



HAL
open science

La fin de vie des batteries des véhicules électriques, un impensé de la transition énergétique ?

Louise Hurel, Robin Girard

► To cite this version:

Louise Hurel, Robin Girard. La fin de vie des batteries des véhicules électriques, un impensé de la transition énergétique?. Ecole nationale Supérieure des mines de Paris. 2024. hal-04702677

HAL Id: hal-04702677

<https://hal.science/hal-04702677v1>

Submitted on 19 Sep 2024

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

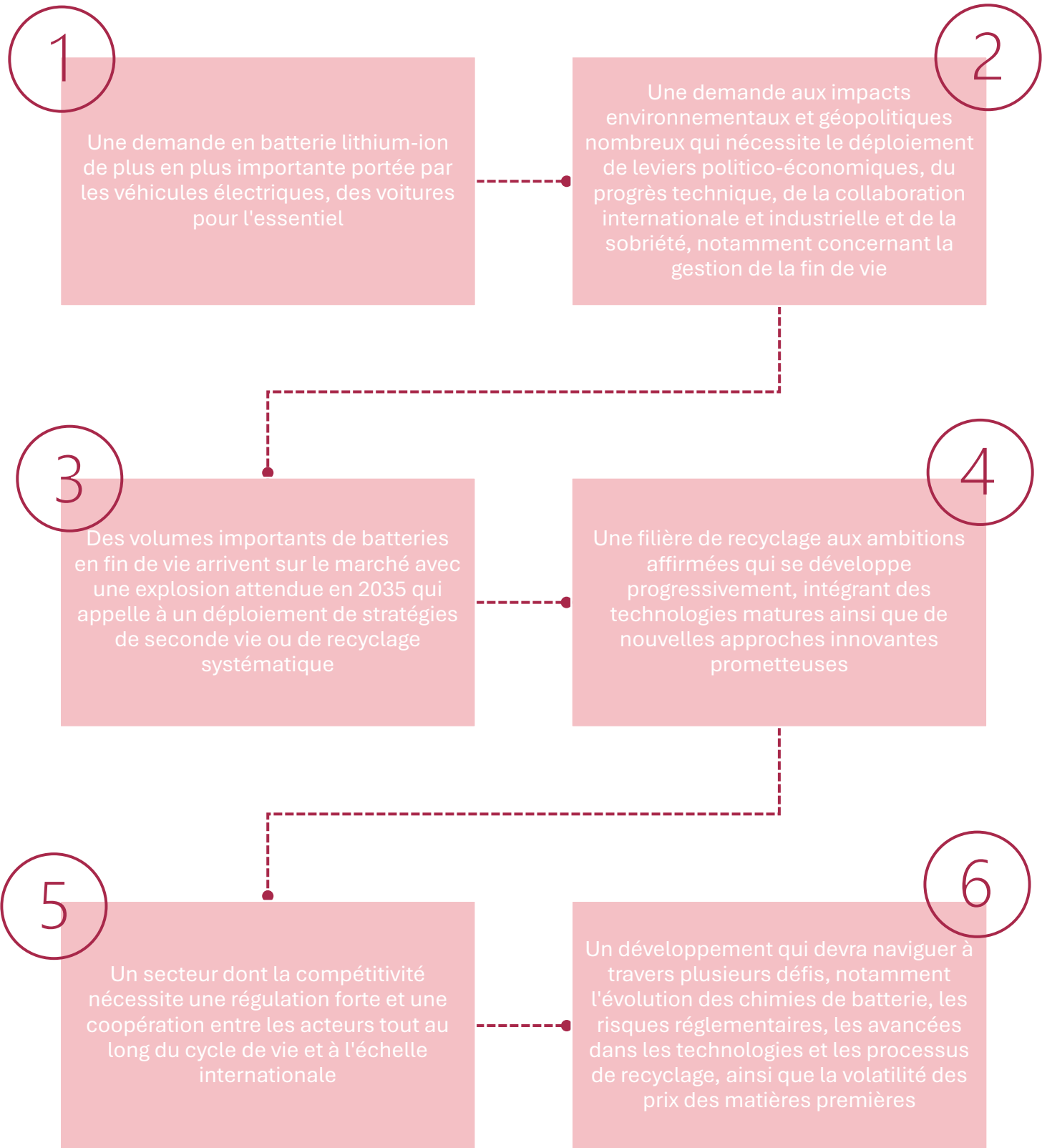
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



La fin de vie des batteries des véhicules électriques

Un impensé de la transition énergétique ?

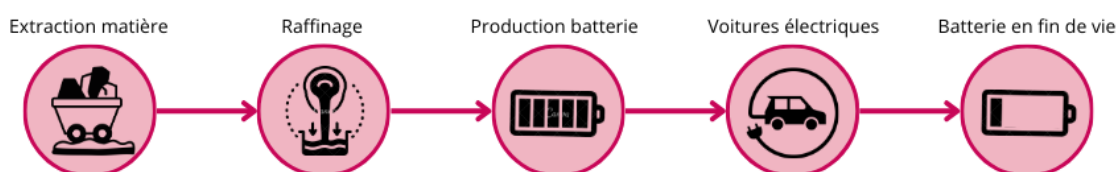
Enseignements clefs



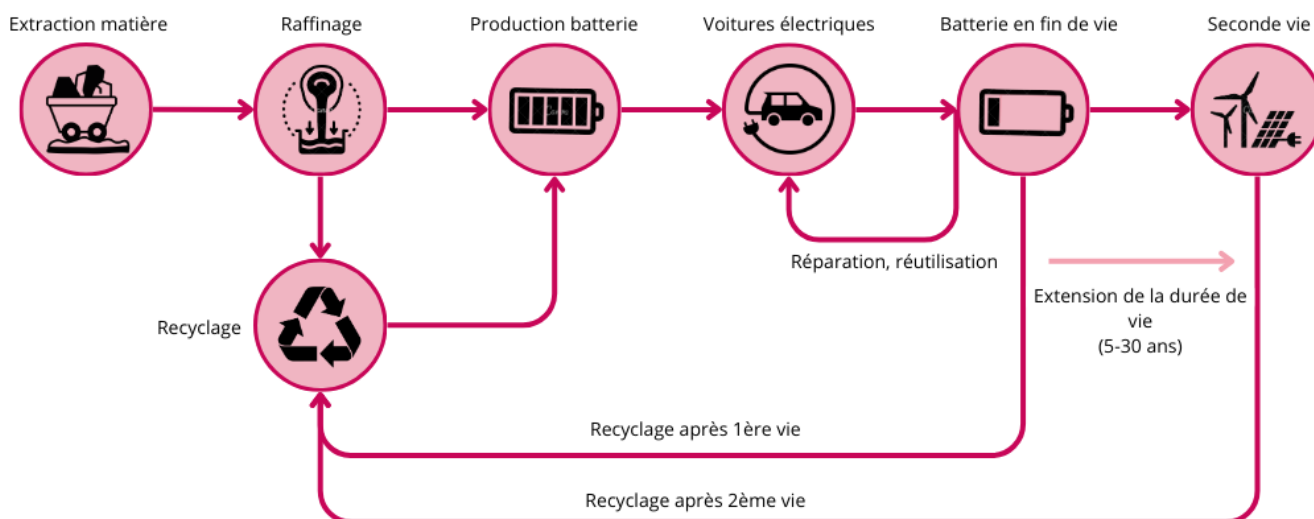
Sommaire

Introduction.....	4
Le marché des batteries lithium-ion au cœur de la décarbonation du transport routier.....	6
Une demande en batterie qui engendre une demande importante en matières premières	7
Pourquoi est-il important de parler de l'évolution des chimies des batteries dans le cadre de la fin de vie et du recyclage ?	10
Le potentiel inexploité du recyclage.....	17
États des lieux et comparaison techno-économique des technologies de recyclage	18
Marché et ambitions industrielles.....	28
Analyse de la réglementation européenne	32
La sobriété, une question de taille de batterie ?.....	36
Conclusion	37

D'un modèle linéaire...



... à un modèle plus circulaire

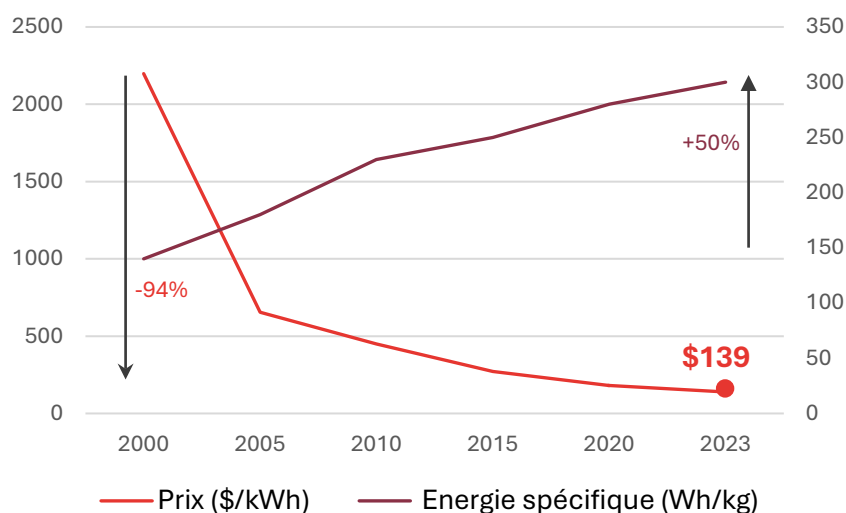


Introduction

L'essor fulgurant des véhicules électriques, soutenu par la baisse rapide des coûts [1][2][3], une série de développements technologiques et un cadre politique encourageant, les ont établis comme le choix dominant pour la décarbonation du secteur des transports routiers [4][5][6]. Cette transformation du système de transport exige une augmentation sans précédent de la capacité de production de batteries lithium-ion.

Évolution des batteries lithium-ion entre 2000 et 2023

Les prix ont chuté de 94% en 20 ans, indiquant un taux d'apprentissage des plus élevés dans les technologies bas carbone. En effet, les prix ont baissé en moyenne de 18,9 % chaque fois que la capacité installée a doublé. [9][1][3]



Évolution de la demande en batteries lithium-ion [9]

Dans ce contexte, les obstacles politico-économiques sous-tendant le développement d'une économie circulaire pour les batteries lithium sont nombreux [7][8][9]. La transition énergétique demande une gouvernance accrue, notamment pour les véhicules électriques dont les besoins en matières premières sont sources de tensions sociales, géopolitiques et environnementales nouvelles. Selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la demande en batteries pourrait être multipliée par 12 d'ici 2035 [9]. Cette croissance crée un besoin impératif d'anticipation concernant la gestion efficace du flux de batteries en fin de vie. En effet, la quantité vertigineuse de batteries en fin de vie qui devront être traitées dans les 15 à 20 prochaines années pose un défi colossal [10] qui dépasse de loin les capacités actuelles de traitement¹ [11] et nécessite une planification minutieuse, des innovations technologiques et un cadre politique sérieux pour assurer une gestion durable et responsable de ces déchets. Dans le monde, entre 2 et 4 millions de batteries de véhicules électriques devraient arriver en fin de vie en 2035, et entre 12 et 20 millions de batteries d'ici 2050² [12]. Selon d'autres scénarios, dans l'UE-27 uniquement, c'est de 1 à 3 millions de batteries de véhicules électriques qui sont attendus en 2035 [13].

¹ La capacité de recyclage existante en Europe ne pourrait traiter que 22% des batteries lithium-ion en fin de vie en 2030 [11]. Remarque : l'inventaire des unités de recyclage effectué est très bas comparativement à d'autres sources.

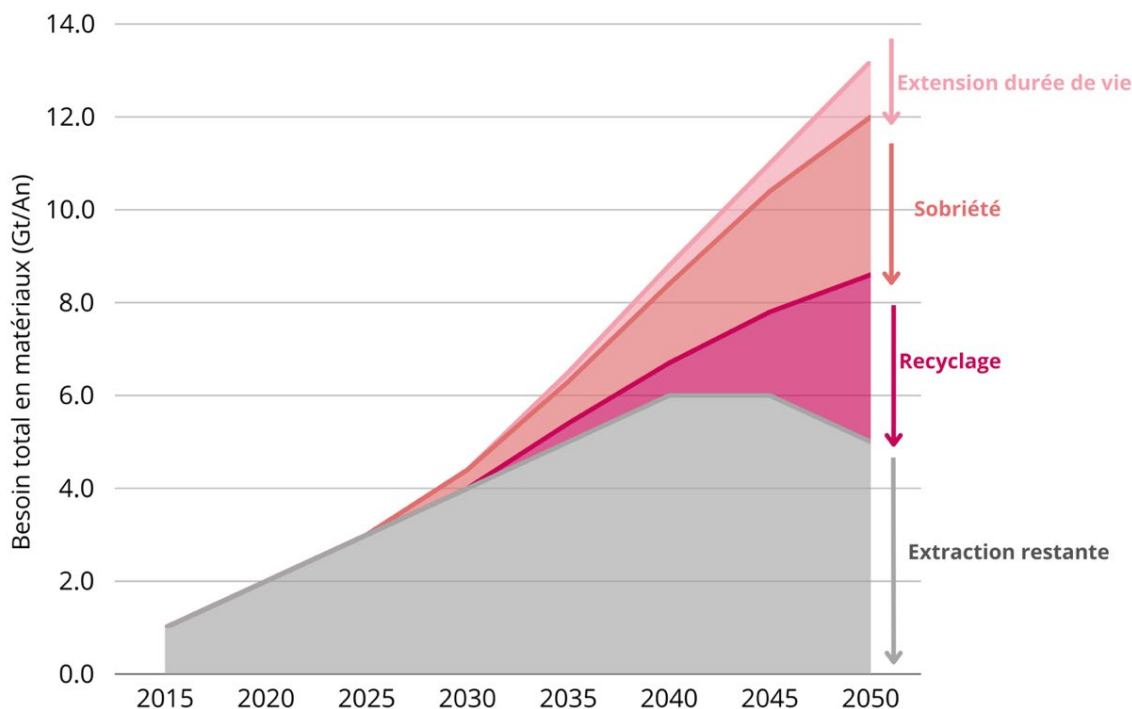
² Le volume pourrait être bien plus important dans le cadre du scénario Net Zero de l'Agence Internationale de l'Énergie [9].

Les conséquences environnementales, économiques et sociales du cycle de vie des batteries sont devenues une priorité sur les agendas politiques en raison de la croissance exponentielle de l'extraction des métaux [12], des impacts climatiques liés à la production des batteries [14] et des incertitudes concernant la sécurité, la recyclabilité et les conséquences environnementales en fin de vie des batteries [15]. Les stratégies de circularité, comme l'extension de la durée de vie ou encore le choix de batteries plus petites [10][13], permettent réduire l'extraction associée au besoin de métaux de 60% [16]. Parmi ces leviers, le **recyclage** occupe une place non négligeable et pourrait représenter 25% de cette réduction [16]. Au-delà, il est crucial de mettre en place des stratégies ainsi qu'une planification de la gestion de la fin de vie des véhicules électriques. En effet, les batteries, avant d'être recyclées, peuvent être d'abord réparées mais aussi avoir une seconde vie en tant que batteries de stockage stationnaire, représentant une opportunité de coupler l'arrivée des batteries de véhicule électrique en fin de vie avec le développement des énergies renouvelables³ [17][18]. Ce couplage existe déjà au long de la vie du véhicule électrique grâce au « smart-charging » et au « vehicule-to-grid » (V2G) [19]. Enfin, grâce au recyclage après la seconde vie, il est possible d'obtenir des matières premières secondaires réduisant ainsi l'impact de l'industrie minière et la demande de matières premières vierges [11][13][14][19].

Pour réaliser ces ambitions, il est essentiel que les annonces politiques et industrielles récentes, notamment européennes (voir p.32) [21] et chinoises⁴ [22], soient effectivement déployées et respectées. En outre, la sobriété et la recherche constante d'innovation [4] joueront un rôle essentiel dans la résolution de ces défis, en permettant de prolonger la durée de vie des batteries et de réduire leur impact environnemental global.

Impact des stratégies d'économie circulaire sur les exigences totales en matériaux associées à la production de métaux de 2015 à 2050 (2021) [16]

Les stratégies considérées ici sont : le recyclage, la sobriété (covoiturage principalement) et l'extension de la durée de vie grâce à des choix judicieux de batteries ou des habitudes bénéfiques de recharge ou de conduite. L'impact de la sobriété pourrait être amplifié par le choix de batteries de plus petite taille.



³ Le projet européen [Circusol](#) (*Circular Business Models for the Solar Power Industry*) s'intéresse de près à la coévolution des panneaux solaires et des batteries de véhicules électriques en fin de vie.

