

L'hydrométallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques

Pascal Muller, Directeur, Pôle Hauts de France et Grand Est, Sarpi Veolia (*Figure 1*).

1 Les métaux, une nouvelle ressource stratégique dans notre société

1.1. Une explosion de la demande en métaux

A. Les batteries, une petite partie des déchets métalliques mais en forte croissance

Les batteries de véhicules électriques et les déchets qu'ils induisent contiennent des métaux ainsi que d'autres matériaux minéraux : plastiques, solvants, carbone. D'autres typologies de déchets contiennent également des éléments métalliques et font

l'objet de travaux et de procédés de récupération. Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur le traitement, le recyclage et la récupération des métaux contenus dans les batteries en fin de vie (*Figure 2*).

Une grande partie des activités industrielles utilisent des métaux et sont donc productrices de déchets métalliques (voir par exemple le chapitre « Tri et valorisation de mâche-fers¹ d'incinération d'or-

1. Mâchefer : matériaux incombustibles résiduels après l'incinération du charbon ou des ordures ménagères.

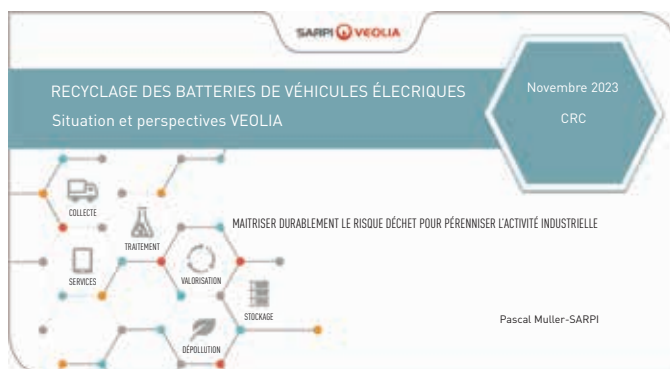


Figure 1

Le cycle de vie des batteries électriques et l'action de Veolia sur le recyclage.



Figure 2

Les métaux issus de divers déchets, une ressource précieuse à valoriser.

dures ménagères », d'Hervé Antonsanti). Ces métaux proviennent souvent des objets du quotidien. On en a cité ici quelques-uns pour souligner que dans ces déchets se trouvent des terres rares², des métaux stratégiques et divers

2. Terres rares : 17 éléments chimiques font partie des « terres rares », ainsi désignées à cause de leur faible concentration dans la croûte terrestre qui rend donc leur extraction difficile.

autres éléments qu'il convient de récupérer et de recycler.

B. Au cœur des évolutions technologiques, l'emploi des métaux

Lorsqu'on parle de « dématérialisation de l'économie », ou de « mobilité électrique », il est important de réaliser que derrière ces termes se cachent des équipements qui contiennent des métaux (Figure 3).

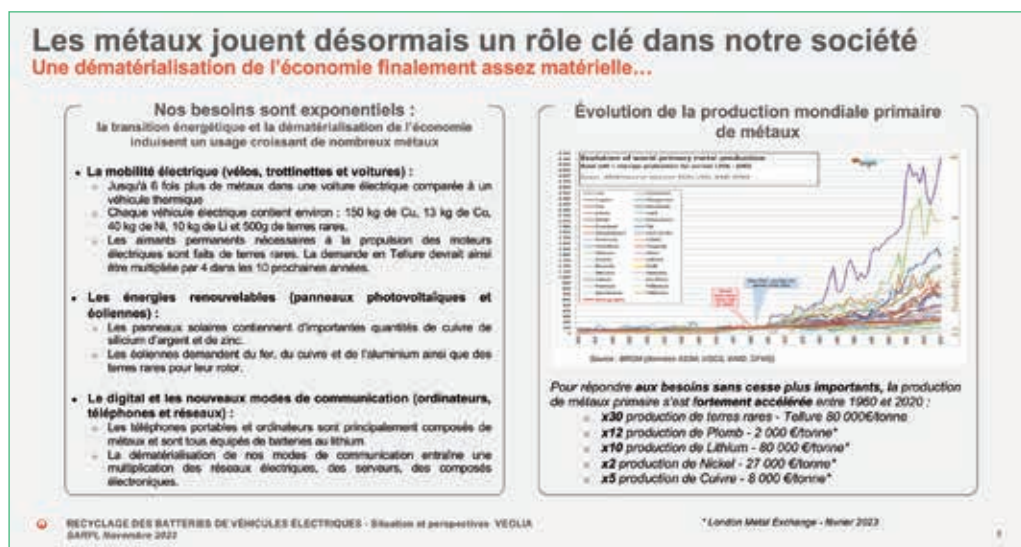


Figure 3

Explosion de la demande en métaux accompagnant la transition énergétique et numérique.

Sans regarder le détail de chacune des courbes de la **Figure 3**, on perçoit les enjeux auxquels il faut faire face aujourd'hui en termes de besoins en métaux. De la mobilité électrique : voitures électriques, vélos électriques, trottinettes, jusqu'aux téléphones portables et ordinateurs, les nouveaux équipements regorgent de métaux, en particulier des métaux dits stratégiques.

