions)
- désassemblage
- réassemblage (besoin de modularité)
- fabrication de nouvelles pièces aussi light que possible (BMS / casing / ...)

18. Comment se présenterait le CdC ?

Dans le cas du repurposing a posteriori :

- Choix de la cellule imposé
- Vérifier que la technologie dispo corresponde bien à l'usage 2
- Vérifier comment les batteries ont été endommagées (cyclage à froid, à chaud, calendrier,...)

Dans le cas d'une conception de produits repurposés :

- adapter les besoins au service de chacune des vies
- moduler les choix de conception pour répondre aux 2 usages
- prédéfinir / catégoriser les usages possibles en 2de vie, dès la conception
- faciliter les étapes de repurposing (diagnostic, démontage, remplacement de cellules, etc.)
- modularité électrique et mécanique
- penser pour la réutilisation : architecture mécanique, gestion thermique
- sécurité (gonflement des cellules pas pris en compte pour la 2de vie aujourd'hui : surcoût)
- traçabilité des cellules pour faciliter U2
- que le CdC1 permette / autorise la 2de vie
- définir la place du curseur entre fin de l'U1 et le début de l'U2
- avoir une architecture facilitant les 2 usages (modularité ?)
- faciliter le recyclage en fin d'U1 et U2

19. Quelles étapes retrouverait-on dans le processus de conception du produit ?

En fonction du produit visé, les étapes pour l'application 2 peuvent se faire dans la première phase de conception, la deuxième, ou partiellement dans l'une puis dans l'autre. Mais ce sera une conception combiné entre 1 et 2.

20. Quelles activités seraient celles de votre équipe pour un tel système ?

Besoin de connaître :

- les applications de 2de vie
- les cahiers des charges pour chaque usage + processus de 1 vers 2
- problématiques de sécurités qui évoluent (répercuté sur l'architecture / surveillance/...)
- diagnostic : compréhension, vieillissement, modélisation des paramètres de l'état de santé

21. Quelles seraient les paramètres clefs liés à ce système ?

En quoi diffèreraient-ils de ceux évoqués précédemment ?

Paramètres important lors d'une conception à plusieurs usages :

- évaluation des performances / diagnostic
- prévision des performances en 2de vie
- standardiser les cellules et les modules sur au niveau géométrique
- standardiser les protocoles (facilité la communication)
- équilibrer les cellules (courants de fuite)
- équilibrer les accumulateurs entre eux (capacité) -> compensation via de l'électronique ou une architecture commutée
- contraintes économiques
- contraintes techniques : mécaniques / thermiques / densité énergétique / agencement des C.
- logiciel pour la communication avec le BMS (idem que les valises pour les voitures)

22. Un manque quelconque ?

/

Annexe 4. Tableau de définition des critères propres aux fonctions dans le cadre du repurposing

Catégorie (P.PBM) + caract	Fonctions	Critères d'appréciation	Niveaux	Flexibilités * (Acteur i) (de 0 à 3)	Dégradation en cours d'usage (%)	Moyens de contrôle	Si le critère est considéré critique par un expert =	Crrière 'flou'	Parties prenantes concernées	Nombre de parties prenantes	Estimation de la répartition des coûts sur l'offre (% par usage)	Estimation des externalités environnementales (de 0 à 3)
		1.1	Application #1	-								
		1.2	Application #2	-								
		1.3		-								
		1.4		-								
	Flou FA #1	1.5		-								
		1.6		-								
		1.7		-								

Rappel des définitions des termes employés pour caractériser les fonctions d'un produit repurposé

Termes	Spécifique au repurposing?	Définition
Critère d'appréciation		"Caractéristique(s) utilisée(s) pour évaluer la performance attendue d'un produit ou celle qu'il réalise" (AFNOR 2014)
Niveau		"Position sur l'échelle de mesure ou d'estimation d'un critère d'appréciation d'une fonction" (AFNOR 2014)
Flexibilité (classe de)		"indication donnée au niveau d'un critère d'appréciation pour préciser le degré selon lequel il est négociable ou obligatoire" (AFNOR 2014), de F0 (non flexible) à F3 (très flexible)
Critère de 'flou'	Oui	Estimation par un expert de l'incertitude lié à la réalisation d'un critère d'évaluation d'une fonction, pour un usage donné. Varie de f0 (très incertain) à f3 (très confiant)
Dégradation à l'usage	Oui	Dégradation potentielle des performances de la fonction au cours du temps (%)
Moyens de contrôle		Moyens permettant de vérifier le niveau des critères d'évaluation
Critère critique ⁵¹	Oui	Estimation de la criticité du critère au regard de la stratégie de repurposing (oui/non)
Parties-prenantes	Oui	Liste des parties-prenantes directement concernées par le critère
Évaluation économique		Estimation des coûts de la fonction, par rapport à l'offre (%)
Externalités environnementales		Estimation des impacts environnementaux de la fonction, par rapport à l'offre, de E0 (très peu d'externalité) à E3 (externalités majeures)

⁵¹ Un critère est jugé critique lorsque les concepteurs estiment qu'il peut influencer négativement d'autres fonctions tout au long du cycle de vie, rendant plus difficile leur réalisation d'une application à l'autre.