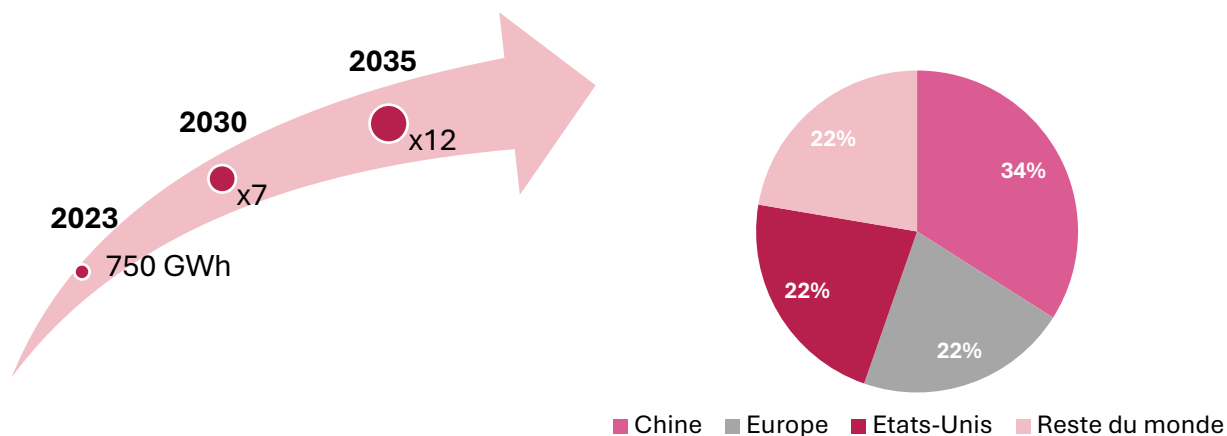
⁴ Voir la partie « Analyse de la réglementation européenne p.33

Le marché des batteries lithium-ion au cœur de la décarbonation du transport routier

En 2023, les véhicules électriques⁵ ont dominé le marché des batteries lithium-ion. En effet, les batteries des véhicules électriques ont regroupé 90% de la demande en batterie lithium-ion, pour un total de 750 GWh. Les 10 % restants se partagent entre les applications électroniques, informatiques et de communication (3C), le stockage d'énergie et d'autres usages commerciaux. La répartition géographique de cette demande montre une prédominance de la Chine (56 %), suivie par les États-Unis (23 %) et l'Europe⁶ (14 %). La Chine, l'Europe et les États-Unis sont actuellement les plus grands marchés de véhicules électriques, représentant 90 % du parc mondial.

Dans le scénario STEP⁷ de l'AIE, la demande de batteries pour véhicules électriques augmente de quatre fois et demie d'ici 2030, et presque de sept fois d'ici 2035 par rapport à 2023. Dans le scénario NZE⁸, la demande est nettement plus élevée, multipliée par 7 en 2030 et 12 en 2035. En moyenne, la flotte de véhicules électriques augmente de 27 % par an jusqu'en 2035, atteignant ainsi 790 millions de véhicules électriques (sans compter les 2/3 roues). En 2035 la demande hebdomadaire pourrait être équivalente à celle de l'année 2019³ !

Évolution de la demande en batterie dans le scénario NZE et demande future par zone géographique en 2030 [9]



Les voitures resteront le principal facteur de cette demande, (environ 75 % dans le scénario APS⁹ de l'AIE en 2035). Pour les autres types de véhicules électriques - particulièrement les 2-3 roues et les camions [9]- cette part sera inférieure à celle constatée actuellement.

Dans l'Union Européenne, la demande annuelle de batteries destinées aux véhicules électriques et aux systèmes de stockage d'énergie devrait croître à 860 GWh d'ici 2030 et approcher les 1 500 GWh d'ici 2035 [23]. Cette estimation représente le seuil minimal anticipé, étant donné la progression vers l'élimination graduelle des ventes de nouvelles voitures et fourgonnettes à moteur thermique d'ici 2035 [24].

⁵ Le terme « véhicules » ne correspond pas à « voitures » mais prend aussi en compte les camions, les 2/3 roues etc. Notons néanmoins que les voitures correspondent à 90% de la demande en batterie lithium-ion pour les véhicules électriques.

⁶ Incluant l'UE, l'Islande, Israël, la Norvège, la Suisse, la Turquie et le Royaume-Uni

⁷ Le 'Scénario des Politiques Annoncées' (STEP) est conçu pour donner une idée de l'évolution actuelle des systèmes énergétiques, en se basant sur une analyse détaillée des politiques en vigueur.

⁸ Le scénario d'émissions nettes nulles d'ici à 2050 (scénario NZE) est un scénario normatif qui montre la voie à suivre pour que le secteur mondial de l'énergie parvienne à des émissions nettes nulles de CO2 d'ici à 2050, les économies avancées parvenant à des émissions nettes nulles plus tôt que les autres.

⁹ Le 'Scénario des Engagements Annoncés' (APS), introduit en 2021, illustre dans quelle mesure les ambitions et objectifs annoncés peuvent permettre de réaliser les réductions d'émissions nécessaires pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

Cette explosion de la demande en batterie est aussi influencée par la taille des batteries des véhicules électriques. C'est le cas par exemple aux États-Unis où la demande en batterie de véhicules électrique a augmenté de 80% en 2022 tandis que les ventes de véhicules électriques n'ont augmenté que de 55%. Cela s'explique notamment par la taille des batteries des véhicules électrique vendus (principalement des SUV ou des pickups) qui est 40% plus large aux États-Unis que dans le reste du monde [9]. Nous verrons plus bas l'importance de la taille de la batterie pour la durabilité.

Une demande en batterie qui engendre une demande importante en matières premières

Au fil du temps, la production de batteries pour véhicules électriques occupera une part de plus importante dans la demande en minéraux atteignant environ 40% de la demande liée aux technologies de la transition énergétique¹⁰ dans le scénario NZE en 2040. Dans un scénario tendanciel d'évolution des chimies¹¹, la demande pour le secteur des transports pourrait augmenter de 18 à 20 fois pour le lithium, de 17 à 19 fois pour le cobalt, de 28 à 31 fois pour le nickel, et de 15 à 20 fois pour la plupart des autres matériaux entre 2020 et 2050 [12]. Néanmoins, il est important de mettre en perspective les 43 millions de tonnes de minéraux nécessaires dans le NZE avec les 15 milliards d'énergie fossile extraite chaque année¹²[27][16]. Globalement, la transition énergétique réduira l'activité minière notamment grâce à la diminution de la consommation de charbon [27][16][26]. Au-delà, certains défis restent spécifiques au secteur du transport.

Évolution de la demande pour les véhicules électriques pour certains minéraux entre 2020-2050 [12]



¹⁰ Les technologies de transition prises en compte sont : les batteries des véhicules électriques, les moteurs de véhicules électriques, les panneaux solaires, les éoliennes, le réseaux électriques et le stockage réseau.

¹¹ Ces demandes sont associées à un scénario où les batteries NMC seront majoritaires dans le cadre d'un développement des véhicules électriques suivant le scénario STEP. Ces facteurs peuvent fortement changer si d'autres chimies prennent le dessus ou dans le cadre d'une accélération de l'électrification des véhicules. Par exemple, dans le cadre d'une évolution majoritaire des chimies LFP, la demande en nickel, manganèse et cobalt serait au moins 2 fois inférieures à celle annoncée ci-dessus [12].

¹² Il faut ici faire preuve de rigueur car pour obtenir les 43 millions de tonnes de minéraux, il faut en réalité extraire beaucoup plus de matière. En effet, la concentration des minéraux dans les minerais est souvent faible. Néanmoins, même en prenant en compte les déblais, la conclusion générale ne change pas : la transition énergétique réduit considérablement l'extraction [25] [26].



La décarbonation du **secteur des transports** entraînera un doublement de l'extraction des ressources en compensant la baisse de la production de combustibles fossiles par une augmentation massive de la production de métaux. Ces conclusions suggèrent que la transition énergétique dans ce secteur pourrait, paradoxalement, réduire les émissions de carbone tout en augmentant considérablement l'extraction des ressources [28].



En effet, les véhicules électriques nécessitent six fois plus de minéraux que leurs équivalents thermiques [9][24]. Néanmoins, il existe une différence conceptuelle importante : l'extraction de combustible fossile est continue et à "usage unique" tandis que l'extraction pour les batteries des véhicules est ponctuelle et réutilisable voir recyclable. Les minéraux forment ainsi un "stock" dont une partie variable peut-être en "roulement".

Comprendre l'ampleur de la demande future en matières premières pour les batteries de véhicules électriques est essentiel pour orienter les décisions stratégiques en matière de politique et d'industrie, ainsi que pour évaluer les risques d'approvisionnement et les impacts sociaux et environnementaux associés. Enfin, cela peut également être un argument de taille pour investir dans le recyclage systématique des batteries.

Les batteries lithium-ion sont composées d'une anode (l'électrode négative) et d'une cathode (l'électrode positive) immergées dans un électrolyte, avec une membrane les séparant. Les ions lithium présents dans l'électrolyte peuvent se déplacer librement entre les électrodes, générant ainsi un courant électrique.

Il existe différentes chimies de batterie qui correspondent à la composition de la cathode à l'origine des propriétés techno-chimiques diverses. On distingue principalement :

Caractéristiques techno-économiques des différentes chimies de batteries¹³

Batterie	NMC	LFP	NCA
Acronyme	Nickel Manganèse Cobalt	Lithium Fer Phosphate	Nickel Cobalt Aluminium
Part de Marché (Monde-2023) [9]	60%	32%	8%
Energie spécifique (Wh/kg) ¹⁴ (2020) [12]	150-260	90-130	180-200
Nombre de cycle ¹⁵ (2020) [30]	1000-2000	2000	500
Prix (€/kg) ¹⁶ [30]	15	12	20

¹³ Il est important de noter que les prix et les caractéristiques techniques évoluent au fil du temps !

¹⁴ Pour une voiture électrique de taille moyenne, soit de 66 kWh.

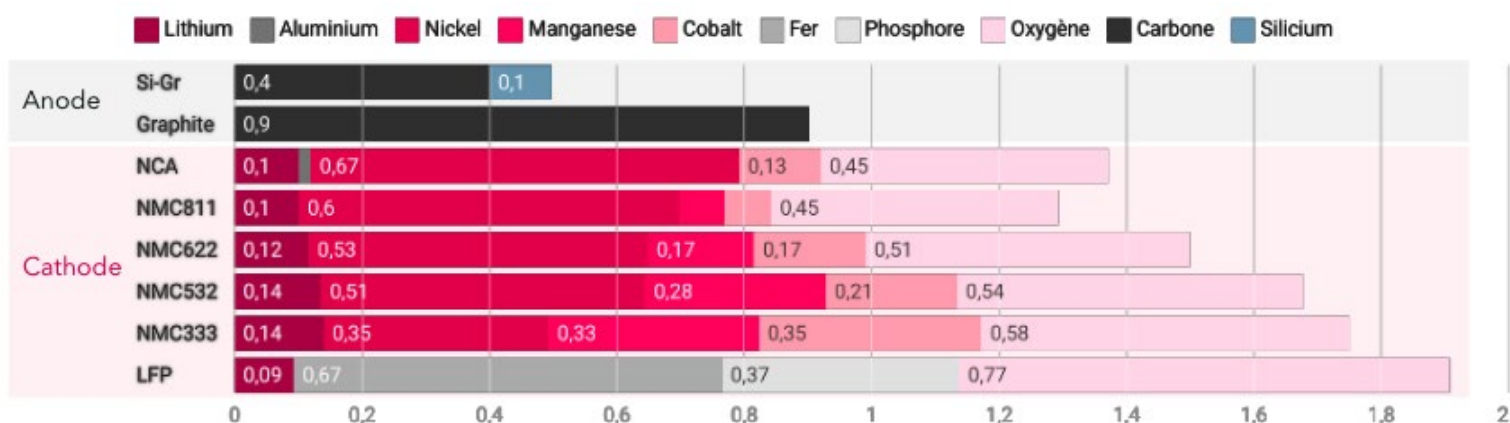
¹⁵ Le nombre de cycles de vie d'une batterie indique combien de fois elle peut être complètement chargée et déchargée avant que sa capacité ne tombe en dessous d'un seuil, généralement 80 % de sa capacité initiale.

¹⁶ Chiffre de 2022.

Les batteries NMC occupent la plus large part de marché des batteries lithium-ion pour les véhicules électriques en Europe, tandis que les LFP sont encore discrètes (6% de part de marché en 2023 en Europe[9]) . Il existe différents types de chimie NMC avec des proportions variables de nickel, de manganèse et de cobalt. Une batterie « NMCxyz » est composée proportionnellement de x parts de nickel, y parts de manganèse et z parts de cobalt. Plus la proportion de nickel est importante plus l'énergie spécifique est élevée¹⁷. Néanmoins, si les batteries NMC riches en nickel prennent de plus en plus de part de marché c'est également pour réduire l'utilisation du cobalt, du fait des préoccupations concernant les problèmes sociaux liés à l'exploitation minière, et à la difficulté d'approvisionnement. Un consensus décrit une tendance vers le développement de batteries NMC riches en nickel (NMC811) en extrapolant vers les batteries NMC9 0.5 0.5 encore peu matures aujourd'hui [31].

D'autre part, on observe la croissance des batteries LFP qui ont atteint en 2023 leur plus haute part de marché en une décennie, principalement grâce aux préférences des fabricants chinois. Malgré leur énergie spécifique plus faible, les batteries LFP sont une alternative intéressante parce qu'elles ne contiennent ni cobalt ni nickel, sont beaucoup moins chères et parce qu'elles suffisent largement pour un usage de proximité. Au cours des premiers mois de 2024, les prix des cellules LFP ont continué leur baisse, se situant bien en dessous de 100\$/kWh en mars 2024, contre une moyenne de \$139/kWh fin 2023 pour les batteries lithium toutes chimies confondues [32].

Composition des cathodes et anodes (kg/kWh) [33]



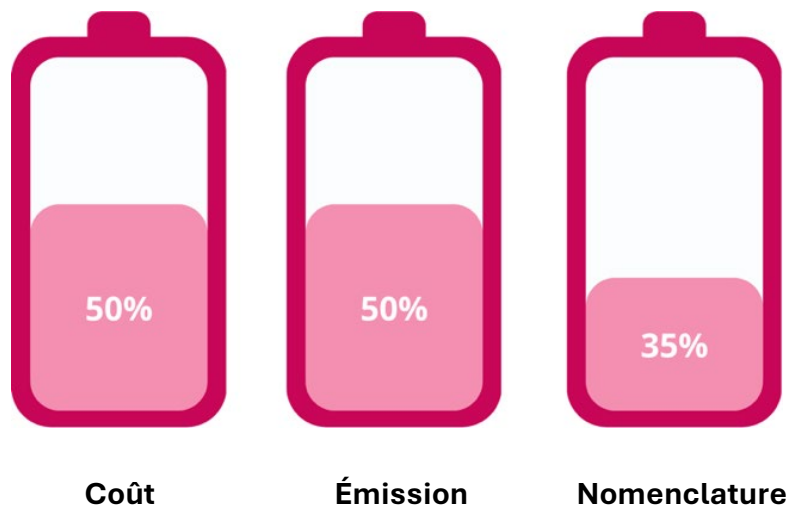
Il est très intéressant de noter que, en moyenne, les matériaux qui composent la cathode, les CAM (pour **cathode active material**), représentent environ 50 % du coût de la cellule de batterie, entre 30 et 40% de la nomenclature¹⁸, et près de 50%¹⁹ des émissions de la fabrication [14]. A l'échelle du véhicule, la batterie représente généralement entre 20 et 30% du prix d'achat [14].

¹⁷ Pour la batterie NMC811, l'énergie spécifique est de 200 à 260 Wh/kg. [30]

¹⁸ Une nomenclature, Bill of Materials ou BOM, est une liste complète des matières premières, des pièces et des outils nécessaires pour fabriquer un produit donné.

¹⁹ En moyenne pour les batteries NMC. Remarque : L'augmentation de l'énergie spécifique des batteries lithium-ion (LIB) due à une teneur accrue en nickel est le principal facteur de la réduction des émissions de gaz à effet de serre attribuées à la production de batteries.

Poids des matériaux actifs de la cathode dans le coût de la cellule, la nomenclature et les émissions de la fabrication de la batterie



Les anodes des batteries, principalement composées de graphite, permettent le stockage des ions lithium. On distingue le graphite naturel, extrait et traité pour produire de petites particules sphériques, du graphite synthétique, fabriqué par chauffage de sous-produits de charbon ou de pétrole à des températures très élevées. Le graphite naturel, principalement extrait en Chine, présente des avantages tels qu'un coût moindre, une plus grande capacité et une production moins énergivore, mais il fait face à des contraintes d'approvisionnement. En revanche, le graphite synthétique, bien que compatible avec les électrolytes, offrant une charge rapide et une meilleure longévité, a un impact environnemental plus élevé en raison de son processus de fabrication énergivore.

Récemment, le silicium a été ajouté aux anodes pour améliorer leurs performances. Bien que les anodes en silicium offrent une capacité de stockage d'énergie dix fois supérieure à celle des anodes en graphite, leur expansion lors de la charge peut rapidement dégrader les batteries. Les recherches sur le [silicium poreux](#) cherchent à résoudre ce problème en réduisant cette expansion.

Pourquoi est-il important de parler de l'évolution des chimies des batteries dans le cadre de la fin de vie et du

1° La durée de vie

Les caractéristiques chimiques distinctes des batteries impliquent que les batteries ont des durées de vie différentes. Cela entraîne une incertitude importante concernant l'ampleur du flux de batteries en fin de vie à traiter dans le futur.