Quand on parle d'énergie renouvelable, on parle de panneaux photovoltaïques ou d'éolien et donc de métaux. Lorsque l'on parle de dématérialisation ou de digital, on sous-entend des serveurs, des câbles pour transporter l'énergie ou pour transporter les données, des ordinateurs ou des téléphones portables. Et là encore, on parle de métaux. L'évolution sur les 60 dernières années (depuis 1960),

fait ressortir une véritable « explosion » de la production de métaux dans le monde (**Figure 3**, à droite). Les terres rares donnent la courbe la plus parlante [la courbe violette de la figure 3], avec une production multipliée par 30 ! D'autres éléments ont connu une croissance significative. Ainsi, la production de lithium ou de nickel, éléments présents dans les batteries, a été multipliée par 10 pour le lithium, et par 2 pour le nickel et 5 fois plus pour le cuivre, qui est abondamment utilisé dans toutes les applications qui concernent l'électronique, l'électricité, la mobilité.

1.2. Répartition de la production

La **Figure 4** donne des informations sur l'origine géographique de la production

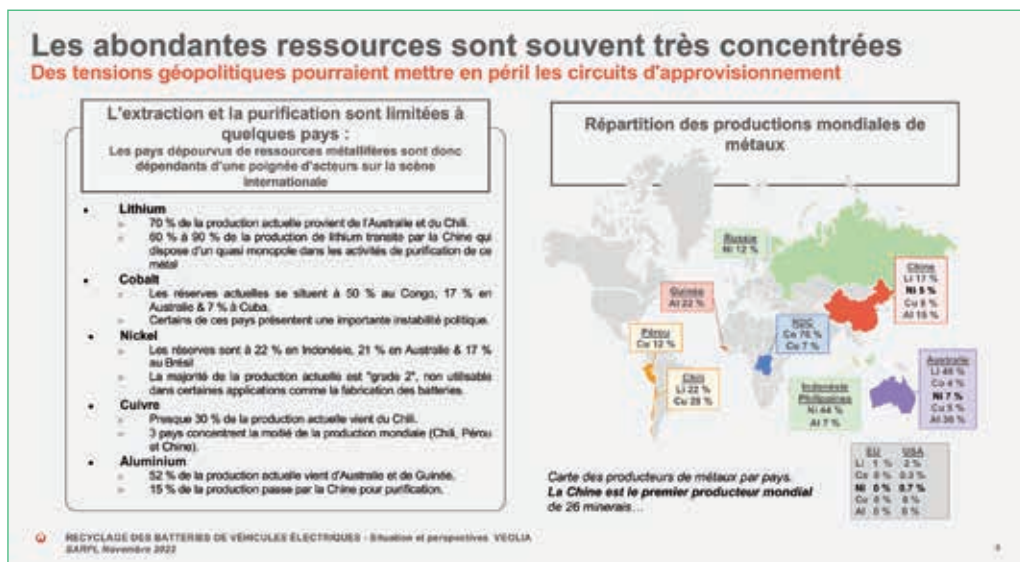


Figure 4

Les enjeux de l'approvisionnement en métaux stratégiques pour l'Europe.

des métaux. On savait qu'en France, on n'avait pas de pétrole. La question c'est : avons-nous des métaux ? La réponse est plutôt négative. En réalité, quand on regarde la répartition de la production (Figure 4) qui concerne non pas les gisements, mais la production mondiale de métaux, on constate que ces métaux sont majoritairement dans les régions non européennes, assez peu en Europe du Nord. La Chine apparaît comme l'un des producteurs importants de métaux, non pas parce que ces métaux en proviennent mais parce qu'ils y sont transformés. Ainsi, l'essentiel du lithium transformé pour obtenir le lithium utilisable dans les batteries l'est en Chine.

Pour les métaux, comme le cobalt, qui sont très présents dans les téléphones ou les ordinateurs portables, l'essentiel de la production et des gisements sont localisés au Congo. En termes de production des matériaux bruts,

donc de minerais ou de sels de lithium, c'est l'Amérique du Sud (le Chili, l'Argentine) qui domine, vient ensuite l'Australie. La Russie possède quant à elle des gisements significatifs de nickel. Une grande partie de ces pays ou de ces zones ne sont pas particulièrement de grandes démocraties et présentent des stabilités politiques discutables. Les enjeux géostratégiques liés à l'approvisionnement de tous ces métaux seront extrêmement prégnants dans les années à venir.

2 Les batteries de véhicules électriques

2.1. Composition d'une batterie

Une batterie pour automobile, c'est un objet de 300 kg (Figure 5). Plus exactement, c'était la base il y a quelques années lorsque l'objectif des producteurs de véhicules électriques était de faire un petit véhicule avec une autonomie de

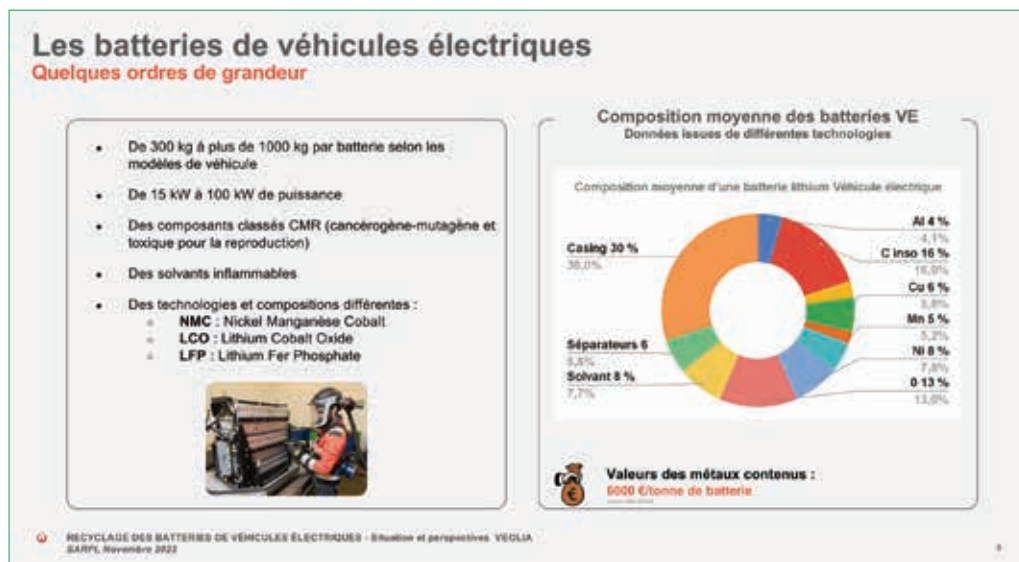


Figure 5

Composition d'une batterie de voiture électrique.