Annexe 5. Document de préparation au workshop

Objectif du Workshop :

1. Définir l'ensemble des besoins relatifs à une batterie au cours de différents cycles d'usages en vue de sa conception (la partie conception ne sera pas traitée ici.)
2. Valider la pertinence des outils proposés lors de la phase d'analyse des besoins.

Date :

A 5.1. Applications et besoins

Contexte du workshop (activités de l'entreprise, organisation,...) :

Expression du besoin :

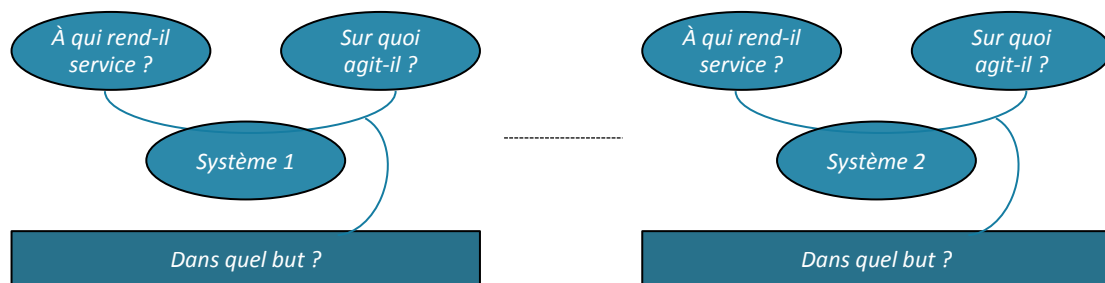
Exprimer la/les fonctions de service (Fds)⁵² du système, pour chacun des usages (si le second usage n'est pas connu/imprécis l'exprimer de manière globale) :

Description du profil / contexte des missions :

Application 1 :

Application 2 :

Compléter les bêtes à cornes pour chacun des usages :



⁵² "Liées au service ou à l'usage d'un produit, [les fonctions de service] décrivent ou définissent une action du produit répondant à un besoin ou une attente de l'utilisateur." [Fanchon, 2006]

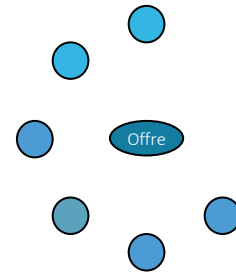
A 5.2. Graphe des interacteurs

À partir de vos connaissances des offres semblables, de vos compétences et de vos outils habituels, définissez en 2 temps les éléments extérieurs qui interagissent avec l'offre telle qu'elle est présentée lors de l'expression du besoin (0

Applications et besoins). Il peut s'agir de l'environnement direct de l'offre, de l'utilisateur,...

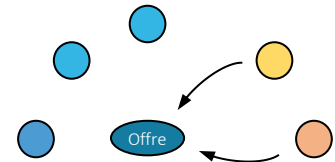
A 5.2.1. À partir des outils de conception classique

Dans un 1^{er} temps, élaborer le graphe des interacteurs en lien avec l'offre (voir figure ci-contre) **sans** l'annexe support.



A 5.2.2. Utilisation de guidelines

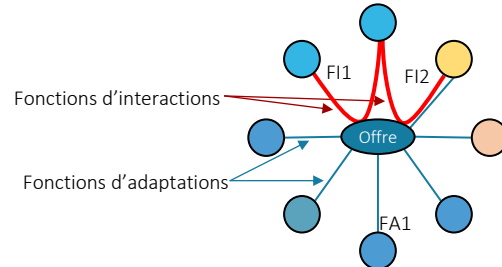
Dans un 2nd temps, **en utilisant** le document support disponible au A 5.4, complétez le précédent graphe dans une couleur différente (ou surlignez les modifications apportées).



A 5.3. Fonctions d'interactions et d'adaptations

Complétez le graphe précédent en faisant apparaître :

- Les fonctions d'interactions (reliant l'offre à plusieurs éléments du milieu extérieur) et,
- Les fonctions d'adaptations (liant 1 interacteur à l'offre).



Enfin, à l'image du tableau ci-contre, décrivez au bas de cette page les différentes fonctions en utilisant un verbe à l'infinitif.

Par exemple : "enlever la poussière d'une pièce".

NB1 : Les fonctions mises en avant ici, qu'elles soient d'interaction ou d'adaptation contraintes, peuvent être classées en 2 catégories :

- Les fonctions de service, liées au service et/ou à l'usage d'un produit.
- Les fonctions techniques, qui dépendent et orientent à la fois la conception de l'offre.

