

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**ÉTAT DE L'ART SUR LE RECYCLAGE ET LE REEMPLOI
DES BATTERIES**

***STATE OF THE ART ON RECYCLING AND RE-USE
OF BATTERIES***

juillet 2019

F. SANCHEZ – RECYSTEM PRO



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Etat de l'art sur le recyclage et le réemploi des batteries, 2019, 175 p, n°17-0915/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2019

RESUME

L'étude se situe sur un périmètre mondial et différencié sur quatre zones géographiques principales : Chine, Etats-Unis, Europe et Japon.

Elle propose dans un premier temps un état de l'art du marché des batteries en étudiant notamment les différentes technologies et les dynamiques de croissance des marchés utilisateurs.

Une deuxième partie se penche sur les enjeux liés à la réglementation, l'éco-conception, la sécurité, la seconde vie et le coût et la disponibilité des métaux qui conditionnent en partie le marché des batteries mais surtout le marché de leur recyclage.

Une troisième partie permet de faire un état de l'art du recyclage des batteries à travers une description générale des procédés, une cartographie des principaux acteurs du recyclage, une description détaillée de quelques procédés spécifiques et enfin une analyse de la stratégie des acteurs vis-à-vis de la filière de recyclage.

La dernière partie offre enfin une vision prospective afin d'évaluer au travers de plusieurs scénarii, les volumes de batteries en fin de vie sur la période allant jusqu'en 2030 et discuter de l'adéquation des capacités de recyclage.

MOTS CLES

BATTERIES, RECYCLAGE, LITHIUM-ION, BMS, VEHICULE ELECTRIQUE, REGLEMENTATION, REEMPLOI, SECONDE VIE, ECO-CONCEPTION, IMPACT ENVIRONNEMENTAL, METAUX STRATEGIQUES, PYRO-METALLURGIE, HYDROMETALLURGIE, PROCEDE DE VALORISATION DIRECTE

SUMMARY

The study covers on a worldwide perimeter and differentiates four main geographical areas: China, United States, Europe and Japan.

It first proposes a state of the art on battery market by studying the different technologies and growth dynamics of user markets.

Secondly it focuses at the issues related to regulations, eco-design, security, second life and the cost and availability of metals that partly condition the battery market but more significantly the market for their recycling.

A third part allows to make a state of the art on battery recycling, through a general description of the processes, a mapping of the main actors of recycling, a detailed description of some specific processes and finally an analysis of the strategy of the stakeholders involved regarding the recycling sector.

The last part finally offers a prospective vision to evaluate, through several scenarios, the battery volumes at the end of life over a period until 2030 and discusses the adequacy of recycling capacities.

KEY WORDS

BATTERIES, RECYCLING, LITHIUM-ION, BMS, ELECTRIC VEHICLE, REGULATIONS, RE-EMPLOYMENT, SECOND LIFE, ECO-DESIGN, ENVIRONMENTAL IMPACT, STRATEGIC METALS, PYRO-METALLURGY, HYDROMETALLURGY, DIRECT RECOVERY PROCESS

Contexte et objectifs

Le marché mondial des batteries est en forte croissance. Il a doublé depuis 2000 pour atteindre plus de 500 GWh aujourd'hui. Cette croissance soulève pour les années à venir, de nombreuses questions concernant la gestion des batteries en fin de vie. Après un état des lieux du marché mondial des batteries à travers les technologies utilisées, les dynamiques de croissance des secteurs utilisateurs et les acteurs impliqués, l'étude s'intéresse à d'autres déterminants du marché des batteries et de leur recyclage et plus particulièrement le contexte réglementaire, l'éco-conception, la sécurité, la seconde vie, le coût et la disponibilité des métaux.

Cette première partie ayant montré notamment que les principaux enjeux concernent la technologie Li-ion, la deuxième partie dresse un état de l'art concernant le réemploi et le recyclage des batteries usagées en France, en Europe et dans le monde en s'appuyant sur :

- Une présentation synthétique des différentes voies technologiques de traitement des batteries en fin de vie,
- Une cartographie des principaux acteurs du recyclage et du réemploi de batteries dans le monde,
- Une description détaillée des technologies exemplaires,
- Une analyse de la stratégie et du positionnement des acteurs vis-à-vis du réemploi et du recyclage des batteries en fin de vie,
- Un regard sur l'évolution du gisement de batteries et des procédés de traitement (R&D).

La troisième partie propose enfin une vision prospective sur l'évolution des volumes de batteries en fin de vie et un regard critique sur l'adéquation des capacités de recyclage.

Etat du marché des batteries

Les batteries sont utilisées pour du stockage électrique depuis le 19ème siècle. Cependant, elles ont été principalement utilisées jusqu'à la fin du 20ème siècle pour des applications à petite échelle (secteur du transport, secours et source de courant mobile).