250 km voire 150 km, capable de répondre aux besoins du commun des mortels, c'est-à-dire entre 25 à 30 km par jour en excluant les grandes migrations de l'été.

En réalité, les évolutions réglementaires et les changements des besoins des utilisateurs ont poussé les constructeurs à produire des véhicules avec une autonomie de plus de 400 à 500 km et donc des batteries avec des puissances de 70 à plus de 100 kW qui pèsent entre 500 et 600 kg. Pour les bus électriques, on atteint des poids de 1 tonne à 1,5 tonne.

2.2. Une valeur extrêmement fluctuante

A. Des technologies s'appuyant sur des compositions différentes

Les batteries de véhicules électriques possèdent de fait de très bonnes performances et des capacités énergétiques significatives. Comme souvent

on obtient ces hauts niveaux technologiques, en faisant appel à des mélanges d'une grande complexité chimique. Sur la *Figure 5*, à gauche, sont indiquées quelques technologies par sigles (NMC, LCO, LFP), mais ils ne résument que des métaux majoritaires concernés. Dans les véhicules électriques, nous trouvons majoritairement des technologies NMC (nickel-manganèse-cobalt). Dans les téléphones portables, majoritairement des technologies LCO (lithium-cobalt-oxyde).

D'autres technologies sont également présentes sur le marché, comme la technologie lithium-fer-phosphate qui a l'avantage d'être beaucoup moins chère puisqu'elle ne contient pas de métaux coûteux comme le cobalt ou le nickel. Le cobalt, avec des variabilités très importantes sur un marché très fluctuant, vaut aujourd'hui entre 25 000 à 30 000 euros la tonne, il en valait 80 000 il y a 1 an. Le lithium vaut à peu

près 80 000 euros la tonne, il en valait 250 000 il y a 6 mois.

B. Composition moyenne pour un véhicule électrique

La **Figure 5**, à droite, donne une composition (pourcentages en masses) moyenne en métaux pour les batteries de véhicules électriques : 2 % de lithium, 3 % de cobalt (non indiqués sur la figure), 8 % de nickel, 5 % de manganèse. On trouve également des terres rares qui sont présentes dans l'électronique de la batterie. Par ailleurs, les batteries contiennent des solvants, donc des chaînes carbonées, et du graphite.

La valeur des métaux contenus dans une tonne de batterie sur la période de novembre 2023 est de 6 000 euros la tonne. Avec les variabilités indiquées

précédemment, on était plutôt de 10 000 à 12 000 six mois auparavant.

2.3. La demande et la production en Europe

A. Une demande plus forte que prévue pour les véhicules électriques

Il demeure très difficile de faire des projections de vente de véhicules électriques mais les tendances sont là ! Il y a une quinzaine d'années, Carlos Ghosn prédisait que 10 % du volume total de la production automobile à l'horizon 2020 serait électrique. Aujourd'hui, en Europe (2023), il s'agit plutôt de 15 %. La **Figure 6** représente (en vert clair) la courbe de mise sur le marché

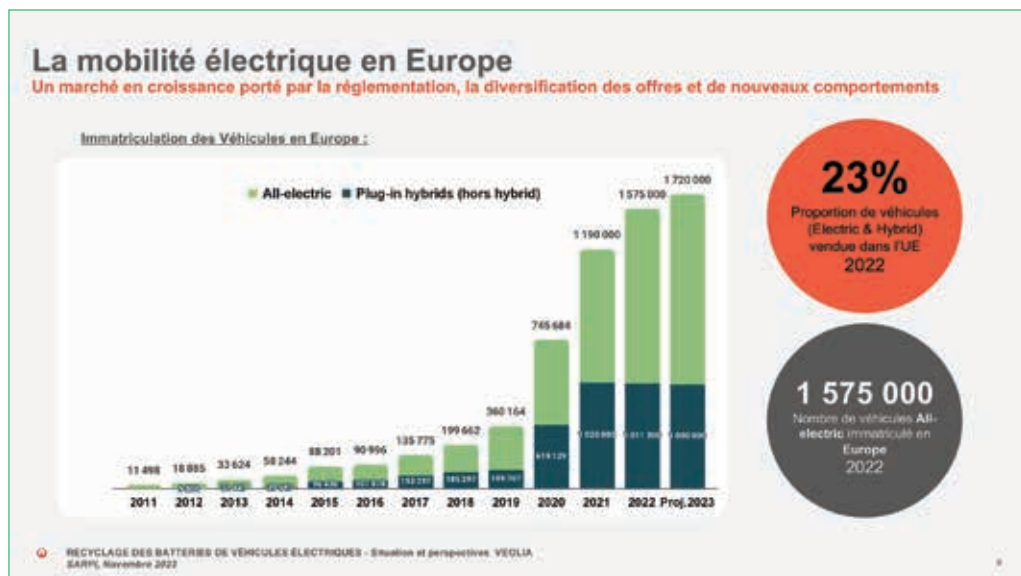


Figure 6

Déploiement de la mobilité électrique en Europe depuis l'année 2011. On note une forte accélération à partir de 2020 pour l'ensemble des véhicules électriques, portée en particulier par la technologie des véhicules hybrides (mixtes électriques/thermiques). Le taux de pénétration de l'électrique atteint 23 %, plus élevé qu'on ne le prévoyait il y a dix ans.