F1	description
F2	description
FA1	description
...	...

NB2 : Les fonctions peuvent dépendre d'un usage (engins de chantier) ou de l'autre (chariots élévateurs) de manière exclusive, comme aux deux usages à la fois sans que cela n'affecte cette étape.

A 5.4. Guidelines destinées à la prise en compte des interacteurs lors de l'Analyse des Besoins

Produit	Processus	Business Model
<p>Caractéristiques communes</p> <ul style="list-style-type: none"> Choix technologiques 	<p>Chaine Logistique Inverse</p> <ul style="list-style-type: none"> - stockage - acquisition - démontage - transport 	<p>Aspects légaux</p> <ul style="list-style-type: none"> Législation Propriété Intellectuelle Standardisation
<p>Caractéristiques distinctes</p> <ul style="list-style-type: none"> Aspects sécurité <ul style="list-style-type: none"> - normes / réglementations - évolutions possibles Caractéristiques dimensionnelles <ul style="list-style-type: none"> - volume / dimensions physiques Critères de performance Contraintes d'usages Suivi à l'usage 	<p>Processus de Repurposing</p> <ul style="list-style-type: none"> - flexibilité Contrôle / Inspection Désassemblage Nettoyage Réassemblage Repurposing Stockage Tests 	<p>Stratégie</p> <ul style="list-style-type: none"> Critères de Retour Image Niveau de repurposing Ownership
	<p>Remise sur le Marché</p> <ul style="list-style-type: none"> - vente - transport - installation 	<p>Marché</p> <ul style="list-style-type: none"> Applications Prix Volumes suffisants
		<p>Partenariats</p>

Annexe 6. Récolte des besoins pour le repurposing

Objectif de l'entretien : récolter les besoins des différentes parties-prenantes

A 6.1. Présentation du contexte général

1.1 Présentations

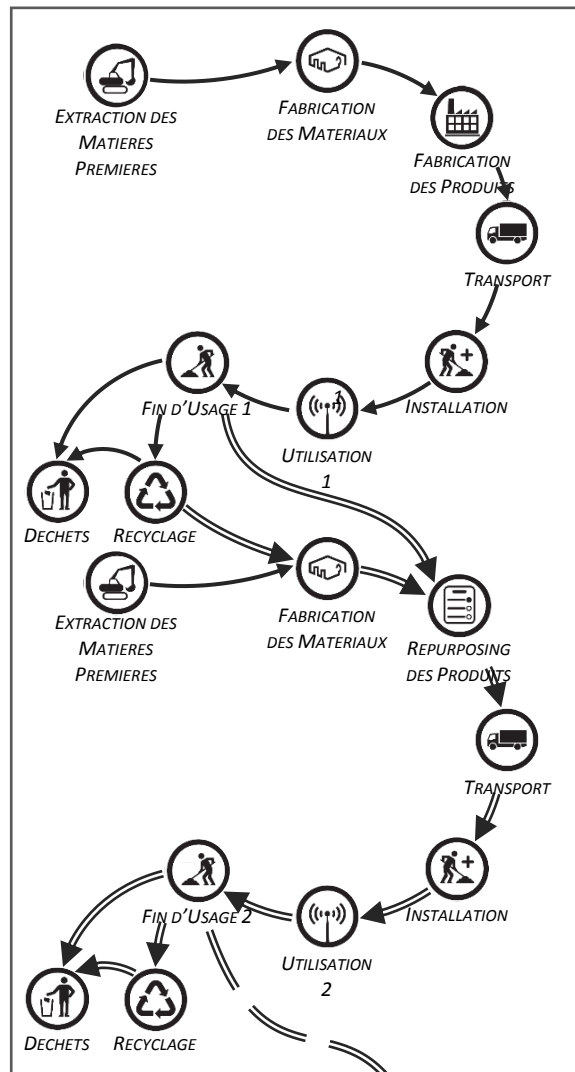
1.2 Description du (des) cas d'étude(s)

A 6.2. Expression des besoins

2.1 Expression du résultat de l'offre pour chaque application (cœur de l'offre, attendu par les utilisateurs)

2.2 Description plus approfondie de l'offre selon chaque application ('l'offre doit / devrait répondre à...'):

- a) Librement
- b) Complétée par la vision du cycle de vie (ci-après)
- c) Complétée par les autres acteurs.



2.3 'Service flip - EMAF' (Ellen MacArthur Foundation 2016) :

- Autres moyens possibles que le produit actuel pour répondre aux besoins
- Préciser les bénéfices liés à la non-possession du produit par l'utilisateur
- Préciser au besoin les éléments à développer : partenaires, feedback, bénéfices, etc..