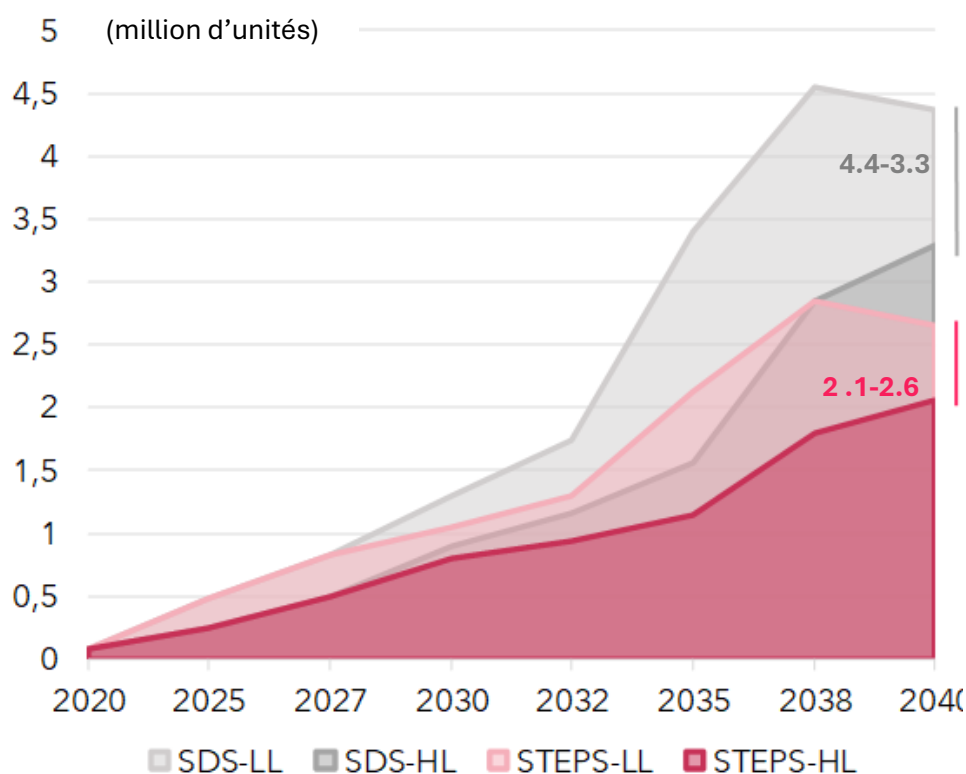
Par exemple, si nous comparons trois scénarios de développement de chimies, nous obtenons des résultats très différents [12]:

Batterie dominante	NMC	LFP	Li-S/Li-Air ²⁰
Nombre de batteries en fin de vie en 2050 STEP-SD (Mt)	11-22	14-28	9-18
Part de marché dans le scénario associé	98%	60%	60%

Attention, ces scénarios ne décrivent pas les trois voies de développement de chimies les plus probables. Dans le cadre de ce rapport ils servent juste à mettre en perspective l'impact des différences de durée de vie des batteries selon leur chimie sur le nombre de batterie en fin de vie à traiter. Parmi ces scénarios, d'après les dynamiques récentes de développement des batteries LFP, il est peu vraisemblable que les NMC occupent une part de marché écrasante. Aussi, les batteries Li-S/Li-air sont encore au stade de la R&D, il semble donc irréaliste que leur part de marché soit si haute d'ici 2050. De plus, ici ne sont pas mentionnées les autres types de chimies [34] comme les batteries aux sodiums qui semblent intéresser l'industrie chinoise [9].

Toutes ces incertitudes s'ajoutent évidemment à celle de la durée de vie d'une batterie dans un véhicule. Cette durée de vie est multifactorielle.

Nombre de batterie arrivant en fin de vie dans l'UE-27 selon des scénarios de durée de vie [13]



- **Scénario de longue durée de vie (HL)** : les durées de vie moyennes des batteries pour les périodes 2009-2016, 2017-2022 et 2023-2030 sont respectivement de 4, 10 et 16 ans.

- **Scénario de courte durée de vie (LL)** : les durées de vie moyennes des batteries pour les périodes 2009-2016, 2017-2022 et 2023-2030 sont respectivement de 4, 8 et 12 ans.

- **Scénario de longue durée de vie**

²⁰ Les batteries Li-S utilisent du lithium et du soufre, offrant une haute densité énergétique mais se dégradent rapidement, tandis que les batteries Li-Air utilisent l'oxygène de l'air, offrant une densité énergétique très élevée mais posant des défis techniques pour la recharge. Ces batteries sont encore en phase de développement et doivent surmonter des défis majeurs avant de pouvoir être commercialisées, notamment en termes de durée de vie limitée et de problèmes de sécurité. La réalisation de ce scénario est donc pour l'instant très peu probable. Toutefois, elles pourraient offrir une densité énergétique spécifique deux à trois fois supérieure à celle des batteries lithium-ion actuelles, ce qui pourrait réduire les coûts et améliorer l'autonomie des véhicules électriques.

Les batteries en fin de vie ne seront pas nécessairement recyclées. Elles pourront être soit réparées, si leur état le permet, et donc réemployées pour le même usage, soit réutilisées dans un nouvel usage tel que le stockage stationnaire (voir partie suivante sur les options de seconde vie). Dans cette étude [13], la remanufacture (réparation + réemploi) est envisagée pour les batteries des véhicules électriques ayant un état de santé supérieur à 90 %. Toutefois, seules 50 % des batteries mises au rebut dans les cinq premières années sont jugées aptes à être remanufacturées. Pour la réutilisation des batteries en seconde vie, un taux de 10 % historique est fixé en 2019, avec une augmentation progressive pour atteindre 50 % en 2030, puis une stabilisation à 50 % par la suite. Les batteries destinées au recyclage sont donc celles qui sont recyclées directement après leur première utilisation et les batteries recyclées usagées après leur seconde vie.

Non seulement cela rend incertain le volume à traiter et ainsi le dimensionnement industriel adéquat, mais cela rend également incertain la nature des matériaux secondaires récupérables grâce au recyclage. En 2030, en Europe, les quantités annuelles recyclées indicatives de Li, Co, Ni et Cu devraient se situer respectivement entre 1.3-3, 2.4-5, 9.3-18 et 11.4-21 kt, selon les dynamiques de déploiement des véhicules électriques²¹, les hypothèses sur leur durée de vie²² mais également selon les hypothèses autour du devenir des batteries en fin de vie (relativement à leur usage initial dans les véhicules électriques).

Quantités de matières recyclées selon les scénarios en 2030 en Europe [13]

Quantités recyclées en 2030 (kt)	Li	Co	Ni	Cu
Scénario SDS durée de vie haute	2	3	11	14
Scénario SDS durée de vie basse	3	5	18	21

Ces résultats [13] restent très intéressants car ils se basent sur des efficacités de recyclage dynamiques calquées sur les objectifs de la régulation européenne des batteries (voir partie sur l'analyse de la réglementation européenne), c'est-à-dire : 70 % pour le lithium en 2030 et 95 % pour le cobalt, le nickel et le cuivre, et non pas sur le potentiel maximal du recyclage avec des efficacités parfois très loin de l'état actuel des choses [35]. Néanmoins, nous pouvons nous interroger sur l'évolution des parts de marché des différentes chimies de batteries présentée dans cette étude : elle prévoit que les batteries NMC622, 811 et 955 représenteront 80% du marché, tandis que les batteries LFP sont étonnamment absentes, avec seulement 1% de part de marché en 2030 !

²¹ STEP versus SDS dans le cadre de l'article mentionné. [13]

²² Deux scénarios possibles sont considérés [13] :

- durée de vie basse : moyenne de 4, 8 et 12 ans pour les périodes 2009-2016, 2017-2022, et 2023-2030.

- durée de vie haute : moyenne de 4, 10 et 16 ans pour les périodes 2009-2016, 2017-2022, et 2023-2030.

On peut souligner que les différentes durées de vie dans cet article sont relativement faibles par rapport aux autres études sur le sujet.

2° Les options de seconde vie

Mise en parallèle de l'utilisation théorique d'une batterie lithium-ion selon sa capacité en fonction de facteurs socio-économiques exogènes



Lorsque la capacité d'une batterie diminue et qu'elle n'est plus adaptée à une utilisation dans un véhicule électrique, elle conserve généralement entre 70 et 80 % de sa capacité initiale, elle peut donc être utilisée dans un autre cadre (capacité auxiliaire ou stockage stationnaire par exemple) avant d'être recyclée [17]. Pourtant, certaines chimies de batterie sont plus ou moins appropriées à une seconde vie en tant que batterie de stockage [17]. À l'échelle mondiale, le scénario avec une majorité de LFP présente une capacité cumulative légèrement supérieure à celle envisagée dans le scénario avec une majorité de batteries NMC [18], du fait de la moindre dégradation des batteries LFP observée dans la plupart des pays et régions.

Aussi, des recherches suggèrent que les profils de dégradation des batteries, différents selon les batteries et l'usage du véhicule, peuvent entraîner des inefficacités et des dysfonctionnements qui rendront les batteries moins attrayantes. Pour l'instant, peu de constructeurs automobiles et de fabricants de batteries ont adhéré à l'idée d'une seconde vie. Un des arguments étant économique : souvent, la raison pour laquelle les batteries de véhicules électriques usagées ne sont pas utilisées dans des applications de stockage d'énergie n'est pas qu'elles valent trop peu, mais plutôt parce qu'elles valent trop pour un tel usage. Il est probable qu'un équilibre économique entre la réutilisation en seconde vie et le recyclage soit atteint en fonction de la valeur future des métaux : lorsque la valeur est élevée, le recyclage devient rentable ; lorsqu'elle est basse, la réutilisation en seconde vie est privilégiée. Il convient de noter que le marché des métaux est très volatile, ce qui complique les prévisions concernant l'avenir de l'utilisation des batteries en fin de vie.

La réparation des batteries est une alternative. Cependant, bien que des projets pilotes, notamment par des start-ups, commencent à émerger, le reconditionnement et la réutilisation des batteries lithium-ion en sont encore à leurs débuts. Cela s'explique en partie par la quantité actuellement limitée de batteries disponibles pour ce type de traitement mais aussi par les défauts inhérents à la conception et au design²³ des batteries pour véhicules électriques²⁴ [7] et par le fait que nous manquons encore d'expertise, ce qui rend les réparations souvent très coûteuses. Afin de permettre un choix optimal de seconde vie i.e. un arbitrage selon la chimie mais surtout de l'état de santé²⁵ de la batterie, de nombreux progrès sont à faire au niveau du design des batteries et de leur positionnement dans le véhicule²⁶, mais aussi au niveau de l'accessibilité aux données de la batterie afin de constater son niveau de dégradation²⁷. Certaines techniques non destructives²⁸ pour évaluer l'état de santé des grandes cellules de batterie de véhicules électriques sont étudiées avec succès [36].

En France, certaines start-ups²⁹ se distinguent particulièrement par leur ambition :



- [Revolte](#) se positionne sur la réparation et le prolongement de vie des véhicules électriques
- [Bib Batteries](#) utilise l'analyse de données fournies par le « Battery Management System » pour suivre l'état de santé des batteries afin de proposer un diagnostic complet orientant la fin de vie des batteries (seconde vie ou recyclage).
- [VoltR](#) mise sur la remanufacture afin de maximiser la performance résiduelle avant le recyclage.

Outre la durée de vie technique, la durée de vie d'une batterie dépend aussi de l'évolution relative de sa valeur économique par rapport à sa valeur d'usage. En effet, une batterie peut rester dans un véhicule même si son état de santé technique est inférieur à 70%. Un véhicule arrive donc en fin de vie économique lorsqu'il n'est plus rentable de le réparer. Ces dynamiques socio-économiques, bien qu'importantes, sont difficiles à intégrer dans les modèles de prévisions des batteries à recycler ou à réutiliser.

²³ Le design de la batterie en elle-même ainsi que sa position et orientation dans le châssis peuvent faciliter (ou compliquer) toutes les étapes de fin de vie du diagnostic au désassemblage. [36]

²⁴ Le guide des technologies propres de l'IEA évalue que les batteries conçues pour faciliter, sécuriser et rendre plus efficaces le démontage, le reconditionnement, le réemploi ou même la régénération ne sont pas encore matures (niveau de maturité technologique TRL 5 depuis 2020 !). La réparation est également liée à des problèmes de sécurité. Par exemple, les batteries logées dans des boîtiers en plastique renforcé peuvent être difficiles, voire impossibles, à ouvrir sans endommager les composants internes. De plus, les cellules sont souvent collées ou soudées ensemble, ce qui rend leur remplacement individuel difficile, voire impossible.

²⁵ Souvent appelé « state of health ».

²⁶ Certains industriels développent de nouvelles méthodes d'assemblage comme le "cell-to-pack" (TRL 10-11) où les cellules sont directement intégrées dans le pack de batterie complet, sans être divisées en modules individuels, ou même le "cell-to-chassis" (TRL 7) où les cellules sont directement intégrées dans le cadre du véhicule. Cela pourrait représenter une excellente opportunité pour réduire les matériaux (en particulier l'acier et le plastique) et pour faciliter la réparation, la réutilisation et le recyclage, car le démontage pourrait être moins complexe. Ces méthodes d'assemblage permettent généralement d'obtenir une efficacité d'utilisation volumétrique élevée et une densité énergétique supérieure. [5]

²⁷ Phénomène complexe et non linéaire [36].

²⁸ Thermographie IR, acoustique ultrasonique, tomographie X et diffraction X [36].

²⁹ Bib Batteries et VoltR se concentrent pour l'instant sur les batteries de moyens de transports légers (vélos ou trottinettes électriques) mais visent à terme les batteries des voitures électriques.

3° L'attractivité économique du recyclage

La tendance actuelle à s'éloigner des batteries à haute teneur en cobalt en faveur des chimies de batteries riches en nickel et de batteries LFP aura un impact significatif sur la rentabilité du recyclage, car le cobalt est le matériau le plus précieux dans les chimies de batteries actuelles [37]. Actuellement, le profit net de recyclage (après revente des matériaux récupérés) est le plus bas pour les batteries LFP. Il y a donc des inquiétudes concernant l'attractivité économique du recyclage de telles batteries [9]. Néanmoins, la réalité industrielle, notamment en Chine où le recyclage des batteries LFP est déjà en place, montre que le recyclage des batteries LFP n'est pas voué à être le « talon d'Achille »³⁰ du recyclage des batteries. Le recyclage direct, présenté plus bas, semble être une option intéressante pour ces batteries. Il est crucial que les autorités publiques subventionnent dès maintenant la R&D sur ce sujet, car la gestion de ces déchets deviendra très problématique à partir de 2035.

D'autre part, les batteries NMC présentent les plus hautes émissions de carbone lors de leur production, tandis que les batteries LFP ont les émissions de carbone les plus basses [14]... La faible rentabilité couplée avec l'impact environnemental plus faible questionne donc l'avenir du recyclage des batteries LFP.

4° La résilience des technologies de recyclage

Certaines technologies sont plus ou moins adaptées au traitement de certaines chimies et ont des sélectivités distinctes. Sans même mentionner les chimies peu matures comme les batteries sodium ou solides [38], le développement des chimies doit anticiper cette question d'adaptation des industries de recyclage. Par exemple, pour les batteries LFP, la pyrométallurgie³¹ étant très peu rentable, c'est plutôt l'hydrométallurgie³² qui doit être développée. Selon certains chercheurs cela pourrait poser problème, car lors du processus d'hydrométallurgie la lixiviation³³ des batteries LFP produit des ions phosphates qui interfèrent avec la précipitation des métaux, entraînant des pertes, des impuretés indésirables et des coûts de traitement supplémentaires [30]. Nous détaillons plus loin les caractéristiques des processus de recyclage.

5° Les matières secondaires disponibles

Les raisons ci-dessus créent de l'incertitude quant à l'impact à venir du recyclage sur la réduction de la demande en matières premières. Par exemple, la réutilisation des batteries lithium crée un décalage de disponibilité des matières secondaires. Dans un scénario de faible réemploi, environ 3 400 tonnes de cobalt seront stockées en 2030 dans les batteries lithium-ion des véhicules électriques³⁴. Dans un scénario de haut réemploi, cette quantité double presque. Par conséquent, la disponibilité du cobalt pour le recyclage en 2030 est réduite de 19 % dans le scénario de haut réemploi par rapport au scénario de bas réemploi [39].

³¹ Processus industriel utilisant la chaleur pour traiter les matériaux, souvent à haute température, pour extraire des métaux à partir de minerais.

³² Technique qui utilise des solvants ou des solutions aqueuses pour extraire des métaux à partir de minerais ou de déchets métalliques.

³³ Processus chimique par lequel des solvants liquides ou des solutions aqueuses sont utilisés pour extraire des métaux à partir de matériaux solides, tels que les déchets de batteries.

³⁴ Dont 74 % dans les batteries des véhicules électriques à batterie i.e. pas hybride.

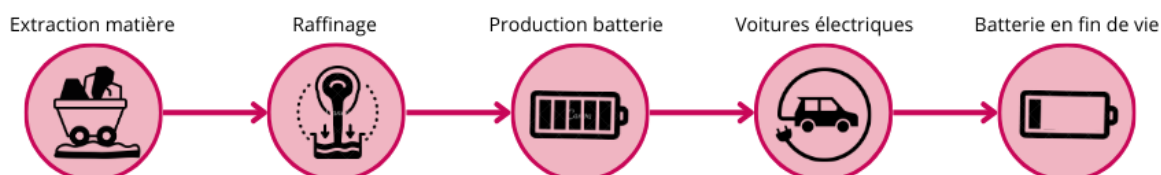
Il y a donc de nombreuses dynamiques temporelles qui se superposent créant une dimension supplémentaire de complexité concernant une technologie clef pour la décarbonation.

C'est ainsi que des régulations sont essentielles afin d'orienter les choix consommateurs et industriels, et de rendre compétitifs la seconde vie et le recyclage afin de "circulariser" le cycle de vie des batteries. Il n'est d'ailleurs pas actuellement purement linéaire, et la circularité ne sera jamais atteinte à 100% [12] [31], mais c'est un idéal vers lequel tendre.