en Europe des véhicules tout électriques, et des véhicules hybrides (c'est-à-dire des véhicules qui ont une batterie à l'intérieur qui en général fait entre 50 et 70 kg), à la différence d'un véhicule tout électrique qui ne fonctionne qu'à l'électricité et a plutôt une batterie de 300 à 600 kg. Le taux de pénétration du véhicule électrique total (hybride et électrique) est d'environ 23 %. **C'est très significatif et beaucoup plus rapide que ce qui avait été envisagé.**

Globalement en Europe, c'est 1,5 million de véhicules tout électriques qui ont été vendus en 2022, et la tendance 2023 sera à peu près supérieure de 200 000. C'est plus de 600 000 tonnes de batteries mises sur le marché en 2023 qu'il faudra recycler dans les années à venir.

B. Vers une production européenne de batteries

Pour évaluer la quantité de déchets liés aux voitures électriques à traiter (Figure 7), il faut tenir compte des usines qui sont en train de s'implanter aujourd'hui en Europe : en Allemagne, dans le nord de la France, c'est le cas par exemple avec ACC, Verkor ou encore Envision, dans le nord de l'Europe en Suède et celles déjà présentes en Hongrie ou en Pologne pour ne citer que ces pays. Toutes ces usines sont ce que l'on appelle des gigafactories³.

Ces usines de production génèrent des déchets. Ces déchets sont des rebuts générés durant le processus de production des batteries qui se révèlent non conformes au

3. Usines géantes.

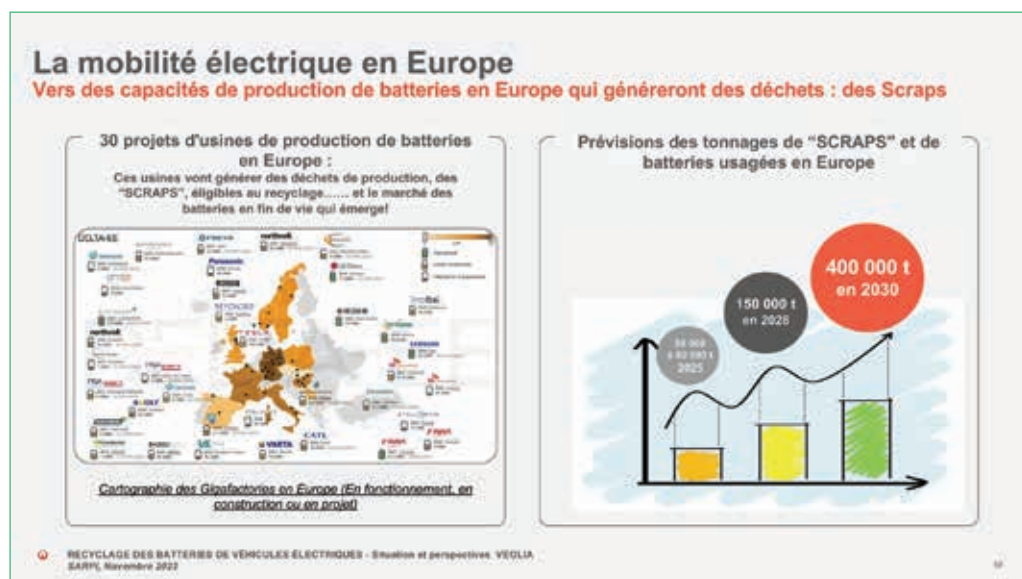


Figure 7

Le marché de la production et du recyclage de batteries en Europe. Prévision de l'accroissement de la production de batteries et de la génération de déchets associés en Europe.

standard qualité requis et ne peuvent donc être mis sur le marché. Cela peut représenter jusqu'à 10 % de la production. Les simulations de prévision présentées sur la **Figure 7**, à droite, sont basées sur ces estimations. Ainsi, en 2025, ces projections indiquent qu'il faudra recycler entre 50 000 et 80 000 tonnes de batteries en fin de vie et de résidus de production et jusqu'à 400 000 tonnes en 2030.

2.4. Une contrainte légale sur le recyclage

A. Des directives européennes de recyclage des déchets...

Pour répondre aux enjeux environnementaux et à la raréfaction de certaines ressources naturelles, L'Europe s'est dotée d'un cadre

réglementaire ambitieux. Une directive européenne a été mise en place et impose une obligation de recyclage stimulant le développement de filières de recyclage. Pour les batteries de véhicules électriques en fin de vie, il sera obligatoire de recycler 65 % de la masse globale de la batterie. À cela s'ajoute la nécessité d'inventorier en détail les métaux stratégiques contenus dans les déchets et de garantir des taux de recyclage par type de métal extrêmement ambitieux pour le nickel, le cobalt, le lithium, le cuivre (**Figure 8**).

