

Conception de batteries repurposées : Quels paramètres de conception et comment les définir ?

Tom Bauer, Peggy Zwolinski, Guillaume Mandil, Élise Monnier

► To cite this version:

Tom Bauer, Peggy Zwolinski, Guillaume Mandil, Élise Monnier. Conception de batteries repurposées : Quels paramètres de conception et comment les définir ?. 15e Colloque National AIP-Priméca, Apr 2017, La Plagne, France. <hal-01518693>

HAL Id: hal-01518693

<http://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-01518693>

Submitted on 5 May 2017

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.

Conception de batteries repurposées

Quels paramètres de conception et comment les définir ?

Tom Bauer
Laboratoire G-SCOP
46 av. Félix Viallet,
38031 Grenoble cedex 1, France
tom.bauer@g-scop.eu

Peggy Zwolinski
Laboratoire G-SCOP
46 av. Félix Viallet,
38031 Grenoble cedex 1, France
peggy.zwolinski@grenoble-inp.fr

Guillaume Mandil
Laboratoire G-SCOP
46 av. Félix Viallet,
38031 Grenoble cedex 1, France
guillaume.mandil@g-scop.eu

Élise Monnier
CEA-Liten
17 rue des Martyrs
38054 Grenoble cedex 9 France
elise.monnier@cea.fr

Résumé— Les batteries contribuent de manière forte aux impacts environnementaux globaux du système véhicule électrique. Sur le plan environnemental, leur gestion en fin de vie apparaît comme un élément important de la chaîne globale. La réduction des impacts environnementaux peut passer par la prolongation de la durée de vie de ces batteries en les réutilisant dans d'autres applications : on parle ici de repurposing. Il est dès lors nécessaire de penser, dès les phases amont de conception, l'ensemble du cycle de vie et notamment chacun des deux usages successifs ainsi que les phases de re-fabrication intermédiaires. Pour définir les paramètres de conception qui viennent en appui à des batteries repurposées, des experts batteries ont été interrogés. Pour ce faire, une grille d'entretien a été développée. Le but visé est l'identification des paramètres clefs en conception, que ce soit en termes de produits, de processus de fabrication ou de modèle d'affaires envisagé. Les premiers résultats font remonter des problématiques liées aux aspects de sécurité des batteries, aux profils des sollicitations et de densité d'énergie.

Mots-clés— Repurposing, Paramètre de conception, Batterie

I. INTRODUCTION

Quels intérêts y a-t-il à penser la Fin de Vie (FdV) d'un produit avant même sa conception ?

Contrairement au schéma linéaire traditionnel basé sur le 'produire-consommer-jeter', la pensée 'Cycle de Vie' est axée sur une prise en compte de l'environnement tout au long de la durée de vie du produit. Cette évolution peut provenir d'origines diverses : prises de conscience environnementale, volontés de différenciation par rapport au marché, réglementations ou directives environnementales. Parmi ces dernières, les directives européennes 'Véhicules Hors d'Usage' et 'Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques' contraignent les industriels à prendre en compte, dès les phases de conception, le devenir des produits en FdV [1,2].

Désormais, nombre d'entreprises cherchent à valoriser leurs produits jusqu'à leur phase de fin de vie. Pour cela, la littérature établit 4 stratégies présentées en Figure 1. Les 2 premières visent

à récupérer la valeur-ajoutée du produit en prolongeant son usage – *Réutilisation directe et Remanufacturing*. La troisième permet la récupération des matériaux utilisés dans la fabrication du produit - *Recyclage*. La dernière valorise, au mieux, le pouvoir calorifique du produit - *Élimination : Incinération ou mise en décharge*. D'un point de vue environnemental et dans la majorité des cas, il est admis que réutiliser un produit est mieux que de le remanufacturer, puis que de le recycler et enfin de l'éliminer [3]. Lorsque les 2 premières alternatives ne peuvent être mises en place, pour des raisons économiques ou technologiques, les produits suivront au mieux la stratégie de Recyclage.