Les batteries au plomb ont longtemps répondu aux besoins de stockage et de mise à disposition d'énergie électrique et continuent de dominer le marché du fait de leur robustesse, leur faible prix et leur facilité d'utilisation.

Les batteries Ni-Cd, robustes et faciles d'utilisation sont particulièrement utilisées pour les applications offshores, les transports aériens et ferroviaires et sur sites isolés du fait de leur fiabilité dans les environnements extrêmes.

La mise au point de technologies alternatives plus récentes (Ni-MH et Li-ion) a été motivée par la nécessité de trouver des systèmes de stockage avec des densités d'énergie plus importantes. Ceci est lié à partir du début des années 2000 à un fort développement des applications électroniques nomades (téléphonie, informatique) et plus récemment au développement de la mobilité électrique (VEH et bus électriques).

Ce dernier marché, compte tenu de son potentiel considérable s'est imposé comme le principal déterminant des choix technologiques et industriels qui ont abouti à une **large domination des batteries Li-ion**. En effet, malgré ses défauts (complexité de gestion, contraintes de sécurité) la technologie Li-ion est aujourd'hui la seule en mesure de répondre au cahier des charges de la mobilité électrique dont le potentiel de croissance a permis d'attirer des investissements massifs. Dans le monde, plus de 20 Mds de dollars ont été investis entre 2011 et 2017 en capacité de production de cellules Li-ion.

Context and objectives

The global battery market is growing rapidly. Since 2000 it doubled to exceed 500 GWh today. Such a growth raises many questions about end-of-life battery management for years to come. After an inventory of the global battery market through the technologies used, the dynamics of growth of the user sectors and the stakeholders involved, the study focuses at other determinants of the battery market and their recycling and more particularly in a regulatory context, their eco-design, safety, second life, costs and availability of metals.

This first part of the study having shown in particular that the main issues concern the Li-ion technology, the second part draws up a state-of-the-art concerning the reuse and recycling of used batteries in France, in Europe and in the world by relying on :

- *A synthetic presentation of the various technological ways of treating batteries at the end of their life,*
- *A mapping of the main stakeholders in the recycling and reuse of batteries around the world,*
- *A detailed description of exemplary technologies,*
- *An analysis of the strategy and the positioning of the stakeholders regarding the reuse and recycling of batteries at their end of life,*
- *A look at the evolution of the battery field and treatment processes (R & D).*

The third part finally proposes a prospective vision on the evolution of battery volumes at the end-of-life and a critical look at the adequacy of recycling capacities.

State of the battery market

Batteries have been used for electrical storage since the 19th century. However, they were mainly used until the end of the 20th century for small-scale applications (transport sector, backup and mobile power source).

Lead-acid batteries have long responded to the need for storage and provision of electrical energy and continue to dominate the market due to their robustness, low price and ease of use.

Because of their reliability in extreme environments, Ni-Cd batteries, which are robust and easy to use, are particularly used for off-shore applications, air and rail transport.

The development of newer alternative technologies (Ni-MH and Li-ion) has been motivated by the need to find storage systems with higher energy densities. This has been linked from the early 2000s to a strong development of nomadic electronic applications (telephony, computing) and more recently to the development of electric mobility (EVH and electric buses).

*This latter market, given its considerable potential, has emerged as the main determinant of the technological and industrial choices that have led to a **widespread domination of Li-ion batteries**. Indeed, despite its shortcomings (management complexity, security constraints) Li-ion technology is now the only one able to meet the specifications of electric mobility whose growth potential has made it possible to attract massive investments. Worldwide, more than 20 billion dollars have been invested between 2011 and 2017 in capacity of production of Li-ion cells.*

Ces investissements ont permis au cours des dernières années, une amélioration continue des performances par la R&D et une baisse des prix principalement liée à des économies d'échelle et une guerre commerciale entre fabricants. Ce contexte réduit très fortement le potentiel d'émergence de technologies alternatives à moyen terme. La domination de la technologie Li-ion perdurera ainsi au moins sur les 10 à 15 prochaines années. D'autant plus que les surcapacités actuelles et l'agressivité commerciale des fabricants à la recherche de débouchés permet l'implantation de batteries Li-ion y compris sur le marché du stockage stationnaire sur lequel la technologie ne présente pourtant pas d'atouts déterminants. Bien que beaucoup moins important que les VEH, ce marché offre lui aussi des perspectives de croissance intéressantes du fait du développement des EnR (éolien et photovoltaïque).

Cependant, Le marché du stockage stationnaire reste plus ouvert et même si la technologie Li-ion capte aujourd'hui l'essentiel de la croissance, des technologies alternatives telles que les batteries Na-S, les batteries à circulation, les piles à hydrogène ou encore les supercondensateurs devraient trouver leur place, notamment dans le stockage de longue durée - 4 à 6h - et/ou de grande capacité.