B. Et sur les produits neufs

Un sujet extrêmement important lorsque l'on déploie des solutions de recyclage, est d'identifier des partenaires prêts à accepter un produit issu de recyclage. Il convient pour

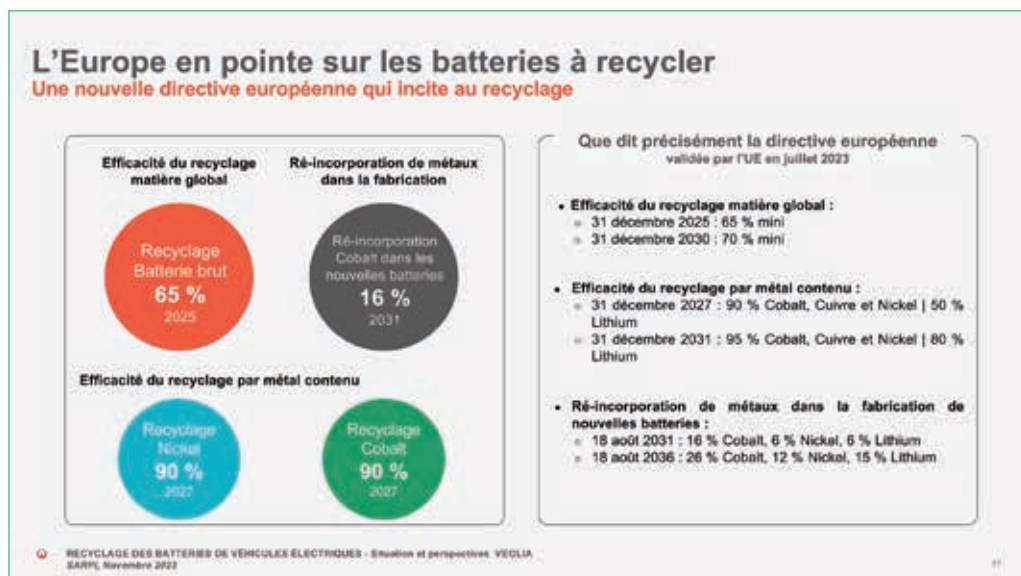


Figure 8

Objectifs européens sur le recyclage des métaux des batteries.

se faire de lutter contre les aprioris qui supposent que ce coproduit est de moins bonne qualité qu'un produit noble.

Afin d'inciter le marché à évoluer, le législateur a stipulé qu'à partir de 2031, les batteries mises sur le marché européen devront contenir un pourcentage minimum de métaux issus du recyclage. Ainsi, en 2031, il faudra démontrer que 16 % du cobalt global contenu dans une batterie provient du recyclage. Cette mesure doit permettre à l'ensemble de la filière (constructeurs automobiles, fabricants de batteries, fabricants de précurseurs et transformateurs de métaux stratégiques, recycleurs...) de trouver les meilleures solutions pour aboutir à des schémas de recyclage en boucle fermée.

3 Le recyclage des batteries en France chez Sarpi-Veolia

3.1. Des choix de positionnement pour les acteurs du recyclage

A. Insertion du recyclage dans le cycle de vie d'une batterie

Considérons le cycle de vie d'une batterie et la place du recyclage dans sa valorisation (**Figure 9**).

Lorsque la batterie ou le véhicule arrive en fin de vie, la batterie est extraite et diagnostiquée. Si aucune solution de réemploi n'est possible, elle devient un déchet.

B. Vers une matière première ou un produit plus élaboré, le choix des entreprises

La question du positionnement du recyclage dans la chaîne

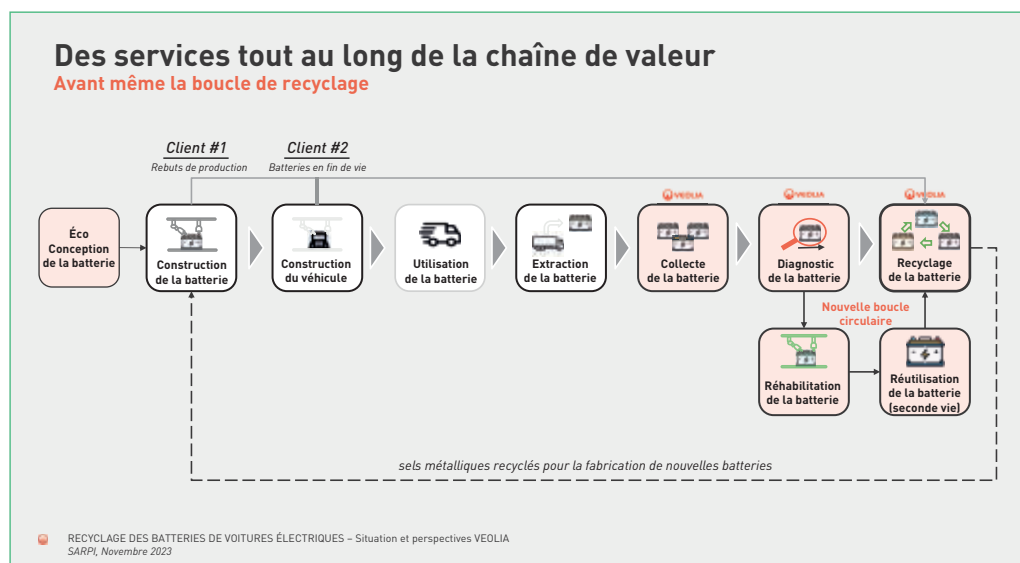


Figure 9

Cycle de vie d'une batterie pour automobile. On distingue, en carrés blancs les étapes de la vie « utile » de la batterie, de sa construction à sa mise au rebut, et en carrés ocre celles qui correspondent à son recyclage – de la collecte à la réhabilitation.

de valeur est fondamentale. La directive impose à terme la réutilisation de métaux issus du recyclage pour la production de nouvelles batteries mises sur le marché en Europe. Mais il existe plusieurs chemins possibles pour fermer la boucle du point de vue du recycleur. En particulier de savoir jusqu'à quel niveau de pureté on doit aller et pour quel positionnement dans la chaîne de production des batteries :

– Est-ce que je me positionne en tant que producteur de produits finis ? Auquel cas, le recycleur produit un nickel de très haute pureté et se met en concurrence avec les acteurs miniers et métallurgistes qui fabriquent du nickel de haute pureté dans des volumes bien supérieurs à la réalité du marché du recyclage dans les années à venir.