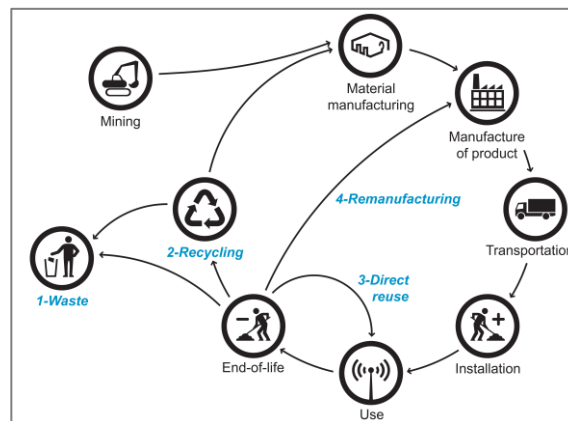


Figure 1 - Cycle de vie d'un produit et stratégies de fin de vie

En parallèle, de nouvelles stratégies se dessinent et cherchent à se mettre en place dans le monde industriel. C'est le cas du Repurposing. Cette stratégie se définit par l'utilisation consécutive de produits pour des applications différentes (voir Figure 2). On parle également d'utilisations 'en cascades' du fait d'emplois différents d'un usage à l'autre. La particularité de cette stratégie de FdV, par rapport aux précédentes, vient du fait que les performances des produits peuvent être différentes selon

les usages [4,5]. L'intérêt majeur est de pouvoir prolonger la durée de vie du produit lorsque la Réutilisation directe ou le Remanufacturing ne sont pas appropriés [6]. On s'intéressera ici notamment aux batteries de véhicules électriques repurposées dans des applications stationnaires, une fois que leurs performances ne satisfont plus le premier usage.

Dans cette optique, et à l'instar des 4 stratégies de FdV existantes, nous cherchons à mieux comprendre les éléments facilitant le repurposing de produits. L'objectif ici est de comprendre comment identifier les paramètres de conception d'une batterie repurposée. Pour ce faire, nous proposons une approche en 2 temps. Tout d'abord, nous cherchons à formaliser la démarche de conception dans le cadre de projets de batteries pour déterminer quels sont les processus de conception et les paramètres qui y sont liés. Ensuite, nous transposons cette démarche dans le cas qui nous intéresse, celui des batteries repurposées.

Dans cet article, la section 2 présente l'état de l'art autour de la stratégie de repurposing et des problématiques en conception. Ensuite, la section 3 détaille une grille d'entretiens éprouvée au-

près d'experts batteries qui permet d'évaluer les paramètres influents. Enfin, la section 4 rend compte des premiers résultats issus des entretiens concernant le repurposing de batteries.

II. ÉTAT DE L'ART

La littérature concernant les stratégies de Fin de Vie est particulièrement vaste. Lorsque l'on s'intéresse à celles permettant de maximiser la valeur-ajoutée des produits - *les stratégies de réutilisation : Réutilisation directe et Remanufacturing* -, on s'aperçoit que ces dernières ne sont pas adaptées à l'ensemble des produits [5,6]. Les raisons sont multiples et l'ADEME en met deux en avant : l'obsolescence fonctionnelle et l'obsolescence d'évolution [7]. La première "correspond au fait qu'un produit ne réponde plus aux nouveaux usages attendus, pour des raisons techniques (...), réglementaires et/ou économiques". La seconde est liée "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". Les stratégies de FdV ne permettent pas toujours de supplanter ces obsolescences. Le remanufacturing par exemple, qui est défini par Lund comme "un processus industriel par lequel des produits hors d'usages sont restaurés dans leur état d'origine" [8], n'est pas toujours applicable. Dans le cas des batteries de véhicules électriques, le remanufacturing ne permet pas aujourd'hui de recouvrer les performances initiales à un coût raisonnable [5], alors que la réutilisation directe n'est pas même pensable pour la même application.