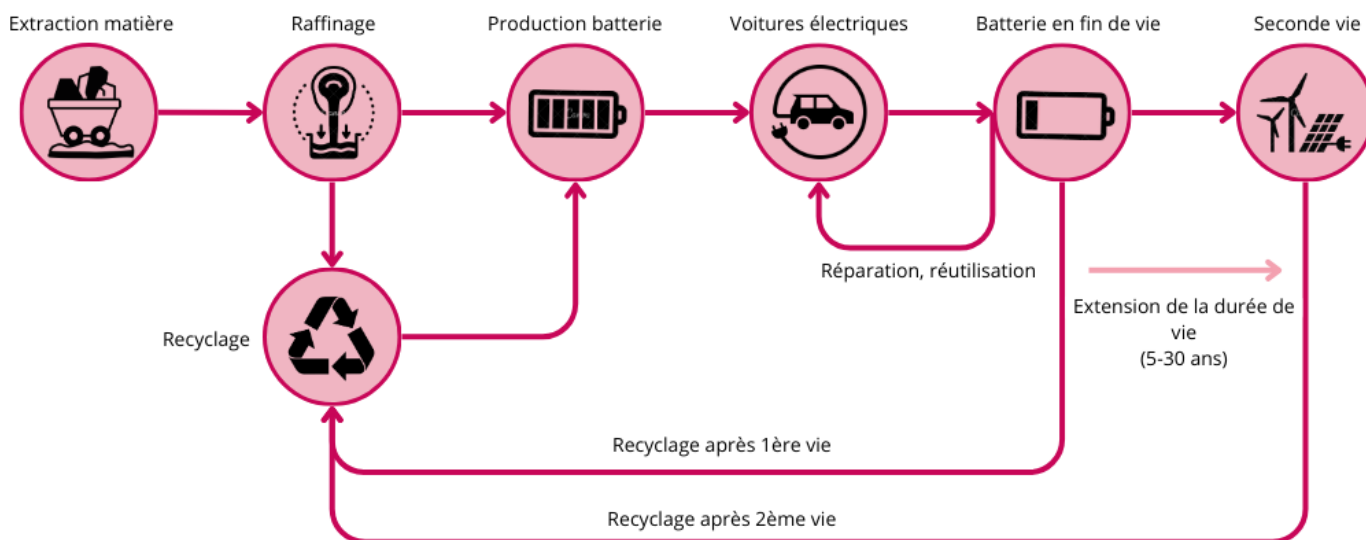
Tout choses égales par ailleurs, l'exemple du recyclage des batteries au plomb laisse espérer qu'un modèle plus « circulaire » est possible pour les batteries des véhicules électriques. Le taux de collecte et la capacité de recyclage des batteries au plomb en Europe ont atteint 99 % et 95 % au cours de la dernière décennie, transformant les déchets de plomb recyclés en source principale de la chaîne d'approvisionnement en batteries au plomb.

Cycle de vie linéaire versus circulaire

D'un modèle linéaire...



... à un modèle plus circulaire



Le potentiel inexploité du recyclage

La capacité mondiale de recyclage des batteries lithium est actuellement d'environ 2 millions de tonnes par an, dont près de 85 % en Chine [9]. Aujourd'hui, l'intrant principal dans les unités de recyclage n'est pas des batteries en fin de vie, mais les rebuts de production. Cela s'explique en partie par le volume encore faible des batteries en fin de vie, mais probablement aussi par le fait que les rebuts sont moins coûteux à recycler que les batteries usagées qui nécessitent d'être collectées, démantelées et prétraitées [41]. Cette tendance pourrait s'inverser d'ici 2035 [10]. Ce chiffre de 2 millions est donc ambigu et ne reflète pas bien la capacité de recyclage des batteries lithium-ion. Il est compliqué de trouver des données consensuelles. Selon un rapport de l'IEA [29], la capacité de recyclage des batteries des véhicules électriques s'élève à 800 000 tonnes environ en 2023 dont 50% en Chine. En Europe, la capacité de recyclage des batteries lithium-ion serait de 50kt à 150kt selon les inventaires [11]. Actuellement, cela représente seulement 45% des batteries lithium-ion usagées pouvant être recyclées par les entreprises européennes. Pourtant recycler a de nombreux avantages :

1 Intégrer le recyclage dans le cycle de vie des batteries présente un potentiel considérable **de réduction de l'empreinte carbone**, avec la possibilité de la réduire de 28 % à 46 % [42] par rapport à l'incinération ou à l'enfouissement, selon la chimie de la batterie et les méthodes de recyclage. Comparativement à la voie d'extraction primaire, le recyclage permet de réduire les émissions de 30% à 40% [43].

2 **Réduire l'impact environnemental global. Les bénéfices environnementaux** ne se cantonnent pas aux émissions de gaz à effet de serre. Il a été démontré que le traitement en fin de vie des packs de batteries usagées atténue l'impact dans la plupart des catégories environnementales [43] [44]. En prenant en compte l'impact de production des batteries lithium-ion le recyclage permet de réduire d'environ 74 % le potentiel d'acidification total, de 77 % le potentiel de déplétion métallique et de 50 % le potentiel de toxicité humaine [43].

3 **Fournir des matières premières secondaires précieuses** : le recyclage des batteries a, au mieux³⁵, le potentiel de réduire de 20 à 23 % la demande cumulative en lithium d'ici 2050, de 26 à 44 % pour le cobalt, et de 22 à 38 % pour le nickel [12]. Dans l'UE, les quantités recyclées de lithium, de cobalt, de nickel et de cuivre en 2030 pourrait représenter respectivement environ 5,2 à 6,2 %, 9 à 11,3 %, 6 à 6,9 % et 6,1 à 7,2 % de la demande annuelle, en fonction des ventes de nouveaux véhicules électriques cette année-là [13]. Pour l'UE, l'adoption de ces solutions est cruciale. En effet, l'UE est entièrement dépendante des importations pour ses besoins en matières premières critiques, notamment le lithium et le cobalt. En 2020, l'Europe a ainsi importé plus de 70 % de ses besoins en lithium et plus de 90 % de ceux en cobalt. Malgré des projets ambitieux de « mines urbaines ³⁶ » de batteries européennes, souvent discutés mais encore rarement réalisés, la filière de la seconde vie et du recyclage des batteries est encore en phase émergente. Nous verrons plus bas comment la nouvelle régulation pourra impulser de nouvelles dynamiques.

³⁵ Ces résultats supposent un taux de collecte de 100% et des efficacités de recyclage très ambitieuses (entre 90-98% pour le Li, Ni, Co, Mn, Cu, Si et le graphite selon la technique de recyclage). Les fourchettes hautes prennent en considération le développement important des batteries Li-S et Li-air.

³⁶ L'« urban mining » ou « mine urbaine » fait écho à l'idée de considérer les déchets (ici les batteries de véhicules électriques en fin de vie) comme une mine alternative et incite donc à récupérer des matériaux à partir des déchets au lieu d'extraire de nouvelles matières premières.

Permettre des économies : une comparaison entre les routes de recyclage basées sur la pyroméallurgie, l'hydroméallurgie et le recyclage direct a révélé des économies de coûts par rapport à l'utilisation de matériaux vierges de 6, 13 et 27% respectivement pour Ni, Mn, Co à partir du NMC111 [30].

Cependant, pour maximiser ces bénéfices et minimiser les impacts négatifs, il est impératif d'instaurer des réglementations strictes, de développer des incitations financières appropriées, de réaliser des investissements substantiels et d'assurer une coordination internationale efficace. C'est d'autant plus important quand nous gardons en tête qu'environ 32 à 40 % [28] de l'augmentation de l'extraction des ressources associée à la transition bas carbone devrait se produire dans des pays ayant une gouvernance des ressources faible, médiocre ou défaillante, ce qui indique que l'activité minière à venir pourrait entraîner une grave dégradation de l'environnement, des conditions sociales et des inégalités économiques. Par exemple, le nickel indonésien a une teneur en carbone cinq fois supérieure à la moyenne de l'industrie et quinze fois supérieure aux meilleures pratiques mondiales [45].

États des lieux et comparaison techno-économique des technologies de recyclage

Au cœur de la problématique se trouve un chiffre difficilement accessible : le taux de recyclage des batteries. L'absence de données fiables et d'infrastructures adéquates rend difficile l'établissement d'un consensus à ce sujet. On évoque souvent un taux de recyclage de 5 %, mais ce chiffre issu de publications de 2011 [25] pourrait ne pas refléter la réalité actuelle. D'autant plus, il y a souvent une ambiguïté sur la nature des batteries lithium auquel ce taux fait référence (piles lithium ? batteries portables, électroniques ?). Hans Éric Melin, de Circular Energy Storage, souligne la nécessité d'une interprétation plus [nuancée et prudente](#). D'autant qu'en 2011, les batteries lithium-ion étaient majoritairement utilisées pour des usages électroniques.

La confusion persiste dans les rapports sur l'état actuel du recyclage des batteries au lithium-ion. Tandis que certains estiment que 95 % de ces batteries finissent en décharge, d'autres rapportent un taux de recyclage approchant 60 % [46]. Cette disparité montre à quel point il est crucial de mieux comprendre et d'analyser les données disponibles. Dans un récent article, des chercheurs (dont Hans Éric Melin) estiment que 59 % des batteries des véhicules électriques disponibles pour le recyclage sont effectivement recyclées [10]. Cependant, il est important de noter que cela ne signifie pas nécessairement que les 41 % restants ne sont pas recyclés, mais plutôt qu'il manque des informations pour tirer des conclusions définitives.

La nouvelle réglementation européenne fixe des objectifs « d'efficacité » de recyclage pour les batteries lithium-ion de 65% et 70% à atteindre en 2025 et 2030 respectivement. Face à ces divergences, il est essentiel de considérer que l'arrivée de volumes importants de batteries d'ici 2035, combinée aux dynamiques politiques récentes, pourrait favoriser une meilleure collecte et un partage accru des données. Cela permettrait de clarifier la situation actuelle et de mieux préparer les infrastructures pour un recyclage plus efficace.

Actuellement, il existe trois voies principales de recyclage des batteries lithium-ion pour convertir les batteries usagées en produits recyclés. Ces voies sont généralement classées en fonction de la manière dont les éléments sont libérés des matériaux actifs des électrodes :

Par **fusion** dans la **pyrométallurgie**

Par **lixiviation** dans l'**hydrométallurgie**

Sans destruction de la structure cristalline du matériau actif de l'électrode dans le **recyclage direct**

Ces voies de recyclage se distinguent tant du point de vue des étapes et procédés que du point de vue des besoins énergétiques, des impacts environnementaux et des dynamiques économiques sous-jacentes. Ces procédés ne sont pas spécifiquement développés pour les batteries lithium-ion issues des véhicules électriques. Néanmoins le traitement de telles batteries présente certaines spécificités liées notamment à leur taille importante, à l'hétérogénéité des designs qui complique le processus de démantèlement et broyage, et à la diversité des chimies qui peut impliquer des traitements distincts. De plus, ces batteries sont dans la catégorie 9 des matières dangereuses diverses en raison des risques de fuite de substances toxiques et de leur haute inflammabilité. Une question se pose également du côté de la possibilité de traiter de manière commune des batteries de différentes tailles notamment au niveau de la sécurité³⁷. En amont des trois principales voies, certaines étapes sont communes [7], [30] :

COLLECTE ET TRI

La Chine et l'Union Européenne sont leaders dans la mise en place de cadres pour la gestion responsable des batteries en fin de vie. En Chine et dans l'UE, les politiques incluent des responsabilités élargies des producteurs, rendant les fabricants responsables de la collecte des batteries. La Chine a introduit une plateforme de traçabilité pour garantir la collecte des batteries. Pour garantir la collecte des batteries de véhicules électriques en fin de vie, l'Union Européenne impose des mécanismes de traçabilité et des réglementations claires : toutes les catégories de batteries doivent être collectées gratuitement auprès des utilisateurs finals par les constructeurs, quelle que soit leur nature, composition chimique, état, marque ou origine (Article 62.1).

Avant les opérations de traitement, une phase de séparation des batteries en fonction de leur tension nominale, capacité, composition chimique, ainsi que son niveau de dégradation et sa capacité restante, est essentielle. Si le flux entrant n'est pas homogène, la technologie de recyclage doit être suffisamment robuste et tolérante pour traiter par exemple des batteries de compositions chimiques différentes, comme c'est le cas avec les procédés basés sur la voie pyrométallurgie. En revanche, l'efficacité et la sélectivité des processus hydrométallurgies seront rapidement compromises face à un mélange entrant non maîtrisé³⁸.

PRÉTRAITEMENT

Le premier processus de prétraitement, commun à toutes les méthodes de recyclage, implique le démontage des boîtiers, de l'électronique et des câbles contenus dans les systèmes de batteries. Cependant, si les batteries ne sont pas conçues pour être démontées « facilement », le processus peut nécessiter la séparation

³⁷ Voir [l'incendie](#) de l'usine de SNAM à Viviez.

³⁸ En effet, le phosphate des batteries LFP interfère avec l'extraction efficace du nickel et du cobalt par les solvants couramment utilisés en hydrométallurgie (voir plus bas).

de modules et de cellules collés ou soudés, ce qui peut prendre de 6 à 10 heures et entraîner des coûts de main-d'œuvre élevés [47][48]. Les coûts de démontage d'une batterie varient entre 34 et 80 dollars par kWh de capacité initiale ce qui représente environ 25 % à 57% du prix moyen de 139 dollars par kWh pour une batterie neuve en 2023 [32]. Puis, une étape de **désactivation** vise à réduire les risques électriques et inflammables. Cela implique généralement une "surdécharge", réalisée en déchargeant la batterie dans un liquide conducteur tel qu'une saumure de NaCl, ou en utilisant un dispositif de charge ajustable capable de récupérer environ 20 % de l'énergie restante pour l'introduire dans le réseau électrique.

Ensuite, l'électrolyte est désactivé, ce qui peut être fait par volatilisation thermique ou par congélation à -65°C. Il est important de noter que les processus de retrait de l'électrolyte peuvent être appliqués après le démontage et le broyage des cellules de batterie.

Néanmoins, dans la voie pyrométallurgique, la surdécharge et le retrait de l'électrolyte peuvent être évités en jetant directement les cellules de batterie dans les hauts-fourneaux. En revanche, ces étapes deviennent nécessaires en amont des processus hydrométallurgiques qui nécessitent en plus des étapes de séparations mécaniques complexes afin de récupérer les débris d'aluminium (coffrage, collecteur de courant à la cathode), de fer (armatures) et de cuivre (collecteur de courant à l'anode, circuits électriques), et, en particulier, d'extraire la masse noire ou '**black mass**', c'est-à-dire la poudre issue du broyage de batteries Li-Ion contenant les éléments **nickel, cobalt, lithium et manganèse**.

La pyrométallurgie

Les processus basés sur la pyrométallurgie consistent à fondre toute la batterie à des températures élevées (**environ 1300°C-1500 °C**) pour récupérer un **alliage** des métaux tels que le nickel, le cobalt et le cuivre, qui peuvent ensuite être affinés en **sels métalliques** de haute pureté grâce à des étapes hydro-métallurgiques.

Il s'agit de la voie de recyclage de batteries la plus établie (TRL 9³⁹). Beaucoup d'industries l'exploitent, comme Umicore en Belgique qui couple pyrométallurgie avec l'hydrométallurgie afin de récupérer le cobalt et le nickel⁴⁰. Ci-dessous une description du procédé Valéas développé par Umicore en 2000 [49] :

Les cellules de batteries démontées sont combinées avec du calcaire (CaCO₃), du sable, du coke et des agents réducteurs tels que l'aluminium et le zinc métalliques. Ce mélange est ensuite introduit dans un four à axe vertical équipé d'une lance d'oxygène immergée⁴¹.

La première phase, appelée « zone de préchauffage » (<300 °C), permet l'évaporation progressive de l'électrolyte, qui est donc perdu, et réduit ainsi au minimum les risques d'explosion. Ensuite, la « zone de pyrolyse des plastiques » (700°C) provoque la fonte, la décomposition et l'évaporation partielle des composants plastiques et des liants des cellules, ce qui produit des gaz chauds qui remontent vers la « zone de préchauffage ». Les plastiques, le graphite et l'électrolyte sont incinérés pour la récupération d'énergie, et les gaz résultants nécessitent un système de purification spécifique.

Enfin, dans la « zone de fusion et de réduction », de l'air préchauffé à 500 °C, parfois enrichi en oxygène, est injecté au fond du four. À des températures comprises entre 1200 et 1450 °C, les résidus de batteries sont transformés en deux sorties : une fraction de laitier comprenant du lithium, de l'aluminium, du silicium, du manganèse, du calcium et du fer résiduel sous forme oxydée, et une fraction d'alliage contenant principalement du cuivre, du cobalt, du nickel et du fer sous forme réduite. Le laitier pourrait subir des opérations

³⁹ TRL (Technology Readiness Level) est une échelle utilisée pour évaluer le niveau de développement et de maturité technologique d'une innovation, allant de la validation théorique (TRL 1) à la démonstration en conditions opérationnelles réelles stables (TRL 11).

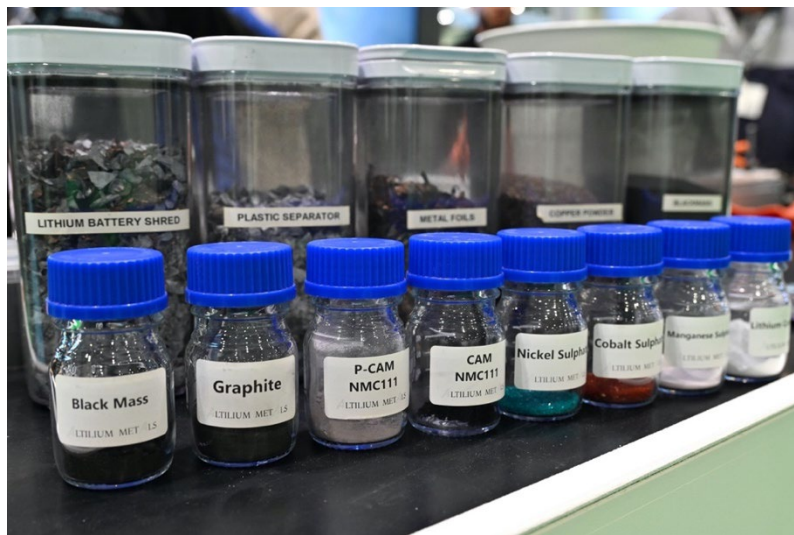
⁴⁰ Question de rentabilité. En effet, le mélange doit contenir entre 30 et 50 % de batteries usagées pour produire un alliage avec une teneur en cobalt et en nickel suffisante pour être économiquement viable.