Alors que certains acteurs européens historiques restent performants sur des marchés de batteries à haute valeur ajoutée, la fabrication de batteries Li-ion destinées aux marchés de masse (VEH principalement) se concentre aujourd'hui en Asie (Chine, Japon, Corée du Sud) proche des principales zones de consommation. En effet, en 2018 le marché Chinois absorbe plus de 50 % du marché mondial des VEH.

Tandis que les Etats-Unis tentent de combler leur retard, l'Europe malgré ses atouts (R&D, tissu industriel) restera probablement à moyen terme, un acteur secondaire de la fabrication alors même qu'elle est potentiellement un important marché utilisateur.

Enjeux et déterminants du marché des batteries et de leur recyclage

Outre la demande utilisateur, d'autres enjeux sont pris en compte car ils déterminent en partie l'évolution du marché des batteries et plus encore celui du recyclage.

La réglementation

La réglementation influence le marché des batteries en interdisant ou en limitant par exemple l'utilisation de certaines substances (Mercure, Cadmium, Plomb).

Mais c'est surtout dans le domaine de la fin de vie que la réglementation joue un rôle structurant important. Elle peut agir de manière plus ou moins contraignante sur l'orientation des flux. En limitant par exemple les contraintes sur les activités de réemploi, en orientant les flux vers le recyclage par des interdictions d'enfouissement, en mettant en œuvre des filières à responsabilité élargie du producteur (REP) qui obligent les metteurs en marché à organiser la gestion opérationnelle et financière de leurs batteries en fin de vie.

La réglementation peut également imposer une obligation de résultat sur le taux de collecte, les rendements de recyclage ou encore le respect de normes environnementales. Ainsi la réglementation est un levier majeur pour la structuration de la filière de recyclage. Elle influe aussi bien sur les capacités que sur les procédés à mettre en œuvre.

These investments have allowed in recent years, a continuous improvement of the performances through R & D and a decline of the prices mainly related to economies of scale and a commercial war between manufacturers. This context greatly reduces the potential for the emergence of alternative technologies in the medium term. The dominance of Li-ion technology will last for at least the next 10 to 15 years. Especially since current overcapacities and the commercial aggressiveness of manufacturers looking for opportunities allows the implementation of Li-ion batteries, including the stationary storage market on which the technology does not present any decisive assets. Although much less important than EHV, this market also offers interesting growth prospects due to the development of renewable energies (wind and photovoltaic).

However, the stationary storage market remains more open and even if the Li-ion technology now captures most of the growth, alternative technologies such as Na-S batteries, circulation batteries, hydrogen fuel cells or supercapacitors should still find their place, especially in long-term storage - 4 to 6 hours - and / or large capacity.

While some historical European stakeholders continue to perform well in high value-added battery markets, the manufacture of Li-ion batteries for mass markets (mainly EVH) is now concentrated in Asia (China, Japan, South Korea) close to the main areas of consumption. Indeed, in 2018 the Chinese market absorbs more than 50% of the global market of the EVH.

While the United States are trying to catch up, Europe, despite its strengths (R & D, industrial fabric) will probably remain a secondary stakeholder in manufacturing in the medium term, even though it is potentially a major user market.

Stakes and determinants of the battery market and their recycling

In addition to the user demand, other issues are taken into account as they partly determine the evolution of the battery market and even more that of recycling.

The regulations

The regulations influence the battery market by prohibiting or limiting for example the use of certain substances (Mercury, Cadmium, Lead).

But it is especially in the area of the end-of-life that regulations play an important structuring role. They can be more or less restrictive on the different flow orientations. For example, by limiting constraints on re-use activities, by directing flows towards recycling through landfill bans or even by implementing extended producer responsibility chains that force marketers to organize operational and financial management of their batteries at the end of their life.

The regulations may also impose an obligation of results on the rate of collection, recycling yields or compliance with environmental standards. Thusly regulations are a major lever for the structuring of the recycling sector. They influence both the capacities and the processes to be implemented.

L'Eco-conception

Au regard des exigences en matière de performance, coût, sécurité et de la complexité des processus chimiques à l'œuvre dans le fonctionnement des batteries, les marges de manœuvre en matière d'éco-conception liée à la composition des batteries en vue d'une meilleure recyclabilité sont quasi inexistantes. En revanche, pour les batteries de grande taille (VEH, stockage stationnaire), les processus de recyclage en amont de la filière (identification, préparation à la réutilisation, démontage, démantèlement) offrent un important potentiel d'optimisation par une meilleure prise en compte des contraintes du recycleur par les fabricants et assembleurs de cellules.

La sécurité

Les batteries Li-ion présentent un certain nombre de risques d'emballage thermique. Si les contraintes de sécurité, maîtrisées dans la phase d'utilisation, ne font pas obstacle au développement du marché des batteries Li-ion, des mesures spécifiques sont nécessaires au niveau de la gestion de la fin de vie.