Pour maximiser la valeur-ajoutée des batteries, une autre approche est nécessaire et c'est pourquoi on s'intéresse au Repurposing des batteries de véhicules électriques. On définit dès lors le Repurposing comme *un processus industriel par lequel des produits en fin d'usage (FdU) sont réutilisés dans des applications distinctes*. La fonction principale du produit restera donc inchangée d'un usage à l'autre mais les fonctions secondaires ainsi que les performances du produit sont amenées à évoluer [4,6]. Dans le cas des batteries au Lithium passant d'un usage dans un véhicule électrique à un usage stationnaire, la fonction principale est toujours le stockage d'énergie, mais ses performances en termes de densité énergétique sont différentes. Les fonctions secondaires liées, par exemple, aux scénarios d'usages, ou aux aspects de sécurité sont amenées à changer.

Plusieurs études montrent que l'augmentation de la durée de vie de batteries de véhicules électriques, par leur réutilisation dans d'autres applications, permettrait d'éviter des impacts environnementaux [9-12]. Mais ces dernières se limitent souvent à une comparaison entre plusieurs systèmes pour vérifier la pertinence environnementale du repurposing, sans s'intéresser à la conception des batteries de proprement parler.

D'autres études examinent plus finement la situation. Casals et al. [13] précisent : que toutes les technologies de batteries ne servent pas la stratégie de repurposing ; que la seconde application doit permettre le stockage d'énergie d'origine renouvelable ; et que des études plus poussées sur le vieillissement des batteries au lithium en seconde vie est nécessaire. Dans le projet Batteries2020 (www.batteries2020.eu), les recherches se sont axées sur l'évaluation des différents contributeurs à l'utilisation des batteries au lithium en seconde vie. Parmi les nombreux objectifs affichés, on peut noter d'une part une volonté d'amélioration des tests de caractérisation du vieillissement et d'autre part une

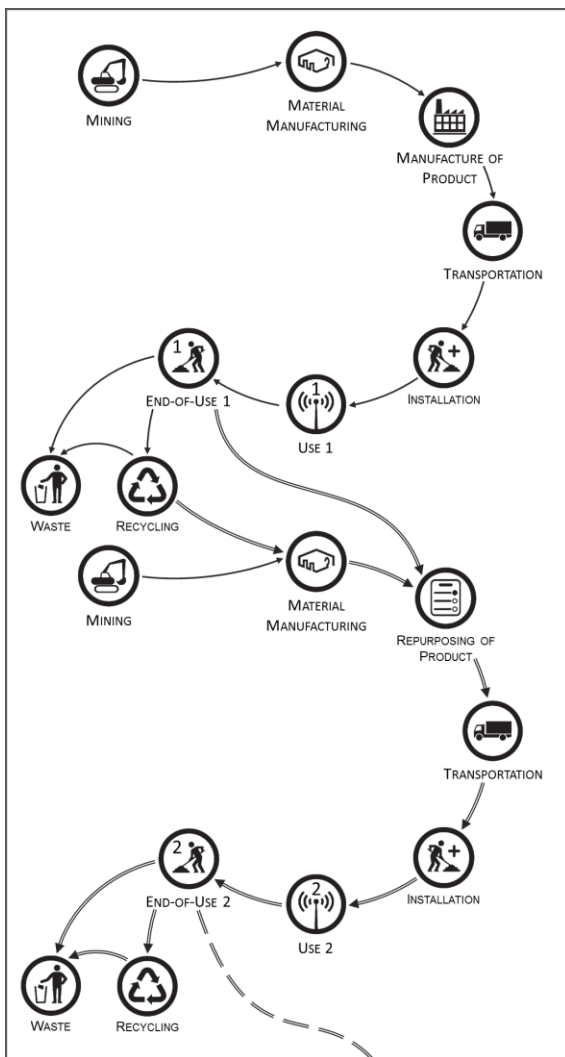


Figure 2 - Cycle de vie d'un produit repurposé

amélioration des modèles de prédiction des durées de vie. Plus récemment, certains chercheurs se sont intéressés à l'évaluation des conditions relatives à un repurposing efficace, toujours pour des batteries de véhicules électriques. Assunção et al. [14] ont évalué d'un point de vue technique et économique la faisabilité de la réutilisation de batteries de véhicules électriques pour du stockage d'énergie photovoltaïque au Portugal. En revanche, leur étude ne permet pas d'identifier une démarche facilitant le repurposing des batteries, ni n'interroge les problèmes de conception de ces dernières.