⁴¹ « Top Submergerd Lance ».

d'hydrométallurgie afin de récupérer le lithium par exemple, mais cette option est rarement considérée comme rentable.

L'hydrométallurgie

Le processus hydrométallurgique dissout les composants de la batterie et les sépare en fonction de leurs propriétés chimiques. La lixiviation utilise généralement de l'acide sulfurique concentré chaud pour dissoudre le lithium, le cobalt, le nickel, le manganèse et le cuivre dans la solution. Les éléments dissous sont ensuite séparés et purifiés par des méthodes d'extraction liquide-liquide ou de précipitation analogues à celles qu'on emploie pour traiter les minerais des mêmes métaux. Par exemple, le nickel peut être sélectivement précipité en utilisant l'agent complexant⁴² DMG (diméthylglyoxime), le D2EHPA (acide di-(2-ethylhexyl) phosphorique) peut extraire le manganèse, tandis que le cobalt peut être précipité en utilisant des solutions d'oxalate d'ammonium. Le lithium restant seul en solution peut être précipité sous forme de carbonate par addition de carbonate de sodium (Na_2CO_3).



Les éléments et autres matériaux récupérés des batteries de véhicules électriques, y compris le graphite, sont exposés lors du London EV Show en novembre 2023. [John Keeble / Getty Images](#)

Jusqu'à 2020, le recyclage des batteries servait essentiellement à récupérer le cobalt, puis le cuivre et le nickel pour les réinjecter dans l'industrie métallurgique. L'augmentation du flux de batteries permet d'envisager des procédés destinés à recycler des batteries spécifiquement pour les ré-utiliser dans la fabrication de nouvelles batteries. À ce titre, on peut développer ce qu'on appelle des boucles courtes où il n'est plus nécessaire de séparer Ni, Mn, Co puisqu'ils sont destinés à être remélangés pour refabriquer des matériaux de cathodes.

D'après les annonces des acteurs industriels européens, l'hydrométallurgie devrait devenir la voie de recyclage principale d'ici 2030. La Chine et les États-Unis ont déjà des capacités de recyclage opérationnelles basées sur l'hydrométallurgie telle que Shenzhen Green Eco Manufacturer Hi Tech, Guanghua Sci-Tech, Tele Battery Recycling et Retrieval ou Li-cycle respectivement.

Un des projets européens les plus ambitieux est celui de NorthVolt AB, une entreprise suédoise de batterie qui a également décidé d'investir dans le recyclage. Le projet regroupe Norsk Hydro, un producteur d'aluminium qui récupérera celui issu du recyclage des batteries tandis que la black mass sera traitée par NorthVolt grâce au processus [Revolt](#), développé en interne, et les sels récupérés seront réutilisés dans les nouvelles batteries

⁴² Les agents complexant sont des substances qui lient des ions spécifiques dans la solution.

permettant ainsi de faire du recyclage en boucle fermée. Hydrovolt est la plus grande usine de recyclage de batteries pour véhicules électriques en Europe, capable de traiter 12 000 tonnes de packs de batteries par an (soit 25 000 batteries de véhicules électriques), ce qui suffit pour recycler la totalité des batteries en fin de vie sur le marché norvégien.

Hydrovolt envisage d'étendre sa capacité de recyclage en Europe, avec pour objectif de recycler environ 70 000 tonnes de packs de batteries d'ici 2025 et 300 000 tonnes d'ici 2030. NorthVolt vise ainsi à incorporer 50 % de matériaux recyclés dans sa production de nouvelles batteries d'ici 2030. De plus, NorthVolt produit des batteries NMC avec une énergie verte (33 kgCO₂/kWh !) rendant ces dernières encore plus durables et bas carbone, mais innove aussi du côté des batteries [sodium](#).

Le recyclage direct

La black mass constitue le point de départ de la voie de recyclage direct. Cela consiste à séparer puis à régénérer les matériaux actifs de la cathode (et de l'anode) sans les détruire par dissolution ou par des traitements à haute température.

Au lieu de récupérer des alliages métalliques par pyrométallurgie ou des éléments métalliques par hydrométallurgie, la valorisation directe vise à récupérer par une séparation optimisée l'électrolyte, du graphite et les matériaux actifs des électrodes puis à les régénérer par lavages, purifications et traitements thermiques légers pour reformer des composés directement réutilisables pour la fabrication de nouvelles électrodes. Bien que cette méthode soit encore au stade expérimental, elle offre théoriquement un avantage environnemental significatif, avec une consommation d'énergie réduite, des émissions faibles et une production minimale de déchets pendant le processus. En cas de succès elle serait parfaitement adaptée pour des matériaux comme le LFP dont la valeur économique est dans le procédé de fabrication plutôt que dans les éléments qui le composent (Fer et Phosphate).

Le procédé de recyclage [OnTo](#), également appelé EcoBat, a été breveté et testé en laboratoire aux États-Unis. Leur but est d'industrialiser ce processus de recyclage direct à l'international, notamment dans des unités déjà existantes, afin d'atteindre les objectifs de neutralité carbone tout en préservant la viabilité économique. Le procédé se focalise spécifiquement sur les batteries LFP perçues comme les plus difficiles à recycler avec les approches industrielles actuelles. Le processus OnTo commence par une décharge complète des batteries, suivie de leur démontage pour obtenir des cellules individuelles ou de petits modules. Les cellules sont perforées et l'électrolyte est extrait à l'aide de CO₂ supercritique (74 bar, 31°C) et de co-solvants, récupérant ainsi le sel de LiPF₆. Les cellules séchées sont ensuite broyées, les fragments tamisés pour séparer les feuilles de cuivre et d'aluminium des matériaux actifs et des impuretés. La fraction plus grossière subit une séparation magnétique pour isoler l'acier, puis une séparation en milieu dense pour séparer le graphite des matériaux cathodiques actifs.

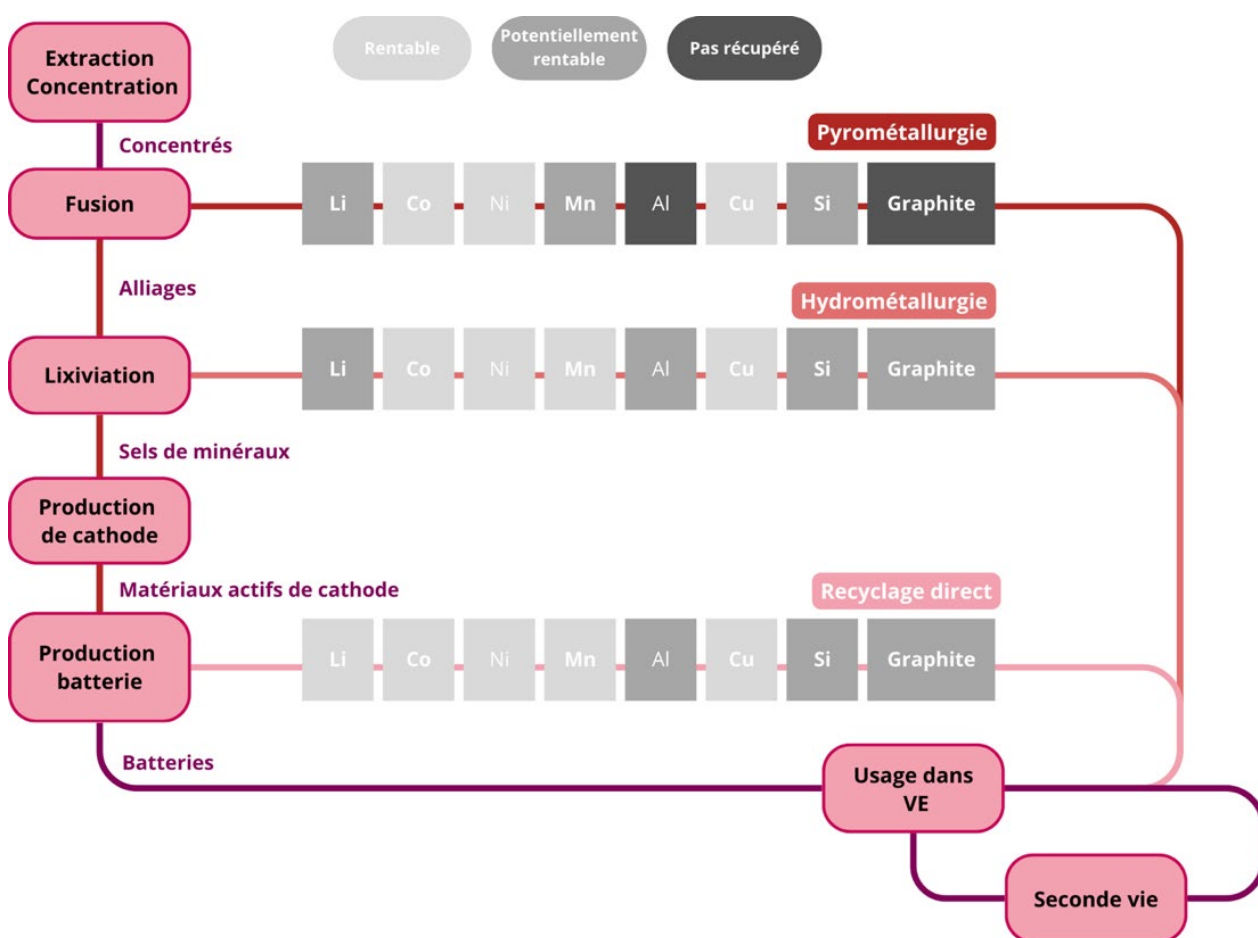
Les poudres obtenues sont purifiées : le graphite est traité à faible et à haut PH pour éliminer les impuretés, tandis que les matériaux cathodiques sont purifiés dans une solution basique de LiOH (hydroxyde de lithium) pour dissoudre le liant PVDF⁴³. Ces purifications produisent des matériaux de haute pureté. Le graphite purifié est ensuite chauffé pour éliminer les résidus de plastique, produisant du graphite de qualité batterie (ou *battery grade*).

⁴³ Le Polyfluorure de vinylidène est un type de polymère utilisé couramment comme liant dans les batteries lithium-ion, en particulier pour maintenir les matériaux actifs des électrodes ensemble et les faire adhérer au collecteur de courant.

Les matériaux cathodiques sont séchés, broyés et régénérés avec une solution de LiOH dans un autoclave⁴⁴ chauffée à 250-275°C pour restaurer le lithium. Après filtration et lavage, la poudre cathodique est frittée⁴⁵ à 900°C pour produire des matériaux actifs de qualité. Ce processus permet de produire des matériaux de batterie à un coût compétitif et avec une consommation d'énergie réduite par rapport à la fabrication primaire.

Néanmoins, le processus de recyclage direct nécessite soit une réduction de la variété des batteries acceptables pour minimiser les coûts liés aux installations et à la complexité associée à la gestion de plusieurs types de batteries, soit une augmentation du nombre d'installations et de main-d'œuvre pour gérer des LIB d'entrée diverses. De plus, le désassemblage manuel entraîne des coûts de main-d'œuvre plus élevés que les autres méthodes. Malgré ces défis, il y a un intérêt significatif pour le recyclage direct comme moyen d'atténuer les impacts environnementaux négatifs de la pyrométallurgie (coût en énergie, émissions de CO2) et de l'hydrométallurgie (nombre d'étapes, coût des réactifs, consommation d'eau, effluents liquides). Des développements avancés sont en cours, tels que le [ReCell Center](#) au Laboratoire national d'Argonne qui s'intéresse notamment à la valorisation du graphite et de l'électrolyte, et [ReLiB](#) à The Faraday Institution. Des recherches à l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux du CNRSE sur les [fluides supercritiques](#) pourraient également avoir une application prometteuse pour le recyclage des batteries.

Représentation simplifiée des différentes voies de recyclage et perspectives des matériaux récupérés



⁴⁴ Un autoclave est un équipement utilisé dans divers processus industriels pour effectuer des réactions chimiques sous pression et haute température.

⁴⁵ Le terme "frittée" fait référence à un processus de fabrication où des poudres sont chauffées à une température élevée, juste en dessous de leur point de fusion, pour les agglomérer sans les faire fondre complètement. Cela permet de créer des matériaux solides à partir de poudres métalliques ou céramiques, tout en conservant leur structure granulaire.

Voici quatre points à garder à l'esprit lors de la comparaison des technologies de recyclage :

- 1 La majorité des avantages environnementaux provient de la récupération de l'aluminium⁴⁶ et du cuivre du pack de la batterie, ainsi que du nickel et du cobalt des électrodes, ce qui signifie que les études qui prennent en compte le **pack** montrent des bénéfices plus élevés que celles focalisées sur les **cellules**.
- 2 La spécificité géographique influence fortement le bénéfice net du recyclage, avec des bénéfices plus élevés dans les régions où les chaînes de production sont plus polluantes.
- 3 La volatilité des prix des matières premières, influencée par divers facteurs géopolitiques, rend l'analyse de la valeur des matériaux récupérés sujette à des fluctuations et doit être considérée comme une estimation à un instant donné.
- 4 L'optimalité d'une voie dépend aussi de la chimie traitée.

Aussi, il est très difficile de tirer une conclusion simple quant à la "meilleure" méthode de recyclage. Cela s'explique par :

(i) des limites de systèmes différentes et non spécifiées dans la littérature

(ii) des informations manquantes et des données non comparables

(iii) des états de développement divergents des technologies

(iv) une certaine complémentarité actuelle. En effet, beaucoup d'industriels couplent les expertises selon leurs besoins. La pyrométallurgie ayant été implémentée avant l'émergence des batteries lithium-ion, la récupération du lithium n'était pas anticipée. Les batteries LCO majoritaires au début imposaient la récupération du cobalt regroupant la majorité de la valeur. Pourtant, aujourd'hui, seuls l'hydrométallurgie ou le recyclage direct permettent de récupérer le lithium. C'est ainsi que de nombreuses industries développent ou sous-traitent le traitement de la black mass en vue de récupérer le lithium ou de nouveaux éléments autrefois perdus. La récupération du lithium, techniquement faisable, est donc conditionnée par des éléments économiques, géopolitiques mais aussi réglementaires comme nous le verrons avec la régulation européenne sur les batteries

Efficacité totale maximale théorique et rendement de récupération par matériaux par technologie de recyclage

L'hydrométallurgie est reconnue pour son rendement de récupération élevé, pouvant atteindre entre 76 % et 98,2 %, ainsi que pour la pureté des matériaux obtenus. Elle est souvent perçue comme extrêmement moins énergivore que la pyrométallurgie car elle ne nécessite pas d'atteindre des températures élevées. Pourtant, en comptant des processus supplémentaires comme le traitement des eaux usées, la consommation d'énergie peut égaler voire dépasser celle de la pyrométallurgie. De même, l'utilisation de nombreux produits chimiques, notamment les acides et hydroxydes, impacte les émissions en gaz à effet de serre d'un tel procédé. Le choix des réactifs employés peut également avoir beaucoup d'impact. De plus, en raison de sa nature même, le traitement hydrométallurgique nécessite plus d'eau que d'autres techniques. Enfin, les procédés hydrométallurgiques génèrent de grandes quantités de saumures de sulfate de sodium dont l'élimination ou la

⁴⁶ Production en Chine très carbonée.

valorisation posent encore de sérieux défis. Ainsi, des approches optimisées qui réduisent la consommation d'eau peuvent apporter des avantages significatifs pour cette méthode de recyclage.

	% matériaux récupérés max	Li	Ni	Co	Cu	Al	Mn	Plastique	Acier	Graphite
HR [11] [35]	73%	93.6%	90.1 ±15%	94%	95 ±11%	71% ±31%	88.4 ±19%	50%	90%	90%
PR [11] [33]	36%	0%	98%	86±1 5%	96%	0% ? 99% ? 47	88.4 ± 4%	0%	90%	0%
RD [37]	96%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	50%	90%	90%

Caractéristiques des technologies de recyclage

Voie de recyclage	Pyrométallurgie (PR)	Hydrométallurgie (HR)	Recyclage direct (RD)
TRL ⁴⁸	9	9	4
Empreinte carbone batterie selon recyclage sur le cycle de vie (kgCO ₂ eq/kWh) [43]	70	65	50
Réduction par rapport à l'incinération	-15%	-20%	-40%
Émissions de GES (kgCO ₂ eq/kWh) [43]	15,8	12,7	5,8
Impact net [14] (kgCO ₂ eq)	-35%	-39%	-50%

Le bénéfice net du recyclage des batteries prend en compte l'impact environnemental global de la production des batteries lithium-ion. Cela permet de mesurer dans quelle mesure l'intégration de matériaux recyclés dans la chaîne de valeur des batteries peut réduire cet impact. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer si et dans quelle proportion l'utilisation de composants recyclés diminue la charge environnementale associée à la fabrication des batteries neuves. Cela dépend évidemment de nombreux paramètres, à commencer par le pays de production de la batterie. Par exemple, la fabrication d'une batterie NMC émet entre 51 et 55 kgCO₂eq/kWh en Europe et entre 68 et 73 kgCO₂eq/kWh en Chine [14].

⁴⁷ Il peut être récupéré mais dans les faits il est souvent perdu dans les scories.