2.4 D'une manière générale, quelles sont les valeurs associées à cette offre ?

A 6.3. *Priorisation des besoins*

3.1 Comparaison à l'aide d'une matrice de Pairwise, pour chaque application pour identifier si les besoins sont plus, moins ou d'égal importance les uns par rapport aux autres. Les coefficients 1 ; 0 et 0.5 y sont respectivement attribués.

Use A	Use A										Lifecycle A				
	Temps de fonctionnement = 10h											Fabrication : assemblage (nb d'outils, nb & type)			
Temps de recharge <= 1h											Transport : non dangereux				
Rechargeable sur le réseau											Recyclage : désassemblage (nb d'outils, nb &				
Environnement : conditions extérieures,...											Recyclage : extraction et valorisation de la BM				
Sécurité des opérateurs											Recyclage : extraction des matériaux à forte				
Densité volumique élevée															
Maintenable facilement															
Vente de la batterie (ou location ?)															
Coût minimum															
Respecter les normes engins															

3.2 Tri et mise en avant des besoins prioritaires pour chaque application.

3.3 Commentaires.

A 6.4. Confrontation inter-usages

4.1 Confrontation des besoins liés à chaque application pour vérifier s'ils sont compatibles, neutres ou antagonistes. (Voir ci-après).

4.2 Dans un premier temps, il est possible de se limiter aux besoins jugés comme les plus pertinents au regard de l'étape précédente.

4.3 Commentaires.

X = ANTAGONISTS
 N = NEUTRAL
 O = COMPATIBLES

		Use B.a					Lifecyle B.a															
Use A	temps de fonctionnement = 10h																					
	temps de recharge <= 1h																					
	rechargeable sur le réseau																					
	Environnement : conditions extérieures, poussières, chocs																					
	Sécurité des opérateurs																					
	Densité volumique élevée (=??)																					
	Maintenable facilement																					
	vente de la batterie (ou location ?)																					
	coût minimum																					
	Respecter les normes engins																					
Lifecyle A	fabrication : assemblage (nb d'outils, nb & type d'éléments connectés, temps d'ass.)																					
	transport : non dangereux																					
	recyclage : désassemblage (nb d'outils, nb & type d'éléments connectés, temps de désass.)																					
	recyclage : extraction et valorisation de la blackmasse																					
	recyclage : extraction des matériaux à forte valeur																					

Annexe 7. Tableau d'explicitation des fonctions par rapport aux critères et caractéristiques de conception

Fonctions	Critères ou caractéristiques associées
<p>FI1</p> <p>Stocker de l'énergie de l'infrastructure pour une application 'engin de chantier' ou 'chariot élévateur'</p>	<p>Quantité d'énergie (kWh)</p> <p>Durée d'utilisation (minimum) (hre)</p> <p>Temps de recharge (minimum) (hre)</p>
<p>FI2</p> <p>Restituer l'énergie stockée pour une application 'engin de chantier' ou 'chariot élévateur' dans l'espace de travail</p>	<p>Pré-charge</p> <p>Tenue diélectrique</p> <p>Densité volumique</p> <p>Volume / Dimensions</p> <p>Capacité à communiquer</p> <p>Plage de température</p>
<p>FA1 + FA2</p> <p>Être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs de chaque application</p>	<p>Poids du module à manipuler (kg)</p> <p>Nombre de pièces sous tension (nb)</p>
<p>FA3.1</p> <p>Être maintenable par le concessionnaire ou le fabricant</p>	<p>Temps de démontage/remontage pour les pièces d'usure ?</p>
<p>FA3.2</p> <p>Être sécuritaire pour les opérateurs du fabricant</p>	<p>Nombre de pièces sous tension à l'utilisation (nb)</p> <p>Temps de sécurisation en modules <60V (min)</p>
<p>FA4</p> <p>Être transportable jusqu'au recycleur et au repurposeur avec les infrastructures existantes</p>	<p>Temps de démontage sur l'engin</p> <p>Temps de packaging</p> <p>Temps / coût du transport ?</p>
<p>FA5.1</p> <p>Être valorisable</p>	<p>Taux de valorisation de la blackmasse</p> <p>Taux de revalorisation</p>
<p>FA5.2</p> <p>S'adapter au processus de recyclage</p>	<p>Temps de démontage</p> <p>Nombre d'outils</p> <p>Temps de manipulation à? la main ?</p>
<p>FA5.3</p> <p>Être sécuritaire pour les opérateurs du recyclage</p>	<p>Nombre de pièces sous tension à l'utilisation (nb)</p> <p>Temps de sécurisation en modules <60V (min)</p>
<p>FA6.1</p> <p>S'adapter au processus de repurposing</p>	<p>Temps de démontage</p> <p>Nombre d'outils</p> <p>Temps de manipulation à? la main ?</p> <p>Être nettoyable</p> <p>Temps de réassemblage</p>
<p>FA6.2</p> <p>Être reconfigurable d'une application à l'autre</p>	<p>Taux de revalorisation</p> <p>Temps de packaging</p> <p>Temps de diagnostic</p>
<p>FA6.3</p> <p>Être sécuritaire pour les opérateurs du repurposing</p>	<p>Nombre de pièces sous tension (nb)</p> <p>Temps de sécurisation en modules <60V (min)</p>
<p>FA7</p> <p>S'adapter à une infrastructure de gestion de données</p>	<p>Infrastructure de gestion des données</p>