Les risques sont généralement bien maîtrisés par les acteurs spécialisés du recyclage de batterie. En revanche, les filières connexes telles que DEEE ou VHU confrontées à des flux de batteries en croissance, parfois endommagées, sont fortement exposées aux risques et continuent à travailler à la mise en œuvre et la diffusion de procédures de sécurisation de leurs opérations.

La seconde vie

Malgré les fortes incertitudes techniques, économiques et réglementaires liées à la seconde vie des batteries issues de véhicules électriques, la plupart des acteurs s'accordent à penser qu'il existe un fort potentiel sur ce marché. Nombreux se positionnent et quelques réalisations tendent à confirmer l'intérêt de la seconde vie. Mais le décollage significatif du secteur est dépendant d'un gisement qui reste encore limité.

Le coût et la disponibilité des métaux

L'étude se penche sur 3 métaux principaux, utilisés pour la fabrication de batteries Li-ion : Cobalt, Lithium et Nickel. L'impact de la croissance du marché des batteries Li-ion sera très fort sur la demande en Cobalt et Lithium mais beaucoup plus faible sur la demande en Nickel, largement utilisé par d'autres secteurs industriels. Bien que les réserves et ressources soient suffisantes en Cobalt et Lithium (au moins à moyen terme), le marché subit de fortes fluctuations et fait craindre des difficultés d'approvisionnement. Ceci est dû à des facteurs particuliers et notamment une forte concentration des gisements dans des pays parfois politiquement instables, une situation oligopolistique des acteurs de l'extraction minière, des marchés à faibles volumes pouvant favoriser la spéculation. Le Cobalt ajoute une incertitude supplémentaire puisqu'en étant le plus souvent un co-produit de l'extraction du Cuivre et/ou du Nickel, sa production dépend de l'évolution du marché de ces métaux. La disponibilité à long terme du Cobalt est source d'inquiétude pour les fabricants de batteries qui cherchent d'une part à réduire son utilisation et d'autre part à sécuriser leurs approvisionnements par différentes stratégies vis-à-vis des acteurs miniers et/ou des activités de recyclage.

The eco-design

In view of the requirements in terms of performance, cost, safety and the complexity of the chemical processes at work in a battery operation, the room for maneuver in terms of eco-design related to the composition of batteries in order to have a better recyclability are almost non-existent. On the other hand, for large batteries (VEH, stationary storage), recycling processes upstream of the supply chain (identification, preparation for reuse, disassembly, dismantling) offer a great potential for optimization by a better awareness of the cell manufacturers and assemblers' constraints.

Safety

Li-ion batteries have a number of risks in terms of thermal runaway. If the security constraints, mastered in the use phase, do not hinder the development of the Li-ion battery market, specific measures are needed at the end-of-life management level.

Risks are generally well mastered by specialized stakeholders in battery recycling. On the other hand, related industries such as WEEE or out of use vehicles (OUH) faced with growing battery flows, sometimes damaged, are highly exposed to risks and continue to work on the implementation and dissemination of procedures to secure their operations.

Second life

Despite the strong technical, economic and regulatory uncertainties related to the second life of electric vehicle batteries, most stakeholders agree that there is a lot of potential in this market. Many stand behind it and some accomplishments tend to confirm the interest of the second life. But the significant takeoff of the sector is dependent on a field that is still limited.

The metal costs and availability

The study focuses on 3 main metals, used for the manufacture of Li-ion batteries: Cobalt, Lithium and Nickel. The impact of growth in the Li-ion battery market will be very strong on the demand for Cobalt and Lithium but much lower on the demand for nickel, widely used by other industrial sectors. Although natural reserves and resources are sufficient in Cobalt and Lithium (at least in the medium term), the market is subject to strong fluctuations and fears the supply difficulties. This is due to particular factors, including a high concentration of deposits in countries that are sometimes politically unstable, an oligopolistic situation of mining stakeholders, and low-volume markets that can encourage speculation.

Cobalt adds an additional uncertainty since, being most often a co-product of copper and / or nickel extraction, its production depends on the evolution of the market for these metals. The long-term availability of Cobalt is a source of concern for battery manufacturers seeking to reduce its use on the one hand, and on the other hand to secure their supplies through different strategies regarding mining stakeholders and / or recycling activities.

State of the art on the reuse and recycling of batteries

In the context of strong market growth, faced with environmental issues related to the manufacture and end-of-life of li-ion batteries and the risk of depletion of resources

Etat de l'art sur le réemploi et le recyclage des batteries

Dans ce contexte de forte croissance du marché, face aux enjeux environnementaux liés à la fabrication et à la fin de vie des batteries Li-ion et face au risque de déplétion des ressources utilisées pour leur fabrication (métaux stratégiques : Cobalt, Lithium et Nickel dans une moindre mesure), la question du recyclage de ces batteries devient particulièrement prégnante. Pour les autres technologies de batteries (Ni-MH, Ni-Cd, Na-S...), bien que les enjeux de recyclage ne soient pas à négliger, ils apparaissent beaucoup moins importants au regard des volumes considérés.