⁴⁸ TRL (Technology Readiness Level) est une échelle utilisée pour évaluer le niveau de développement et de maturité technologique d'une innovation, allant de la validation théorique (TRL 1) à la démonstration en conditions opérationnelles réelles (TRL 9).

Nous pouvons néanmoins récapituler les avantages et désavantages de chacune de voies :

La pyroméallurgie

Avantages

- Technologie maîtrisée, applicable à toutes chimies
- Pas de production d'eaux usées
- Pas de prétraitement après le tri
- Bonne efficacité de recyclage pour certains matériaux
- Récupération d'énergie via l'électrolyte

Désavantages

- Consommation d'énergie et investissement en capital plus élevés
- Émissions de substances nocives, coût de traitement associé
- Li, Mn, Al, plastique et graphite non récupérés, nécessitant une étape supplémentaire d'hydroméallurgie

L'hydroméallurgie

Avantages

- Technologie maîtrisée, applicable à toutes les chimies
- Sels récupérés utilisables directement pour la production de cathodes de batteries
- Conditions de réaction ajustables pour favoriser la récupération de certains matériaux

Désavantages

- Utilisation d'agents corrosifs et produits chimiques nocifs (eaux usées contaminées)
- Nombreuses étapes rendant le process chronophage et complexe
- Nécessité d'un démantèlement, d'un tri (risques associés au broyage) et d'un prétraitement

Le recyclage direct

Avantages

- Très bonne efficacité de recyclage, tous les autres matériaux de la batterie peuvent être récupérés, y compris l'anode, l'électrolyte, le liant et les feuilles.
- Faible consommation énergétique
- Faibles émissions durant le process

Désavantages

- Technologie encore en développement
- Les batteries doivent être en bon état ce qui réduit la ressource utilisable
- Difficilement résiliente face à l'évolution des nouvelles technologies de chimies
- Travail manuel plus important nécessitant des innovations pour les technologies de séparation

Dans le recyclage hydrométallurgique des batteries, le principal défi réside dans les séparations mécaniques, notamment le tamisage des fragments broyés. La forte adhérence des matériaux actifs aux collecteurs de courant, due aux liants organiques polymères [50][51], complique cette étape. Les entreprises de recyclage tentent de résoudre ce problème par divers moyens comme le broyage supplémentaire, l'incinération thermique ou la dissolution des liants dans des solvants, mais aucune solution n'est encore optimale. Une alternative envisagée est l'utilisation de liants solubles dans l'eau lors de la conception des batteries, ce qui faciliterait leur recyclage par lavage. Cependant, l'impact sur la durabilité des batteries nécessite une évaluation approfondie, car les liants solubles dans l'eau pourraient ne pas assurer la même adhérence durable que les liants organiques polymères actuellement utilisés [52][53].

La récupération problématique des matériaux critiques dans la section de séparation mécanique explique pourquoi plusieurs entreprises de recyclage basées sur l'hydrométallurgie, en particulier celles utilisant la coprécipitation, préfèrent actuellement utiliser **des rebuts ou scraps** de production comme flux d'entrée [10]. Cette pratique évite les séparations mécaniques et l'introduction conséquente d'impuretés, car la composition des déchets de production est moins fluctuante que celle des batteries usagées, rendant ainsi les étapes hydrométallurgiques intrinsèquement plus efficaces et produisant des matériaux de plus grande pureté. Cette efficacité de recyclage accrue doit donc être attribuée au flux d'entrée plutôt qu'au processus de recyclage lui-même, montrant une fois de plus que le potentiel des processus basés sur l'hydrométallurgie est compromis par les impuretés et les pertes de matériaux lors des séparations mécaniques, lorsqu'on utilise des batteries usagées mélangées.

La diversité des batteries au lithium entrant dans le processus de recyclage est également un facteur important. Actuellement, bien que la pyrométallurgie offre une plus grande polyvalence et puisse généralement traiter des flux de LIB mélangés, la plupart des processus hydrométallurgiques, de coprécipitation et de recyclage direct sont conçus pour traiter des LIB usagées avec quelques types de chimie, nécessitant ainsi une phase de tri. Évidemment, trier une tonne de petites LIB est plus complexe que de trier une tonne de systèmes de batteries, c'est-à-dire 3 à 5 packs de batteries de véhicules électriques.

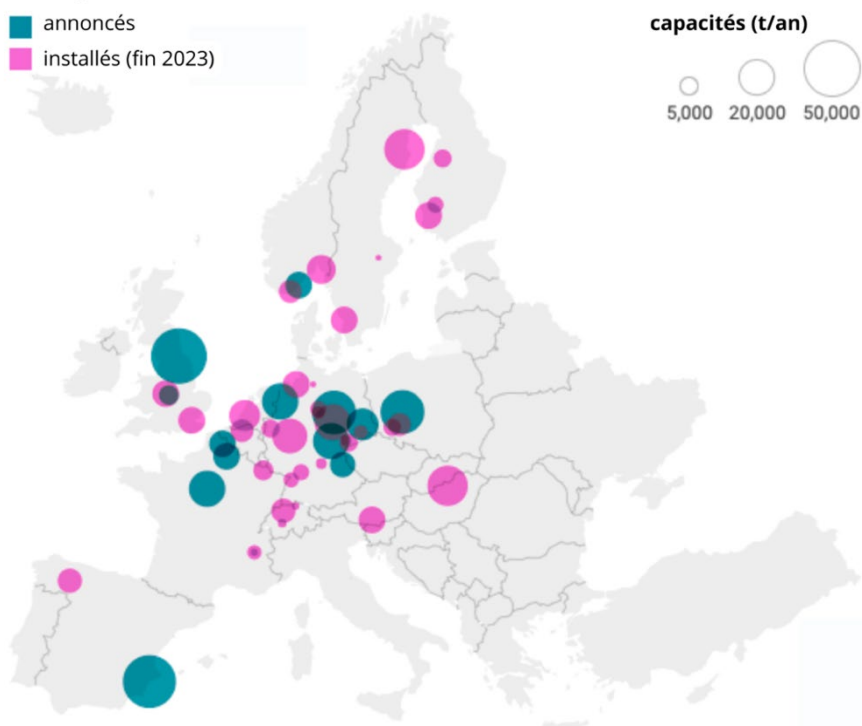
À cet égard, tous les efforts réglementaires en matière d'étiquetage, de codage et de classification des batteries vont dans le sens de la fourniture de détails tels que la composition chimique, sous forme normalisée sur des étiquettes d'information, pourrait permettre, ou du moins faciliter, le tri automatique. Pour cette raison, d'un point de vue purement logistique, on pourrait supposer que les processus de recyclage pyrométallurgique pourraient traiter les petites LIB sans étape de tri préalable, tandis que les processus hydrométallurgiques et le recyclage direct pourraient être dédiés au recyclage des grands systèmes de batteries, triés en fonction de leur chimie.

Cependant, cette répartition stricte peut être contrainte par des restrictions légales et des nécessités de marché, résultant en un compromis qui doit être spécifiquement abordé, en tenant également compte de l'évolution de nouveaux processus basés sur l'hydrométallurgie qui ne nécessitent pas de phase de tri.

Confiants dans la transition vers l'électromobilité, de nombreux développeurs technologiques et acteurs industriels cherchent à se positionner sur le marché futur de la gestion de fin de vie des véhicules électriques et ont annoncé des expansions de capacités considérables. Bien que l'approvisionnement en déchets de batteries et en véhicules électriques hors d'usage soit appelé à augmenter à partir de 2035, les plans actuels d'expansion et les annonces faites par les industriels laissent penser que la capacité de recyclage des batteries pourrait être fortement excédentaire d'ici 2030 [41]. En effet, l'offre de batteries à recycler en 2030 pourrait représenter seulement un tiers de la capacité de recyclage annoncée dans les scénarios STEPS et APS [41]. À court terme, cette surcapacité pourrait entraîner des conséquences financières majeures pour les entreprises de recyclage qui n'arriveraient pas à garantir des sources stables de batteries en fin de vie, ce qui pourrait provoquer une consolidation importante du marché.

La capacité de recyclage actuelle de l'UE est plutôt répartie de manière équitable entre les entreprises de pyrométallurgie, d'hydrométallurgie et de traitement mécanique, contribuant chacune pour environ un tiers de la capacité totale de recyclage de l'UE⁴⁹. Entre 2011 et 2035, 182 à 442 GWh seront dirigées vers le recyclage). D'ici 2030, une infrastructure de recyclage avec une capacité annuelle de 15 à 28 GWh sera nécessaire selon les scénarios considérés.

Projets de recyclage annoncés (2023)⁵⁰



Map: Fraunhofer ISI · Created with Datawrapper

Dans l'UE, la capacité pour les premières étapes du recyclage des batteries lithium-ion (LIB) atteindra 160 000 tonnes par an d'ici la fin de 2023, réparties sur 37 sites. Par rapport à 2020, les capacités ont augmenté de plus de 100 000 t/an avec la mise en service de 13 grandes installations de recyclage. De plus, 16 autres usines sont prévues et apporteront des gains de capacité supplémentaires. Avec les nouvelles usines annoncées et les expansions prévues, les capacités devraient atteindre 400 000 t/an en 2025. D'ici 2030, la capacité de production de batteries lithium-ion (LIB) en Europe devrait être suffisante pour satisfaire les besoins anticipés [54]

Le secteur des batteries lithium-ion implique une variété d'acteurs, notamment les entreprises minières et métallurgiques comme Glencore ou le groupe français Eramet, les raffineurs et fabricants de composants en aval, les acteurs historiques du recyclage issus de la métallurgie tel que SNAM, ainsi que les acteurs intégrés

⁴⁹ La pyrométallurgie représente 35 % de la capacité de recyclage en Europe, tandis que l'hydrométallurgie en représente 28 %. Leur combinaison représente 21 %, et le traitement mécanique représente les 16 % restants [44].

⁵⁰ Illustration de [Fraunhofer](#)

horizontalement et verticalement tel que BYD, fabricant chinois de batteries et de véhicules électrique. Enfin, les "pure players", spécialisés dans le recyclage des batteries, sont de plus en plus présents, stimulés entre autres par des politiques de responsabilité élargie des producteurs en Europe et des réglementations gouvernementales en Chine.

Sélection d'acteurs européens du recyclage des batteries lithium-ion⁵¹



Source: Arthur D. Little

En France, les batteries et leur recyclage sont également des enjeux stratégiques forts. Deux nouveaux projets axés sur la chaîne de valeur des batteries dans le secteur automobile ont été sélectionnés dans le cadre de l'appel à projets « Recyclage, Recyclabilité et Réincorporation des matériaux » de France 2030. Ces projets lauréats bénéficieront d'un soutien financier de 30 millions d'euros, venant s'ajouter aux financements déjà obtenus dans le cadre de France Relance.

1 Veolia/Solvay/Renault : Recyclage de batteries

L'alliance Veolia/Solvay/Renault met en œuvre un projet de recyclage de batteries visant à ériger une unité de traitement d'une capacité de 10 000 tonnes par an en 2023, avec un déploiement trois fois plus grand prévu pour 2028. Veolia apporte son expertise dans la réduction des batteries en black mass, tandis que Solvay contribue avec sa maîtrise des procédés hydrométallurgiques. Le projet bénéficiera d'un soutien pour la mise en place d'un démonstrateur d'hydrométallurgie capable de traiter entre 4 000 et 7 000 tonnes équivalentes de black mass.

⁵¹ Carte issue de [Arthur D. Little](#)

2

Mecaware/Verkor : Recyclage de rebuts de batteries

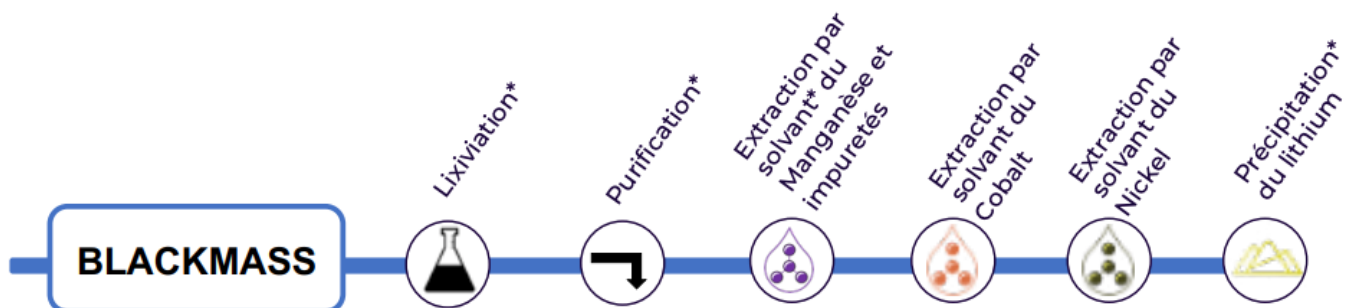
Le projet ScrapCO2MET de [Mecaware](#) et [Verkor](#) vise à construire une unité industrielle de recyclage des rebuts de production de la Gigafactory, réintégrant les métaux dans la chaîne de valeur. Il se distingue en se concentrant exclusivement sur les rebuts de production, contrairement à la plupart des autres initiatives qui incluent des batteries lithium-ion en fin de vie. De plus, il se caractérise par son intégration "in situ" dans la Gigafactory de Verkor à Dunkerque. Pour soutenir le développement des technologies du procédé, une ligne pilote d'une capacité de 50 à 100 tonnes par an sera initialement installée sur le site R&D de Verkor à Grenoble. Si le procédé est validé, une première ligne industrielle sera déployée dans la Gigafactory de Verkor à Dunkerque, capable de traiter entre 6 000 et 8 000 tonnes de rebuts par an.

Hors du scope France 2030, d'autres projets intéressants se développent notamment :

3

Eramet : Le projet ReLieVe⁵²

Le projet ReLieVe, porté par Eramet, consiste en la création d'une usine de raffinage hydrométallurgique située à Dunkerque, dédiée à la transformation de la black mass issue des batteries de véhicules électriques. Ce projet vise à extraire et à purifier les métaux stratégiques tels que le nickel, le cobalt et le lithium contenus dans cette black mass, afin de les réutiliser pour la production de nouvelles batteries. L'usine aura une capacité de traitement de 25 000 tonnes de black mass par an, issue de 50 000 tonnes de modules de batteries lithium-ion, ce qui correspond à l'équivalent de 200 000 voitures électriques.

Procédé de recyclage ReLieVe

Ce projet représente une réponse industrielle aux besoins de recyclage des batteries de véhicules électriques en France. Il permettra également de recycler les rebuts des gigafactories, ces grandes usines de production de nouvelles batteries. En outre, le projet a pour objectif de produire des métaux sous une forme chimique suffisamment pure pour fabriquer de nouveaux matériaux d'électrode, contribuant ainsi à boucler le cycle du recyclage.

Pour s'assurer d'un approvisionnement stable en matériaux, Eramet négocie directement avec les gigafactories de la région pour obtenir les rebuts de fabrication et collabore avec les fabricants de voitures pour garantir à long terme un flux régulier de batteries en fin de vie à recycler.

⁵² "Recycling of Li-ion Batteries for Electric Vehicle"

On pense également à [Orano](#) qui, en mai 2023, a signé des accords avec le groupe XTC New Energy, spécialiste chinois de la production de matériaux de cathodes pour batteries, pour créer deux co-entreprises dédiées à la production de matériaux critiques pour les batteries de véhicules électriques, un projet incluant une usine de recyclage d'Orano ainsi que la fabrication de matériaux actifs de cathode et de précurseurs de matériaux de cathode, ce qui permettra au groupe de contribuer à la création d'une chaîne de valeur complète et durable pour les batteries électriques.

Aujourd'hui, seule une petite quantité de matériaux secondaires provenant des batteries lithium-ion en fin de vie est disponible sur le marché, et les usines de traitement de ces batteries en fin de vie commencent tout juste à se construire et à entrer en phase de production. Néanmoins, le taux de croissance annuel composé (CAGR) du marché du recyclage des batteries lithium-ion devrait être de 23% entre 2024 et 2032, atteignant une valeur de 23 milliards de dollars [55].

Comme pour toute activité économique, le recyclage des batteries doit être rentable pour être viable au-delà d'être techniquement faisable. La rentabilité dépend des coûts opérationnels, qui incluent notamment les coûts de collecte et peuvent être réduits grâce à des économies d'échelle ou à une expertise accrue, ainsi que des revenus provenant de la vente des métaux récupérés. Cette équation économique est influencée par la qualité des matériaux récupérés, les prix des matières premières, le prix du CO₂, les réglementations environnementales et la possibilité d'une seconde vie pour les batteries recyclées, qui peut également générer des revenus. En ce qui concerne les revenus, en dehors du matériau de l'emballage de la cellule, le recyclage direct émerge théoriquement comme une option plus lucrative, générant des revenus plus élevés par rapport aux processus pyrométallurgiques et hydrométallurgiques en raison de la récupération d'une plus grande quantité de matériaux [43], [56]. En réalité dans le futur rien n'empêche techniquement que l'hydrométallurgie puisse récupérer ce qui est pour l'instant perdu, cela dépendra des incitations économiques et des volontés politiques sous-jacentes. Les nouvelles réglementations et subventions mises en place notamment en Europe visent justement à pérenniser cette activité afin que cet obstacle économique ne soit plus décisif.

