

ANNEXE A L'ETUDE PEPS5

RAPPORT SUR LA SECONDE VIE DES BATTERIES



EXPERTISES

Janvier
2023

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

CITATION DE CE RAPPORT

CEA, Artelys, ATEE, ADEME. 2022. Annexe à l'étude PEPS5, Rapport sur la seconde vie des batteries. 49 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2205D0018

Etude portée par l'ATEE, réalisée avec l'aide d'Artelys et du CEA Liten, pour ce projet co-financé par l'ADEME. Ce projet a également été co-financé par l'Avère, Comax, Dalkia, ETC, EDF, Eiffage, Energie, Engie, FAFCO, Fraîcheur de Paris, Idhelio, H2V, RTE, SAFT, Terega, TotalEnergies.

Coordination technique - ADEME : BERTHOMIEU Nadine
Direction/Service : Service Réseaux et Energies Renouvelables

AVANT-PROPOS

Ce document est une annexe à l'étude PEPS5. L'étude PEPS5 du Club stockage d'Energies de l'ATEE a été réalisée avec le soutien de l'ADEME, et le co-financement de 16 acteurs référents sur le stockage d'énergies : Association nationale pour le développement de la mobilité électrique (AVERE France), Comax France, Dalkia, Eco-tech Ceram, Electricité De France, Eiffage énergie, Enedis, Engie, Fafco, Fraîcheur de Paris, H2V Product, Idhelio, Réseau de Transport d'électricité (RTE), Saft, Terega et TotalEnergies. L'ensemble de ces acteurs ont participé activement aux comités de pilotage et ont contribué à l'étude à travers des interviews, la fourniture de données et les avis d'experts sur les technologies et cas d'étude.

Les éléments présentés dans ce rapport, ainsi que leur interprétation, sont les résultats des travaux réalisés par Artelys et le CEA et n'engagent aucunement les membres de ce Club ou l'ADEME, qu'ils aient ou non contribué à la réalisation de cette étude.



Annexe à l'étude PEPS5
Rapport sur la seconde vie des batteries

AUTEURS

Les auteurs de ce rapport sont Elisabeth Lemaire (CEA) et Yves-Marie Bourien (CEA).

	Rédacteur(s)	Vérificateurs	Approbateur	Emetteur
Nom(s)	E. LEMAIRE	J.-M. KLEIN	B. FROIDUROT	A. JOUINI
Fonction	Ingénieur-chercheur	Chef de Laboratoire	Chef de Service	Chef de Département



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
INES RDI | Savoie Technolac | BP332 | 50 avenue du lac Léman
F-73375 Le Bourget-du-Lac
T. +33 (0)4 79 79 22 44 | F. +33 (0)4 79 68 80 49
Laure.KAWECKI@cea.fr

Liten

Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux

Direction de la Recherche Technologique
Département : DTS
Service : SIRE
Laboratoire : L2SA

SOMMAIRE

ACRONYMES.....	6
INTRODUCTION	7
1. ESTIMATIONS DU GISEMENT DE BATTERIES POUR LA SECONDE VIE	9
2. OPPORTUNITES OFFERTES PAR LES BATTERIES DE SECONDE VIE DANS LE STOCKAGE STATIONNAIRE	16
2.1 APPLICATIONS DU STOCKAGE STATIONNAIRE	16
2.2 APPLICATIONS PERTINENTES POUR LES BATTERIES DE SECONDE VIE	19
3. LIMITATIONS ET CHALLENGES TECHNIQUES POUR L'UTILISATION EN SECONDE VIE	21
3.1 DIAGNOSTIC EN FIN DE PREMIERE VIE	21
3.2 RECONDITIONNEMENT	22
3.3 DIMENSIONNEMENT ET GESTION DU NOUVEAU SYSTEME DE STOCKAGE	23
3.4 ASPECTS SECURITE.....	23
4. ASPECTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS.....	27
4.1 REGLEMENTATION CONCERNANT LA SECONDE VIE DES BATTERIES	27
4.1.1 Règlementation actuelle.....	27
4.1.2 Évolutions réglementaires en cours.....	27
4.2 NORMES PERTINENTES POUR LES BATTERIES DE SECONDE VIE	30
4.2.1 Normes actuellement en vigueur.....	30
4.2.2 Normes en préparation.....	31
5. ASPECT ECONOMIQUE.....	33
5.1 COUTS D'UNE BATTERIE NEUVE	33
5.2 COUTS D'UNE BATTERIE SECONDE VIE	35
5.3 SYNTHESE ET COMPARAISON DES COUTS	41
CONCLUSION	43



Résumé

Compte-tenu de la très forte croissance actuelle du marché des véhicules électriques et hybrides en Europe et dans le monde, il est attendu d'ici 5 à 10 ans un important volume de batteries en fin de vie pour usage automobile. Certaines de ces batteries pourraient être réutilisées pour des applications aux besoins moins contraignants que ceux d'un véhicule, comme le stockage stationnaire : on parle alors d'une « seconde vie » de la batterie. Depuis quelques années, de nombreuses expérimentations et démonstrations ont été menées et ont permis de progresser sur les différents aspects de cette application.

Dans ce contexte, l'étude présentée ici a pour objectif de donner une vue d'ensemble de la problématique « seconde vie » dans ses différents aspects :

- ✓ Estimations du gisement de batteries pour la seconde vie, donnant les volumes de batteries mis en jeu,
- ✓ Opportunités offertes par les batteries de seconde vie dans le stockage stationnaire,
- ✓ Limitations et challenges techniques pour l'utilisation en seconde vie,
- ✓ Aspects réglementaires et normatifs,
- ✓ Aspect économique.

Les projections et estimations du gisement de batteries destinées à la seconde vie s'accordent sur une augmentation conséquente des volumes annuels, qui est déjà en train de démarrer, avec de fortes disparités entre les prévisions d'une source à l'autre. Les démonstrateurs mis en place depuis quelques années ont donné de bons résultats sur le plan technique, et ont montré que les systèmes seconde vie sont capables de répondre aux besoins de différentes applications stationnaires. Il reste cependant beaucoup d'incertitudes, par exemple sur la durée possible de cette seconde vie. Les aspects diagnostic, reconditionnement et surtout sécurité nécessitent encore un effort de R&D pour fiabiliser cet usage, de même que le développement de modèles de vieillissement adaptés. L'adaptation de la réglementation est en cours, ce qui devrait aussi faciliter la mise en œuvre de systèmes seconde vie.

Au niveau économique, la faible maturité de ces systèmes ne permet pas de donner des chiffres fiables en termes de rentabilité. On observe l'apparition d'un nouveau type d'acteur, chargé du reconditionnement des batteries après leur première vie. Le coût de ce reconditionnement est un des paramètres importants au niveau économique, de même que la durée de vie possible.

Pour une batterie en fin de première vie, l'arbitrage entre une réutilisation en seconde vie ou un recyclage doit tenir compte à la fois des aspects techniques, environnementaux et économiques. Cet arbitrage dépendra aussi du prix des matières premières et de l'amélioration des procédés de recyclage d'une part, et des améliorations techniques apportées aux batteries neuves d'autre part.

Pour une stratégie industrielle nationale voire européenne, l'arbitrage entre le développement d'une filière performante de seconde vie et le développement d'une filière puissante du recyclage dépend, lui aussi, de nombreux facteurs socio-économiques, environnementaux et stratégiques. En attendant que cet arbitrage s'opère, la supériorité de la seconde vie (versus l'option d'une première vie étendue plus le recyclage) ne peut pas être considérée comme garantie d'emblée. L'obligation d'intégration de matériaux recyclés dans les batteries neuves (discutée dans le cadre de la nouvelle directive européenne Batteries) incitera peut-être à privilégier le recyclage plutôt que l'utilisation des batteries en seconde vie.



ACRONYMES

BMS	Battery Management System
CAGR	Compound Annual Growth Rate
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
LFP	Lithium Fer Phosphate
LMO	Lithium Manganese Oxide
LTO	Lithium Titanate Oxide
NCA	Nickel Cobalt Aluminium
NMC	Nickel Manganese Cobalt
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
SEI	Solid Electrolyte Interphase
SOH	State-of-health



INTRODUCTION

Compte-tenu de la très forte croissance actuelle du marché des véhicules électriques et hybrides (EV, PHEV et HEV) en Europe et dans le monde avec une explosion du nombre de modèles disponibles, il est attendu d'ici 5 à 10 ans un important volume de batteries en fin de vie pour usage automobile. Cette première fin de vie ne signifie pas forcément absence de capacités à stocker de l'énergie et restituer de la puissance pour des besoins moins contraignants que ceux d'un véhicule, comme le stockage stationnaire : on parle alors d'une « seconde vie » de la batterie.

Cette problématique a été identifiée très tôt, avec de premières publications aux USA dès le début des années 2000 [1], et en France un rapport de l'ADEME en 2011 [2], qui prévoyait des volumes significatifs à partir de 2025. Depuis, de nombreuses expérimentations et démonstrations ont été menées et ont permis de progresser sur les différents aspects de cette application [3]. En 2020, le Comité Stratégique de Filière (CSF) Mines et Métallurgie du Conseil National de l'Industrie a publié le rapport de son groupe de travail sur le recyclage des batteries [4], avec un état des lieux et des recommandations pour les marchés du recyclage mais aussi de la seconde vie : ces deux problématiques apparaissent comme étroitement liées.

En particulier, les constructeurs automobiles qui ont mis le véhicule sur le marché ont l'obligation en Europe de gérer la fin de vie de la batterie et la mise en décharge est interdite [5]. Afin d'aider à une utilisation complémentaire à la première vie et retarder le recyclage, les réglementations actuellement en discussion pour les batteries dans l'UE (*Battery Directive*) devraient officiellement reconnaître la réutilisation des batteries comme un moyen de traitement du 'déchet' batterie première vie.

Dans les différentes études existantes, le sujet de la seconde vie des batteries peut recouvrir un périmètre plus ou moins large et inclure ou non certaines applications et certains cas particuliers. La Figure 1 illustre les nouveaux flux de batteries potentiels, ainsi que l'articulation avec le recyclage des batteries en fin de vie. Ici, nous avons borné le domaine de notre étude à la réutilisation de batteries Li-ion issues de véhicules électriques ou hybrides, dans des applications stationnaires. Il y a donc changement d'application, et éventuellement un reconditionnement ou une reconfiguration de la batterie en fin de première vie.



Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

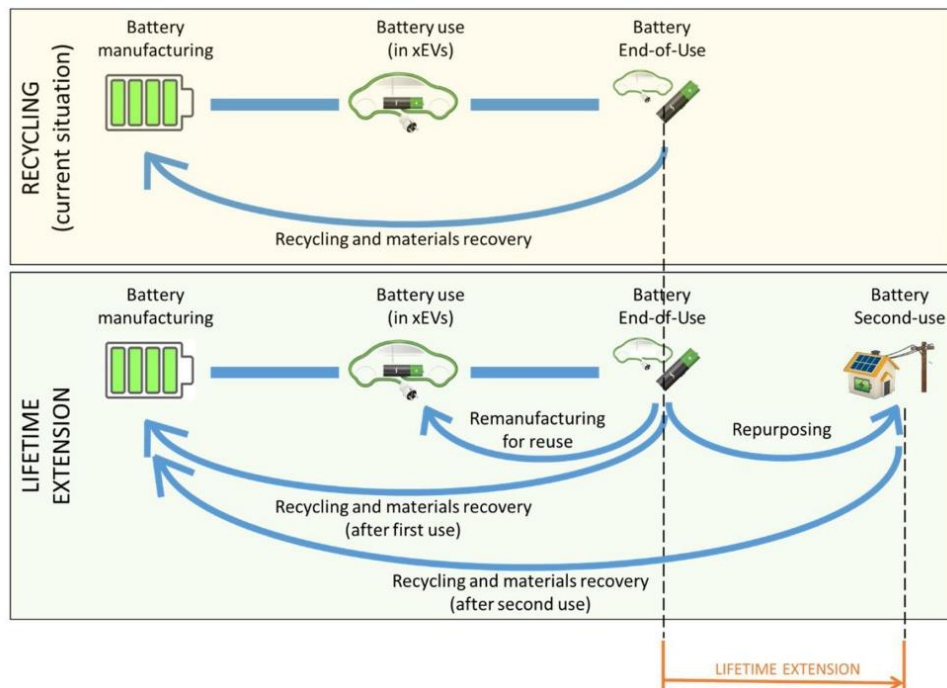


Figure 1 : Gestion de la fin de vie des batteries de VE dans les différents scénarios [6]



Figure 2 : Analyse SWOT de la problématique « seconde vie » au niveau français [4]

Le rapport du CSF [4] en 2020 inclut une analyse SWOT¹ de la problématique « seconde vie » au niveau français (Figure 2). Le travail rapporté ici propose d'apporter un complément à cet exercice en donnant une vue d'ensemble de la problématique « seconde vie » dans ses différents aspects. Ces aspects sont détaillés dans les différentes parties de ce rapport :

¹ Strengths Weaknesses Opportunities Threats, (respectivement forces, faiblesses, opportunités et risques)

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

- ✓ Estimations du gisement de batteries pour la seconde vie, donnant les volumes de batteries mis en jeu,
- ✓ Opportunités offertes par les batteries de seconde vie dans le stockage stationnaire,
- ✓ Limitations et challenges techniques pour l'utilisation en seconde vie,
- ✓ Aspects réglementaires et normatifs,
- ✓ Aspect économique.

1. ESTIMATIONS DU GISEMENT DE BATTERIES POUR LA SECONDE VIE

Depuis 2010, les ventes annuelles de batteries Li-ion sont en forte croissance (Figure 3). Le marché est principalement driven par la mobilité électrique, les ventes de batteries destinées à l'électronique étant quasi-stables depuis une dizaine d'années. On notera aussi la part importante du marché chinois.

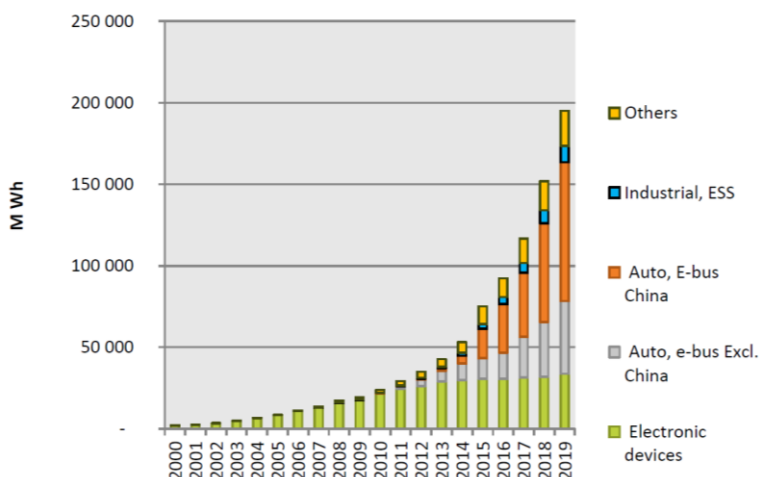
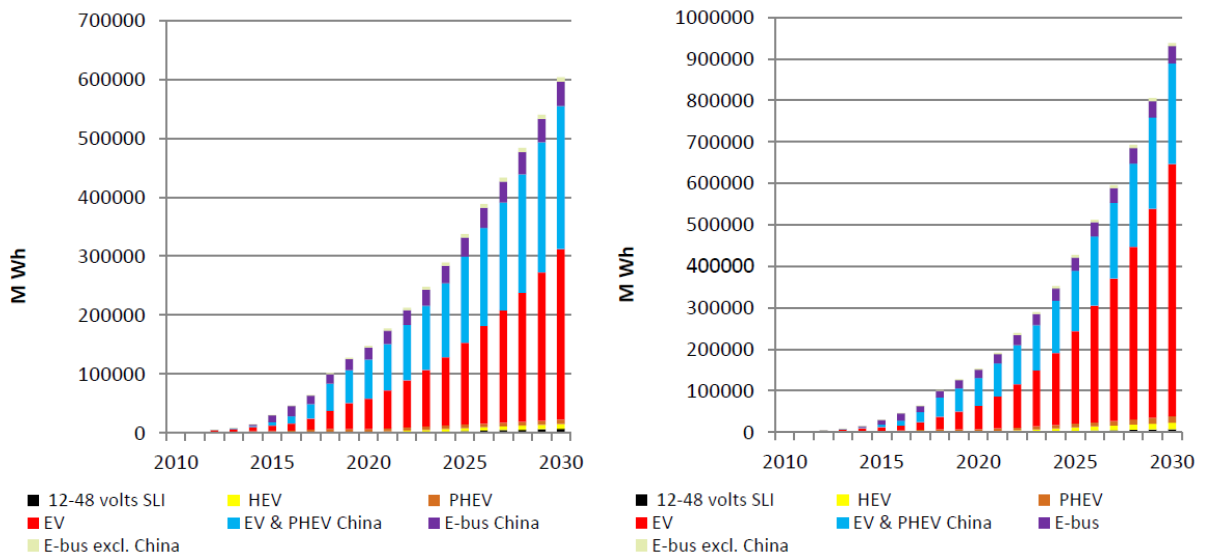


Figure 3 : Ventes annuelles de batteries Li-ion au niveau mondial depuis 2000 [7]

Les projections de ventes annuelles envisagent une croissance du marché de l'ordre de 25% par an (Figure 4), on approcherait donc potentiellement du millier de GWh annuel en 2030. Par contre, comme le montrent les Figure 5 et Figure 6 et le Tableau 1, ces prévisions varient beaucoup d'une source à l'autre, et même au cours du temps pour une même source.