La conception de produits implique généralement différentes étapes et de nombreux paramètres. Lorsque l'on s'intéresse au processus de conception (Figure 3), on retrouve habituellement les mêmes jalons au cours d'un projet de conception. Au début du processus sont explicités les *requirements*. Ils permettent d'établir la base du processus de conception [15]. Ces derniers peuvent être de différentes natures : géométrique, énergétique, ergonomique, de matériau, de sécurité, de qualité, etc. [16]. Au cours de l'élaboration du produit, le concepteur devra choisir parmi plusieurs paramètres de conception pour respecter ces *requirements* [15]. En accord avec nos précédentes études [4,6], et malgré la disparité des paramètres de conception rencontrés, nous proposons, à l'instar de Charter et Gray dans le cadre du remanufacturing [17], de les grouper en 3 catégories, liées au produit, au processus de fabrication et au modèle d'affaires.



Figure 3 - Processus de conception classique

La littérature est aujourd'hui assez pauvre lorsqu'on l'interroge sur ces problématiques de conception pour le repurposing. Quelques études abordent néanmoins les paramètres de conception nécessaires à la réussite de cette stratégie de fin de vie [4,5,14]. Dans une précédente étude [4], nous avons avancé plusieurs paramètres de conception de produits repurposés et les liens qui existent avec les autres stratégies de réutilisation. Puis nous avons présenté un lien entre les guidelines utilisés en conception pour des produits réutilisés, qui peuvent être appliqués à des produits conçus pour être repurposés [6]. Au travers d'entretiens avec des experts, Beverungen et al. détaillent davantage ces paramètres de conception [5].

Comme susmentionné, on considère ici que le repurposing est un processus industriel par lequel des produits en fin d'usage sont réutilisés dans des applications distinctes. Deux scénarios apparaissent dès lors. Premièrement la conception pour le repurposing - penser le second usage dès la conception initiale. Deuxièmement, le repurposing à partir de produits en fin d'usage - le produit n'est pas conçu initialement pour être repurposés.

Nous cherchons dans ce papier à définir le moyen d'évaluer les paramètres qui influent le repurposing de batteries de véhicules électriques, que ce soit dans le cadre d'une conception pour du repurposing ou le repurposing à partir de produits en fin d'usage. Ainsi, en confrontant ces définitions à un terrain industriel, nous souhaitons apprécier si les paramètres qui avaient été pressentis suite à l'étude bibliographique sont pertinents. Pour cela, nous avons établi une grille d'entretien à destination d'experts en conception de batteries.

III. GRILLE D'ENTRETIEN POUR LES BATTERIES A 2 USAGES.

Cette troisième partie détaille la grille d'entretien développée pour évaluer les paramètres qui influent lors de la conception de batteries destinées à plusieurs usages.

L'établissement de cette grille d'entretien a été motivé par une étude préliminaire réalisée auprès d'un industriel - appelé Entreprise A -, expert dans le traitement des batteries de véhicules électriques en fin de vie. L'entreprise A, consciente du potentiel résiduel de stockage d'énergie au sein des batteries en fin d'usage souhaite les valoriser différemment que par du recyclage. Plusieurs questions s'étaient alors posées concernant cette stratégie de repurposing :

- Quels modèles d'affaires pour favoriser le développement ?
- Quels processus de (re)fabrication faire intervenir ?
- Quels caractéristiques produits pour faciliter cette stratégie ?