Annexe 8. Tableaux de caractérisation des fonctions par R&Delec, R&Dbms et R&Drecycl

A 8.1. Résultats issus de l'entretien avec R&DELEC

Catégorie (P.P.BM) + caract	Fonctions	Critères d'appréciation	Niveaux	Flexibilités* [Acteur i] (de 0 à 3)	Dégradation en cours d'usage (%)	Moyens de contrôle	Si le critère est considéré critique par un expert = justifié ; sinon laisser blanc	Parties prenantes concernées	Nombre de parties prenantes	
Produit	F11 Stocker de l'énergie de l'infrastructure pour une application 'engin de chantier' ou 'chariot élévateur'	Rendement de stockage (> à)	0.95	1	10%	BMS et borne d		Fabriquant, repurposing	2	
			0.9	1	10%	BMS et borne d				
		Temps de recharge (lente) max (hre)	8	2	30%					
		Capacité résiduelle après cyclage	0.8	1	Intrinsèque	Autotests	Oui, évite un surdimensionnement	Fabriquant, repurposing	2	
		Capacité après vieillissement	0.8	1	Intrinsèque	Autotests	Oui, évite un surdimensionnement	Fabriquant, repurposing	2	
		Temps de recharge (rapide) max (hre)	1	-						
Produit	FA1 & FA2 Être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs de chaque application	Temps de maîtrise du risque	1	1		Tests a priori		Maintenance, recyclage,	5	
		Niveau sonore max (dB)	80	0		Tests en fonction		Conducteur	1	
		Masse max (si transport manuel)	20	1		Balance		Maintenance, recyclage,	4	
		Tensions aux bornes max (V)	60	2		Volmètre		Maintenance, recyclage,	4	
		Disposer d'un intersectionneur en	0	0		Visuel et tests ré	Oui : sécurité des personnels de secours	Conducteur, personnel de	3	
		Disposer d'une trappe de noyage en	0	1		Visuel	Oui : sécurité des personnels de secours	Personnel de secours	1	
		Pas d'émanation toxique (O/N)	0	0		Mesures	Oui : sécurité des personnes	Maintenance, recyclage,	4	
Business mo	FA7 S'adapter à une infrastructure de gestion de données	Compatibilité standard		0		Tests		Fabriquant, repurposing,	3	
		Volume de données transmis Mb/s			0		Tests			

A 8.2. Résultats issus de l'entretien avec R&DBMS

Catégorie (P.P.BM) + caract	Fonctions	Critères d'appréciation	Niveaux	Flexibilités* [Acteur i] (de 0 à 3)	Dégradation en cours d'usage (%)	Moyens de contrôle	Si le critère est considéré critique par un expert = justifié ; sinon laisser blanc	Parties prenantes concernées	Nombre de parties prenantes	
Produit	F12 Restituer l'énergie stockée pour une application 'engin de chantier' ou 'chariot élévateur' dans l'espace de travail	Rendement de puissance (%)	0.95	2	2%	Capteur courant	Oui par rapport à la puissance thermique à		?	
			0.97	2	2%	Capteur courant				
		Puissance (kW)	300	3	5%	Capteur de puiss				?
			10	3	5%	Capteur de puiss				
		Volume (L)	40	3	1%		Important			?
			5	3	1%					
		Poid (kg)	100	3						?
			15	3						
		Récupération au freinage	0	-						?
		Ajustement de la puissance en	1	3				Gain en durée de vie/ continuité de service		?
			1	3						
Temps de réaction (ms)	1	3				Confort utilisateur		?		
	1	3								
Produit	FA1 & FA2 Être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs de chaque application	Tension max des pieces sous tension	48	0		Capteur de tensi	Risque électrocution	client, concepteur,	4	
			48	0		Capteur de tensi				
		Température maximale qui peut	60	3		Capteur de temp		concepteur, utilisateur	2	
			60	-		Capteur de temp				
		Projection chimique		-				Brulure chimique	concepteur, utilisateur	2
				-						
		Nombre d'arc électrique/feu	0	0		Détecteur de fur	Brulure, éblouissement	concepteur, utilisateur,	3	
			0	0		Détecteur de fur				
		Tenue mécanique (exemple considéré :	20	3		Capteur détecta	Risque de blessure	client, concepteur,	4	
			5	3		Capteur détecta				
Courant maximal		3		Capteur détecta	Risque de brulure	concepteur, utilisateur	2			
		3		Capteur détecta						
		-								
		-								
		-								