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries



scenari « base » CAGR +24% en énergie, +13% en \$ scenari « réaliste » CAGR +26% en énergie, +17% en \$
 Figure 4 : Projections de ventes annuelles des batteries Li-ion pour la mobilité suivant deux scénarios (Avicenne) [7]

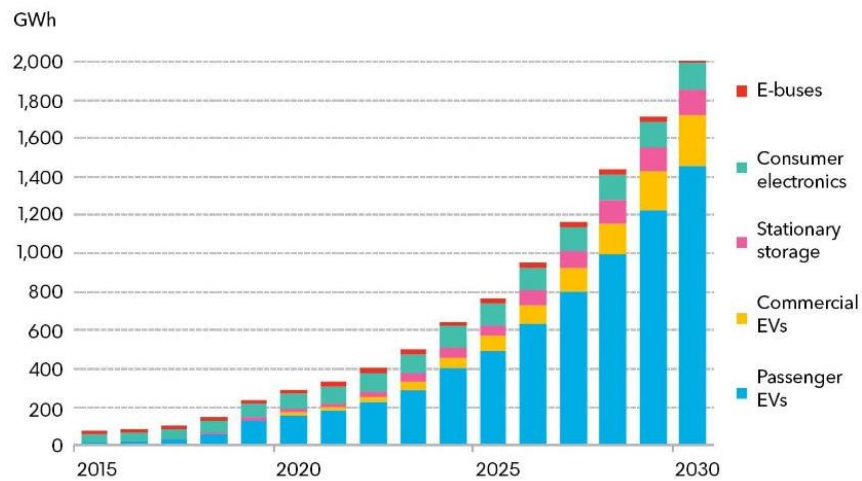


Figure 5 : Projection de la demande annuelle en batteries Li-ion (Bloomberg NEF), Février 2020 [8]

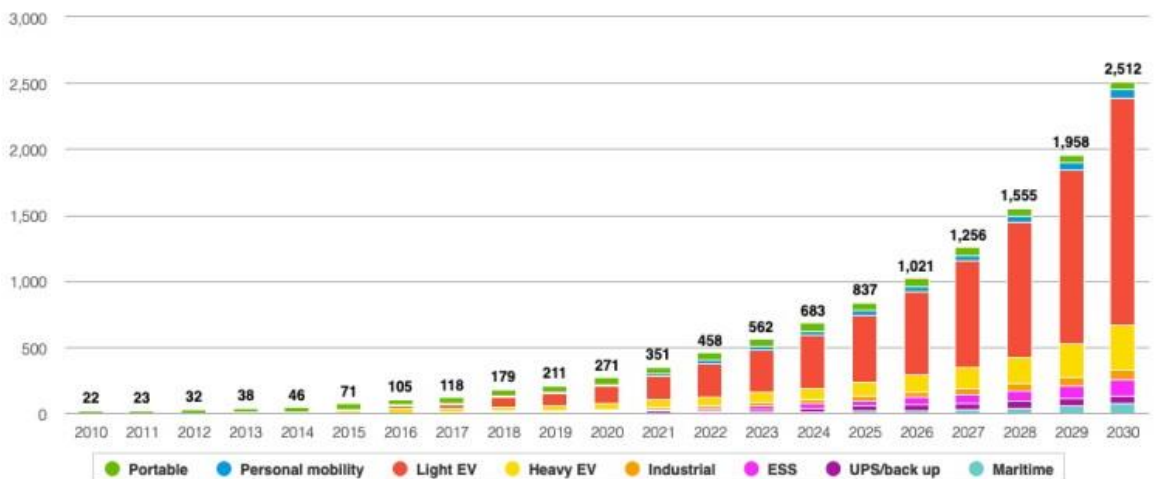


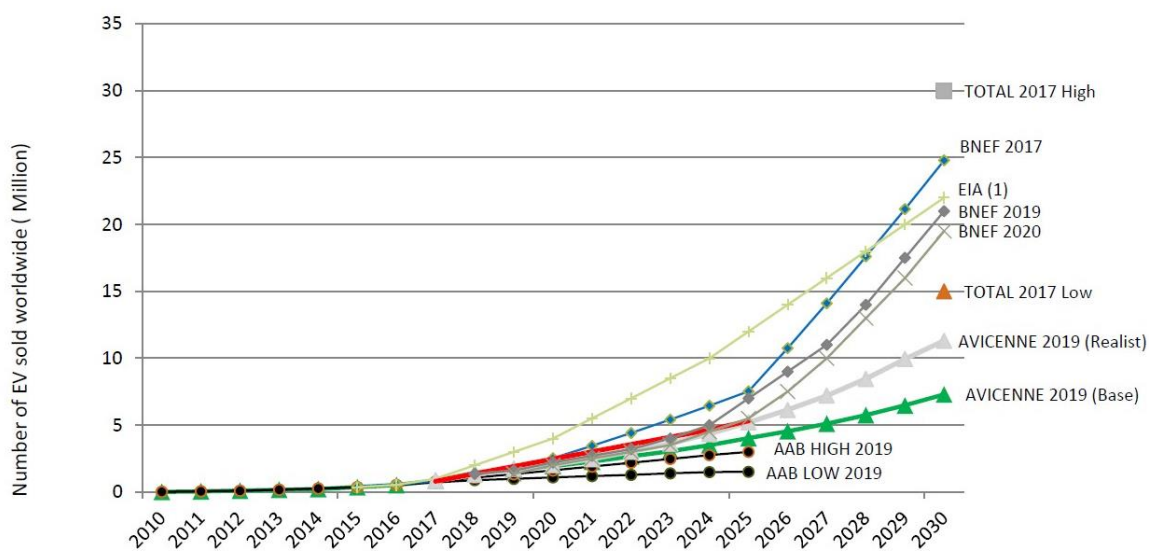
Figure 6 : Estimation de la demande annuelle en batteries Li-ion (CES) [9]

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

Source	Date	Estimation 2030
Avicenne [10]	01/2020	700 -1000 GWh
Circular Energy Storage [9]	01/2020	2100 GWh
Bloomberg NEF [8]	02/2020	1700 GWh
Avicenne [7]	10/2020	600 - 900 GWh

Tableau 1 : Estimations du marché des batteries pour la mobilité électrique en 2030, suivant différentes sources

Cette variabilité des prévisions est directement liée aux projections de ventes de véhicules électriques (Figure 7), et aux incertitudes sur l'évolution des réglementations et du contexte géopolitique et économique. En 2018, un rapport du JRC fournissait également une comparaison de différents scénarios, qui conduisait à une conclusion similaire (Figure 8).



AAB, AABC US, June 2017, 2018, 2019

BNEF, BATTERIES 2017, October 2017

AVICENNE Analysis 2020

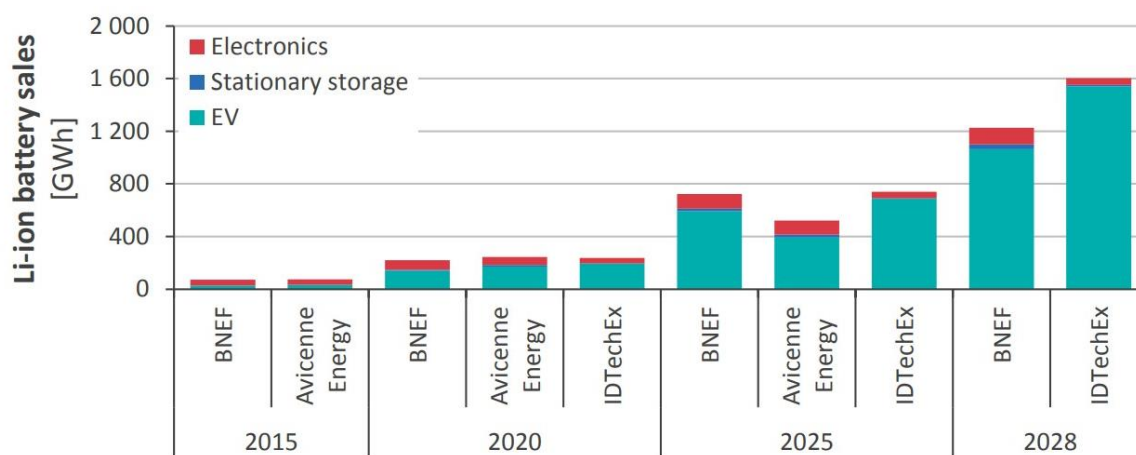
COVID 19 impact partially implemented as the crisis is not over - Impact could be worst

(1) EIA – Avicenne estimation based on "Stock" numbers

Figure 7 : Projections du marché des véhicules électriques et hybrides [7]



Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries



Source: JRC based on BNEF [26], Avicenne Energy [44] and IDTechEx [52]. Note: EV includes passenger light duty vehicles and buses; Electronics includes consumer electronics for all studies, power tools and medical in Avicenne Energy, and wearables in IDTechEx; Stationary storage includes industrial applications in Avicenne Energy.

Figure 8 : Projection de la demande en batteries Li-ion (JRC) [11]

En outre, le type de batteries Li-ion pour l'application automobile évolue également. On observe une tendance à utiliser des cellules de capacité plus élevée, et une évolution des matériaux d'électrode, avec l'augmentation de la part du NMC et dans une moindre mesure du NCA (Figure 9). Pour les VE légers, les matériaux LFP et LMFP pourraient s'imposer de plus en plus également. D'autres innovations futures, non analysées ici, pourront concerner notamment le développement des batteries à électrolyte solide, dites 'solid-state' ou dans un premier temps 'semi-solid-state'.

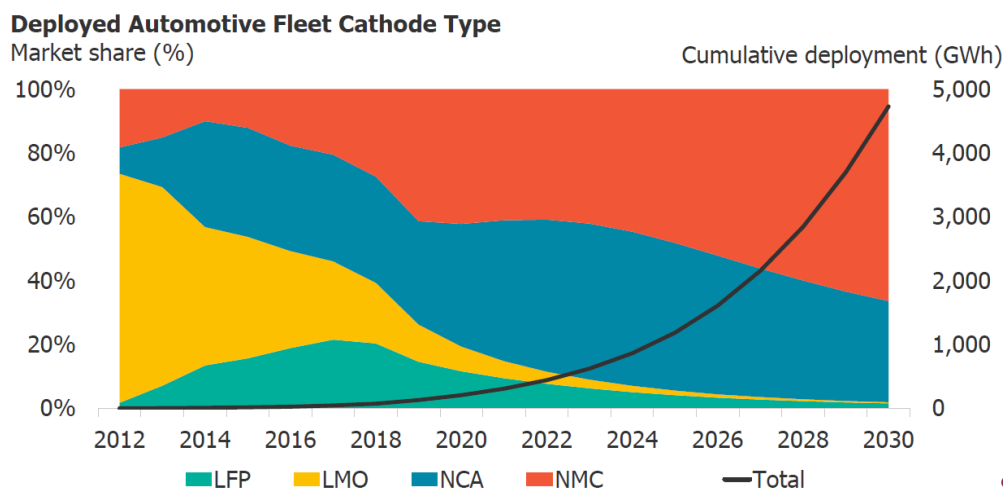


Figure 9 : Évolution de l'usage des matériaux d'électrode positive pour batteries de VE [12]

Les avis divergent sur la chimie des batteries destinées à la seconde vie. Ainsi, Lux Research estime que les batteries LFP sont les mieux placées pour cela, et que les batteries NMC et NCA seraient mieux valorisées par le recyclage. Cette hypothèse exclut d'emblée les batteries de VE au profit de celles issues des bus et des vélos électriques (Figure 10), en accordant beaucoup d'importance à l'aspect financier de la seconde vie, qui sera discuté à la fin de ce rapport.

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

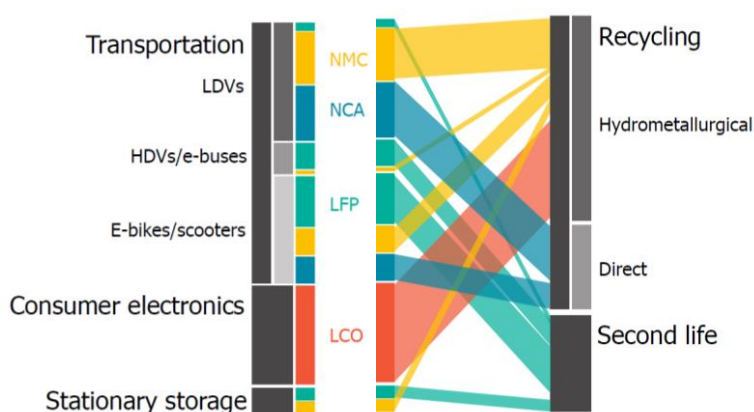


Figure 10 : Destinations des batteries en fin de première vie suivant les applications et les chimies (projections 2030) [12]

On peut estimer que les batteries de VE arriveront en fin de première vie en même temps que le véhicule qu'elles équipent, soit au bout d'une dizaine d'années, 15 ans au maximum. Cela signifie que des volumes importants pour la seconde vie seront rapidement disponibles. Par exemple, dans une étude déjà ancienne (2016), Lux Research donne une estimation du gisement annuel de batteries pour la seconde vie, suivant différents scénarios de durée de la première vie (Figure 11). Comme pour les projections de ventes de batteries pour VE, le gisement varie énormément suivant les hypothèses de départ (du simple au triple). Le marché des véhicules électriques est en pleine maturation : de plus en plus de modèles, tous les constructeurs concernés, batterie de capacité de plus en plus importante et propriété du véhicule avec sa batterie. Le critère de fin de première vie qui sera appliqué est donc très difficile à déterminer et reste donc à l'état d'hypothèse. Ici encore, CES donne des chiffres beaucoup plus élevés (Figure 12), avec 175 GWh en 2030, contre environ 60 GWh au maximum pour Lux Research. Rien qu'en Europe, on arriverait à environ 7 GWh en 2025, et 30 GWh en 2030. Le scénario optimiste d'une autre source n'arrive qu'à un tiers de cette valeur (Figure 13, [6]), et le rapport du CSF [4] donne une valeur maximale de 25 GWh de batteries arrivant en fin de première vie en 2030, pour les véhicules légers uniquement (hypothèse de durée de vie du véhicule de 10 ans, seulement 2 GWh environ en fin de première vie si hypothèse à 15 ans), mais sans préciser quelle fraction serait disponible pour une seconde vie. Le Tableau 2 résume l'ensemble de ces estimations.



Annexe à l'étude PEPS5
Rapport sur la seconde vie des batteries

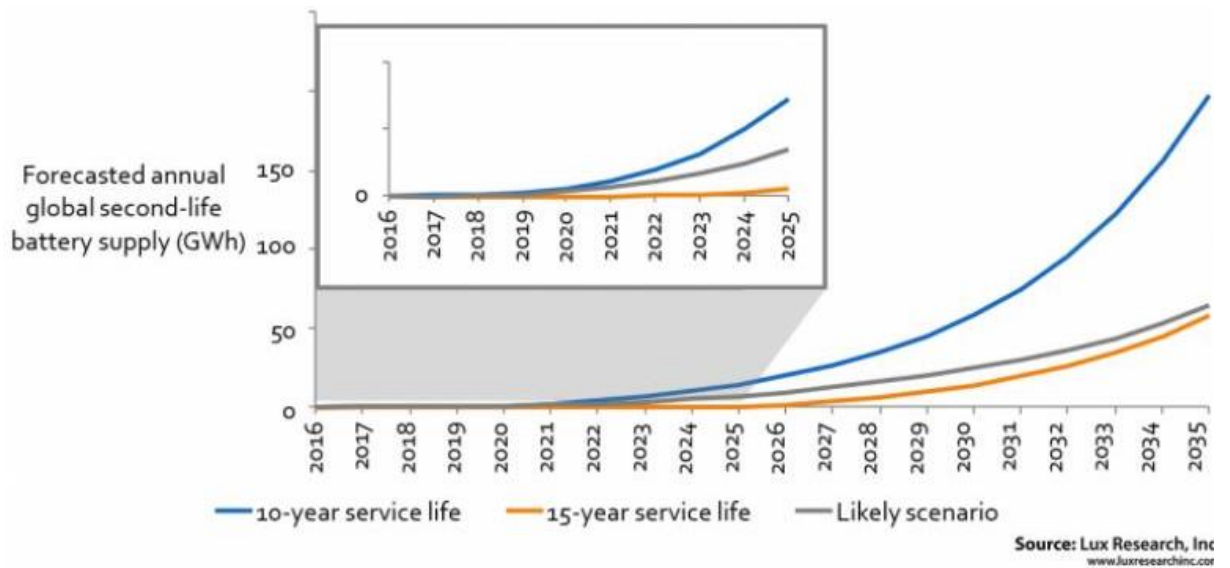


Figure 11 : Estimation du gisement annuel de batteries pour la seconde vie (Lux Research) [13]