Cette étude préliminaire avec l'entreprise A avait confirmé que la séparation de paramètres de conception suivant les 3 axes Produit, Processus de repurposing et Modèle d'affaires, identifiés dans [4] étaient pertinents. Néanmoins, cette catégorisation n'étant pas suffisante pour identifier dans le détail les différents paramètres sous ces 3 catégories, nous avons décidé d'interroger d'autres acteurs pour mieux les identifier. Nous sommes ainsi revenus au processus de conception d'une batterie classique et avons détaillé les différentes étapes de conception, pour ensuite faire un parallèle avec les batteries sujettes au repurposing. Le but est d'apprécier les différences techniques entre les différents usages, les implications de ces différences en conception et ainsi identifier des paramètres clefs, nécessaires à la réalisation d'une batterie à deux usages.

A. Contexte des entretiens

Pour répondre à ces interrogations, nous nous sommes tournés vers trois équipes d'experts en conception de batteries, réparties au sein du laboratoire LITEN du CEA. Ces équipes ont coutume de travailler sur des projets industriels de conception de batteries et leurs connaissances dans le domaine vont au-delà du premier usage. Pour formaliser ces connaissances, nous avons commencé à réaliser plusieurs entretiens semis-directifs d'une durée de 2h auprès de ces équipes. Les résultats seront confrontés entre les différentes équipes et une synthèse globale rendra compte de la vision transverse.

B. Structure des entretiens

La collecte d'informations auprès des différentes équipes a été établie sur un même schéma global afin de faciliter le traitement des réponses apportées et l'établissement d'un processus de conception pour des batteries repurposées.

Les entretiens sont structurés en 4 parties distinctes : (1) présentations ; (2) généralités sur la conception des batteries ; (3) activités de conception de batteries au sein d'une équipe ; et (4) conception de batteries pour 2 usages successifs et différents.

La **première partie** est destinée à présenter chacune des personnes ainsi que leurs activités. Cette présentation permet

d'orienter les discussions à venir et de renseigner les thématiques qui seront abordées dans la suite de l'entretien, en fonction des profils de personnes présentes.

La **seconde partie** permet de contextualiser la conception de batteries et d'introduire brièvement les discussions plus techniques à venir. On aborde ici :

- A. Le contexte de l'activité,
- B. Les pratiques de conception et de recherche actuelles,
- C. Les étapes du processus de conception.

Ces questions permettent de comprendre le cadre général dans lequel s'inscrit l'activité de conception de batteries.

La **troisième partie** de l'entretien développe davantage les points liés à la conception de batteries lors d'un projet. Ceci nous aide à répondre à notre première sous-question de recherche visant à formaliser la démarche de conception actuelle pour déterminer les processus et les paramètres qui y sont liés. Nous cherchons ici à identifier pour chaque équipe :

- D. Les applications sur lesquelles elles sont sollicitées,
- E. Leur implication dans l'élaboration du CdC,
- F. Leur rôle dans chacune des étapes du processus de conception,
- G. Leurs interactions avec d'autres équipes,
- H. Les paramètres de conception retenus lors des projets (comment ils sont choisis, hiérarchisés et quels sont les outils qui permettent de les caractériser).

À l'issue des entretiens, un travail de synthèse est réalisé pour mettre en commun les différentes réponses et confronter chaque équipe aux réponses globales lorsque des discordances sont constatées. Cette troisième partie permet de répondre à notre sous-question de recherche qui consiste à formaliser la démarche de conception dans le cadre de projets de batteries classique pour déterminer quels sont les processus de conception et les paramètres de conception utilisés.