A 8.3. Résultats issus de l'entretien avec R&DRECYCL

Catégorie (P.P.BM) + caract	Fonctions	Critères d'appréciation	Niveaux	Flexibilités* [Acteur i] (de 0 à 3)	Dégradation en cours d'usage (%)	Moyens de contrôle	Si le critère est considéré critique par un expert = justifié ; sinon laisser blanc	Parties prenantes concernées	Nombre de parties prenantes
Produit	FA1 & FA2 Être sécuritaire pour les utilisateurs et les opérateurs de chaque application	Mesures électriques (Tension,...)		1	5%		OUI	Concepteur, Fabricant,	4
		Câbles, connectiques,...	0	0		OUI, risques électriques	Client, Fabricant,	4	
		Étanchéité des cellules	0	0		OUI, risques chimiques	Concepteur, Fabricant,	5	
		Accès aisé aux cellules, démontage	0	2			Client, Concepteur,	5	
		Batterie facilement transportable (explosion,...)	0	0		OUI, risque d'explosion	Tous	7	
		Accès de la Batterie à l'engin soit	0	2			Client, Concepteur,	3	
				-					
				-					
				-					
				-					
Processus	FA5.2 S'adapter au processus de recyclage	Temps de démontage (min)	5	1		Horloge	Oui, rentabilité	Concepteur, Fabricant,	3
		Sécurité du démontage	0	0		Opérateur en vie	Oui risques vis à vis de l'opérateur	Concepteur, Fabricant,	3
		Pourcentage de démontabilité de la batterie (%)	0.7	2		Opérateur en vie	OUI, pour permettre le traitement des matériaux	Concepteur, Recycleur	2
				-					
				-					
				-					
				-					
				-					

Annexe 9. Guidelines pour la conception de produits repurposés

Différents exemples de guidelines sont proposées dans cette annexe, classées selon les sphères produit, processus de (re)fabrication et modèle d'affaire. Elles sont précisées pour chaque dimension mise au jour.

A 9.1. Des guidelines concernant les aspects 'Produit'

A 9.1.1. Architecture globale

- Tenir compte des 2 cahiers des charges établis à l'issue de l'analyse des besoins.
- Adapter l'architecture en fonction des [différents milieux](#) auxquels le produit sera confronté.
- Adapter l'architecture au processus de repurposing défini.
- Une [architecture standardisée](#) facilite les opérations de repurposing, mais également la conception et la réalisation des usages suivants.
- Une [architecture modulaire](#), lorsqu'elle est possible, facilite grandement les opérations de désassemblage et de réassemblage, ainsi que le remplacement des composants et le réemploi des sous-systèmes.
- Un produit fiable limite les interventions durant les phases d'usages.
- Un produit durable dispose d'une plus grande durée de vie et peut être réutilisé plus facilement.

A 9.1.2. Architectures sous-jacentes

- Généralités au niveau des architectures sous-jacentes :
 - Faciliter la [réutilisation des sous-ensembles](#) du produit sur les différents cycles d'usage,
 - Faciliter la [réutilisation des composants](#) sur les différents cycles d'usage,
 - Mettre en place des [détrompeurs / indicateurs](#) pour s'assurer que les différents sous-systèmes / composants soient réutilisables dans de bonnes conditions de sécurité et de performances.
- Architecture Mécanique
 - En fonction de l'échelle choisie, faciliter le [diagnostic](#) des sous-systèmes / composants,
 - Définir les [choix d'assemblages](#) pour chaque échelle (boulonnage, soudage, rivetages,...),
 - Maximiser les éléments à réutiliser.
- Architecture Électrique
 - Agencer l'architecture électrique pour tenir compte des usages successifs,
 - Maximiser la [réutilisation des éléments électr.on.iques](#),
 - À défaut, pour les éléments électroniques, s'assurer que les composants peuvent être reconfigurés d'un usage à l'autre.
- Autres Architectures
 - [Maximiser les éléments à réutiliser.](#)

A 9.1.3. Choix technologiques

- Parmi les technologies mises à disposition pour la réalisation du produit, définir les meilleurs choix de paramètres pour les usages successifs
 - Au niveau du produit,
 - Au niveau des composants.

A 9.1.4. Critères de performance

- Définir les valeurs des critères de performances du produit similaires sur l'ensemble des usages
- (Issus de l'analyse des besoins).
- Établir la stratégie pour maximiser ces performances sur les usages successifs.

A 9.1.5. Aspects sécurité

- Définir les paramètres liés à la sécurité du produit pour chacun des usages :
 - Normes associées au produit,
 - Réglementation associées à l'offre.
 - Prise en compte de leur évolution au cours des usages successifs.
- Préciser les sous-systèmes / composants dont l'évolution au cours du temps pourrait entraîner des problèmes de sécurité.