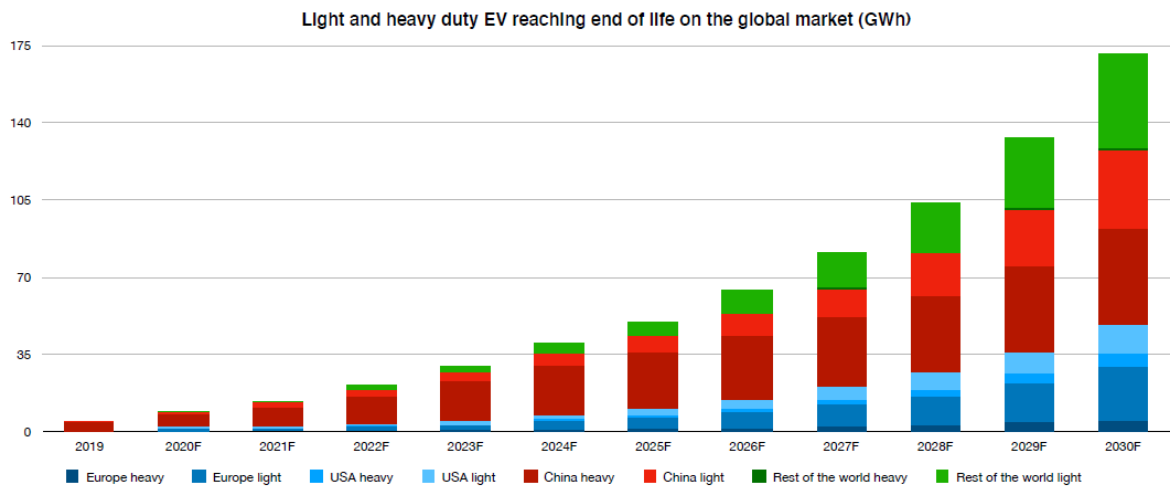


Figure 12 : Estimation du gisement annuel de batteries en fin de la première vie par région (CES) [9]

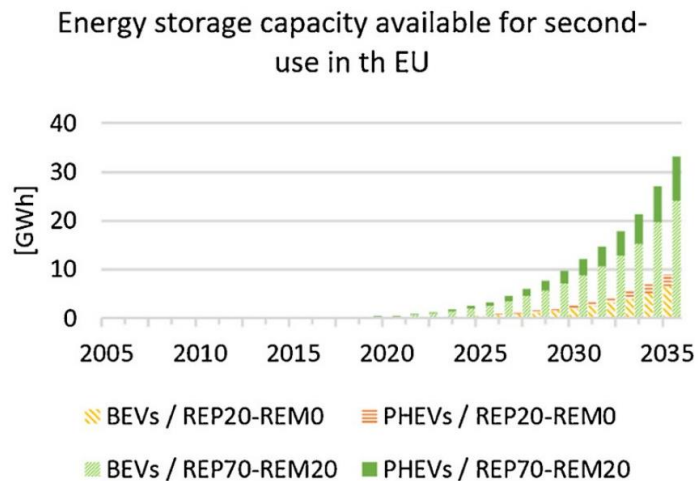


Figure 13 : Estimation du gisement annuel de batteries pour la seconde vie en Europe [6]

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

REP-20/REM0 : scénario de développement progressif de la seconde vie pour atteindre 20% en 2030, pas de réutilisation en VE (remanufacturing)

REP70/REM20 : scénario de développement rapide de la seconde vie, 70% des batteries sont réutilisées en seconde vie en 2030, et 20% sont réutilisées dans un autre VE

Source	Date	Estimation 2030	Échelle
Lux Research	2016	10 à 60 GWh 20 GWh scénario probable	Monde
Circular Energy Storage [9]	01/2020	175 GWh	Monde
Circular Energy Storage [9]	01/2020	30 GWh	Europe
Bobba <i>et al.</i> [6]	06/2019	10 GWh	Europe
CSF [4]	02/2020	< 25GWh, VL seuls	Europe

Tableau 2 : Estimations du gisement annuel de batteries pour la seconde vie, suivant différentes sources

2. OPPORTUNITES OFFERTES PAR LES BATTERIES DE SECONDE VIE DANS LE STOCKAGE STATIONNAIRE

2.1 Applications du stockage stationnaire

Pour qu'une batterie disponible pour une seconde vie soit réutilisée en stockage stationnaire, ses caractéristiques doivent être en adéquation avec les besoins de ce marché.

Au niveau chimie, les technologies actuellement utilisées dans les VE sont principalement NMC et NCA, comme on l'a vu plus haut. Dans les systèmes stationnaires, on trouve beaucoup de LFP, qui présente de meilleures caractéristiques de sécurité et une meilleure durée de vie, et dont la moins bonne densité d'énergie n'est pas forcément problématique. Le NMC reste intéressant pour des systèmes un peu contraints en encombrement², et devient envisageable car la gestion des aspects sécurité a bien progressé, que ce soit au niveau du design interne des cellules ou de la conception des packs batterie. La durée de vie résiduelle est suffisante, car les batteries de VE cyclent assez peu : il est très rare d'avoir plus de 5 cycles par semaine, et on estime généralement que ces batteries passent 90% de leur temps au repos³. Toutefois, au fur et à mesure que les batteries de VE sont de plus en plus optimisées par leurs fabricants pour leur coût et leur autonomie, il se peut que cela diminue leur durée de vie en cyclage, ce qui irait à l'encontre des besoins de certains usages stationnaires.

Au-delà des systèmes off-grid dans lesquels le stockage est habituellement indispensable, le développement du stockage stationnaire est directement lié à l'évolution actuelle de l'écosystème électrique, initialement conçu avec un flux descendant et qui doit maintenant permettre l'intégration de productions décentralisées à différents niveaux. Dans le même temps, il reste nécessaire de satisfaire un équilibre offre-demande à tout instant et de maintenir une bonne qualité de fourniture. Le stockage électrique est une des solutions pour apporter la flexibilité requise et adapter le système à cette évolution. Le terme de stockage stationnaire recouvre donc en réalité des applications très

² A titre d'exemple, un conteneur 45 pied peut contenir 5.2MWh de batterie et son électronique de puissance. L'empreinte au sol de ce conteneur est de 33,4m². Avec l'hypothèse de 4 fois 33,4m² pour prendre en compte l'espace entre les conteneurs, l'empreinte au sol typique d'une batterie est de l'ordre de 26m²/MWh.

³ A titre d'exemple, un véhicule électrique doté d'une batterie de 50 kWh parcourant 40 000 km par an (6800 kWh/an) fait 136 cycles équivalents par an, et les batteries stationnaires font plutôt entre 180 et 300 cycles équivalents par an. Avec 2040 cycles équivalents sur 15 ans, la dégradation du stockage maximal peut être estimée à 11,2% liée au cyclage (avec un facteur de 0,055%/cycle équivalent) et 7,5% de vieillissement calendaire pour 15ans (avec le facteur de 0,5%/an), soit un stockage maximal diminué de 18,7% au moment du passage en seconde vie.



Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

variées par leur localisation et leur dimensionnement, comme l'illustre la Figure 14 ci-dessous.

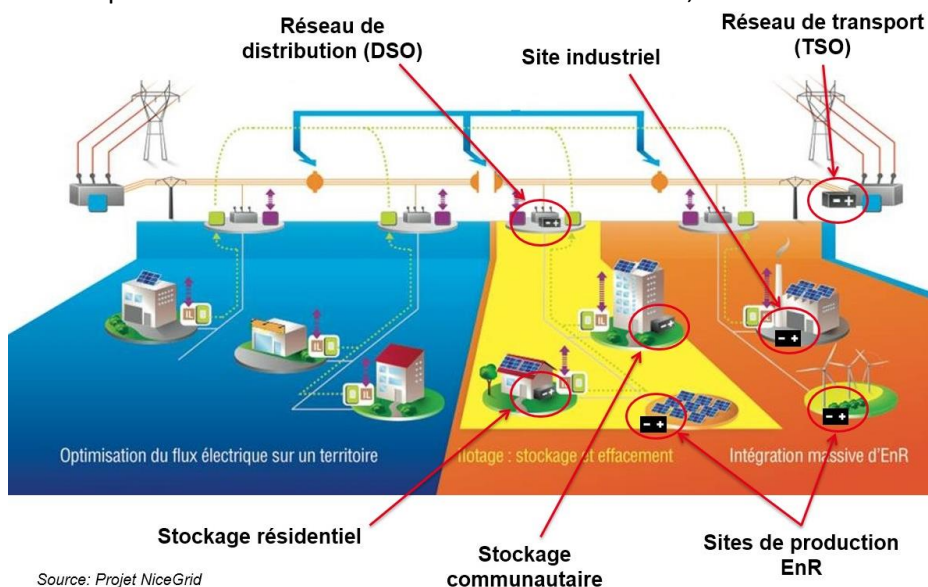


Figure 14 : Principales localisations des systèmes de stockage stationnaires

Les travaux de catégorisation des applications potentielles du stockage sont très nombreux, et utilisent des critères de classification et de regroupement qui peuvent être très différents. On rencontre globalement deux types d'approches :

- ✓ Point de vue du système électrique : catégorisation par bénéficiaire (opérateur de réseau, producteur, utilisateur) et par type de service (lissage, maintien de tension, etc.),
- ✓ Point de vue du stockage : classement en fonction des caractéristiques de la sollicitation électrique du stockage.

Cette deuxième approche est apparue plus adaptée dans le cas présent, car elle permet d'identifier plus facilement les applications adaptées à un type de stockage donné, ici les batteries Li-ion issues de VE et destinées à une seconde vie. Les principaux critères techniques pour caractériser les besoins d'une application sont la puissance à fournir ou à absorber, le temps de réponse acceptable et le profil-type de sollicitation (en particulier les régimes de charge et de décharge du stockage). En particulier, une représentation visuelle des applications en fonction du régime de décharge moyen permet de les regrouper en différentes catégories. Ainsi, le projet européen DERri définit trois catégories pour des durées de décharge allant de la seconde jusqu'à la dizaine d'heures (Figure 15). Le Tableau 3 donne plus de précisions sur les caractéristiques de ces trois familles d'applications, auxquelles on ajoute ici le stockage de plus longue durée, pour les alimentations de secours et le stockage saisonnier.

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

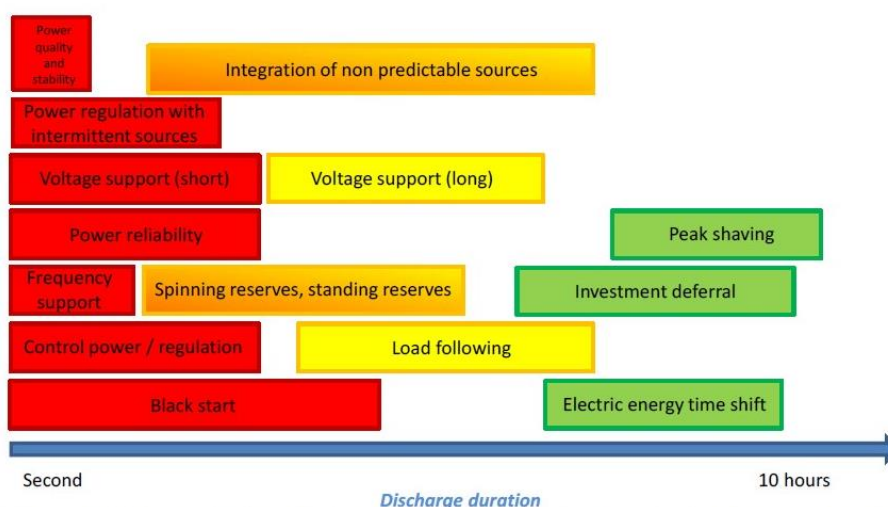


Figure 15 : Catégorisation des usages réalisée dans le projet européen DERri [14]

Application	Puissance unitaire typique	Temps de réponse	Durée	Remarques
Services réseaux (qualité de puissance, régulation de tension et de fréquence)	1 à 100 MW	millisecondes	millisecondes à secondes - minutes	cycles fréquents de démarrage - arrêt, nombreuses variations de puissance
Suivi de production et de consommation	100 kW à 100 MW	secondes	secondes - minutes, quelquefois heures	généralement couplage EnR
Gestion optimale de l'énergie, écrêtage, décalage temporel	1 à 100 MW	minutes	heures - jours	décalage énergétique d'une période de la journée à une autre, réduction de puissance max
Stockage saisonnier	30 à 500 MW	minutes – heures	semaines – mois	Li-ion non pertinent
Alimentation de secours (UPS), redémarrage du réseau (black start)	jusqu'à 5 MW	< seconde	10min à 2h	

Tableau 3 : Résumé des besoins techniques pour les principales applications du stockage connecté au réseau

Ces besoins en flexibilité du système électrique ont été évalués dans de nombreux travaux, et en particulier au niveau français dans l'étude PEPS4 de 2018 pour 2035 et dans l'étude RTE « Futurs énergétiques 2050 » de février 2022 [15]. À l'horizon 2035, PEPS4 estimait un besoin en flexibilité du système électrique allant jusqu'à 25 GW suivant les scénarios, dont 6 GW adaptés aux batteries (durée de stockage 2h). À l'horizon 2050, RTE propose jusqu'à 26 GW de batteries (durée de stockage 4h) suivant le mix. L'étude du CSF [4], mentionne enfin pour l'ensemble du système électrique européen, à une valeur de 10 – 15 GW, soit 30 – 50 GWh. Bien entendu, l'intégration de ce potentiel de stockage dans le système électrique s'échelonne sur plusieurs années.

2.2 Applications pertinentes pour les batteries de seconde vie

La plupart des applications listées ci-dessus demandent un système de stockage d'une taille conséquente, par exemple parce que le besoin local en énergie est important, ou bien parce qu'il faut une puissance minimale pour pouvoir être candidat aux services systèmes. Cela va bien au-delà de la capacité typique d'une batterie de VE qui est plutôt de l'ordre de quelques dizaines de kWh (55kWh pour la Renault Zoé par exemple). Cela signifie que pour répondre aux besoins de ces applications, on ne pourra pas simplement réutiliser une batterie de VE entière, mais il faudra prévoir une étape de conception et/ou de reconditionnement pour associer plusieurs batteries ou modules issus de ces batteries. Les difficultés techniques associées sont discutées dans la section 3. Par contre, cet inventaire ne tient pas compte des applications résidentielles ou commerciales (Figure 16) où les batteries sont installées « behind the meter », c'est-à-dire que l'énergie peut être stockée et déstockée localement sans passer nécessairement par le réseau. Ici, la taille du système de stockage est du même ordre de grandeur que celle d'une batterie de VE, ce qui va simplifier la mise en œuvre technique. Il est aussi envisageable techniquement d'agréger plusieurs de ces systèmes de stockage diffus, résidentiels et commerciaux, pour pouvoir répondre à des applications comme les services systèmes en plus de leur application locale. Cela permet de mutualiser les systèmes de stockage installés mais cela nécessite en contrepartie la mise en place d'intermédiaires pour valoriser et mettre en œuvre cette agrégation, qui pourrait se baser sur des technologies proches de celles utilisées pour les applications vehicle-to-grid (V2G) ou Smart Charging.

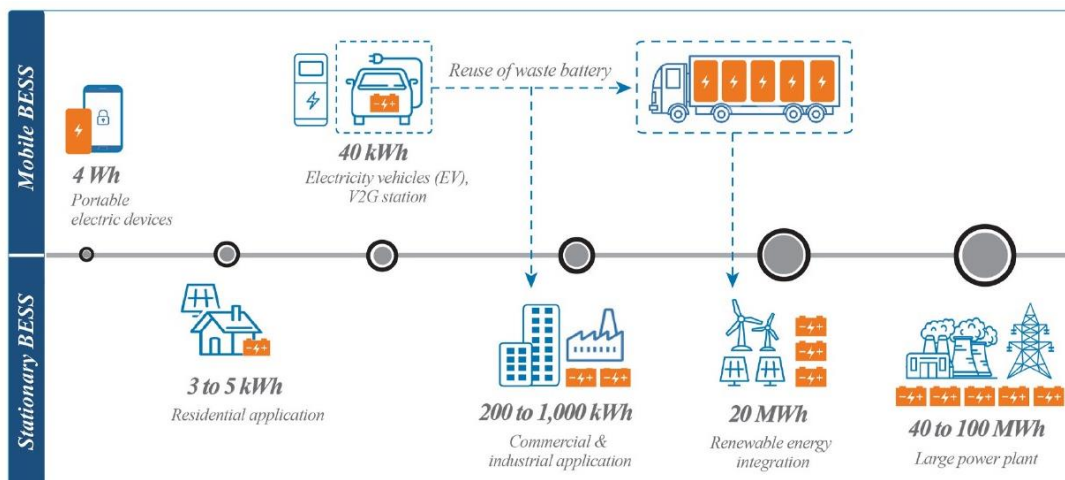


Figure 16 : Modes d'installation et principales applications des BESS [16]

Une analyse des démonstrateurs utilisant des batteries de seconde vie a été réalisée dans PEPS4 en 2018 [3]. On retrouve effectivement beaucoup de systèmes de petite ou moyenne taille, de quelques dizaines à quelques centaines de kW et kWh :

- ✓ Systèmes domestiques pour l'autoconsommation à l'échelle d'une maison ou d'un immeuble,
- ✓ Systèmes de stockage associés à une production d'énergie renouvelable (souvent le PV) pour le lissage ou l'écrêtage de la production EnR, la fourniture en soirée (energy time-shift),
- ✓ Systèmes d'alimentation de secours (UPS),

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

- ✓ Stations de recharge de VE, pour augmenter l'autoconsommation d'énergie renouvelable et ainsi limiter l'impact sur le réseau, ou encore pour augmenter la puissance instantanée disponible et permettre la charge rapide des VE.

Quelques démonstrateurs de plus grande taille ont aussi été réalisés dans des conteneurs à l'échelle de la dizaine de MW, pour du soutien au réseau, souvent du réglage de fréquence primaire. Depuis, la situation a assez peu évolué au niveau des applications visées. On peut aussi souligner la mise en service de grands entrepôts de stockage de pack VE connectés électriquement en début de vie ou en fin de vie afin de fournir des service système comme de la régulation de fréquence. Ces entrepôts sont opérés avec le soutien d'un constructeur automobile, notamment Audi ou Mercedes. Deux avantages ressortent de cette configuration : la flexibilité pour l'intégration de nouveaux packs, et la granularité élevée qui n'engendre que peu de conséquence en cas de défaut (par exemple une mort subite, voir partie 3.3) sur un pack.