L'étude passe rapidement en revue les enjeux et procédés de recyclage des différentes technologies de batteries avant de se concentrer sur les procédés de recyclage des batteries Li-ion.

Les procédés

La structuration de la filière de recyclage des batteries Li-ion fait face à plusieurs difficultés :

En premier lieu la diversité des batteries li-ion, aussi bien sur leur forme (petits formats de batteries portables, grands formats de batteries VEH contenant un système électronique de gestion – Battery Management System ou BMS -, diversité d'agencement des packs, etc...) que sur leur composition (LCO, LMO, NCA, NMC, LFP), entraînent une hétérogénéité des flux entrants, qui rend difficile la standardisation des opérations de pré-traitement et affecte le rendement global des procédés de traitement.

En second lieu, la teneur en Cobalt qui a la plus forte valeur, a tendance à diminuer dans les nouvelles chimies de batteries, ce qui dégrade l'intérêt économique du recyclage. Le cours du lithium qui ne représente que 2 à 3 % du poids des batteries reste par ailleurs trop faible pour que sa récupération (trop coûteuse aujourd'hui) change l'équation économique du recyclage.

On peut classer les procédés de recyclage selon deux logiques différentes :

La première est fondée sur les volumes traités et passe par l'utilisation d'un procédé robuste et tolérant vis-à-vis du flux entrant, tel que la pyrometallurgie qui produit des composés métalliques valorisables directement ou en passant par des intermédiaires d'affinage, dans différents secteurs industriels (superalliages, catalyseurs, pigments, etc...).

L'autre approche est fondée sur la maximisation de la valeur récupérée et passe par le développement de procédés de recyclage pour chacune des natures chimiques des batteries traitées (donc la maîtrise des flux entrants) telles que la valorisation directe ou l'hydrometallurgie qui permettent potentiellement une valorisation en boucle fermée.

On peut noter qu'un procédé hydro-métallurgique peut venir en complément d'un premier traitement pyro-métallurgique (en général une simple calcination qui élimine la matière organique).

Les particularités et les impacts environnementaux des 3 grandes familles de procédés sont discutés.

La cartographie des acteurs et description des procédés de réemploi et de recyclage

Plusieurs procédés sont ensuite décrits de manière détaillée. La sélection des procédés s'est faite dans la limite des informations disponibles et avec le souci de décrire des procédés exemplaires. L'exemplarité provenant de l'efficacité industrielle

used for their manufacture (strategic metals: Cobalt, Lithium and Nickel in to a lesser extent), the issue of recycling these batteries becomes particularly important. Other battery technologies (Ni-MH, Ni-Cd, Na-S...), although recycling issues are not negligible, appear much less important in terms of the volumes considered.

The study briefly reviews the issues and recycling processes of different battery technologies before focusing on recycling processes for Li-ion batteries.

The processes

The recycling network structuring of Li-ion batteries faces several difficulties:

First of all, the diversity of li-ion batteries, both in terms of form (small portable battery formats, large VEH battery formats containing a battery management system -BMS -, diversity of package layouts, etc.) and their composition (LCO, LMO , NCA, NMC, LFP), result in heterogeneity of the input streams, which makes standardization of pre-treatment operations difficult and affects the overall efficiency of the treatment processes.

Secondly, the contents in terms of Cobalt which has the highest value tends to decrease in new battery chemistries. The lithium price rate representing only 2 to 3% of the battery weight remains too weak for its recovery (too expensive today) to change the economic equation of recycling.

Recycling processes can be approached in two different ways:

The first approach is based on the volumes treated and goes through the use of a robust and tolerant process with respect to the incoming flow. Pyro-metallurgy for example which produces metal compounds that can be upgraded directly or via refining intermediates, in different industrial sectors (superalloys, catalysts, pigments, etc. ...).

The second approach is based on maximizing the recovered value and goes through the development of recycling processes for each of the chemical natures of the treated batteries (thus mastering the incoming flows) such as the direct recovery or the hydrometallurgy which both potentially allow a closed loop recovery. It may be noted that a hydro-metallurgical process can complement a first pyrometallurgical treatment (generally a simple calcination which eliminates organic matter).

The particularities and environmental impacts of the 3 main process families are discussed.

Stakeholder mapping and the description of reuse and recycling processes

Several methods are thereafter described in detail. The selection of processes was done within the limits of available information and with the aim of describing exemplary processes. The exemplarity is based on the industrial efficiency of the process itself, its theoretical potential for development (especially for the direct recovery that still remains in the state of industrial pilot) or strategic positioning on the recycling chain that it offers to its operator.