A 9.1.6. Caractéristiques dimensionnelles

- S'assurer que les volumes et dimensions disponibles dans chacune des applications sont cohérents avec la conception du produit.

A 9.1.7. Critères de performance

- Définir les valeurs des critères de performances du produit qui diffèrent sur l'ensemble des usages
- (Issus de l'analyse des besoins).
- Définir ceux qui ont le plus d'influence sur l'usage suivant.
- Établir la stratégie pour maximiser ces performances sur les usages successifs.

A 9.1.8. Contraintes d'usage

- Identifier les principaux critères de performances liés à la phase d'utilisation et qui diffèrent sur l'ensemble des usages
- (Issus de l'analyse des besoins).
- Définir ceux qui ont le plus d'influence sur l'usage suivant.

A 9.1.9. Suivi à l'usage

- Pour faciliter les opérations de contrôle et l'évaluation des performances en fin d'usage, il faut pouvoir *suivre l'évolution du produit au cours de son cycle de vie*, et notamment lors de la phase d'utilisation.
- Évaluer les paramètres produit n'étant pas amenés à changer au cours des différents usages.
- Évaluer si ces paramètres sont amenés à être dégradés au cours des usages.

A 9.2. Des guidelines concernant les aspects 'Processus de (re)fabrication'

A 9.2.1. Chaîne Logistique Inverse

Définir les enjeux liés aux étapes importantes parmi :

- *Le stockage* - e.g. espace suffisant, conditions nécessaires (température, hygrométrie, charge,...), durée,...
- *L'acquisition* - e.g. besoin de rachat du produit,...
- *Le démontage* - e.g. se rendre sur le site du client, récupération via un réseau,...
- *Le transport* et la logistique à prévoir

A 9.2.2. Processus de Repurposing

Définir les étapes du processus de repurposing, en définir le moment, le lieu et les exigences attendues :

- *Contrôle / Inspection* - e.g. niveau de diagnostic, contrôle visuel, contrôle des aspects sécurité, évaluations du vieillissement et de la durée de vie résiduelle, traçabilité de l'Usage 1, réduire le temps d'inspection,...
- *Désassemblage* - e.g. intégrer de la Conception pour du Désassemblage, utiliser des outils standardisé, réduire la diversité des composants, préférer des liaisons démontables,...
- *Nettoyage* - e.g. utiliser des composants ne s'abimant pas au nettoyage, faciliter l'accès aux composants pour le nettoyage,...
- *Réassemblage* - e.g. intégrer de la conception pour le Réassemblage, éviter les liaisons permanentes, diminuer le temps de réassemblage, utiliser des matériaux robustes résistant aux opérations d'assemblage, diminuer le nombre d'éléments de liaisons total,...
- *Repurposing* - e.g. définir la phase de reconception, définir les opérations relatives au processus de repurposing au maximum en amont : telles que les nouveaux développements (casing, sous-systèmes, composants différents), utiliser des processus standard,...
- *Stockage* - e.g. s'assurer que le stockage n'endommagera pas le produit : conditions nécessaires de température, hygrométrie, charge,...
- *Tests* - e.g. définir quels sont les tests à prévoir avant la remise sur le marché, minimiser le nombre de tests, réduire leur complexité, utiliser des tests standardisés si possible,...

A 9.2.3. Remise sur le marché

- Définir les schémas de **remise sur le marché** possible :
 - Modèle économique associé (Cf. Ownership),
 - Canaux de diffusion possibles.
- Identifier les **services** pouvant être associés à l'offre - e.g. maintenance, garanties de performances, assistance à distance, etc..
- S'assurer de la **flexibilité** du processus de repurposing - e.g. pouvoir gérer un flux morcelé de produits.

A 9.3. Des guidelines concernant les aspects 'Modèle d'affaire'

A 9.3.1. Législation

Définir les **règlementations** applicables et les performances attendues :

- Normes applicables,
- Législation des pays visés,
- Évaluer les **évolutions possibles** des performances au cours des usages successifs,
- Définir un **niveau de garanties** à apporter en interne et en externe, pour chaque usage.

A 9.3.2. Propriété intellectuelle

- Les produits utilisés dans l'offre envisagée sont sujets à un brevet.
- Le brevet peut être envisagé comme une solution pour protéger l'offre.

A 9.3.3. Standardisation

- La **standardisation** du produit, entièrement ou partiellement, est-elle une **obligation légale** ?
- La **standardisation** de tout ou partie du produit **faciliterait les usages successifs**.

A 9.3.4. Critères de Retour

- Définir **quels sont les critères importants** pour les usages successifs en terme de :
 - **Business Model** - e.g. législation, niveau de repurposing, prix, volume,
 - **Processus** - e.g. condition de stockage, inspection, désassemblage,
 - **Produit** - e.g. performances résiduelles, produit standardisé, choix de techno.
- Définir si :
 - L'usage amont impose l'usage aval,
 - Un compromis est possible entre les différents usages.