Étant donné la faible maturité du marché de la seconde vie pour stockage stationnaire (les applications envisagées étant toujours au stade du démonstrateur), il n'est pas possible de conclure sur une taille optimale de stockage centralisé utilisant des batteries de seconde vie.



3. LIMITATIONS ET CHALLENGES TECHNIQUES POUR L'UTILISATION EN SECONDE VIE

Dans son chapitre sur les batteries de seconde vie, la roadmap « Stationary applications for batteries » publiée en novembre 2021 par la plateforme technologique « Batteries Europe » [17] liste les principaux défis rencontrés pour l'utilisation des batteries en seconde vie. Les challenges techniques (1 à 4) sont discutés dans cette partie, ainsi que l'aspect sécurité qui est implicite dans cette roadmap. Les aspects réglementaires et économiques, plus transverses, font l'objet des deux parties suivantes.

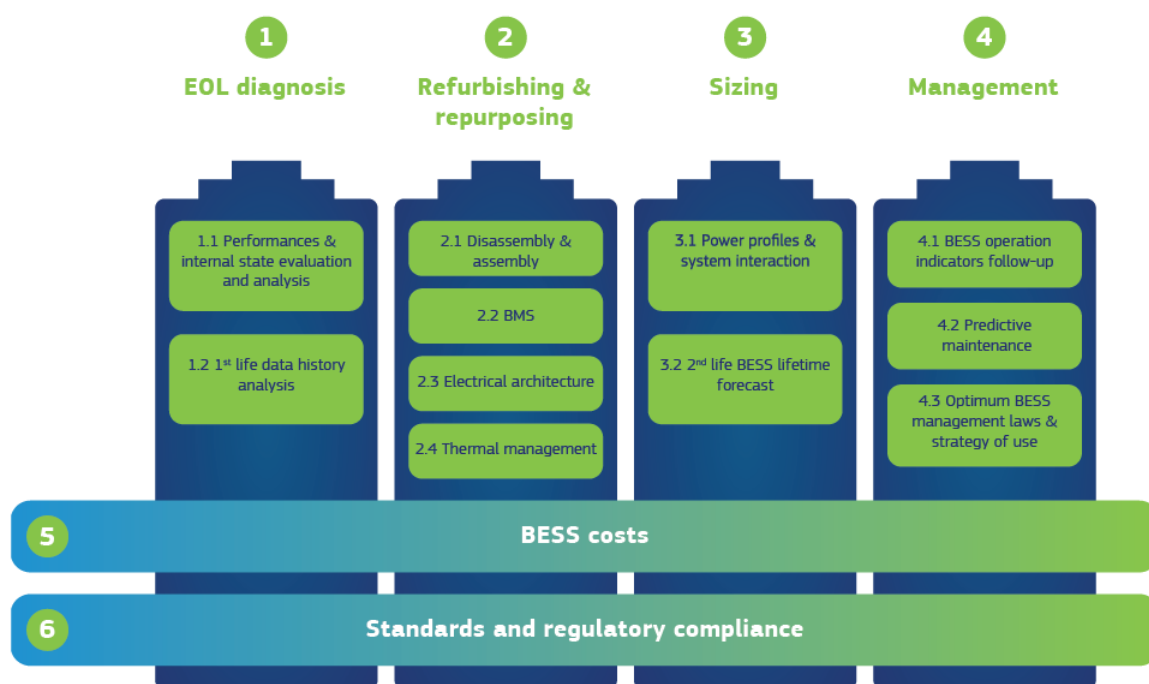


Figure 17 : Principaux défis pour l'utilisation de batteries de seconde vie dans les applications stationnaires [17]

3.1 Diagnostic en fin de première vie

Le premier challenge auquel est confronté un opérateur face à une batterie en fin de première vie, est de déterminer son état de santé afin de déterminer si elle est réutilisable pour une seconde vie. Ce diagnostic recouvre en réalité plusieurs aspects très différents.

Il faut tout d'abord vérifier l'intégrité de la batterie au niveau physique, ainsi que l'absence d'évènement rédhibitoire dans son historique. Par exemple, une batterie issue d'un véhicule accidenté pourra avoir sa structure interne fragilisée et risquera un emballement thermique par la suite.

Il faut ensuite être capable de mesurer de manière fiable et rapide les performances de la batterie : capacité ou énergie restante, résistance interne, dispersion entre cellules ou modules et également la température lors de ces diagnostics. Ces mesures peuvent être réalisées sur la batterie complète ou sur des sous-parties (en particulier les modules). La principale difficulté lors de cette étape est que les

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

packs batterie de VE ne sont pas standardisés au niveau de leur protocole de communication : il sera donc difficile à un opérateur qui ne travaillerait pas en partenariat avec le fabricant du pack ou du VE de réaliser ces mesures. C'est la raison pour laquelle beaucoup de démonstrateurs ont été réalisés jusqu'ici par des constructeurs automobiles ou leurs filiales.

Ces informations ne sont cependant pas suffisantes pour prédire le comportement de la batterie dans une seconde vie : les conditions d'utilisation en première vie ont aussi un impact, et peuvent influencer nettement sur le vieillissement futur de la batterie [18]. Les indicateurs basés sur les mesures électriques instantanées sont trop limités, et ne permettent pas de prédire de manière fiable la performance en seconde vie, et encore plus dans la durée. Le « passeport batterie » en cours de mise en place au niveau européen, décrit dans la section 4.1, devrait améliorer la situation en garantissant la disponibilité des informations de première vie nécessaires.

3.2 Reconditionnement

Une fois le diagnostic effectué, les batteries ou modules validés doivent être mis en configuration pour un usage en seconde vie. Comme l'a montré l'étude d'écodesign financée par la Commission Européenne en 2018-2019 [19], les packs VE actuels ne sont pas conçus pour cela : ils sont optimisés pour l'usage dans le véhicule, mais ne sont pas du tout prévus pour être réutilisés par la suite dans une autre configuration. La tendance irait plutôt vers des packs de plus en plus denses, avec des composants collés ou soudés, donc non démontables. En outre, même si un démontage est mécaniquement possible, il n'est pas toujours souhaitable : ainsi, dans le cas de cellules prismatiques, leur assemblage en module s'accompagne souvent d'un certain niveau de compression, qu'il faut éviter de défaire sous peine de voir les cellules gonfler de manière irréversible. Il existe donc de nombreux freins actuellement à un reconditionnement à l'échelle de la cellule.

Suivant le design du pack VE, une partie du système de contrôle-commande et de monitoring peut aussi être intégré au véhicule plutôt qu'au pack batterie lui-même. Les éléments tels que le câblage électrique, le BMS, les contacteurs et fusibles, le système de refroidissement etc. pourront donc être partie intégrante du pack ou non, et il sera intéressant ou non de les conserver, car ces éléments seront plus ou moins bien adaptés à un usage dans une application stationnaire. Les difficultés rencontrées dans l'étape de reconditionnement seront donc clairement liées aux choix de design du pack en première vie. L'interfaçage de la batterie avec le reste du système peut aussi être plus ou moins complexe, en fonction des informations disponibles (fournies ou non par le fabricant du pack VE).

Les aspects de coût et de sécurité sont bien entendu à prendre en compte également dans cette étape de reconditionnement, ainsi que l'aspect environnemental : la limitation de l'impact environnemental étant une des motivations de l'usage seconde vie pour augmenter la durée d'utilisation avant la mise en recyclage, un reconditionnement trop complexe n'est pas souhaitable, ou en tout cas à considérer avec prudence, car il réduit les bénéfices environnementaux. L'idéal serait de développer des systèmes de gestion suffisamment flexibles pour s'adapter aux différentes chimies et typologies de packs VE, mais cela nécessitera d'importants efforts de R&D.



3.3 Dimensionnement et gestion du nouveau système de stockage

Un troisième challenge porte sur le dimensionnement et la gestion du système batterie seconde vie. Comme pour toute batterie, il faut concevoir le système (architecture électrique, contrôle-commande, système de refroidissement) pour pouvoir garantir des performances suffisantes dans la durée. La difficulté est alors d'estimer comment la batterie va vieillir dans sa nouvelle utilisation. On peut partir des résultats du diagnostic en fin de première vie, mais ensuite le vieillissement est très difficile à prévoir. D'importants travaux de compréhension et de modélisation du vieillissement en seconde vie (aussi appelé sur-vieillessement) sont en cours, mais les résultats disponibles aujourd'hui sont très hétérogènes. Les facteurs influençant le vieillissement en seconde vie sont nombreux :

- ✓ La chimie et le design des cellules, mais aussi celui des modules et packs,
- ✓ Les conditions de vieillissement en première vie,
- ✓ L'état de la batterie en fin de première vie,
- ✓ Les applications visées en seconde vie.

Pour estimer la durée de vie restante, une difficulté particulière consiste à anticiper les phénomènes dits de « mort subite » ou encore « ageing knee », qui consistent en une rupture de pente importante dans l'évolution du SOH (capacité restante par rapport à la capacité initiale en %), et qui peuvent conduire à une très forte accélération du vieillissement de la batterie ou de certaines cellules uniquement. Ce type de phénomène se produit de manière un peu aléatoire et souvent pour des SOH déjà assez faibles (de l'ordre de 60% à titre indicatif), en tout cas inférieurs à la limite usuelle de 80% utilisée pour la fin de première vie (70% dans certains cas).

3.4 Aspects sécurité

La question de la sécurité pour les batteries de seconde vie est plus complexe que pour des batteries neuves, et les questions suivantes se posent :

- ✓ Comment déterminer le niveau de sécurité en fin de première vie ?
- ✓ Quelle est l'influence des conditions de fonctionnement en première vie (température, courants) ?
- ✓ Quelle est l'influence des événements anormaux déjà subis (surchage notamment) ?
- ✓ Quelles sont les différences suivant le format des cellules ?
- ✓ Comment gérer la sécurité lors des phases de stockage, transport, démantèlement ?
- ✓ Comment traiter les disparités inter-cellules dans des modules qui se créent lors du vieillissement (impact fort sur performance et sécurité, mais coût trop important si on devait démonter les packs pour réassembler des cellules par batch de qualité) ?

La Figure 18, tirée d'une étude récente du JRC [20], donne une vue d'ensemble des différentes situations (en abscisse) dans lesquelles des questions de sécurité peuvent se poser, et cela lors des différentes étapes de la vie d'une batterie Li-ion (en ordonnée) : première vie, seconde vie et recyclage. L'étude distingue l'usage normal et les situations anormales, le transport, le stockage et la manutention des batteries. Ces deux dernières étapes ne sont considérées à risque que si les batteries ne sont pas neuves, ce qui pourrait être discuté, le risque étant déjà présent sur les batteries neuves, mais plus facile à gérer car mieux connu.



Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

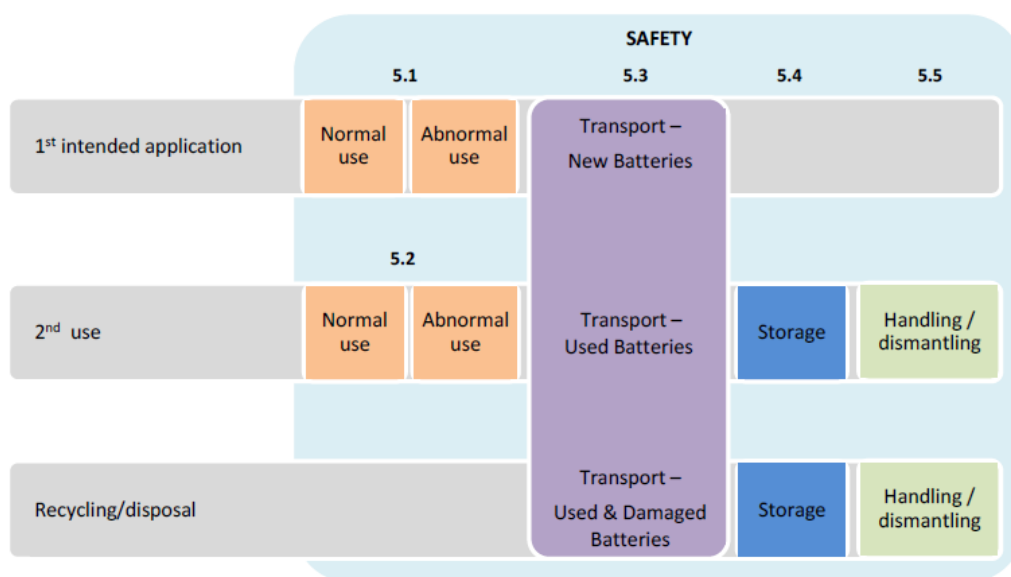


Figure 18 : Représentation schématique des situations dans lesquelles la sécurité est à assurer, lors des différentes étapes de la vie des batteries Li-ion [20]
(les numéros font références aux chapitres du rapport cité)

Les batteries Li-ion sont conçues pour travailler dans une fenêtre de fonctionnement donnée, c'est-à-dire dans une gamme limitée de tension, courant et température. Quand une valeur limite est dépassée, la sécurité de fonctionnement n'est plus garantie, c'est pourquoi l'ajout d'un BMS est systématique pour surveiller et limiter ces paramètres à des valeurs acceptables. Cependant, malgré un design et des contrôles qualité soignés, des défaillances sont quasi inévitables étant donné les densités d'énergie mises en jeu, et il suffit d'un défaut mineur au départ pour provoquer une situation dangereuse. De plus, les batteries peuvent subir des événements externes (incendie, accident) qui peuvent conduire aussi à un emballement thermique. C'est pourquoi les exigences de sécurité et les tests associés tiennent compte non seulement des conditions de fonctionnement normales, mais aussi des événements anormaux « raisonnablement prévisibles ».

Dans le cas particulier de la seconde vie, il faut aussi être capable de déterminer quel est le niveau de sécurité des batteries à la fin de leur première vie. C'est une question particulièrement délicate dans la mesure où l'historique de la batterie n'est pas toujours accessible. Comme mentionné plus haut, les batteries ayant déjà subi des conditions anormales (surcharge, température excessive...) doivent être systématiquement écartées car elles peuvent avoir été fragilisées. D'autre part, les tests de sécurité normés ont été prévus pour des batteries neuves, et demandent de sacrifier quelques batteries d'un lot homogène, ce qui n'est pas forcément possible car chaque batterie destinée à la seconde vie est potentiellement unique, en tout cas en termes d'historique de fonctionnement. La seule possibilité reste donc de s'appuyer sur le design sécurité du système batterie, c'est-à-dire sur la prise en compte des aspects sécurité lors de la conception du système initial, et sur les travaux de recherche concernant la sécurité des batteries non neuves.

Le niveau de sécurité d'une batterie vieillie est généralement modifié, mais peut évoluer vers une moindre réactivité ou au contraire une plus forte sensibilité, suivant le type de vieillissement subi. En effet, pour un même niveau de vieillissement (perte de capacité), les dégradations internes sont

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

différentes suivant les conditions de fonctionnement de la batterie [21]. La simple connaissance du SOH ne permet donc pas de conclure sur le niveau de sécurité, amélioré ou dégradé, d'une batterie vieillie. La plupart des études de sécurité sur les batteries sont basées sur des essais d'emballement thermique provoqué par l'exposition à une température élevée, réalisés dans un calorimètre adiabatique (ARC ⁴) : cela permet d'évaluer notamment le comportement de la batterie en cas d'incendie. On trouve aussi des essais de type « test au clou » [22] qui simulent un endommagement mécanique des cellules lors d'un accident, par exemple.

Le vieillissement en cyclage à température élevée augmente souvent la température de démarrage de l'emballement thermique et diminue sa vitesse : la stabilité thermique de la cellule peut donc être améliorée selon les différents paramètres de vieillissement [23, cellules NCA au format 18650]. Cela s'explique par le développement sur l'électrode négative d'une couche de passivation (SEI) plus épaisse, qui joue un rôle protecteur (mais augmente la résistance interne). À température ambiante, nous avons observé sur des cellules NMC prismatiques que la température d'emballement thermique ne changeait pas après vieillissement, mais la réaction reste plus lente. Cette augmentation de la température d'emballement thermique est aussi observée lorsque la batterie ne cycle pas (conditions du vieillissement calendaire) [24, 25, 26], mais dans une moindre mesure.

Par contre, si la batterie a fonctionné à basse température, le mécanisme de dégradation principal est le dépôt de lithium métallique à la surface de l'électrode négative [23]. La stabilité thermique de la cellule est dégradée, car le lithium métallique est très réactif [27, 28].

Une surcharge limitée n'a que peu d'impact sur la perte de capacité de la batterie, mais détériore fortement sa stabilité thermique [29]. La situation s'aggrave avec l'augmentation de la tension de surcharge, et cette fois, le phénomène en cause est un endommagement de la structure de l'électrode positive et la décomposition de l'électrolyte.

Pour tous les autres mécanismes de dégradation, le matériau d'électrode positive (NMC, LFP, NCA etc) n'a que peu d'impact car ces mécanismes concernent l'électrode négative qui est dans tous les cas à base de graphite. Seules les batteries de type LTO ont un autre type de matériau d'électrode négative, mais elles ne sont pas utilisées dans les applications VE car leur densité d'énergie est bien plus faible.