– Est-ce que je fais le choix de construire des partenariats avec ces derniers ? Auquel cas, je reste dans ma zone de compétence et d'un déchet très complexe, variable et dangereux, le recycleur produit ce qui va constituer une matière première secondaire à introduire dans la chaîne de production en amont des procédés d'affinage conduisant à la production de métaux au grade batterie.

Dans cette deuxième option, l'opérateur substitue une fraction du nickel, du cobalt et du lithium issue des mines par un métal issu du recyclage avec des propriétés et qualités conformes au cahier des charges initial (Figure 10). La stratégie est de leur fournir des produits monométalliques d'une pureté suffisante pour qu'ils soient remis directement

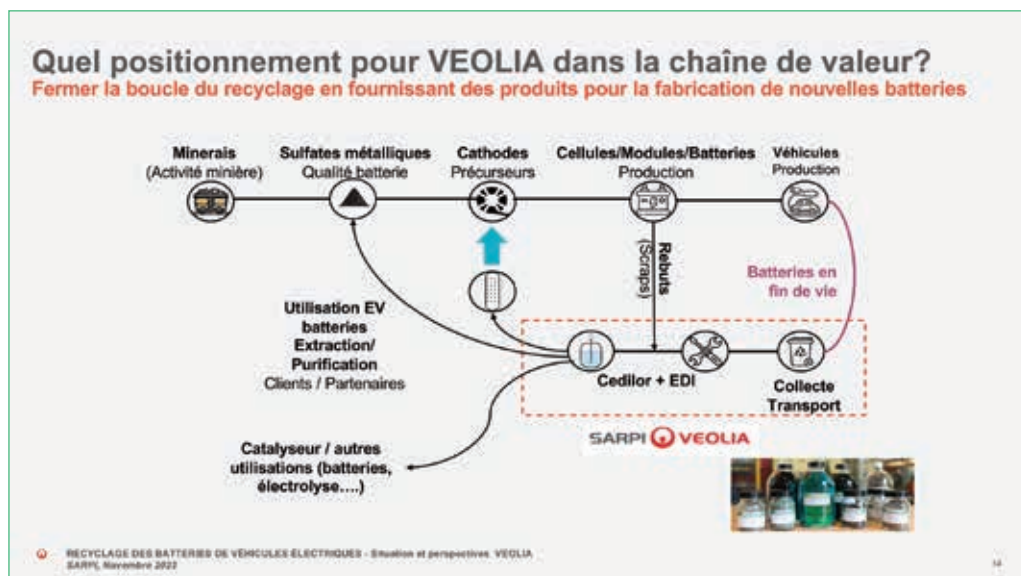


Figure 10

Le rôle de VEOLIA dans les opérations de recyclage.

dans la chaîne de production de batteries. **C'est ce choix que fait Veolia.**

3.2. Première étape : traitement physique de la batterie

A. Deux usines aux spécialités différentes

Deux usines situées dans l'Est de la France opèrent le recyclage des batteries de véhicules électriques à différentes étapes du procédé (**Figure 11**).

Le site de Dieuze recycle depuis plus de 25 ans des piles et des batteries, historiquement issues des téléphones et équipements portables. Depuis une dizaine d'années, elle travaille en partenariat avec les industriels de l'automobile, avec les industries de production de batterie pour

développer des solutions de recyclage des métaux présents dans ces nouvelles typologies de batteries utilisées pour la mobilité. Cette usine est dédiée aujourd'hui aux premières opérations de décharges, démantèlement et séparation des fractions unitaires par voies mécanisées.

Le site de Cedilor est, pour sa part, dédié au traitement et au recyclage des déchets dangereux, tous types confondus. Sur ce site (**Figure 11**), une première unité de recyclage par voie chimique des métaux contenus dans la *black mass*, le constituant des batteries contenant les métaux stratégiques, est en cours de démarrage.

B. Le démantèlement de la batterie

Une batterie de véhicule électrique pèse entre 300 et 500 kg

Une nouvelle filière de valorisation des batteries

Deux usines VEOLIA spécialisées dans le recyclage chimique en Région Grand Est

EDI – Fr 57 Dieuze
(Site dédié au recyclage des batteries)



Opère depuis 25 ans des outils de recyclage de batteries « 8 000 t/an » de toutes technologies (Alcaline, NiCd, LiP, Li-ion,...)
Voies mécaniques (tri, broyage, criblage)
Voies chimiques (recyclage des batteries Ni/Cd)

CEDILOR – Fr 57 Amnéville
(site multi-activités de recyclage)



Opère depuis 50 ans des unités de traitement et de recyclage des déchets dangereux : Tri, broyage, déconditionnement, procédés chimiques, biologiques et thermiques.
Hydrométallurgie extractive du nickel et du zinc.