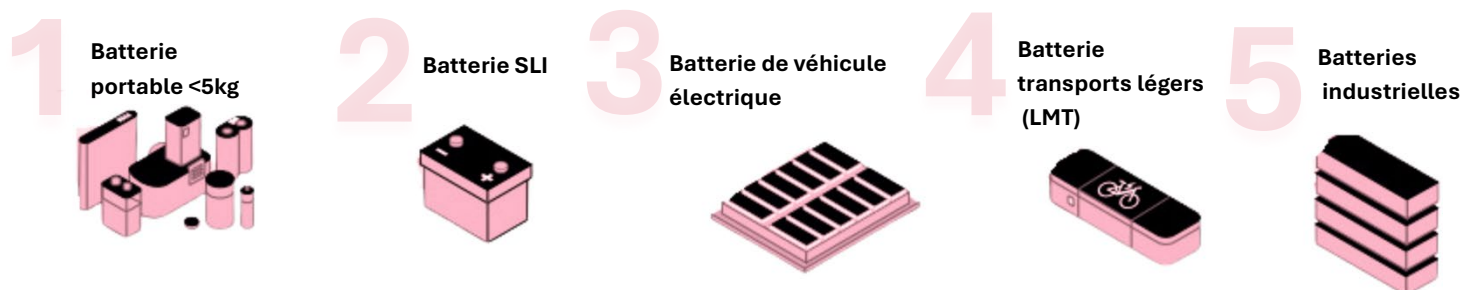
Enfin, bien que les avantages environnementaux proviennent principalement de la récupération de l'aluminium et du cuivre, les avantages économiques proviennent aussi de la récupération des matériaux des cellules, tels que le nickel, le cobalt et le lithium. Bien que la récupération du lithium sous forme d'hydroxyde ait contribué à moins de 6 % dans 11 des 13 catégories d'impact environnemental, elle a augmenté la valeur économique des matériaux récupérés de 32 % dans le cas hydrométallurgique [43]. Cela souligne l'importance de cibler la circularité à l'échelle du pack pour débloquer à la fois les avantages environnementaux et économiques du recyclage des batteries.

Analyse de la réglementation européenne

Bien que l'Europe soit le deuxième marché mondial pour les véhicules électriques, elle ne domine pas les chaînes d'approvisionnement en batteries lithium-ion, dépendant ainsi des marchés mondiaux pour l'extraction des matières premières, le raffinage et la fabrication de batteries.

En 2023, le Conseil de l'UE a adopté une [nouvelle réglementation](#) (EU Battery Regulation) sur les batteries et les déchets de batteries, ciblant l'ensemble de leur cycle de vie, y compris leur fin de vie, afin d'assurer leur durabilité, leur sécurité et leur compétitivité. Cette réglementation s'applique à tous les fabricants, producteurs, importateurs et distributeurs de tous types de batteries (5 catégories distinctes) mises sur le marché de l'UE, y compris les batteries pour véhicules électriques, et ce, indépendamment de l'origine des batteries ou des matières premières utilisées.

Les différentes catégories de batteries considérées dans la réglementation⁵³



Selon l'article 62.1, les cinq catégories de batterie doivent être collectées auprès des utilisateurs finaux sans frais, quelle que soit leur nature, composition, état, marque ou origine.

Ce règlement vise à développer une industrie européenne des batteries robuste et à renforcer la chaîne de valeur associée tout en équilibrant les préoccupations liées à la gestion environnementale avec les intérêts régionaux en matière de compétitivité économique. Ainsi, il vise explicitement à obtenir un avantage compétitif mondial, à créer des barrières à l'entrée et à inciter les investissements au sein de l'UE dans la capacité de production de batteries durables. La réglementation s'articule autour de 4 axes majeurs :

Transparence et Traçabilité

- **Objectif** : Accroître la transparence et la traçabilité tout au long du cycle de vie des batteries.
- **Moyens** : Imposer une diligence raisonnable par des tiers pour les chaînes d'approvisionnement et de valeur des batteries de plus de 2 kWh.

Réduction de l'Impact Climatique

- **Objectif** : Réduire l'impact climatique des batteries.
- **Moyens** : Exiger une déclaration d'empreinte carbone et établir des seuils maximaux pour les émissions.

Promotion de la Circularité des Matériaux Critiques

- **Objectif** : Promouvoir la collecte, le recyclage et l'utilisation efficace des matériaux critiques.
- **Moyens** : Améliorer les taux de récupération pour le lithium, le cobalt et le nickel, et imposer l'utilisation de matériaux recyclés dans les nouvelles batteries.

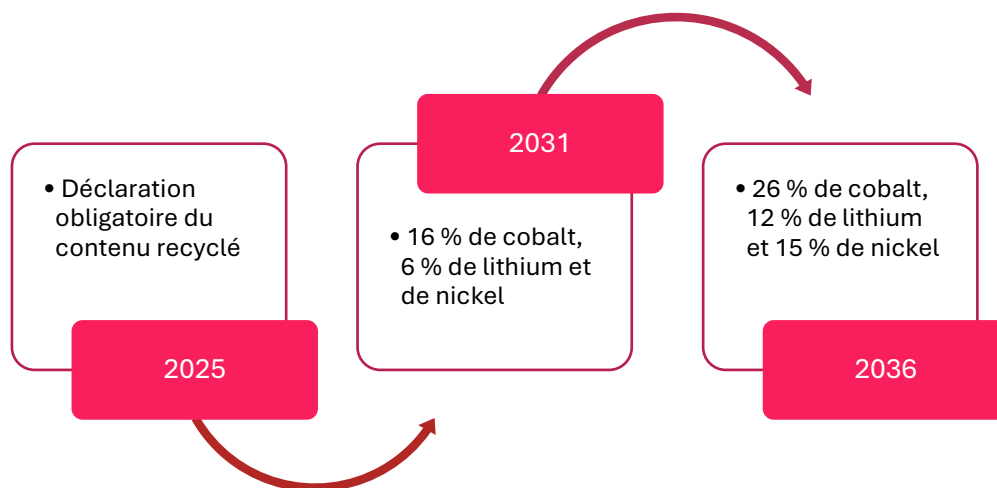
Longévité et Gestion des Performances

- **Objectif** : Prolonger la durée de vie des batteries et optimiser leur gestion.
- **Moyens** : Accorder aux recycleurs l'accès au système de gestion des batteries (BMS) pour vérifier l'état de santé des batteries en temps réel et évaluer leur potentiel de réutilisation ou de réaffectation avant recyclage.

⁵³ Illustration de [Corepile](#)

Les réglementations concernant la gestion des batteries des véhicules électriques en fin de vie ont évolué pour soutenir les opérations de recyclage et l'incorporation de matériaux recyclés dans la production de nouvelles batteries. La législation européenne a pris les devants en proposant un nouveau règlement qui impose l'inclusion obligatoire de métaux recyclés dans la fabrication de nouvelles batteries :

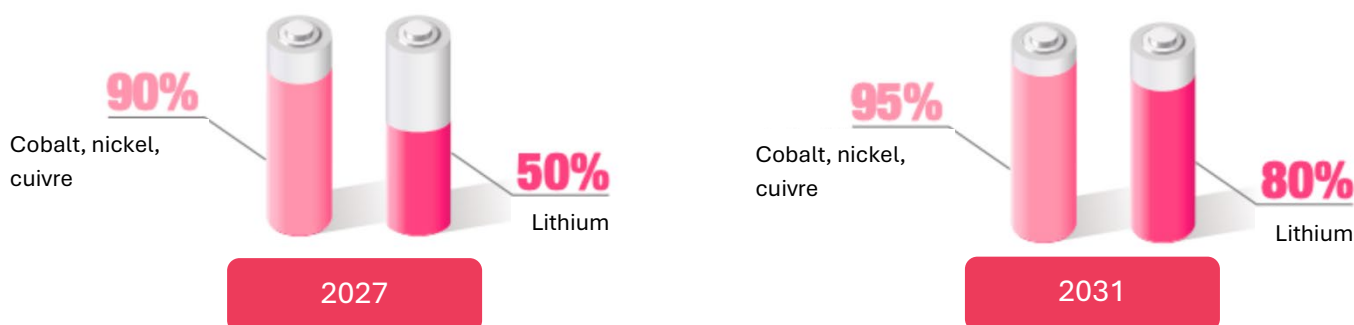
Inclusion obligatoire d'un pourcentage de minéraux critiques recyclés dans les nouvelles batteries lithium-ion



Ces objectifs peuvent sembler modestes mais sont en réalité extrêmement ambitieux. Des experts du secteur estiment que l'industrie européenne, par rapport à ses concurrentes chinoises, n'est pas prête et que sa compétitivité pourrait en souffrir [57]. Pour atteindre ces proportions de contenu recyclé tout en augmentant les volumes de production, une réorientation substantielle des sous-produits de recyclage vers la fabrication de nouvelles batteries sera nécessaire.

Aussi, cela présuppose que les industriels récupèrent ces matériaux avec une efficacité élevée. Des objectifs ambitieux de très court-terme sont déjà fixés. Les objectifs pour les batteries lithium sont d'atteindre un taux de recyclage de 65 % en poids moyen de la batterie d'ici fin 2025, et de 70 % en poids moyen d'ici fin 2030. C'est ainsi que la régulation vise également à contrôler l'efficacité des processus de recyclage avec de nouveaux objectifs obligatoires :

Taux minimaux d'efficacité de recyclage pour certains minéraux⁵⁴



⁵⁴ Illustration de [Corepile](#)

Ces taux sont cohérents avec l'état actuel de la technologie. Pour le lithium, les taux minimaux sont faibles par rapport à ce que certains procédés hydrométallurgiques peuvent obtenir. Les industries basées sur la pyrométallurgie devront s'adapter à ce nouveau règlement en développant une branche d'hydrométallurgie pour récupérer le lithium dans les scories ou sous-traiter cette partie du recyclage. Il sera intéressant de voir dans les prochaines années comme se redessine le paysage des industriels du recyclage en Europe.

En plus de ce flux potentiel de matériaux recyclables, il faut considérer que les produits contenant des batteries, ainsi que les batteries elles-mêmes, passent généralement par plusieurs propriétaires et sont échangés sur les marchés internationaux⁵⁵. Cela complique la tâche des recycleurs européens pour atteindre les économies d'échelle nécessaires, les rendant moins compétitifs et moins attractifs pour les investissements.

La domination de la Chine et de la Corée du Sud dans la production de batteries leur confère un meilleur accès aux matières premières recyclables, ce qui leur a déjà permis d'atteindre des économies d'échelle et un avantage concurrentiel dans l'approvisionnement en matériaux recyclables, tant en Asie qu'en Europe.

Les infrastructures de raffinage des métaux sont principalement implantées en Chine, où elles bénéficient d'une capacité élevée et d'une main-d'œuvre expérimentée. Sans une politique européenne concertée et proactive, il est peu probable que les entreprises privées en Europe investissent dans ce secteur, car la rentabilité y est bien moindre comparée à la Chine. Contrairement aux États-Unis, qui ont fermé leurs frontières pour protéger leur marché, l'Europe n'a pas encore adopté de mesures similaires.

L'Inflation Reduction Act (IRA), lancé par les États-Unis en août 2022, pourrait inciter les entreprises à rediriger leurs projets de batteries et de véhicules électriques de l'Europe vers les États-Unis, retardant ainsi les ambitions européennes. De plus, les investissements dans les métaux critiques et leur traitement, secteur où l'Europe commence à peine à rattraper son retard, risquent de se déplacer ailleurs. En quelques mois seulement, les investissements en Amérique du Nord ont explosé, répondant à la demande de l'IRA selon laquelle 40 % des métaux des batteries doivent provenir des États-Unis et que la moitié des composants de batteries doivent être fabriqués en Amérique du Nord pour bénéficier du crédit d'impôt complet⁵⁶.

Un autre point critique est qu'il existe un risque théorique que le recyclage soit priorisé par rapport à la réutilisation, bien que cette dernière soit placée plus haut dans la hiérarchie des déchets. En effet, la forme la plus élevée de gestion des déchets, telle que définie dans la [Directive 2008/98/CE](#) du Parlement européen, est la "prévention", qui englobe tous les éléments empêchant la batterie de devenir un déchet, comme les habitudes de conduite ou le choix de la batterie.

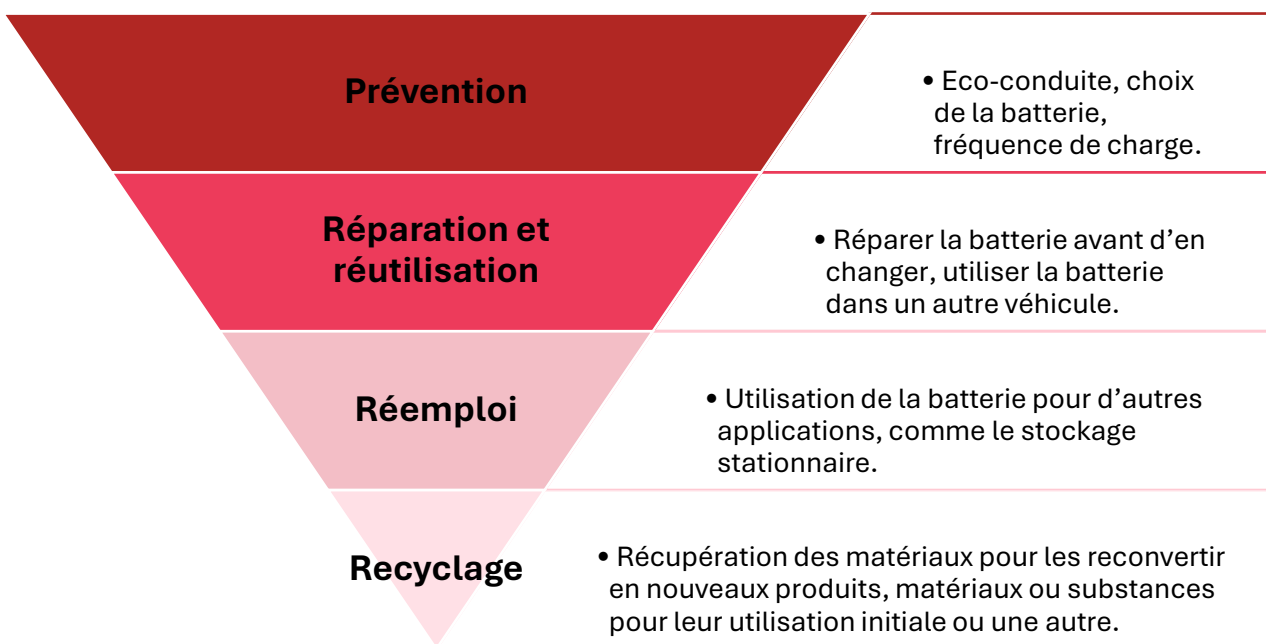
Après la prévention vient la "réutilisation", définie comme "toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés à nouveau pour le même usage pour lequel ils ont été conçus". La réutilisation est associée à la notion de réparation, mais à distinguer du réemploi car celui-ci indique un nouvel usage (comme le stockage par exemple). Cette distinction est importante car l'objet légal « batterie » n'est pas soumis aux mêmes obligations, dans la mesure où elles ne sont pas gérées par les mêmes acteurs selon l'étape du cycle de vie de la batterie (voir infographie). Cette priorité accordée au recyclage pourrait détourner les efforts et les ressources nécessaires pour favoriser la réutilisation des batteries, qui est pourtant une solution plus durable et alignée sur les principes de l'économie circulaire.

⁵⁵ L'article retrace le chemin parcouru par une batterie endommagée Tesla aux États-Unis vers l'Ukraine pour y être réparée.

⁵⁶ La loi sur la réduction de l'inflation aux États-Unis offre des crédits d'impôt généreux pour la production de batteries et de minéraux (appelés crédit de production pour la fabrication avancée) :

- 10 % des coûts de production des minéraux critiques,
- 10 % du coût des matériaux actifs des électrodes de batterie,
- 35 USD par kWh pour la production de cellules de batterie,
- 10 USD par kWh pour la production de modules de batterie, soit 45 USD par kWh au total si les cellules et les modules sont produits ensemble.
- Tous ces crédits peuvent être cumulés et réclamés ensemble.

La hiérarchie de la fin de vie pour les déchets appliqué aux batteries des véhicules électriques



Néanmoins, la clarification par le Règlement de la responsabilité des producteurs pour les batteries réutilisées, ainsi que leur statut de déchet, et l'accès mandaté aux données des systèmes de gestion des batteries (BMS), pourraient aider à conserver les batteries dans l'UE, facilitant ainsi la fabrication de nouveaux produits de batteries qui, en fin de vie, resteront en Europe. En effet, l'article 14 du Chapitre 3 du Règlement stipule que le système de gestion de la batterie (BMS) doit permettre d'accéder à des données actualisées sur paramètres permettant de déterminer l'état de santé et la durée de vie de la batterie. Cela facilitera grandement le travail de tous les opérateurs de la seconde vie. Cependant, cela pourrait également permettre aux commerçants de déclarer les batteries usagées comme une "ressource ou produit", facilitant ainsi leur exportation et augmentant la fuite de matériaux recyclables.

Enfin, nous pouvons souligner l'absence d'un objectif de taux de collecte spécifique pour les batteries de véhicules électriques contrairement aux batteries LMT et de portables. L'absence d'objectif précis sur d'autres minéraux critiques peut également être débattue. T&E [23] souligne également un potentiel de production domestique pour les cellules des batteries lithium-ion de 100% et de 2/3 pour les matériaux actifs de cathode d'ici 2027. Un potentiel inexploité par la régulation dans un contexte pourtant compétitif notamment avec l'IRA.