Toutes les études citées plus haut portent sur des cellules cylindriques 18650, qui est de loin le format le plus répandu, mais relativement peu utilisé en VE. Une étude sur des cellules de 20Ah en sachet souple [21] a cependant donné des résultats similaires. D'autre part, la référence [23] a comparé le comportement de trois références de cellules du même fabricant, de même format 18650 mais de courant maximum différent. Il apparaît que le design interne des cellules joue également un rôle au niveau sécurité. Les cellules de type énergie (faible courant autorisé mais capacité plus élevée) sont plus stables thermiquement à l'état neuf, mais vieillissent plus mal à basse température que les cellules de type puissance. Elles sont plus exposées au dépôt de lithium métallique, leur stabilité thermique se dégrade donc plus rapidement lorsque la température de cyclage diminue. Les cellules de puissance sont, quant à elles, moins stables à l'état neuf, mais leurs meilleures performances en cyclage à basse température les rendent légèrement moins exposées à l'emballement thermique après vieillissement.

⁴ ARC : Accelerated Rate Calorimeter



Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

Enfin, les cellules de type énergie ont une résistance interne plus importante et donc un échauffement plus important qu'une cellule de puissance. Il faut y ajouter une densité d'énergie (quantité de matériau actif combustible) plus importante, ce qui représente donc potentiellement un plus gros risque en cas d'accident.

L'impact du vieillissement sur la sécurité dépend donc de nombreux facteurs potentiellement contradictoires et n'est pas encore suffisamment explicité par la littérature. De plus amples études de R&D sur le lien entre le vieillissement des batteries Li-Ion et leur sécurité sont donc nécessaires.

Pour les phases de transport et de stockage, les batteries non neuves doivent faire l'objet d'une plus grande attention, surtout en l'attente du diagnostic de fin de vie. Le suivi et si possible le contrôle de la température serait une bonne solution pour détecter au plus tôt un problème sur une des batteries.

La sécurité lors de l'étape de démantèlement en vue du reconditionnement (ou du recyclage) est également à considérer, et une partie des opérations reste manuelle, même si l'augmentation des volumes de batteries à traiter s'accompagnera d'une plus grande automatisation des procédés. L'examen visuel est une étape cruciale, qui permettra de repérer des signes de dégradation tels que des cellules gonflées, des fuites d'électrolyte, un endommagement mécanique etc. Ce type d'observations doit conduire au rejet de la batterie qui ne doit pas être utilisée en seconde vie dans ce cas.



4. ASPECTS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS

Comme on l'a vu plus haut, les freins à l'utilisation de batteries de seconde vie sont non seulement techniques mais aussi réglementaires. Des évolutions importantes sont en cours dans ce domaine, à la fois au niveau de la réglementation européenne et des normes internationales.

4.1 *Réglementation concernant la seconde vie des batteries*

4.1.1 *Réglementation actuelle*

En France, la réglementation actuelle est basée sur la directive européenne 2006/66/CE relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs. Les dispositions de cette directive ont fait l'objet d'une transposition en droit français par l'intermédiaire des articles R. 543-124 à 134 du code de l'environnement.

Cette directive définit trois types de piles et accumulateurs : portable, automobile et industriel. Le type « automobile » correspond uniquement aux batteries de démarrage (application SLI pour Starting, Lighting and Ignition), mais ne concerne pas les batteries pour VE, qui sont donc regroupées dans la catégorie « industrielle » avec les batteries stationnaires notamment.

Le texte couvre la totalité du cycle de vie des batteries, depuis le design et la mise sur le marché jusqu'à leur fin de vie, la collecte et le recyclage des batteries usagées. La notion de seconde vie des batteries n'y est pas envisagée, probablement car ce type de développement n'était pas encore considéré comme pertinent à l'époque. De ce fait, le statut des batteries destinées à une seconde vie n'est pas clair, en particulier sur les questions de responsabilité de la (re-)mise sur le marché après des transformations plus ou moins importantes. Cette question de responsabilité étendue (Extended Producer Responsibility, EPR) est clairement un point bloquant actuellement, et on peut potentiellement se retrouver dans des situations où le fabricant initial de la batterie resterait responsable de son utilisation en seconde vie, jusqu'à son recyclage final.

Dans la réglementation en vigueur, le sujet des batteries de seconde vie n'est donc pas directement traité. Le marché se développant déjà, il devient important de mieux définir le cadre réglementaire pour permettre à la filière de se développer et éviter les réutilisations « artisanales » de batteries dont les risques ne sont pas négligeables, comme on l'a vu plus haut (partie 3.4).

4.1.2 *Évolutions réglementaires en cours*

Suite à différentes analyses et consultations en 2019 et 2020 concernant l'implémentation de cette directive et son impact sur l'environnement et sur le marché européen, la Commission européenne a émis en décembre 2020 un projet de règlement européen [30] qui viendra remplacer la directive, afin de moderniser la législation sur les batteries comme annoncé dans le « Circular Economy Action Plan ». Les négociations entre la Commission, le Conseil et le Parlement Européen sont en cours, et le calendrier prévisionnel prévoit une mise en application du règlement au 1^{er} juillet 2023. Il s'agit



Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

maintenant d'un règlement et non plus d'une directive, ce qui signifie que l'application sera automatique et non pas soumise à une transposition en droit national.

Dans ce projet, les batteries de VE sont considérées séparément des batteries industrielles, et constituent une quatrième catégorie à part entière. Comme précédemment, les batteries pour applications militaires et spatiales sont exclues.

La proposition est beaucoup plus large que la directive de 2006, et inclut des aspects importants qui permettront l'utilisation en seconde vie des batteries. Les figures 19 et 20 donnent une vue d'ensemble des étapes du cycle de vie et des articles correspondants du règlement.

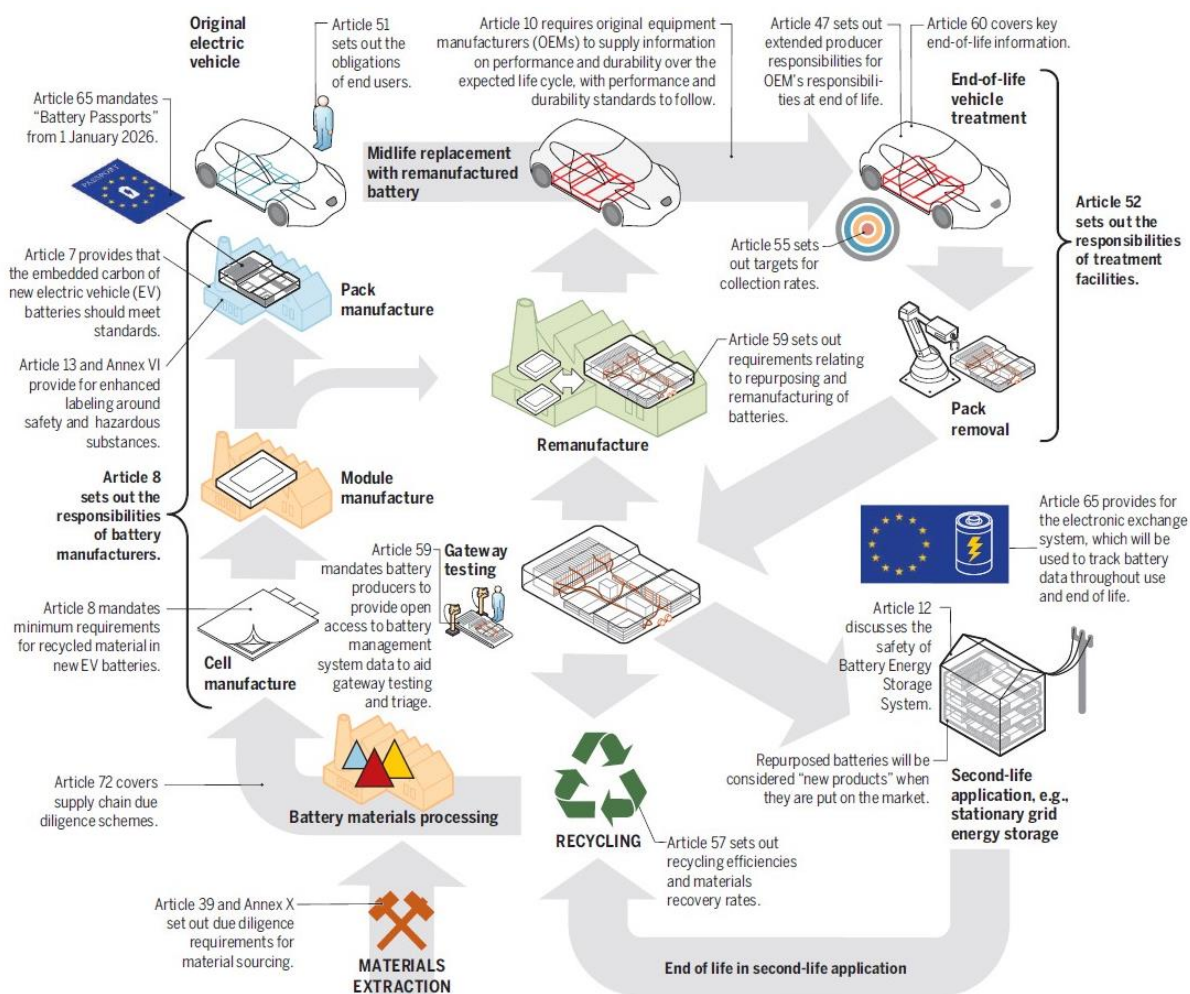


Figure 19 : Une économie circulaire pour les batteries de véhicules électriques : articles clés de la proposition de règlement européen sur les batteries [31]

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

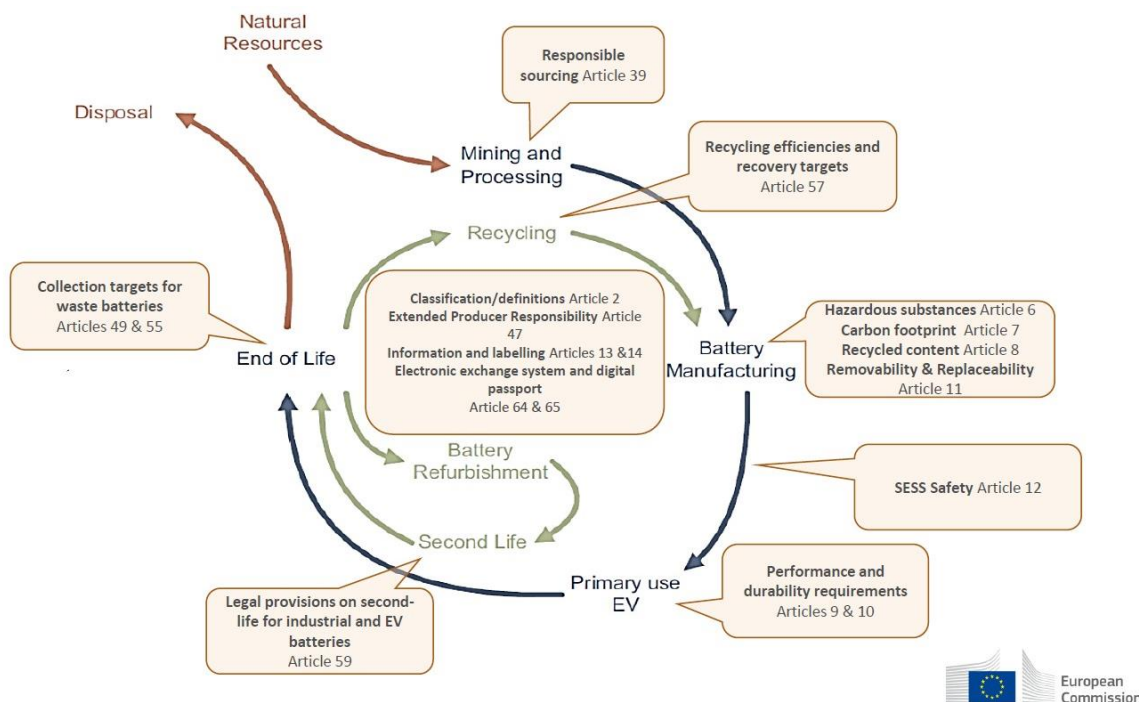


Figure 20 : Cycle de vie des batteries de VE et positionnement des articles du projet de réglementation européenne [32]

En particulier, l'article 59 sur la seconde vie cite explicitement la réutilisation des batteries industrielles et de VE comme « waste treatment method ». Pour pouvoir être réutilisées, les batteries devront subir un « state of health check » et satisfaire à un certain nombre de critères, l'objectif étant de favoriser cette réutilisation dans de bonnes conditions. Les batteries de seconde vie sont considérées comme des produits nouveaux et devront donc satisfaire aux exigences du marché auquel elles sont destinées. Le reconditionneur sera considéré comme le fabricant de la batterie de seconde vie et sera donc responsable de sa conformité pour une mise sur le marché. L'augmentation du risque qui en résulte pour le reconditionneur pourrait modifier le modèle d'affaire de la seconde vie, et en particulier les conditions financières de reprise en fin de première vie (comme discuté dans la partie 5.2).

Le projet de réglementation met l'accent sur la disponibilité d'informations pour chaque batterie unitaire (et non pas par type). Pour cela, chaque batterie (industrielle ou VE, de plus de 2kWh) doit stocker les informations dans un BMS et les rendre accessibles à des opérateurs indépendants. La documentation devra notamment fournir les informations relatives à l'état de santé ou les tests effectués. L'article 65 précise qu'à partir de 2026, ces informations de traçabilité seront regroupées dans un "passeport batterie" consultable en ligne pour rendre l'information la plus accessible possible. Les données d'historique de fonctionnement devront aussi être fournies, ainsi que les maintenances et réparations effectuées sur la batterie, ce qui est crucial pour l'évaluation sécurité : on a vu plus haut que pour un même niveau de vieillissement, les conditions de fonctionnement ayant mené à ce vieillissement ont beaucoup d'influence sur le comportement sécuritaire de la batterie.

Ce type de passeport est généralisé à tous les produits mis sur le marché dans l'article 8 du projet de réglementation Ecodesign paru en mars 2022 [33]. Ici encore, le "Digital Product Passport" fournira en

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

particulier des informations sur les aspects environnementaux des produits, et cette meilleure transparence permettra non seulement un choix plus informé, mais aussi facilitera les réparations et le recyclage.

Actuellement pour les batteries de VE, en l'absence de réglementation de ce type, chaque fabricant peut concevoir sa batterie différemment, et être le seul à pouvoir réaliser des diagnostics, à les réutiliser ou les reconditionner. Cela limite l'accès au marché d'autres opérateurs pour la maintenance, la seconde vie ou le recyclage, mais garantit aussi le sérieux des opérateurs impliqués. La disponibilité des informations devrait permettre également d'établir une garantie pour les batteries de seconde vie, ce qui favorisera clairement leur acceptation par le marché.

4.2 Normes pertinentes pour les batteries de seconde vie

4.2.1 Normes actuellement en vigueur

Dans leur grande majorité, les normes existantes ne font pas la distinction entre une batterie neuve ou de seconde vie. Que ce soit pour les performances ou la sécurité, les batteries doivent satisfaire aux mêmes règles qui sont celles de l'application visée.

En Europe, aucune norme ne concerne directement les batteries de seconde vie. Il existe cependant une norme américaine dédiée aux batteries de seconde vie : **ANSI/CAN/UL 1974 "Standard for evaluation for repurposing batteries"**, publiée en octobre 2018. Cette norme couvre les processus de tri et de classement des packs, modules et cellules batterie qui étaient configurés et utilisés à l'origine pour d'autres applications, comme la propulsion de véhicule électrique, et qui sont destinées à une application de seconde vie telle que le stockage stationnaire ou autre. Elle s'applique à toutes les chimies de batteries ainsi que les condensateurs électrochimiques. Cette norme propose une liste des consignes et exigences à destination d'un fabricant de batteries seconde vie, depuis la collecte des batteries en fin de première vie, jusqu'au produit reconditionné.

La première étape imposée au fabricant de batteries seconde vie est une collecte d'informations très exhaustive sur tous les éléments constituant le pack batterie ainsi que le BMS et les systèmes auxiliaires. Si les informations sur les cellules contenues dans le pack batterie sont insuffisantes, il faut même aller jusqu'à désassembler une cellule (déchargée) pour analyser sa construction interne. L'historique de la batterie est aussi un point important, et toute batterie ayant pu être exposée à des conditions nuisant à sa sécurité (accident, inondation, proximité d'un incendie...) sera automatiquement exclu du circuit de reconditionnement. La norme précise aussi que la batterie ne doit pas être utilisée au-delà de sa date d'expiration ('calendar expiration date'), qui doit être fournie par le fabricant. Actuellement cette date n'est jamais fournie pour des batteries de VE.

Ensuite, avant tout démontage, une inspection visuelle permet de détecter des défauts (fissures, gonflement, fuites, marques de brûlures...) qui conduiront éventuellement au rejet de la batterie. Les données du BMS sont analysées également, ainsi que les conditions dans lesquelles le pack a été stocké (qui doivent avoir été tracées). La norme fixe une liste de données minimales à fournir par le BMS (valeurs moyennes et extrêmes de tension, courant, température, durée totale de charge et de décharge, messages d'erreur, nombre d'activations des contacteurs...). Comme on l'a vu plus haut,

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

dans la situation actuelle, ces données ne sont généralement accessibles qu'au fabricant du pack ou du véhicule, mais le projet de réglementation européenne et notamment le « passeport batterie » devrait permettre d'ouvrir à de nouveaux opérateurs indépendants des fabricants, en Europe en tout cas.

Ensuite, il faut décharger le pack batterie pour limiter les risques électriques, ce qui est évidemment beaucoup plus simple à réaliser si le protocole de communication avec le BMS est connu. On peut ensuite procéder si besoin au désassemblage jusqu'à l'échelle des composants qui seront réutilisés ('smallest intended disassembled unit for repurposing'), puis à une nouvelle inspection visuelle.