To date, only the recycling of high-grade Li-ion batteries (LCO) and the recycling of Ni-MH batteries are cost-effective.

du procédé en lui-même, de son potentiel théorique de développement (notamment pour la valorisation directe qui reste encore à l'état de pilote industriel) ou encore du positionnement stratégique sur la chaîne de recyclage qu'il offre à son exploitant.

A ce jour, seul le recyclage des batteries Li-ion à forte teneur en Cobalt (LCO) ainsi que le recyclage des batteries Ni-MH sont rentables.

Le potentiel de réduction des coûts de recyclage se situe principalement en amont de la chaîne, sur les opérations de pré-traitement : test/décharge, optimisation du réemploi, démontage et démantèlement.

Le développement du réemploi et l'automatisation du démantèlement s'ils apparaissent comme les principaux leviers ne peuvent être développés sans une coopération avec les fabricants et assembleurs de batteries et leur implication dans une démarche d'éco-conception. En effet, la rationalisation de ces activités n'est possible que par une standardisation au moins partielle de la configuration des batteries (qui permet l'automatisation du démontage et du démantèlement) et un accès aux informations du système de gestion de la batterie – BMS - pour optimiser le test et le réemploi des cellules.

La stratégie des acteurs

Le secteur de la fabrication des batteries est déjà aujourd'hui le principal consommateur de Cobalt et de Lithium (> 50 %) et absorbe aussi une part non négligeable de sel de Nickel de grande pureté (NiSO₄ en particulier). A l'avenir, si les recycleurs veulent sécuriser la valorisation de leurs extrants ils devront s'inscrire dans une filière permettant de produire des matières premières secondaires suffisamment pures pour permettre de fermer la boucle de recyclage.

Dans cette optique, l'intégration des activités d'affinage de métaux et donc la maîtrise des procédés hydro-métallurgiques apparaît comme un enjeu stratégique dans la chaîne du recyclage des batteries.

L'ensemble des acteurs de la chaîne (acteurs miniers, affineurs de métaux, fabricants de cathodes, fabricants de batteries et de VEH, recycleurs) se positionnent actuellement vis-à-vis du recyclage, en investissant directement ou en développant des partenariats.

Le contexte industriel et réglementaire qui diffère selon les grandes zones géographiques (Etats-Unis, Europe, Chine, Japon) façonne en grande partie leurs stratégies.

En Europe et au Japon, les réglementations qui permettent de garantir des volumes (essentiellement des batteries portables jusqu'ici) et le financement des opérations de recyclage ont favorisé l'émergence de spécialistes du recyclage des batteries. Ils sont souvent généralistes, intègrent des flux de batteries en mélange et ont une compétence spécifique dans le tri et la séparation des flux ; compétence qui présente moins d'intérêt dans la gestion des batteries de VEH que dans les batteries portables dont les technologies sont très diversifiées, collectées en mélange et non compatibles en matière de traitement.

Sur la partie traitement, la plupart exploitent des procédés pyrométallurgiques ou mécaniques qui préparent les matières à un traitement ultérieur. Ils sont ainsi dépendants des affineurs de métaux qui leur servent d'exutoires.

Aux Etats Unis et en Chine, le peu d'entreprise spécialisées dans le recyclage des batteries Li-ion laisse la voie libre aux acteurs amont et aval de la filière de fabrication des batteries. D'un côté, les spécialistes de la métallurgie extractive (par opportunité ils peuvent intégrer des batteries dans leur flux

The potential for reducing recycling costs lies mainly upstream of the chain, on pre-treatment operations such as testing / unloading, reuse optimization, disassembly and dismantling.

Even if they appear as main levers, the development of reuse and the automation of dismantling cannot be developed without the cooperation between battery manufacturers and assemblers along with their involvement in an eco-design approach. Indeed, the rationalization of these activities is only possible by at least a partial standardization of the battery configuration (which allows automation of dismantling and disassembly) and access to Battery Management System information to optimize the cell testing and reuse.

The stakeholder strategy

The battery manufacturing sector is already the main consumer of Cobalt and Lithium (> 50%) today and also absorbs a non-negligible share of high purity nickel salt (NiSO₄ in particular). In the future, if recyclers want to secure the recovery of their outputs, they will have to enter a sector that will produce secondary raw materials that are pure enough to be able to close the recycling loop.

In this perspective, the integration of metal refining activities and therefore the mastery of hydro-metallurgical processes appear to be a strategic issue in the battery recycling chain. All the stakeholders in the chain (mining stakeholders, metal refiners, cathode manufacturers, battery and EHV manufacturers, recyclers) are currently positioning themselves for recycling, either by direct investment or by developing partnerships.

They are largely shaped by the strategies of the industrial and regulatory context that differs according to the major geographical areas (United States, Europe, China, Japan).