La **quatrième partie** permet d'ouvrir sur les travaux de recherche qui ont motivés ces entretiens : l'identification des paramètres de conception pour des batteries à usages successifs et différents, le repurposing. Comme mentionné dans la section 2, deux stratégies sont pressenties. Le repurposing de produits en fin d'usage d'une part, où des batteries classiques sont réemployées pour une autre utilisation que leur application initiale. La conception pour le repurposing d'autre part, où le produit est pensé, dès les étapes amont de conception précédant l'usage 1, pour ces deux usages successifs et distincts. Ici, on interroge les différentes équipes sur leur vision par rapport à ces stratégies quant à :

- I. Leurs impressions par rapport aux étapes de vie pressenties pour des batteries repurposées - *par exemple entre la fin de l'usage 1 et l'usage 2 ; à la fin de 2ème vie -*,
- J. L'évolution possible de leurs pratiques de conception,

- K. L'évolution dans la présentation et l'élaboration du CdC,
- L. L'évolution du processus de conception des batteries et les nouvelles activités nécessaires à mettre en place,
- M. Les paramètres de conception clefs liés à ces batteries (comment ils sont choisis, hiérarchisés et quels sont les outils qui permettent de les caractériser) et les différences par rapport à ceux évoqués précédemment.

Cette quatrième partie permet de faire un parallèle entre les processus et les paramètres de conception de batteries utilisés dans un cadre classique et ceux utilisés dans le cas d'un scénario de repurposing.

Cette grille d'entretien doit ainsi permettre d'identifier les paramètres de conception qui influent une batterie repurposée tout en formalisant les processus de conception dans le cadre de projets de développements de batteries.

IV. RESULTATS PRELIMINAIRES

Les entretiens étant en cours de réalisation, seuls des résultats partiels sont disponibles. Néanmoins, ceux-ci permettent d'ores et déjà d'avoir une bonne vision de la stratégie de repurposing. Comme mentionné précédemment, les résultats sont analysés en fonction de leur appartenance au produit, au processus industriel, ou, d'une manière plus générale au modèle d'affaire rencontré. En effet, lors d'une activité de repurposing, de nombreuses questions se posent sur les processus permettant de la mener à bien ainsi que vis-à-vis des performances des batteries en fin d'usage. Il est également nécessaire de juger des moyens à disposition des fabricants de produits repurposés pour vendre leur offre sur un marché adapté à ce second usage.

Dans le cas d'un projet de conception de batterie classique (à un usage), lorsque les experts batteries sont interrogés sur le processus de conception mis en œuvre, ils s'accordent sur le modèle de conception standard (Figure 3). Cette première approche permet, par la suite, de formaliser leur opinion sur ce que pourrait être le processus de conception pour des batteries repurposées. Les 5 étapes traditionnelles de ce processus ne sont pas décrites, mais davantage la manière dont elles se succèdent.

A. Produit repurposé

Les paramètres relatifs aux produits sont considérés comme l'un des trois points essentiels à définir lors du processus de conception. La grille d'entretien a d'ores et déjà permis de mettre en avant certains de ces paramètres. En effet, détailler les potentielles étapes de la vie d'une batterie repurposée permet de mieux évaluer quelles sont les caractéristiques importantes pour chacun des usages et ainsi faciliter la prise de décision sur les paramètres à considérer pour la conception des batteries à plusieurs usages. La première étape consiste en la spécification de ces usages, si possible, dès le cahier des charges, qui est une des pistes pour faciliter les étapes du processus de repurposing.

La grille d'entretien a permis de confirmer certains des paramètres liés au produit et cités dans la littérature, tels que la standardisation des différents éléments ou encore la densité d'énergie [4,5].

B. Processus de Repurposing

Concernant le processus de repurposing, les entretiens avec les différents experts ont mis en avant différentes phases qui pouvaient intervenir entre les deux usages et que l'on retrouve également dans la littérature [4,5]. On discerne notamment :

- Le démontage à la fin de l'usage 1
- Le diagnostic - traçabilité de l'usage 1 pour faciliter l'usage 2
- Le désassemblage
- La reconfiguration du produit et la fabrication de nouvelles pièces
- Le réassemblage

L'identification de ces étapes dès les phases amont de conception en permet une meilleure prise en charge au moment du processus de repurposing à proprement parler. La batterie peut alors être pensée pour être démontée et diagnostiquée par exemple.