La norme prescrit ensuite les essais suivants pour caractériser les performances de la batterie en vue d'une utilisation en seconde vie :

- ✓ Tension en circuit ouvert (OCV),
- ✓ Vérification de l'isolement haute tension,
- ✓ Mesure de capacité et énergie,
- ✓ Mesure de résistance interne,
- ✓ Cycle de charge-décharge avec mesures de courant / tension / température des cellules ou modules,
- ✓ Mesure d'auto-décharge.

En outre, si le BMS ou certaines des fonctions de protection sont amenés à être réutilisés, il faut vérifier leur bon fonctionnement. Les données collectées sur les cellules ou modules doivent aussi être analysées sur le long terme pour mieux caractériser les performances et la sécurité après vieillissement. Cette analyse doit permettre d'améliorer le process du reconditionneur. L'application de cette norme demande donc un effort très conséquent en termes de collecte d'informations, d'analyse de ces informations, et beaucoup d'essais et de mesures.

Le nouveau système de stockage obtenu après reconditionnement est considéré comme un nouveau produit, et doit donc se conformer aux normes applicables pour la nouvelle application. Les exigences pour l'emballage, le transport, les contrôles qualité, la sécurité des installations... sont les mêmes que pour une batterie neuve. Pour construire ce système de stockage, la norme n'autorise que des cellules ou modules identiques (même modèle du même fabricant). Cela pourrait être un point bloquant pour la seconde vie, et ne prend pas en compte le remplacement éventuel de modules dans un pack au cours de la première vie, qui n'ont donc pas forcément la même référence et en tout cas pas le même état de santé.

4.2.2 Normes en préparation

À la demande de la Commission Européenne, le CEN-CENELEC a établi en octobre 2021 un groupe de travail pour analyser le besoin de normalisation concernant les batteries : il s'agit d'identifier si tous les aspects de la réglementation en développement sont bien couverts, pour ensuite mettre en place les normes manquantes.

Au niveau international, les travaux de la CEI sont plus avancés et deux normes sont en préparation par le comité TC21 (Secondary cells and batteries) :

- ✓ IEC 63330: Requirements for repurposing of secondary batteries,



Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

- ✓ IEC 63338: General guidance for reuse of secondary cells and batteries.

La publication de ces deux normes est prévue fin 2023. Les deux projets sont complémentaires et développés en parallèle [34]. De premiers éléments peuvent être donnés ici, mais les versions draft actuelles sont encore modifiables et pourraient être remaniées de manière non négligeable pour arriver à un consensus international.

Le premier projet de norme (**IEC 63330 "Requirements for repurposing of secondary batteries"**) se focalise principalement sur les batteries lithium, mais s'applique aussi aux autres types de batteries, seules les redox-flow sont exclues. Son objectif est de fournir les exigences de base et les procédures associées pour évaluer les performances et la sécurité des batteries en fin de première vie, ainsi que les exigences générales pour l'utilisation de batteries de seconde vie. Comme pour la norme UL 1974, des données sur la première vie sont requises : informations exhaustives sur la conception de la batterie, historique de défaillances, conditions de stockage, capacité résiduelle... La notion de durée de vie restante est introduite, basée sur la différence entre la durée d'utilisation possible estimée par le fabricant, et l'âge de la batterie. Dans certaines conditions, l'analyse de sécurité de première vie peut rester valide, si les modifications de design et de conditions de fonctionnement sont suffisamment faibles.

L'autre projet (**IEC 63338 "General guidance for reuse of secondary cells and batteries"**) est porté par le sous-comité SC21A (batteries à électrolyte alcalin), il ne concerne donc que les batteries Li-ion et NiMH. Il fournit des recommandations pour gérer les aspects environnementaux et la sécurité, ainsi que la coordination entre le fabricant initial et le reconditionneur de la batterie. Deux cas de figure sont traités : la réutilisation (reuse, refurbishing) dans une application similaire, et la seconde vie (repurposing : réutilisation dans une autre application). En particulier, il est demandé (dans la version actuelle du projet) un accord écrit entre le fabricant et le reconditionneur, notamment pour des raisons de sécurité. Il faut également, pour qu'une seconde vie soit possible, que des données de traçabilité et d'historique soient disponibles, par exemple enregistrées dans le BMS. Il s'agit en particulier de l'historique de conditions anormales : surcharge, sur-décharge, température ou courant limite dépassés, court-circuit externe, défaut d'isolement, choc ou vibrations excessives... La réutilisation à l'échelle cellule n'est pas recommandée.



5. ASPECT ECONOMIQUE

Le développement du secteur d'activité de la seconde vie va créer une nouvelle étape dans la chaîne de la valeur des batteries, juste avant le recyclage qui s'en trouve repoussé de plusieurs années. Dans ce cas, c'est la capacité restante dans la batterie qui est valorisée, tandis que le recyclage permet de valoriser les matériaux qu'elle contient, notamment les métaux. Nous ne traiterons donc pas ici de l'aspect économique du recyclage, qui devra être effectué quelle que soit la solution retenue (seconde vie ou non).

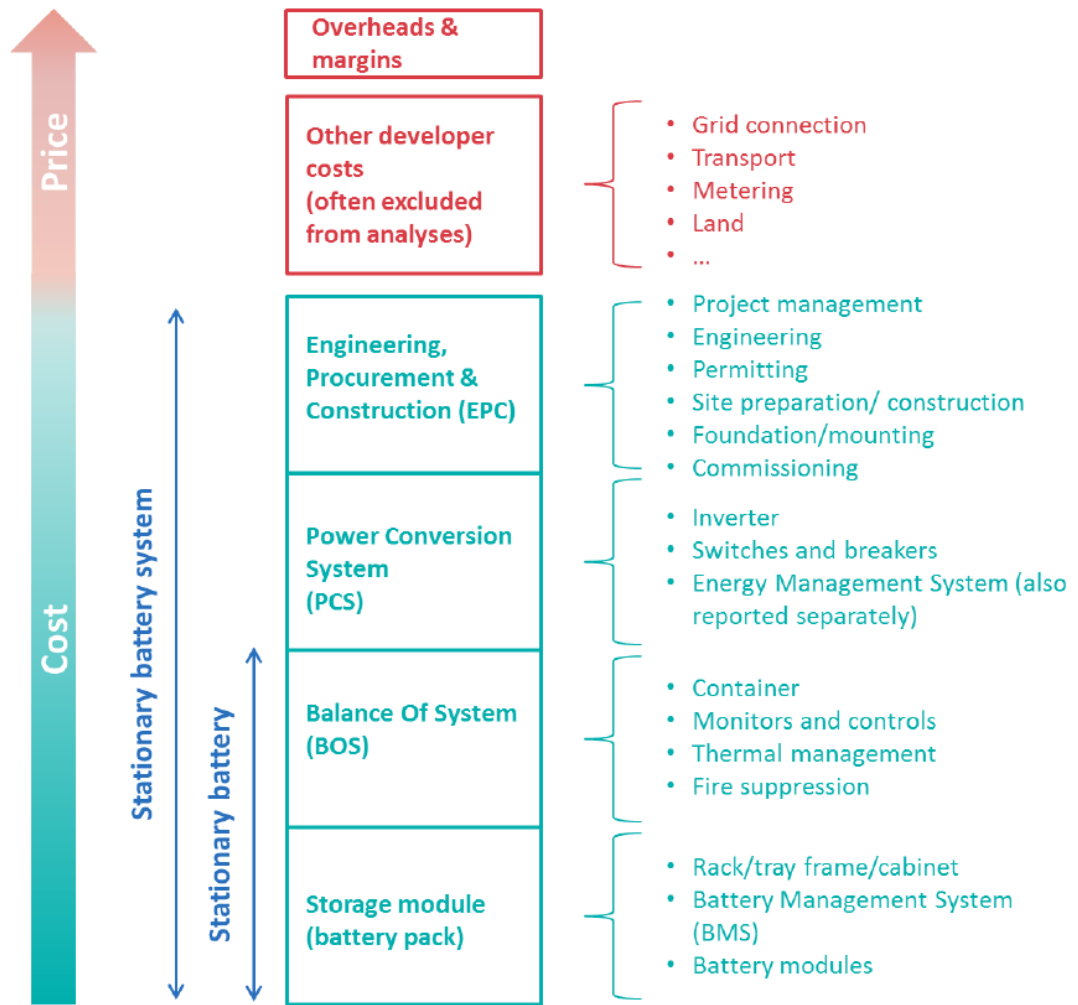
La maturité commerciale de ce type de systèmes reste faible, et pour l'instant on trouve surtout beaucoup de projets de démonstration. Il est donc difficile d'obtenir des chiffres fiables concernant les aspects économiques. On observe cependant qu'un grand nombre de projets aboutissent à la conclusion qu'il faut souvent mutualiser les applications pour aboutir à un système rentable, et donc utiliser un système de stockage pour plusieurs services de flexibilité réseau en même temps.

5.1 Coûts d'une batterie neuve

La Figure 21 donne une liste détaillée des différents items composant la structure de coût d'un stockage stationnaire. Comme pour l'aspect gisement, les projections du coût total sont variables suivant les sources (Figure 22). Dans le cas de la seconde vie, seul le coût du pack batterie lui-même sera modifié par rapport à un système première vie, et cela représente environ 50% du coût du système complet (Figure 23). D'après les scénarios du JRC, cette part devrait baisser à 30% en 2030 [11]. Enfin, dans un pack VE neuf, les cellules représentent 80 à 90% du coût du pack (Figure 24). Au prix éventuel d'achat du pack en fin de première vie, il faut ajouter les coûts de logistique, de diagnostic et de reconditionnement, qui sont difficiles à estimer du fait des faibles volumes mis en jeu pour l'instant. Le coût de fonctionnement pourrait aussi être un peu plus élevé avec des batteries de seconde vie, car celles-ci n'étant pas neuves, elles pourraient nécessiter un peu plus de maintenance.

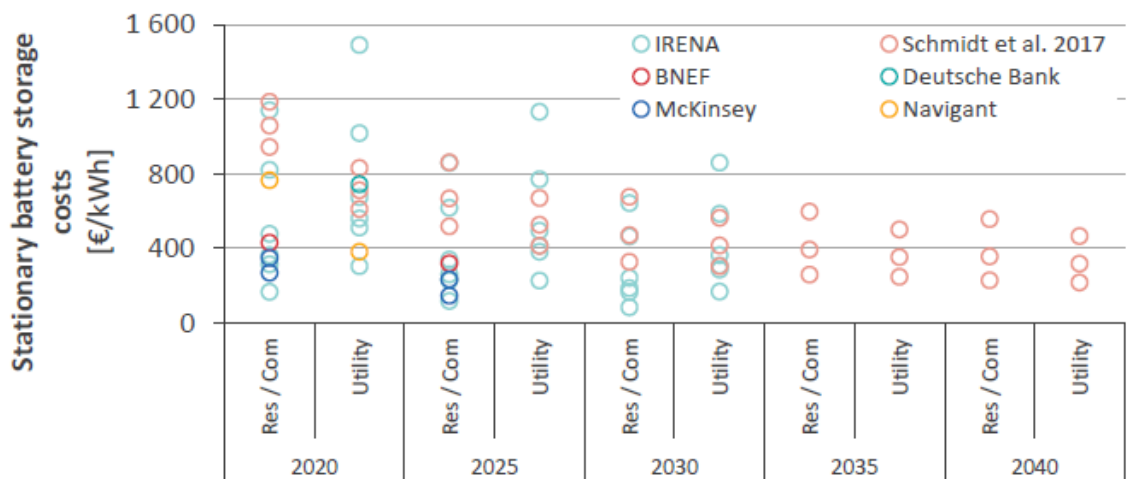


Annexe à l'étude PEPS5
Rapport sur la seconde vie des batteries



Source: JRC based on Lazard and BNEF [84,85].

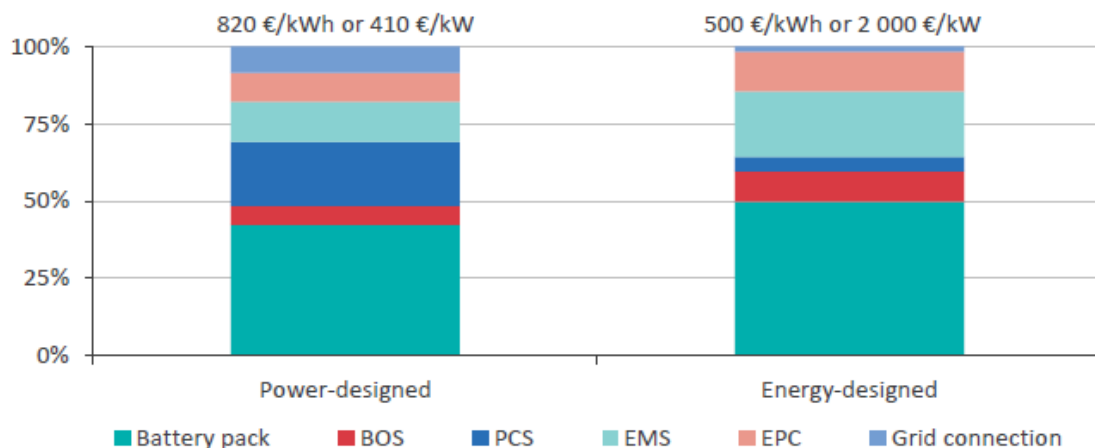
Figure 21 : Illustration de la structure de coût d'un stockage stationnaire [11]



Source: JRC based on IRENA [114], Schmidt et al. [57], BNEF [85], Deutsche Bank [65], McKinsey [86] and Navigant [87]. Note: IRENA estimates are based on ranges for all Li-ion chemistries and selected applications (self-consumption as residential and peak-shaving as utility). The size of the inverter is selected accordingly (small-scale for residential and large-scale for utility).

Figure 22 : Projections de coût d'un système de stockage stationnaire suivant différentes sources [11]

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries



Source: JRC based on average costs in BNEF's survey [85]. Note: Balance of System (BOS), Power Conversion System (PCS), Energy Management System (EMS), Engineering, Procurement and Construction (EPC).

Figure 23 : Répartition des coûts pour des systèmes de stockage stationnaire connectés au réseau, avec un design de type puissance (régime 2C, charge ou décharge en ½ h) ou énergie (régime C/4, charge ou décharge en 4 h) [11]

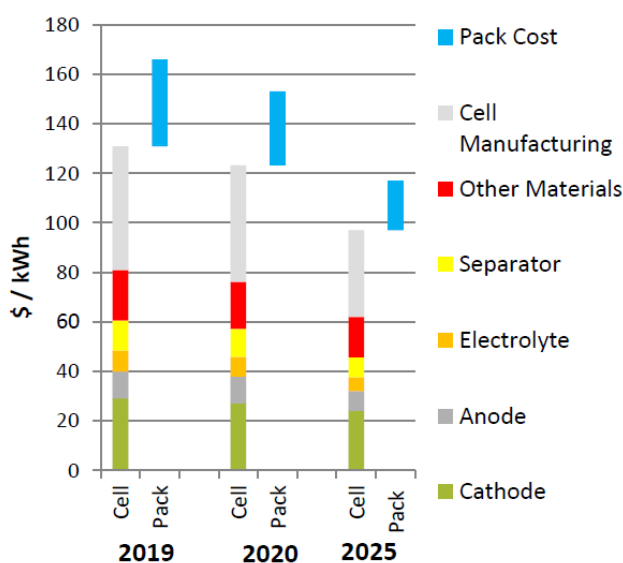


Figure 24 : Répartition des coûts dans un pack pour VE [7]

5.2 Coûts d'une batterie seconde vie

Les quelques études publiées sur les aspects économiques de la seconde vie sont déjà anciennes, et les publications récentes fournissent peu de données nouvelles, mais ont plutôt tendance à s'appuyer sur les valeurs des études précédentes.

Dans son étude de 2011 [2], l'ADEME a chiffré la valeur d'un pack batterie de VE aux différentes étapes de son cycle de vie (Figure 25). La valeur en début de seconde vie est estimée à 100 €/kWh, et par contre la valeur en entrée de la phase de recyclage est négative, ce qui signifie que le recyclage n'est

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

pas rentable mais qu'il faut payer pour faire recycler la batterie, ici 800 €/t. Ce chiffre est cohérent avec l'hypothèse fréquemment retenue de 1 €/kg. Dans le cas traité par l'ADEME, le pack de 25 kWh pèse 200 kg, ce qui donne un coût de recyclage de 8 €/kWh. Dans des projets plus récents (2020), le coût de recyclage des batteries dans un système stationnaire de grande taille (100MWh) a été estimé à 15 €/kWh : l'incertitude sur cette valeur est donc assez élevée, d'autant que les process évoluent encore beaucoup, de même que les contraintes règlementaires, sans parler des estimations de volumes à traiter.