In Europe and Japan, regulations that guarantee volumes (mainly for portable batteries so far) and the financing of recycling operations have favoured the emergence of battery recycling specialists. Often generalists, they integrate mixed battery flows and have a specific competence in sorting and separating flows; this competence is of less interest in the management of EHV batteries than in portable batteries whose technologies are highly diversified, collected in a mixture and are not compatible in terms of treatment.

On the treatment side, most of them operate pyrometallurgical or mechanical processes that prepare the materials for further processing. They are thus dependent on the metal refiners who serve as their outlets.

In the United States and China, the few existing companies specializing in the recycling of Li-ion batteries leave the way open to upstream and downstream stakeholders in the battery manufacturing industry. On the one hand, specialists in extractive metallurgy (when the opportunity arises, they can integrate batteries into their incoming flow) and on the other hand the manufacturers of batteries / EVH position themselves on the activities recycling (either by obligation or to secure their material supply).

In the upcoming years, the industrial landscape of battery recycling will have to evolve considerably: new capacities will have to be created and the sector will have to reinforce its development in the logic of circular economy, with higher recycling rates (thus more recycled metals) and more technological products at the end of the process (to be reused by the battery industry, with a maximization of the added value).

entrants) et de l'autre les fabricants de batteries/VEH (par obligation ou pour sécuriser leur approvisionnement matière) se positionnent sur les activités de recyclage.

Dans les années à venir, le paysage industriel du recyclage des batteries devra fortement évoluer : de nouvelles capacités vont devoir être créées et la filière va devoir renforcer son développement dans une logique d'économie circulaire, avec des rendements de recyclage plus élevés et des produits plus technologiques en sortie de procédé (réutilisables par l'industrie de la batterie, avec une maximisation de la valeur ajoutée).

Les stratégies des acteurs de la filière du recyclage s'organisent donc autour de l'affinage des métaux. Dans ce contexte où les enjeux industriels et financiers sont importants et la sécurisation des exutoires est un élément déterminant du positionnement, les opérateurs du recyclage partagent peu d'information sur la nature et la qualité de leurs produits en sortie et taisent leurs exutoires.

Evolution du gisement et R&D

Les procédés pyro-métallurgiques et hydro-métallurgiques utilisés dans le recyclage des batteries sont maîtrisés depuis longtemps par les acteurs de la métallurgie extractive. Il n'y a pas de révolution attendue sur ces procédés même si la R&D propose des voies d'amélioration pour les rendements de lixiviation et de réduction des impacts environnementaux dans le cadre des procédés hydro-métallurgiques. Ces travaux restent encore à l'état de brevets et leur possible industrialisation reste à démontrer.

En matière de procédé, la valorisation directe pourrait également apporter des solutions innovantes basées en particulier sur des procédés de tri mécanique performants. A ce jour, leur efficacité n'est pas démontrée et seuls des pilotes industriels ont été mis en œuvre.

Dans les années à venir, le gisement de batteries Li-ion va évoluer vers une diminution des teneurs en Cobalt et une augmentation des teneurs en Nickel dans les cathodes. D'ici cinq ans, devraient également arriver sur le marché des batteries à électrolyte solide et probablement une utilisation plus importante de silicium dans les anodes.

Même si ces évolutions ne semblent pas de nature à perturber les procédés existants, l'incertitude liée à la nature des flux entrants apparaît comme un frein au développement de procédés hydro-métallurgiques réellement dédiés et adaptés à des flux entrants spécifiques.

Vision prospective

Même en modérant l'optimisme ambiant concernant le développement du marché des VEH, le marché des batteries et plus particulièrement des batteries Li-ion va poursuivre sa forte croissance dans les années à venir.

En combinant des hypothèses de croissance de marché (2 scénarii), de durée de vie des batteries (2 scénarii) et de taux de réemploi (2 scénarii), l'étude propose une fourchette d'évaluation des volumes de batteries Li-ion en fin de vie sur la période 2020 – 2030. Les volumes en fin de vie augmentent logiquement avec le temps. La prise en compte d'une durée de vie plus longue pour les batteries de VEH et l'optimisation du réemploi ne font que retarder la fin de vie.

En moyenne les volumes en fin de vie doublent tous les 5 ans à partir de 2020 en Europe, aux Etats Unis et au Japon. En Chine les quantités sont multipliées par 10 entre 2020 et 2030.

The strategies of the stakeholders in the recycling sector are therefore organized around the refining of metals. In this context, where the industrial and financial stakes are high and the securing of the outlets is a determining factor in the positioning, recycling operators share little information on the nature and quality of their exit products as well as hiding their outlets.

Evolution of the deposit and R&D

The pyrometallurgical and hydro-metallurgical processes used in battery recycling have long been mastered by stakeholders in extractive metallurgy. There is no expected revolution in these processes, even though R & D proposes ways of improving leaching yields and reducing environmental impacts in hydro-metallurgical processes. These works are still in the state of patents and their possible industrialization remains to be demonstrated.