C. Modèle d'affaire du repurposing

Lorsque l'on s'intéresse davantage aux modèles d'affaires facilitant la stratégie de repurposing, il est nécessaire de penser le moyen permettant de maximiser la valeur ajoutée des batteries. D'un point de vue légal par exemple, si la batterie est considérée comme un déchet à la fin de son premier usage, le 'repurposeur' est contraint de lui faire quitter son statut. En revanche, s'il a la propriété du produit, il a la possibilité de vendre l'usage de la batterie plutôt que cette dernière.

À travers le guide, les entretiens ont confirmé la distinction qu'il pouvait y avoir entre 'Conception pour le Repurposing' - où le second usage est pensé dès la conception initiale - et le 'Repurposing de produits en fin d'usage' - concernant des produits n'ayant pas été conçus pour être repurposés. Ces deux scénarios vont probablement induire un processus de repurposing différent du fait d'une conception initiale différente.

Enfin, à l'image des deux scénarios évoqués précédemment, certains choix pris au niveau du modèle d'affaires vont avoir des conséquences au niveau du produit et du processus de repurposing. Par exemple, en ce qui concerne 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 risquent de l'être également. Ces paramètres confirment en partie ceux de la littérature [4,5].

D. Synthèse du guide d'entretien

Le guide d'entretien que nous avons proposé a été expérimenté auprès de 3 équipes de concepteurs de batteries. Les entretiens ont permis de faire remonter de nombreuses informations par rapport à la stratégie de repurposing étudiée concernant les différents domaines liés au produit, au processus de repurposing ou au modèle d'affaires.

Le tableau 1 résume, pour chaque type de question posée dans la section 3.2, les paramètres de conception qui sont remontés au moment des entretiens et sont catégorisés en fonction de

leur domaine : produit, processus rencontrés en fin d'usage (FdU) ou modèle d'affaires.

Tableau 1 - Paramètres de conception issus des entretiens

Paramètres de conception pour les batteries classiques © et repurposées ® et infos sur le processus de conception ☉				
Partie de l'entretien	Question	Produit	Processus en FdU	Modèle d'affaires
2	A			
	B	☉		
	C	☉	☉	
3	D	©		
	E	©		©
	F	© ☉		☉
	G	© ☉		
	H	©		
4	I	®	®	
	J	© ® ☉	® ☉	®
	K	© ®	®	®
	L		® ☉	☉
	M	© ®	®	®

Au cours des deux premières parties des entretiens - questions A à C - il était question d'une prise de contact et d'une familiarisation avec les processus de conception des experts batteries, c'est pourquoi aucune d'information relative aux paramètres de conception des batteries ne sont ressorties.

La troisième partie des entretiens - question D à H - fait apparaître plusieurs éléments. Tout d'abord, des informations liées aux processus de conception suivis dans le cadre d'un projet de conception de batteries, que ce soit au niveau du produit développé ou au niveau de l'offre proposée. Ensuite, des informations relatives aux paramètres de conception nécessaire au développement du produit ainsi qu'au modèle d'affaires visé.

La dernière partie - questions de I à M - rend compte de davantage d'informations. Premièrement, on retrouve des informations liées au processus de conception au niveau du produit, mais également du processus de fin d'usage - nécessité de concevoir les étapes permettant le repurposing du produit à proprement parlé - et enfin du modèle d'affaires envisagé - besoin de définir l'ensemble de la chaîne et des acteurs dès la conception. Deuxièmement, on remarque que les entretiens font remonter des paramètres de conception concernant les batteries repurposées, la prise en compte de leur fin d'usage, ainsi qu'au niveau de l'offre qui leur est associée. En fonction du scénario adopté - Conception pour le Repurposing ou Repurposing de produits en fin d'usage - ces paramètres diffèrent. Dans cette quatrième partie, de nombreuses informations sont ressorties au niveau des processus de fin d'usage, que cela concerne les paramètres ou les

processus de conception, alors que cette question ne se pose habituellement pas pour des batteries 'traditionnelles'.