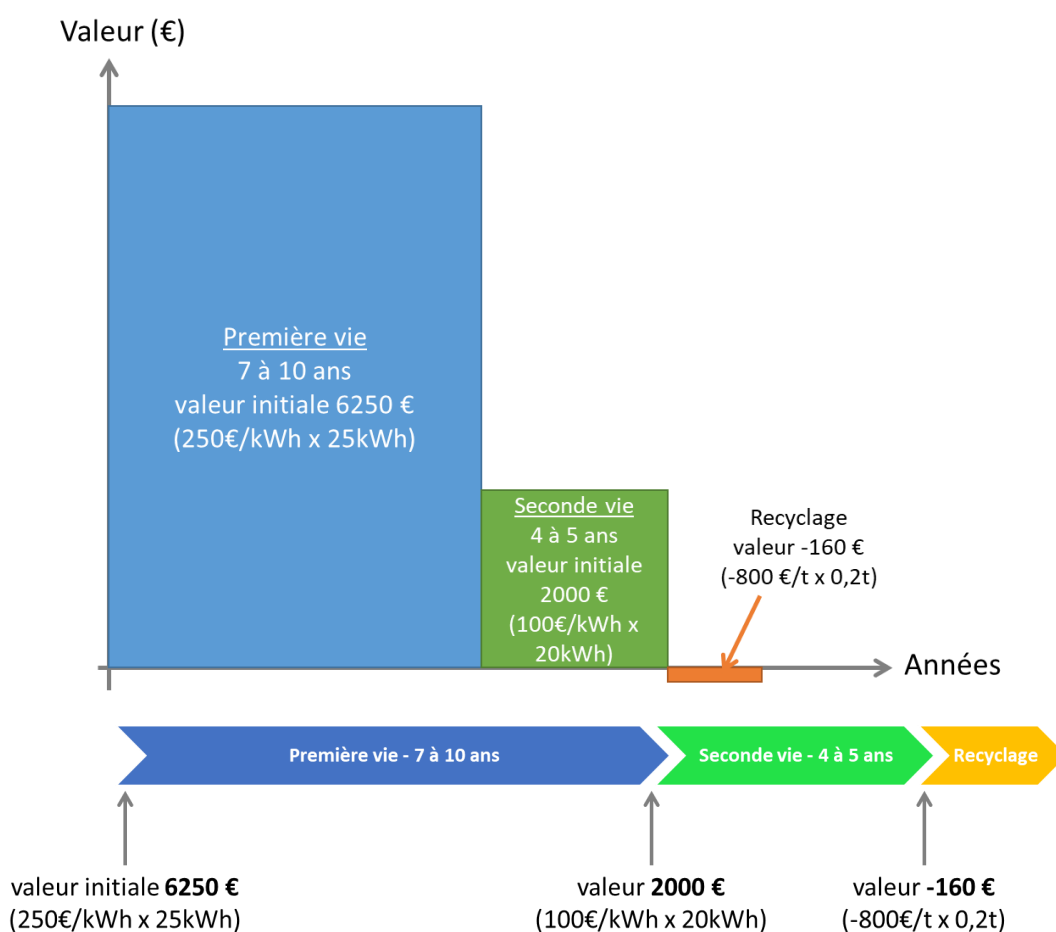


Figure 25 : Chaîne de la valeur d'un pack batterie de VE [d'après 2]

En 2015 s'est terminé le projet ABattReLife [35], soutenu par l'ADEME dans le cadre d'un programme Européen ERANET+ du 7^{ème} PCRD, avec parmi les 11 partenaires, deux constructeurs automobiles (PSA et BMW). La tâche « seconde vie » a permis l'étude de différents scénarios de réutilisation de batteries issues de VE, dans leurs aspects techniques (vieillesse des batteries), environnementaux (étude ACV), et économiques (étude du business model). Le scénario privilégié dans le projet est l'utilisation de la batterie dans un système domestique (HES – Home Energy Storage), en association avec une installation PV. Les paramètres étudiés sont le niveau de consommation, la production PV, la taille de batterie et les prix d'achat et de revente de l'électricité. L'étude aboutit à une taille optimale de batterie entre 2 à 6 kWh, et aboutit (avec les hypothèses de l'étude) à un prix d'achat acceptable pour la batterie de 100 €/kWh, ce qui reste faible par rapport au marché actuel des batteries neuves, mais

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

pourrait favoriser les batteries de seconde vie. Ces chiffres sont confirmés par une étude allemande de 2017 [36], toujours dans le cas de l'autoconsommation chez des particuliers. Ici, l'installation comprend un système PV de 5 kWc et une batterie de seconde vie de 5 kWh (6kWh en début de vie). Le coût de la partie interface, contrôle-commande et onduleur est estimé à 89 €/kWh et la partie installation et mise en service, à 46 €/kWh. Dans le scénario médian, la rentabilité est obtenue à partir d'un coût batterie de 100 €/kWh.

Un article de revue paru en 2018 [37] dresse un état de l'art économique (prix de la batterie, valorisation, baisse du coût initial), technique (vieillesse, satisfaction des besoins) et environnementaux (impact environnemental) de la batterie seconde vie. Au niveau économique, la première étude citée date de près de 20 ans (Cready [38] en 2003) et porte sur des batteries NiMH aux USA, mais donne une analyse intéressante du coût de reconditionnement (Figure 26), qui vient quasiment doubler le prix par rapport au coût d'achat de la batterie en fin de première vie.

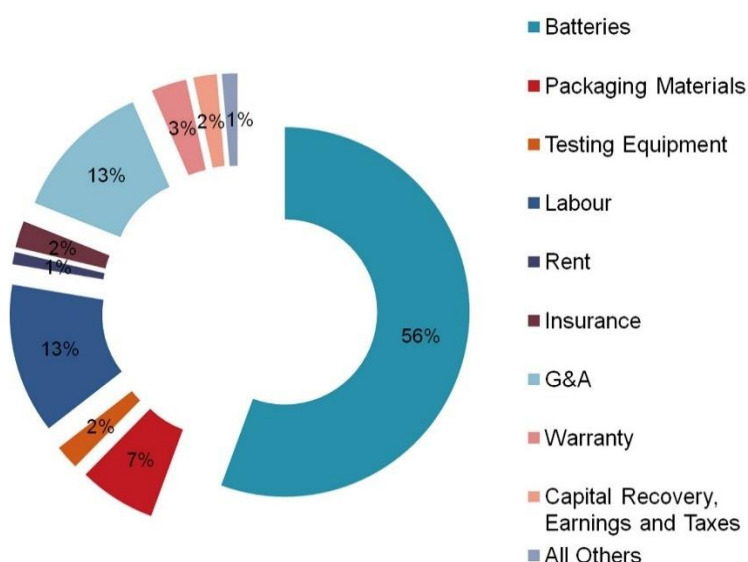


Figure 26 : Répartition des coûts liés au reconditionnement de batteries de VE, de la collecte à la vente selon [38]

Les autres études citées sont un peu plus récentes mais datent quand même d'une dizaine d'années [39, 40]. En 2022, Shahjalal [41] reprend aussi ces chiffres dans son analyse, pour donner une synthèse des coûts estimés pour le reconditionnement (Figure 27). Ce coût de reconditionnement apparaît comme un paramètre-clé dans la rentabilité du modèle d'affaires de la seconde vie [42, 43]. Ce reconditionnement inclut le démantèlement, le diagnostic, le changement du BMS, et le réassemblage.

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

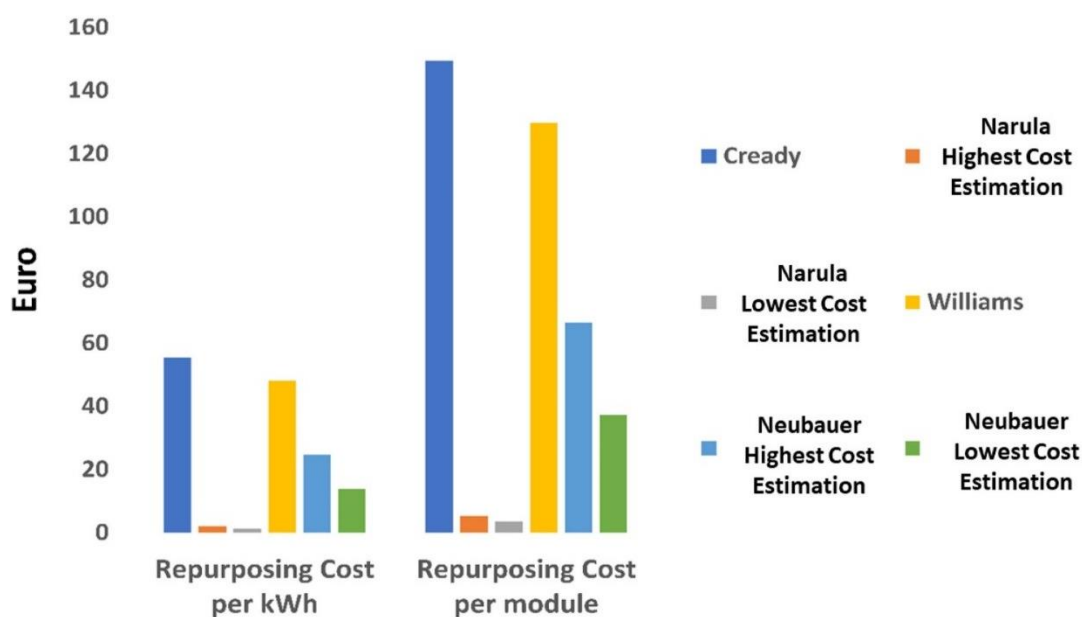


Figure 27 : Synthèse des estimations du coût de reconditionnement selon différentes études [41] Cready – 2003 [38], Narula – 2011 [44], Williams – 2012 [39], Neubauer – 2012 [40]

En 2020, Glöser-Chahoud [45] calcule un coût de 40\$/kWh aux USA, dont 20% de marge brute et 30% correspondant au démontage du pack (Figure 28). La même année, en utilisant le calculateur mis à disposition par le NREL [46], Ambrose [47] arrive à une estimation du prix de vente en seconde vie divisé par deux environ par rapport à une batterie neuve (Figure 29). Ses hypothèses sont un gisement de 10 000 tonnes de batteries usagées par an (~1 GWh/an), et un coût de reconditionnement et de test de 22 \$/kWh. En 2015, le NREL estimait le coût total de réutilisation à 44 \$/kWh, composé pour moitié environ du coût batterie, et pour moitié du coût de reconditionnement [48, 49]. En 2019, Element Energy [50] se base sur des discussions avec les différents acteurs pour calculer un prix de vente de 40\$/kWh à l'horizon 2030 (Figure 30), dont également la moitié de coût de reconditionnement. Enfin, la même année, Canals [51] arrive à un prix d'achat de la batterie de 83 €/kWh comme valeur maximum acceptable pour aboutir à la rentabilité de la seconde vie dans une application résidentielle, en Espagne.

Annexe à l'étude PEPS5
Rapport sur la seconde vie des batteries

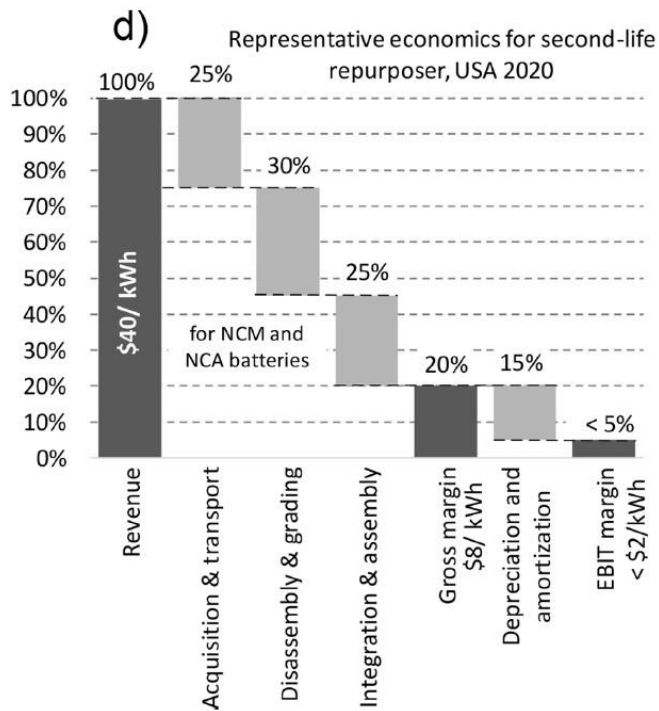


Figure 28 : Structure de coût du reconditionnement pour un cas-type aux USA [45]

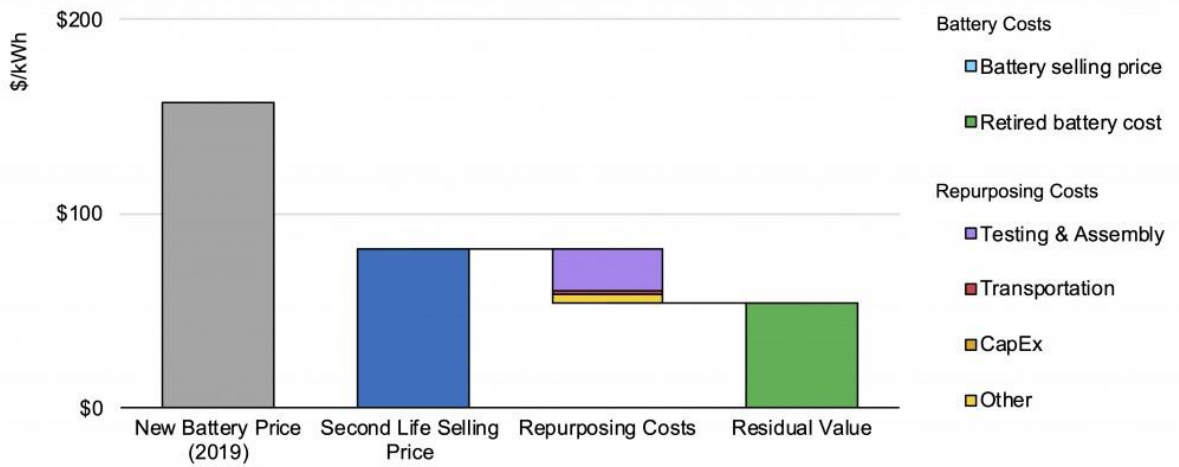


Figure 29 : Décomposition du prix de vente d'une batterie de seconde vie selon [Erreur ! Signet non défini.]

Annexe à l'étude PEPS5 Rapport sur la seconde vie des batteries

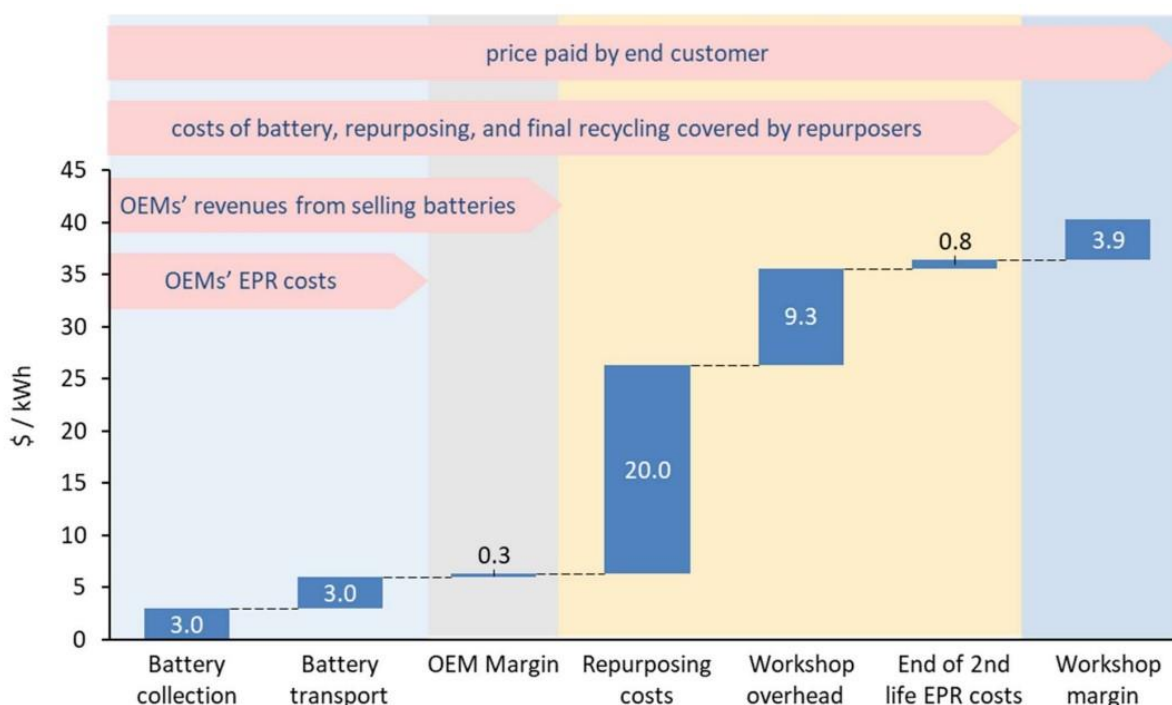


Figure 30 : Décomposition du prix d'une batterie reconditionnée placée sur le marché en 2030 [50]

Sur la base des publications de Martinez et 2018 [37] et Zhao en 2021 [52], Shahjalal [41] propose une classification de la rentabilité des applications identifiées pour une batterie de seconde vie (Figure 31).

Profitable	Limited Profitable	Not Profitable
<ul style="list-style-type: none"> Accelerated calendar life testing Decentralized mini and microgrid Distributed node telecom backup power Light commercial load following Power backup for generation asset outages Residential demand management (Energy time-shift + peak shaving)+ PV Residential load following Smart grid load dispatch UPS 	<ul style="list-style-type: none"> Load-levelling Electric service power quality, service reliability and reserve capacity Voltage support Wind generation grid integration, short duration Area regulation Area regulation + Spinning reserve capacity Demand charge management Transmission and Distribution upgrade deferral Energy time-shift Load-following Renewable capacity firming and energy time shift Substation on-site power Time-of-use energy cost management Transmission congestion relief and support 	<ul style="list-style-type: none"> Power reliability + peak shaving Wind generation grid integration, long duration

Figure 31 : Rentabilité des différentes applications possibles d'une batterie de seconde vie [41]

Tous s'accordent cependant sur l'existence de nombreuses sources d'incertitude qui empêchent d'aboutir à une conclusion tranchée quant à la rentabilité de la seconde vie des batteries. Ces incertitudes sont liées aux structures de coût des batteries seconde vie, aux performances et aux

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

vieillessements, aux dispositifs incitatifs qui peuvent être mis en place, ou encore aux valorisations pour les différentes applications. Les systèmes seconde vie entrent inévitablement en compétition avec les batteries neuves, que la décroissance des prix peut rendre intéressantes sur le plan financier, si l'aspect environnemental est insuffisamment valorisé.