RECYCLAGE DES BATTERIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES – Situation et perspectives. VEOLIA SARLPI, Novembre 2023

Figure 11

Les usines de Veolia dédiées au recyclage de batteries.

et contient généralement une énergie résiduelle pouvant présenter des risques lors des premières étapes de démantèlement. La première opération consiste donc à mettre la batterie en sécurité, c'est-à-dire réaliser la décharge complète de la batterie par voie électrolytique ou électrique. Au terme de cette opération, le module est extrait.

C. Le broyage et la séparation

Les opérations sont schématisées sur la **Figure 13**.

L'opération de broyage est réalisée en voie « humide » afin de limiter les phénomènes d'inflammabilité des solvants contenus dans les modules.

Cette première étape conduit à la production (voir le cercle photographié sur la **Figure 13**) de broyats grossiers. Ces broyats sont orientés vers une

unité mécanisée permettant de séparer les différentes fractions par des techniques granulométriques⁴ et aérauliques⁵. Le cuivre et l'aluminium (l'anode et la cathode) sont récupérés séparément ainsi qu'une partie de l'emballage de la coque, principalement du fer et de l'inox. La *black mass* représente à peu près 30 % du poids de la batterie. Cette matière contient l'ensemble des matériaux stratégiques : le lithium, le cobalt, le nickel, ainsi que du manganèse pour certaines technologies. Le cuivre et l'aluminium comme le fer et l'inox sont orientés vers des

4. Granulométrie : séparation basée sur la taille des grains.

5. Système aéraulique : système de séparation basé sur la différence de densité des matériaux, utilisant un flux d'air.



Figure 12

Premières étapes du recyclage : sécuriser et démanteler la batterie.

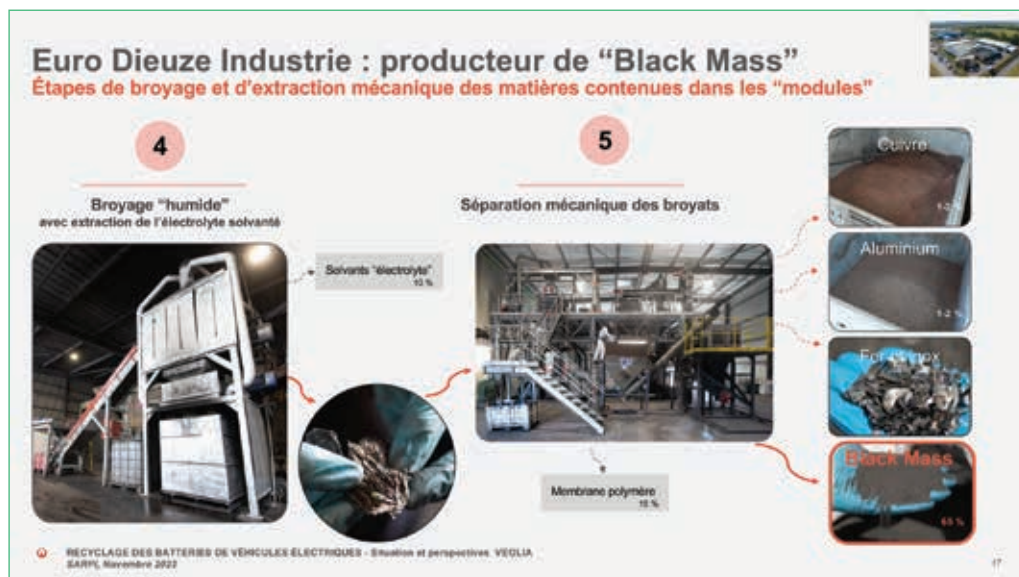


Figure 13

Obtention de matières broyées.

industries classiques de production par voies métallurgiques.

3.3. Puis traitement chimique

A. Un mélange de nombreux métaux

La *black mass* est l'enjeu fondamental de l'étape de recyclage car elle contient la

totalité des métaux considérés comme stratégiques. Un exemple de composition de *black mass* est présenté sur la *Figure 14* pour différentes technologies.

On observe une variabilité importante des compositions en fonction des différentes technologies. Pour le nickel, par exemple, on varie entre

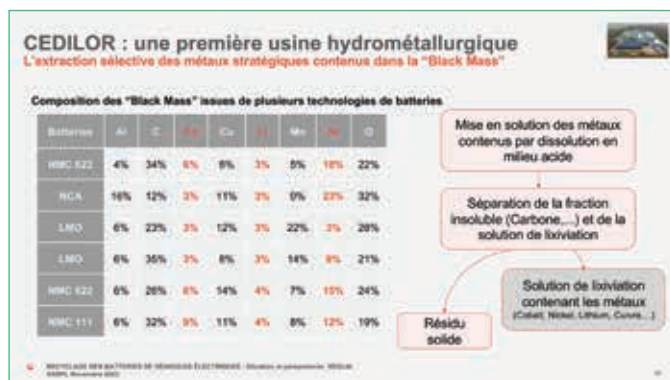


Figure 14

Métaux présents dans la « *black mass* » et étapes de traitement selon les différents types de batteries..

3 % et 18 %. Pour le cobalt, de 3 à 6 %.

L'objectif du procédé est de séparer les six métaux présents dans la matrice.

B. L'extraction sélective des différents métaux

La première étape consiste à mettre en solution la *black mass* de manière à dissoudre les métaux et obtenir un lixiviat⁶ sur lequel on va mettre en œuvre des opérations de séparation (Figure 15).