V. CONCLUSION

Afin de faciliter l'identification des paramètres de conception pour des batteries repurposées, Nous avons proposé un guide d'entretien en 4 parties. L'application de ce guide d'entretien auprès de spécialistes de la conception de batteries nous a permis d'identifier de nouveaux paramètres de conception ainsi que deux scénarios de conception distincts : *la Conception pour le Repurposing et le Repurposing de produits en fin d'usage*. Il est aussi apparu que la pertinence du choix entre ces 2 scénarios allait fortement dépendre du modèle d'affaire envisagé. Ainsi, comme l'ont confirmé les entretiens, la conception du produit seul n'est pas suffisante. Il est primordial de concevoir la chaîne de valeur dans son ensemble en même temps que ce dernier pour, par exemple, pouvoir répondre à la question "À quel moment arrête-on le premier usage ?".

VI. REFERENCES

- [1] EUROPEAN COMMISSION, Directive 2000/53/EC of 18 September 2000 on end-of life vehicles. 2000, pp. 0001–0008.
- [2] EUROPEAN COMMISSION, Directive 2012/19/EU of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), OJEU n°197 of 24 July 2012, Brussels, Belgium. 2012, p. 34.
- [3] EUROPEAN COMMISSION, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. 2008.
- [4] T. BAUER, G. MANDIL, É. NAVEAUX, AND P. ZWOLINSKI, "Lifespan Extension for Environmental Benefits: A new Concept of Products with Several Distinct Usage Phases," in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 47, pp. 430–435.
- [5] D. BEVERUNGEN, S. BRÄUER, F. PLENTER, B. KLÖR, AND M. MONHOF, "Ensembles of context and form for repurposing electric vehicle batteries: an exploratory study," *Comput Sci Res Dev*, pp. 1–15, Jul. 2016.
- [6] T. BAUER, D. BRISSAUD, AND P. ZWOLINSKI, "Design for High Added-Value End-of-Life Strategies," in *Sustainable Manufacturing*, R. Stark, G. Seliger, and J. Bonvoisin, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 113–128.
- [7] ADEME, "Étude sur la durée de vie des équipements électriques et électroniques," Jul. 2012.
- [8] R. T. LUND, "Remanufacturing," *Technology review*, vol. 87, no. 2, pp. 19–29, Feb. 1984.
- [9] J. NEUBAUER AND A. PESARAN, "The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 23, pp. 10351–10358, Dec. 2011.
- [10] L. AHMADI, A. YIP, M. FOWLER, S. B. YOUNG, AND R. A. FRASER, "Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 6, pp. 64–74, Jun. 2014.
- [11] R. FARIA ET AL., "Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective," *Journal of Power Sources*, vol. 262, pp. 169–177, Sep. 2014.
- [12] K. RICHA, C. W. BABBITT, N. G. NENADIC, AND G. GAUSTAD, "Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles," *Int J Life Cycle Assess*, pp. 1–16, Aug. 2015.
- [13] L. C. CASALS, B. A. GARCÍA, F. AGUESSE, AND A. ITURRONDOBEITIA, "Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact," *Int J Life Cycle Assess*, pp. 1–12, Jun. 2015.
- [14] A. ASSUNÇÃO, P. S. MOURA, AND A. T. DE ALMEIDA, "Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy," *Applied Energy*, vol. 181, pp. 120–131, Nov. 2016.
- [15] T. TOMIYAMA, P. GU, Y. JIN, D. LUTTERS, C. KIND, AND F. KIMURA, "Design methodologies: Industrial and educational applications," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 543–565, 2009.
- [16] G. PAHL, K. WALLACE, L. BLESSING, AND G. PAHL, Eds., *Engineering design: a systematic approach*, 3rd ed. London: Springer, 2007.
- [17] C. GRAY AND M. CHARTER, "Remanufacturing and product design," *International Journal of Product Development*, vol. 6, no. 3–4, pp. 375–392, 2008.