Enfin, le rapport de la CNI [4] mentionne que plusieurs publications se sont intéressées à la rentabilité d'écourter la première vie afin d'avoir un meilleur bilan économique en cumulant première et seconde vie. Il en est ressorti que la batterie avait plus de valeur ajoutée dans le VE. Toutefois les conclusions sont à considérer avec prudence car des études devraient être menées sur la détermination optimale des critères de fin de première et de seconde vie.

5.3 Synthèse et comparaison des coûts

Les tableaux ci-dessous synthétisent les coûts associés aux batteries neuves, et la décomposition du coût pour les batteries de seconde vie, suivant les différentes sources citées ci-dessus. Dans un système stationnaire, le pack batterie lui-même représente 30 à 50% du coût du système complet, et c'est sur ce coût que l'utilisation d'une batterie de seconde vie aura potentiellement un impact.

Coûts batteries neuves actuels					
Source	Coût total système (€/kWh) stockage 4h	Coût du pack (€/kWh)	Coût de l'électronique de puissance (€/kW)	Autres coûts (€/kWh)	Remarques
Siemens [53]	201,5 + ?	168	134		Type NMC
NREL [54]	380	209	210	119	Prix en \$
Energinet [55]	299,5	132	270	100	Type NMC
EU [11]	500	250	140	215	

Coûts batteries de seconde vie				
Source	Coût du pack reconditionné (\$/kWh)	Coût d'achat fin de première vie (\$/kWh)	Coût de reconditionnement (\$/kWh)	Remarques
Ambrose [45] (2020)	80	58	22	
Glöser-Chahoud [46] (2020)	32	10 (achat du pack VE usagé + transport)	12 (démantèlement) + 10 (réassemblage)	Prix de vente 40 \$/kWh, dont 20% de marge brute
Shahjalal [40] (2022)			60 (démantèlement et test)	
Kelleher [48] (2019)	44	20	24	
Element Energy [51] (2019)	36	6	30	Prix de vente 40 \$/kWh, dont 10% de marge

Le coût d'une batterie de seconde vie comprend globalement deux parties : le coût d'achat de la batterie en fin de première vie, incluant éventuellement le transport, et les coûts de

Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

reconditionnement : désassemblage, test, réassemblage en configuration stationnaire. Les différentes sources s'accordent sur une valeur de 20 à 25\$/kWh pour cette deuxième partie. Par contre, le coût d'achat en fin de première vie varie beaucoup, de 10 à 60\$/kWh dans les études citées. Par extension, on peut envisager tous les cas de figure entre les limites suivantes :

- ✓ Batterie fournie gratuitement (au lieu de payer la société de recyclage), voire valeur négative (il faut payer le reconditionneur pour qu'il l'accepte, mais moins cher que le recycleur),
- ✓ Batterie vendue à un prix inférieur à celui d'une batterie neuve, par exemple prix proportionnel à sa capacité restante.

Cela explique les variations très importantes dans les coûts annoncés par les différentes sources.

Enfin, ces tableaux présentent les coûts d'investissement (CAPEX), mais les coûts de fonctionnement (OPEX) ne sont pas inclus. Pour pouvoir comparer un service équivalent, il faudrait ramener les coûts à la durée de vie attendue/garantie. De plus, les coûts OPEX d'un système seconde vie pourraient être plus élevés qu'un système neuf compte tenu d'une moindre densité d'énergie et surtout d'une fiabilité potentiellement plus incertaine. Sur ce dernier point, aucun retour d'expérience ne semble avoir été publié.



CONCLUSION

Les projections et estimations du gisement de batteries destinées à la seconde vie s'accordent sur une augmentation conséquente des volumes annuels, qui est déjà en train de démarrer, avec de fortes disparités entre les prévisions d'une source à l'autre. Les démonstrateurs mis en place depuis quelques années ont donné de bons résultats sur le plan technique, et ont montré que les systèmes seconde vie sont capables de répondre aux besoins de différentes applications stationnaires.

Il reste cependant beaucoup d'incertitudes, par exemple sur la durée possible de cette seconde vie. Les aspects diagnostic, reconditionnement et surtout sécurité nécessitent encore un effort de R&D pour fiabiliser cet usage, de même que le développement de modèles de vieillissement adaptés. L'adaptation de la réglementation est en cours, ce qui devrait aussi faciliter la mise en œuvre de systèmes seconde vie.

Au niveau économique, la faible maturité de ces systèmes ne permet pas de donner des chiffres fiables en termes de rentabilité. On observe l'apparition d'un nouveau type d'acteur, chargé du reconditionnement des batteries après leur première vie. Le coût de ce reconditionnement est un des paramètres importants au niveau économique, de même que la durée de vie possible.

Pour une batterie en fin de première vie, l'arbitrage entre une réutilisation en seconde vie ou un recyclage doit tenir compte à la fois des aspects techniques, environnementaux et économiques. Cet arbitrage dépendra aussi du prix des matières premières et de l'amélioration des procédés de recyclage d'une part, et des améliorations techniques apportées aux batteries neuves d'autre part.

Pour une stratégie industrielle nationale voire européenne, l'arbitrage entre le développement d'une filière performante de seconde vie et le développement d'une filière puissante du recyclage dépend, lui aussi, de nombreux facteurs socio-économiques, environnementaux et stratégiques. En attendant que cet arbitrage s'opère, la supériorité de la seconde vie (versus l'option d'une première vie étendue plus le recyclage) ne peut pas être considérée comme garantie d'emblée. L'obligation d'intégration de matériaux recyclés dans les batteries neuves (discutée dans le cadre de la nouvelle directive européenne Batteries) incitera peut-être à privilégier le recyclage plutôt que l'utilisation des batteries en seconde vie.



REFERENCES

- [1] Technical and Economic Feasibility of Applying Used EV Batteries in Stationary Applications, Erin Cready, John Lippert, Josh Pihl, et al., Sandia National Laboratories, SAND2002-4084, mars 2003
- [2] Étude de la seconde vie des batteries de véhicules électriques et hybrides rechargeables, ADEME, juin 2011
- [3] PEPS4 – Livrable 2 : Rapport sur la seconde vie des batteries, Arnaud Delaille, Yves-Marie Bourien, Nicolas Guillet, Laurent Vinit, Rapport technique CEA DTS/LV/2018/102
- [4] Développement d'une filière intégrée de recyclage des batteries lithium, CSF Mines et métallurgie, Février 2020 <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/02/Mission-Recyclage-Batteries-CNI-Fev-2020-vf.pdf>
- [5] Directive européenne 2006/66/CE relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs
- [6] How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries. S. Bobba , F. Mathieux, G. A. Blengini, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 145, June 2019, Pages 279-291
- [7] C. Pillot, conférence Batteries 2020, 7/10/2020 Lyon
- [8] EV Outlook 2020 BloombergNEF, Février 2020
- [9] The lithium-ion battery recycling market, NAATBatt International 2021, H. E. Melin <https://circularener-gystorage.com/articles/2021/2/9/the-battery-recycling-market-nbspces-talk-at-naatbatt-international-2021>
- [10] Impact of the EV market growth on lithium-ion batteries and raw materials supply 2019-2030, C. Pillot, AABC Europe, 15/01/2020
- [11] Tsiropoulos, I., Tarvydas, D., Lebedeva, N., Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications – Scenarios for costs and market growth, EUR 29440 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, doi:10.2760/87175, JRC113360
- [12] Recycling vs. Second life : not one size fits all, T. Gretjak, AABC Europe, 13/01/2020
- [13] Lux Research report 2016 « Reuse or Recycle: The Billion-Dollar Battery Question”
- [14] DERri D_JRA-2.1.4: “Guidelines for testing grid connected storage”. Distributed Energy Resources Research Infrastructures (DERri) FP7 European project, 2014
- [15] RTE, “Futurs énergétiques 2050 », Février 2022 <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesdocuments>
- [16] How to better share energy towards a carbon-neutral city? A review on application strategies of battery energy storage system in city, H. Kang, S. Jung, M. Lee, T. Hong, Renewable and Sustainable Energy Reviews 157 (2022) 112113
- [17] Roadmap on stationary applications for batteries, European Technology and Innovation Platform on Batteries – Batteries Europe, Working Group 6, November 2021 https://energy.ec.europa.eu/roadmap-application-and-integration-stationary_fr
- [18] Schuster, Simon F., Tobias Bach, Elena Fleder, Jana Müller, Martin Brand, Gerhard SEXTL, et Andreas Jossen. « Nonlinear Aging Characteristics of Lithium-Ion Cells under Different



Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

- Operational Conditions ». *Journal of Energy Storage* 1 (juin 2015): 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.05.003>.
- [19] « Ecodesign preparatory Study for Batteries » <https://ecodesignbatteries.eu/welcome.html>
- [20] European Commission, Joint Research Centre, Bielewski, M., Blagoeva, D., Cordella, M., et al., Analysis of sustainability criteria for lithium-ion batteries including related standards and regulations, Publications Office, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/811476>
- [21] Influence of aging paths on the thermal runaway features of lithium-ion batteries in accelerating rate calorimetry tests Xuning Feng, Dongsheng Ren, Shunchao Zhang, Xiangming He, Li Wang, Minggao Ouyang *Int. J. Electrochem. Sci.*, 14 (2019) 44–58, doi: 10.20964/2019.01.14
- [22] Alex Friesen, Fabian Horsthemke, Xaver Mönnighoff, Gunther Brunklaus, Roman Krafft, Markus Börner, Tim Risthaus, Martin Winter, Falko M. Schappacher, Impact of cycling at low temperatures on the safety behavior of 18650-type lithium ion cells: Combined study of mechanical and thermal abuse testing accompanied by post-mortem analysis, *Journal of Power Sources*, Volume 334, 2016, Pages 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.120>
- [23] Pierre Kuntz. Evolution du comportement sécuritaire de batterie lithium-ion pendant leur vieillissement. Thèse de l'Université Grenoble Alpes, 2020 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03157765>
- [24] Zhi Wang, Jian Wang, An experimental investigation of the degradation and combustion behaviors associated with lithium ion batteries after different aging treatments, *Journal of Cleaner Production*, Volume 272, 2020, 122708, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122708>
- [25] Patrick Röder, Barbara Stiaszny, Jörg C. Ziegler, Nilüfer Baba, Paul Lagaly, Hans-Dieter Wiemhöfer, The impact of calendar aging on the thermal stability of a LiMn₂O₄-Li(Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3})O₂/graphite lithium-ion cell, *Journal of Power Sources*, Volume 268, 2014, Pages 315-325, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.040>
- [26] Sara Abada, Martin Petit, Amandine Lecocq, Guy Marlair, Valérie Sauvant-Moynot, François Huet, Combined experimental and modeling approaches of the thermal runaway of fresh and aged lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Volume 399, 2018, Pages 264-273, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.094>.
- [27] Thomas Waldmann, Margret Wohlfahrt-Mehrens, Effects of rest time after Li plating on safety behavior—ARC tests with commercial high-energy 18650 Li-ion cells, *Electrochimica Acta*, Volume 230, 2017, Pages 454-460, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.036>.
- [28] Meike Fleischhammer, Thomas Waldmann, Gunther Bisle, Björn-Ingo Hogg, Margret Wohlfahrt-Mehrens, Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperatures and safety in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, Volume 274, 2015, Pages 432-439, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.135>
- [29] Jialong Liu, Qiangling Duan, Lei Feng, Mina Ma, Jinhua Sun, Qingsong Wang, Capacity fading and thermal stability of LiNi_xCo_yMn_zO₂/graphite battery after overcharging, *Journal of Energy Storage*, 29, 2020, 101397, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101397>
- [30] Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020
- [31] Global implications of the EU battery regulation, H. E. Melin, M. A. Rajaeifar, A. Y. Ku, A. Kendall, G. Harper, O. Heidrich, *Science*, 23 Juillet 2021, vol. 373 issue 6553



Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

-
- [32] Claude CHANSON, The new EU batteries regulation impact on the European industry, Batteries 2020 Conference, Lyon, 7-9/10 2020
- [33] Proposal for a Regulation establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC https://ec.europa.eu/environment/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- [34] CIRCUSOL project, report D3.4 (labelling and certification protocols for second-life batteries) <https://zenodo.org/record/6674934#.YrGzIHZBxMs>
- [35] Rapport final du projet ABattReLife "Automotive Battery Recycling and 2nd Life", 2015 <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/2055-automotive-battery-recycling-and-2nd-life.html>
- [36] Reinhard Madlener, Alexander Kirmas, Economic Viability of Second Use Electric Vehicle Batteries for Energy Storage in Residential Applications, Energy Procedia, Volume 105, 2017, Pages 3806-3815, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.890>
- [37] E. Martinez-Laserna, I. Gandiaga, E. Sarasketa-Zabala, J. Badedo, D.-I. Stroe, M. Swierczynski, A. Goikoetxea, Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 93, 2018, Pages 701-718, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035>
- [38] E. Cready, J. Lippert, J. Pihl, I. Weinstock, P. Symons Technical and economic feasibility of applying used EV batteries in stationary applications Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), Mar. (2003)
- [39] Analysis of the Combined Vehicle- And Post-Vehicle-Use Value Of Lithium-Ion Plug-In Vehicle Propulsion Batteries Brett Williams Timothy Lipman, February 1, 2012 Report Berkeley university <https://escholarship.org/uc/item/60m7j3k1>
- [40] Techno-Economic Analysis of PEV Battery Second Use: Repurposed-Battery Selling Price and Commercial and Industrial End-User Value Neubauer, Jeremy; Pesaran, Ahmad; Williams, Brett; Ferry, Mike; Eyer, Jim NREL Presented at the 2012 SAE World Congress and Exhibition, 24-26 April 2012, Detroit, Michigan; <https://doi.org/10.4271/2012-01-0349>
- [41] Mohammad Shahjalal, Probir Kumar Roy, Tamanna Shams, Ashley Fly, Jahedul Islam Chowdhury, Md. Rishad Ahmed, Kailong Liu, A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues, Energy, Volume 241, 2022, 122881, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122881>
- [42] Ian Mathews, Bolun Xu, Wei He, Vanessa Barreto, Tonio Buonassisi, Ian Marius Peters, Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging, Applied Energy, Volume 269, 2020, 115127, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115127>
- [43] H. Rallo, G. Benveniste, I. Gestoso, B. Amante, Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries, Resources, Conservation and Recycling, Volume 159, 2020, 104785, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104785>
- [44] C.K. Narula, R. Martinez, O. Onar, M.R. Starke, G. Andrews, Economic analysis of deploying used batteries in power systems, Rapport ORNL/TM-2011/1, Oak Ridge National Laboratory, Juin 2011
- [45] Simon Glöser-Chahoud, Sandra Huster, Sonja Rosenberg, Sabri Baazouzi, Steffen Kiemel, Soumya Singh, Christian Schneider, Max Weeber, Robert Mieke, Frank Schultmann, Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery



Annexe à l'étude PEPS5

Rapport sur la seconde vie des batteries

-
- systems, Resources, Conservation and Recycling, Volume 174, 2021, 105735, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735>
- [46] Calculateur NREL téléchargeable sur <https://www.nrel.gov/transportation/battery-second-use.html>
- [47] H. Ambrose, The 2nd Life Of Used EV Batteries, 2020 <https://cleantechnica.com/2020/06/06/the-2nd-life-of-used-ev-batteries/>
- [48] Neubauer, J., Smith, K., Wood, E., & Pesaran, A. Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries. Technical Report NREL/TP-5400-63332 February 2015 <http://dx.doi.org/10.2172/1171780>
- [49] Kelleher Research study on reuse and recycling of batteries employed in electric vehicles | Australian battery recycling initiative, Sept.2019. <https://batteryrecycling.org.au/resources/research-study-on-reuse-and-recycling-of-batteries-employed-in-electric-vehicles/>
- [50] Element Energy, Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond, 06/2019 https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_06_Element_Energy_Batteries_on_wheels_Public_report.pdf
- [51] L. Canals Casals, M. Barbero, C. Corchero, Reused second life batteries for aggregated demand response services, Journal of Cleaner Production, Volume 212, 2019, Pages 99-108, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.005>
- [52] Y. Zhao, O. Pohl, A. I. Bhatt, G. E. Collis, P. J. Mahon, T. Rüther, A. F. Hollenkamp, *A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling*. Sustainable Chemistry, vol.2 (2021) p.167–205. <https://doi.org/10.3390/suschem2010011>
- [53] *Tenerife se prepara para acoger un parque solar con baterías de ión-litio de 7,62 megavatios*. *Energías Renovables*, 7 Julio 2020. <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/tenerife-se-prepara-para-acoger-un-parque-20200707>
- [54] R. Fu, T. Remo, R. Margolis, *2018 Utility-Scale Photovoltaics-Plus-Energy Storage System Costs Benchmark*. National Renewable Energy Laboratory, November 2018. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/71714.pdf>
- [55] *Technology Data – Energy Storage*. Danish Energy Agency and Energinet, Version 0007, January 2020. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energy_storage.pdf



L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



ANNEXE A L'ETUDE PEPS5 - RAPPORT SUR LA SECONDE VIE DES BATTERIES