In terms of process, the direct recovery could also bring innovative solutions based particularly on efficient mechanical sorting processes. To this day, their effectiveness has not been demonstrated and only industrial pilots have been implemented.

In the years to come, the deposit of Li-ion batteries will evolve towards a decrease in the Cobalt contents and an increase in the nickel contents in the cathodes. In the next five years, the solid electrolyte battery market should also appear on the market and there will probably be a greater use of silicon in the anodes.

Even if these evolutions do not seem likely to disturb the existing processes, the uncertainty related to the nature of the incoming flows appears to be a brake on the development of hydro-metallurgical processes that are actually dedicated and adapted to specific incoming flows.

Prospective vision

Even with moderating the optimism surrounding the development of the EHV market, the market for batteries and more particularly Li-ion batteries will continue to grow strongly in the coming years.

By combining assumptions of market growth (2 scenarii), battery life (2 scenarii) and re-use rates (2 scenarii), the study proposes an evaluation range for the end of life Li-ion battery volumes over the period 2020 - 2030. End-of-life volumes logically increase over time. The consideration of a longer life span for HEV batteries and the optimization of re-use merely reinforces the fact that the end of life is delayed.

On average, end-of-life volumes double every 5 years from 2020 in Europe, the United States and Japan. In China the quantities are multiplied by 10 between 2020 and 2030.

The study, differentiated according to these four geographical zones, represents nearly 90% of the world market and shows that recycling capacities, of the order of 85 000 tonnes / year currently worldwide, are quickly insufficient on all areas (between 2020 and 2025). Beyond 2030, end-of-life battery volumes continue to increase even more.

It is to be reminded, however, that end-of-life battery volumes are estimated based on the assumption that 100% of the EHV batteries and end-of-life electric buses are captured by the recycling system (and a capture rate similar to the

L'étude différenciée en fonction de ces quatre zones géographiques représentant près de 90 % du marché mondial et montre que les capacités de recyclage, de l'ordre de 85 000 tonnes/ an actuellement à l'échelle mondiale, s'avèrent rapidement insuffisantes sur toutes les zones (entre 2020 et 2025). Au-delà de 2030 les volumes de batteries en fin de vie continuent à croître de manière encore accentuée.

Rappelons cependant que les volumes de batteries en fin de vie sont évalués dans l'hypothèse que 100% des batteries de VEH et bus électrique en fin de vie sont captés par la filière de recyclage (et un taux de captage similaire à la filière Européenne pour les autres types de batteries). L'évaluation des volumes en fin de vie est donc basée sur un taux de collecte élevé.

Or, l'expérience nous démontre qu'en l'absence de réglementations contraignantes (obligation de recyclage et obligation de financement type filière REP), seule une faible quantité de batteries en fin de vie est réellement recyclée.

La réglementation déjà avancée en Europe et au Japon continue de promouvoir le développement des activités de recyclage.

La Chine affiche depuis début 2018 une forte volonté politique (suivie d'une stratégie industrielle et d'une capacité de financement suffisante) de mettre en œuvre une filière de recyclage sous la responsabilité des fabricants de VEH. En s'appuyant sur le savoir faire des fabricants de précurseurs pour cathodes, et dans une logique d'économie circulaire, la filière pourrait rapidement être opérationnelle et compétitive.

Aux Etats-Unis, où les réglementations contraignantes à l'échelon fédéral ne semblent pas à l'ordre du jour seules 5 % des batteries Li-ion en fin de vie sont actuellement recyclées, 2 % en Australie.

Ainsi, le levier réglementaire semble nécessaire afin de mobiliser et orienter les flux de batteries en fin de vie vers des opérateurs de recyclage. La promesse de volumes importants, la garantie d'un financement des opérations de collecte et traitement sont des éléments essentiels pour donner une visibilité aux industriels et leur permettre d'investir dans de nouvelles capacités et de nouveaux procédés.

European other types of batteries). The evaluation of end-of-life volumes is therefore based on a high collection rate.

However, experience shows us that, in the absence of binding regulations (recycling obligation and the EPR type of financing obligation), only a small amount of end-of-life batteries is actually recycled.

Legislation already advanced in Europe and Japan continues to promote the development of recycling activities.

Since the beginning of 2018, China has displayed a strong political will (followed by an industrial strategy and sufficient financing capacity) to implement a recycling system under the responsibility of the manufacturers of HEV. By relying on the know-how of precursor manufacturers for cathodes, and in a logic of circular economy, the sector could quickly be operational and competitive.

In the United States, where binding regulations at the federal level do not seem to be on the agenda yet, only 5% of end-of-life Li-ion batteries are currently recycled, 2% in Australia.

Thus, regulatory leverage seems necessary in order to mobilize and steer end-of-life battery flows to recycling operators. The promise of large volumes, the guarantee of a financing of the operations of collection and treatment are essential elements to give a visibility to the industrials and to allow them to invest in new capacities and new processes.