La Figure 15 présente quelques résultats d'analyses obtenues

6. Lixiviat : solution obtenue après l'opération de lixiviation. La lixiviation consiste à mettre les métaux en contact avec une solution aqueuse, souvent acide, de manière à permettre leur dissolution dans l'eau puis leur récupération ultérieure.

sur les fractions mono-métalliques qui sortent des étapes de séparation des lixiviats et qui sont essentiellement des oxy-hydroxydes métalliques. L'hydroxyde de nickel par exemple contient des concentrations extrêmement faibles en métaux « non désirables » comme le cuivre, l'aluminium, le cobalt, ou le fer.

C. Vers l'échelle industrielle

Après une période de validation à une échelle pilote semi-industrielle (Figure 16), la décision a été prise de passer à l'échelle industrielle. La construction d'une nouvelle installation a démarré en février 2022.

La Figure 16 montre quelques photos des équipements. Le démarrage est prévu pour janvier 2024 avec une capacité de

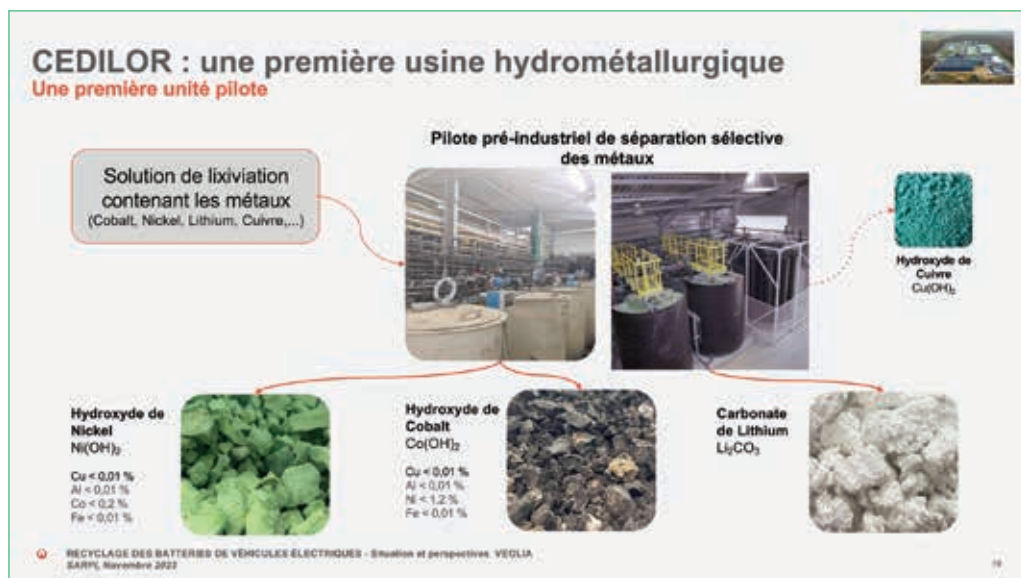


Figure 15

Produits obtenus après traitement de la black mass.



Figure 16

Usine de traitement hydrométallurgique : de la « black matter » aux métaux.

7 000 tonnes de *black mass* par an, ce qui représente près de 20 000 tonnes de batterie. Le CAPEX⁷ (investissement industriel) est de 18 millions

7. CAPEX : abréviation de l'anglais « CAPital EXpenditure », signifiant « dépenses en capital ». Pour usine cela recouvre notamment l'ensemble des coûts liés à l'implantation et à l'achat du matériel industriel.

d'euros pour un objectif de chiffre d'affaires de 20 millions d'euros annuellement à pleine capacité.

L'analyse carbone prévisionnelle estime un CO₂ évité de 1,5 tonne par tonne de batterie recyclée par rapport à une production de batterie issue uniquement de métaux ou de minerais natifs. C'est bien un impact positif sur les émissions de CO₂.

Conclusion

Ce chapitre sur le recyclage des batteries des véhicules électriques dépasse son strict objectif. Il est exemplaire de toute une évolution vers le respect de l'environnement et des ressources qui s'impose maintenant à l'industrie. Ces programmes ne sont plus des gadgets pour faire

plaisir aux écologistes : tous ont maintenant compris qu'on ne pouvait plus s'y soustraire sous peine d'être éliminés par la concurrence.

Et on voit ici les efforts, d'abord de compréhension puis d'adhésion à l'objectif, que cela entraîne. Ensuite, de nouveau, appel à la technique : il faut inventer comment modifier ses procédés, ses outils, ses partenaires pour rester « dans le coup » en ayant intégré les impératifs de l'environnement et du respect des ressources. On voit bien la démarche exigeante qui s'est mise en place à propos des batteries : d'abord l'analyse d'une question que l'on croyait simple mais qui est complexe, définir la nature même de « l'objet batterie », puis invention de procédés de collectes qui ne doivent pas être aveugles mais préparer au tri, invention de principes techniques en laboratoire, passage à l'échelle supérieure par la création et l'exploitation de pilotes industriels, changement d'échelle encore avec la construction d'installations industrielles et l'implantation sur des marchés internationaux et ce n'est pas fini... Reste à tout optimiser au fil des expériences acquises et, car l'entreprise Veolia en a les capacités, à s'imposer sur le plan mondial grâce à de nouvelles aventures industrielles, passage aux très grandes échelles.

Ce qui nous est conté là par Veolia, ses efforts continus et impressionnants, sur plusieurs années voire plusieurs décennies, c'est la démarche qui s'impose à toutes les branches industrielles. Grâce à cet exemple on saisit maintenant ce qu'il y a vraiment derrière les mots populaires et publicitaires de « respect de l'environnement » : c'est beaucoup de compétences, de pluridisciplinarité, de technologie, de volonté de collaborer, de volonté et de persévérance pour assurer le succès de tous et la possibilité de poursuivre nos acquis techniques.