A 9.3.5. Image

Évaluer les retombées pour l'entreprise en termes d'image par rapports à :

- Sa responsabilité environnementale,
- Sa responsabilité sociale.

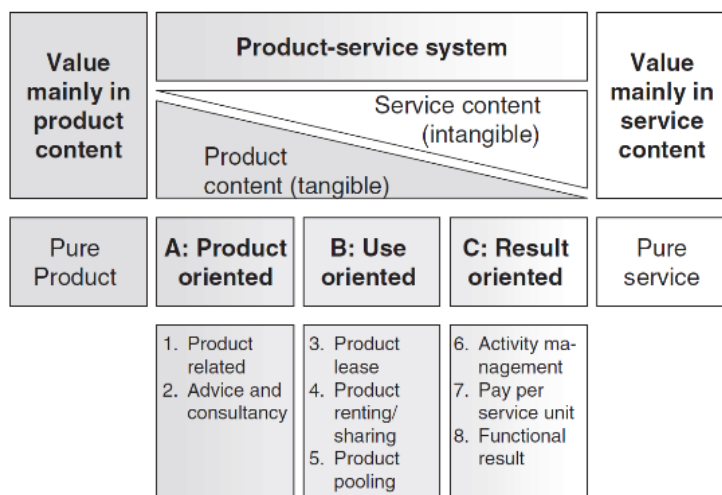
A 9.3.6. Niveau de repurposing

Définir le **niveau de repurposing** visé pour l'offre :

- **Macro** - e.g. à l'échelle du produit, faibles interventions n'impliquant pas ou peu de démontage,
- **Intermédiaire** - e.g. à l'échelle des principaux sous-assemblages,
- **Détaillé** - e.g. à l'échelle des composants, démontage et tests sur la majeure partie des éléments.

A 9.3.7. Possession

- Identifier les **canaux de diffusion** de l'offre proposée.
- Identifier les **stratégies de vente** possible - e.g. vente du produit, location, location longue durée, vente de l'usage, services (voir figure suivante extraite de Tukker (2004))



A 9.3.8. Applications

- Établir les **étapes du cycle de vie** du produit.
- Définir la/les **autre.s application.s** possible.s lors des usages suivants.
- Définir les leviers pour d'autres usages.
- Identifier qui sont les **potentiels clients** lors de chacun des usages.

A 9.3.9. Prix

- Définir le prix du produit lors de chacun des usages.

A 9.3.10. Volumes suffisants

- Estimer le **volume de produits récupérable** à la fin de chacun des usages.
- Estimer les **volumes de produits nécessaires** pour chacun des usages suivants.

A 9.3.11. Partenariats

- Trouver quels partenaires peuvent combler les manques de compétences pour la mise en place de l'offre sur l'ensemble du cycle de vie.
- Déterminer les compétences à développer tout au long des étapes du cycle de vie.

Résumé. Ces travaux de thèse s'intéressent à une stratégie de fin de vie naissante : le repurposing. Nous la définissons comme un processus industriel par lequel des produits en fin d'usage sont réutilisés dans des applications distinctes, dans un but de conservation de la valeur-ajoutée.

Pour faciliter l'industrialisation de tels produits, nous proposons : (1) de classer et clarifier leurs caractéristiques, afin de les rendre utilisable pour l'obtention d'un meilleur compromis dès les premières phases de l'activité de conception ; (2) d'adapter leur processus de conception tout en formulant des recommandations pour une meilleure intégration de leurs spécificités; et (3) d'établir un cadre générique structurant la réalisation d'analyses de cycle de vie de ces solutions. Ces trois propositions sont implémentées sur des cas d'étude batteries, au cours de séances de travail regroupant diverses parties-prenantes.

Mots-clefs.

Repurposing ; stratégie de fin de vie ; processus de conception ; analyse de cycle de vie ; applications en cascade ; économie circulaire.

Abstract. This PhD work focuses on an emerging end-of-life strategy: repurposing. We define it as an industrial process by which end-of-life products are reused in different applications, in order to maintain their added-value.

To facilitate the industrialisation of cascading applications products, we propose: (1) to classify and clarify their characteristics, in order to make them usable for a better compromise during the early stages of a design activity; (2) to adapt their design process while formulating recommendations for a better integration of their specificities, such as stakeholders, life cycle phases, time aspects and better information management; and (3) to establish a generic framework to facilitate the realisation of life cycle assessments of such solutions. To support this framework, three recommendations for design teams are made. These three proposals are implemented on two battery case studies, during working sessions involving stakeholders from the entire life cycle.

Keywords.

Repurposing; end of life strategy; design process; life cycle assessment; cascading applications; circular economy.