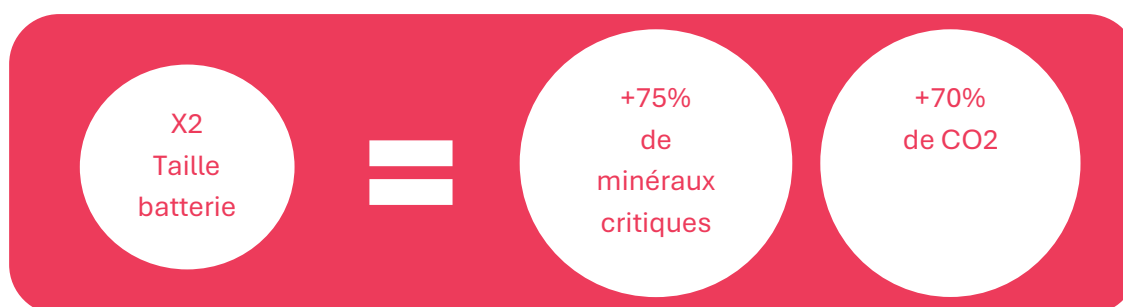
Pour finir, il aurait pu être intéressant d'instaurer une régulation sur la taille des batteries (et/ou leur intensité carbone) afin d'inciter à une sobriété au sein même de la mobilité électrique. Néanmoins l'obligation de délivrer un passeport digital (article 77-78 de la nouvelle régulation) renseignant notamment sur l'empreinte carbone de la batterie pourra peut-être influencer les décisions futures.

La sobriété, une question de taille de batterie ?

En 2023, le rapport mondial sur les véhicules électriques indique que les ventes de grandes voitures électriques (70-90 kWh) et de modèles SUV électriques (70-75 kWh) sont en augmentation, tandis que les modèles de voitures conventionnelles électriques sont en déclin. En 2022, les SUV représentaient 40 % du portefeuille des véhicules électriques, soit une part équivalente à celle des petites et moyennes voitures combinées, et les grandes voitures représentaient 20 % [24] [37].

Cette tendance se reflète également dans les ventes et le parc automobile en circulation. En effet, les SUV et les grandes voitures continuent de dominer le marché. Environ 16 % de tous les SUV vendus en 2022 étaient électriques, ce qui est supérieur à la part de marché globale des véhicules électriques et démontre les préférences des consommateurs pour les SUV, qu'il s'agisse de véhicules à combustion interne ou de véhicules électriques.

Ces modèles affectent la durabilité et les chaînes d'approvisionnement en raison de leurs batteries plus volumineuses, qui nécessitent une plus grande quantité de minéraux critiques. Doubler la taille de la batterie requiert environ 75 % de minéraux critiques supplémentaires et émet 70 % de CO₂ en plus lors du traitement des matériaux, de la fabrication et de l'assemblage [33].



Dans une dynamique de développement des véhicules électriques basé sur le scénario « [Sustainable Development](#) » de l'AIE⁵⁷, la demande cumulative de **lithium, cobalt et nickel** entre 2020 et 2050 fait plus que **doubler** lorsque la capacité moyenne des batteries passe de **66 kWh à 110 kWh** (comparable à celle du modèle [Tesla Model S Long Range Plus](#)) et ce, **qu'il y ait recyclage ou non [58]**. La taille des batteries représente donc un levier essentiel. Combinée à l'implantation du recyclage par hydrométallurgie [59], **ces deux facteurs permettent de réduire la demande cumulative sur cette période d'environ 60 % [58] !**

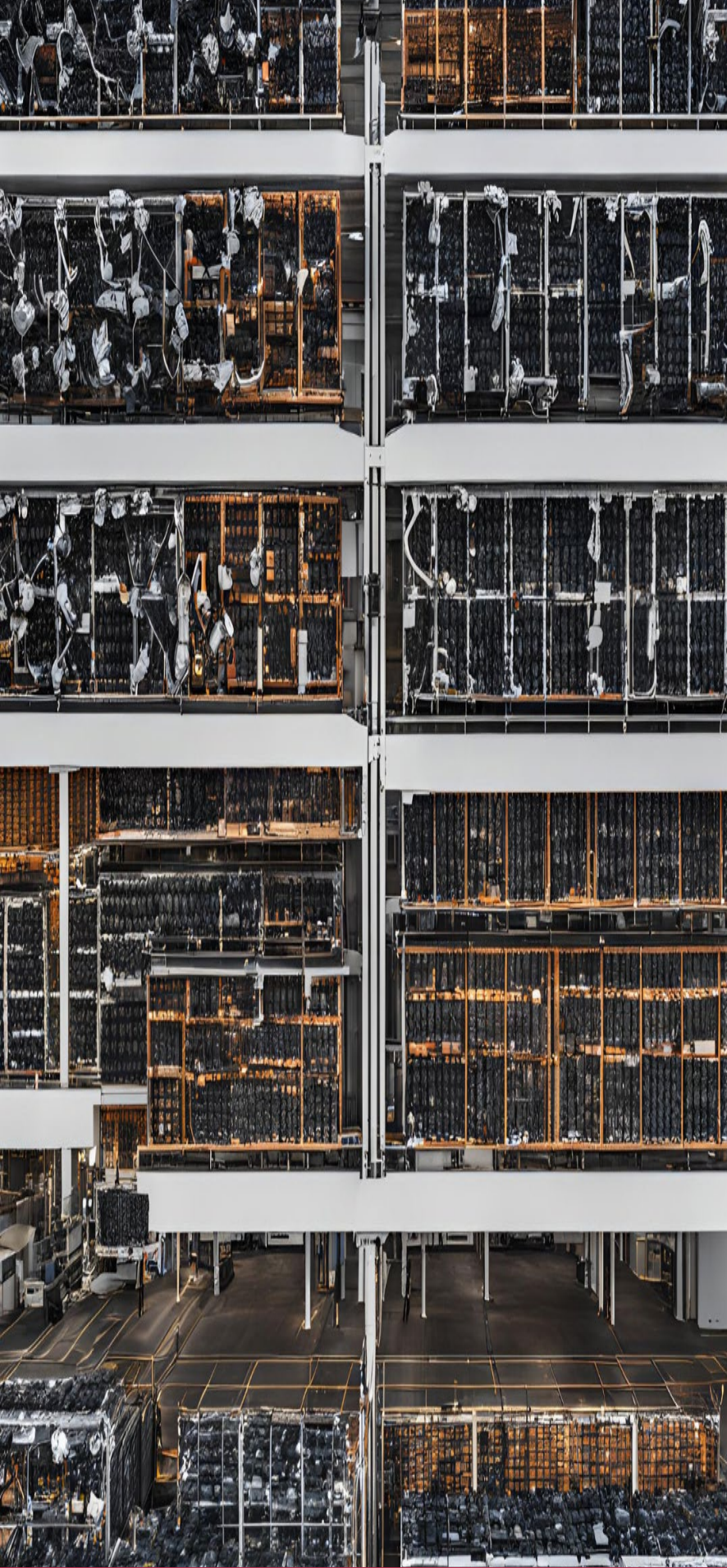
Même si les grandes voitures et les SUV électriques sont préférables aux véhicules équivalents à moteur thermique, la transition doit non seulement s'éloigner des véhicules à combustion interne, mais aussi des voitures rarement utilisées et des véhicules électriques à batterie de grande taille.

Cela met en lumière l'aspect social et comportemental de la transition. Il devra être soutenu par des politiques solides et des investissements dans les transports en commun et les infrastructures favorables aux véhicules électriques.

⁵⁷ Dans le Scénario de Développement Durable, le parc mondial de véhicules électriques atteint près de 70 millions de véhicules en 2025 et 230 millions en 2030 (hors deux/trois-roues). La part des véhicules électriques dans le parc total s'élève à 12 % en 2030.

Conclusion

- L'avenir des technologies de recyclage des batteries des véhicules électriques, présente à la fois des **opportunités prometteuses** et des **défis complexes**. L'augmentation massive du nombre de batteries en fin de vie, attendue dans les décennies à venir, souligne l'importance de développer une **filière de fin de vie** systématique et systémique. Bien que des avancées notables aient été réalisées, notamment en matière de collecte, de tri et de revalorisation des composants critiques ainsi que d'un point de vue réglementaire, de nombreuses **incertitudes** subsistent quant à **l'efficacité, la rentabilité et la durabilité** des processus de recyclage actuels et des options de secondes vies possibles.
- Les technologies comme **l'hydrométallurgie** et la **pyrométallurgie**, bien que **matures**, rencontrent des limites liées à la **consommation énergétique** et aux **externalités environnementales**. Le **recyclage direct**, encore en phase expérimentale, laisse entrevoir une alternative plus efficace, mais nécessite des recherches supplémentaires pour être mis en œuvre à grande échelle. En parallèle, l'intégration des batteries dans **une seconde vie** pour des applications de **stockage stationnaire**, bien que techniquement viable, repose sur des diagnostics précis, des méthodes de reconditionnement optimisées et des modèles de vieillissement fiables. **L'incertitude** concernant la durée de cette seconde vie, ainsi que les coûts associés à ces opérations, demeure un frein important.
- Sur le plan économique, **l'arbitrage** entre réutilisation et recyclage dépendra en grande partie des évolutions technologiques, mais aussi du prix des matières premières et des exigences réglementaires. À cet égard, la nouvelle directive européenne sur les batteries, qui prévoit l'obligation d'incorporer des matériaux recyclés dans les nouvelles batteries, **pourrait redéfinir les priorités industrielles**. Cependant, le développement d'une filière de seconde vie performante ou d'un recyclage puissant soulève également des questions **stratégiques et socio-économiques** sous-jacentes.
- En définitive, bien que les systèmes de seconde vie et les technologies de recyclage soient appelés à jouer un rôle central dans la transition énergétique, leur véritable efficacité à long terme dépendra de la capacité des **acteurs industriels et politiques** à coopérer afin de relever les défis techniques, économiques et environnementaux qui jalonnent leur développement.
- Il n'existe **pas de solution miracle**, et une production en « **boucle fermée** » des batteries de véhicules électriques semble pour l'instant **illusoire**. Tous les leviers sont à mobiliser au plus vite. Notamment les questions **socio-économiques, urbaines et démographiques** que soulèvent le sujet de la voiture par exemple vis-à-vis des **inégalités** d'accès aux infrastructures de transports en commun. **L'innovation, la sobriété et l'adaptation** réglementaire seront des leviers essentiels pour pérenniser ces initiatives et maximiser leur contribution à une économie durable.



AUTRICE

Louise Hurel

Zenon Research

Mines Paris PSL, IHEIE

DIRECTION SCIENTIFIQUE

Robin Girard

Zenon Research

Mines Paris PSL, PERSEE

Remerciements

**Je remercie chaleureusement
pour leurs relectures et
suggestions :**

- Arnaud Baudot
- Cédric Philibert
- Philippe Barboux
- François de Rochette,
Thomas Boigontier,
Rémi Grimaud

Bibliographie

- [1] M. S. Ziegler et J. E. Trancik, « Data series for lithium-ion battery technologies ». Harvard Dataverse, 2021. doi: 10.7910/DVN/9FEJ7C.
- [2] G. Crabtree, E. Kócs, et L. Trahey, « The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond », *MRS Bull.*, vol. 40, n° 12, p. 1067-1078, déc. 2015, doi: 10.1557/mrs.2015.259.
- [3] Hannah Ritchie, « “The price of batteries has declined by 97% in the last three decades” », Published online at OurWorldInData.org., 2021. [En ligne]. Disponible sur: Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/battery-price-decline' [Online Resource]
- [4] A. D. Easley, T. Ma, et J. L. Lutkenhaus, « Imagining circular beyond lithium-ion batteries », *Joule*, vol. 6, n° 8, Art. n° 8, août 2022, doi: 10.1016/j.joule.2022.06.022.
- [5] E. Kallitsis *et al.*, « Safe and sustainable lithium-ion batteries », Imperial College London, mars 2022. doi: 10.25561/95548.
- [6] IEA, « Batteries and secure energy transition », World Energy Outlook Special Report, 2024.
- [7] L. Toro *et al.*, « A Systematic Review of Battery Recycling Technologies: Advances, Challenges, and Future Prospects », *Energies*, vol. 16, n° 18, Art. n° 18, sept. 2023, doi: 10.3390/en16186571.
- [8] IEA (2023), « Critical Minerals Market Review 2023, License: CC BY 4.0 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>
- [9] IEA, « Global Electric Vehicle Outlook 2024 », 2024.
- [10] L. Gaines, J. Zhang, X. He, J. Bouchard, et H. E. Melin, « Tracking Flows of End-of-Life Battery Materials and Manufacturing Scrap », *Batteries*, vol. 9, n° 7, Art. n° 7, juill. 2023, doi: 10.3390/batteries9070360.
- [11] M. Bruno et S. Fiore, « Material Flow Analysis of Lithium-Ion Battery Recycling in Europe: Environmental and Economic Implications », *Batteries*, vol. 9, n° 4, Art. n° 4, avr. 2023, doi: 10.3390/batteries9040231.
- [12] C. Xu, Q. Dai, L. Gaines, M. Hu, A. Tukker, et B. Steubing, « Future material demand for automotive lithium-based batteries », *Commun. Mater.*, vol. 1, n° 1, Art. n° 1, déc. 2020, doi: 10.1038/s43246-020-00095-x.
- [13] E. Kastanaki et A. Giannis, « Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse, remanufacturing and recycling options », *J. Clean. Prod.*, vol. 393, p. 136349, mars 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136349.
- [14] O. Winjobi, J. C. Kelly, et Q. Dai, « Life-cycle analysis, by global region, of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries of varying nickel content », *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 32, p. e00415, juill. 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00415.
- [15] X. Ma, L. Azhari, et Y. Wang, « Li-ion battery recycling challenges », *Chem*, vol. 7, n° 11, Art. n° 11, nov. 2021, doi: 10.1016/j.chempr.2021.09.013.
- [16] T. Watari, K. Nansai, K. Nakajima, et D. Giurco, « Sustainable energy transitions require enhanced resource governance », *J. Clean. Prod.*, vol. 312, p. 127698, août 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127698.
- [17] S. Maharajan, M. Jana, et S. Basu, « Handling of the End of Life Electric Vehicle Batteries for Stationary Storage Applications », in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, Bengaluru, India: IEEE, déc. 2019, p. 1-5. doi: 10.1109/ITEC-India48457.2019.ITECINDIA2019-122.
- [18] C. Xu *et al.*, « Electric vehicle batteries alone could satisfy short-term grid storage demand by as early as 2030 », *Nat. Commun.*, vol. 14, n° 1, Art. n° 1, janv. 2023, doi: 10.1038/s41467-022-35393-0.
- [19] Cédric PHILIBERT, « Electric Vehicles: A Strong and Still Understated Performance ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/ifri_philibert_electric_vehicles_2024_1.pdf
- [20] S. Ziemann, D. B. Müller, L. Schebek, et M. Weil, « Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133, p. 76-85, juin 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.031.
- [21] « REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC ».
- [22] Xinhua, « Energy in China's New Era ». [En ligne]. Disponible sur: http://english.scio.gov.cn/whitepapers/2020-12/21/content_77035604_9.htm
- [23] « A European Response to US IRA- How

- Europe can use its soft and financial powers to build a successful electric vehicle value chain », *Transport & Environment*, janv. 2023.
- [24] European Parliament, *EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>
- [25] Energy Transitions Commission, *Energy Transitions Commission, Who we are, Publications, Blog*, et ENERGY TRANSITION COMMISSION, « Material and Resource Requirements for the Energy Transition », juill. 2023.
- [26] HANNAH RITCHIE, « The low-carbon energy transition will need less mining than fossil fuels, even when adjusted for waste rock ».
- [27] J. Nijmens, P. Behrens, O. Kraan, B. Sprecher, et R. Kleijn, « Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system », *Joule*, vol. 7, n° 11, p. 2408-2413, nov. 2023, doi: 10.1016/j.joule.2023.10.005.
- [28] T. Watari, K. Nansai, K. Nakajima, et D. Giurco, « Sustainable energy transitions require enhanced resource governance », *J. Clean. Prod.*, vol. 312, p. 127698, août 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127698.
- [29] IEA 2021, « The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions- World Energy Outlook Special Report ». 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [30] D. Latini *et al.*, « A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling », *J. Power Sources*, vol. 546, p. 231979, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231979.
- [31] European Commission. Joint Research Centre., *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study*. LU: Publications Office, 2023. Consulté le: 15 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/386650>
- [32] BNEF, « Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh ». [En ligne]. Disponible sur: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>
- [33] IEA, « Global EV Outlook 2023 ». 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- [34] A. Stephan *et al.*, « Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+ », Fraunhofer-Gesellschaft, 2023. doi: 10.24406/PUBLICA-1342.
- [35] M. Abdelbaky, J. R. Peeters, et W. Dewulf, « On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe », *Waste Manag.*, vol. 125, p. 1-9, avr. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.032.
- [36] A. Fordham *et al.*, « Correlative non-destructive techniques to investigate aging and orientation effects in automotive Li-ion pouch cells », *Joule*, vol. 7, n° 11, Art. n° 11, nov. 2023, doi: 10.1016/j.joule.2023.10.011.
- [37] L. Lander *et al.*, « Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling », *iScience*, vol. 24, n° 7, Art. n° 7, juill. 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102787.
- [38] Y. Zhao *et al.*, « Recycling of sodium-ion batteries », *Nat. Rev. Mater.*, vol. 8, n° 9, Art. n° 9, juill. 2023, doi: 10.1038/s41578-023-00574-w.
- [39] S. Bobba, F. Mathieux, et G. A. Blengini, « How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 145, p. 279-291, juin 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.02.022.
- [40] C. Xu, Q. Dai, L. Gaines, M. Hu, A. Tukker, et B. Steubing, « Supplementary information - Future material demand for automotive lithium-based batteries », *Commun. Mater.*, vol. 1, n° 1, Art. n° 1, déc. 2020, doi: 10.1038/s43246-020-00095-x.
- [41] IEA, « Batteries and secure energy transition », *World Energy Outlook Special Report*, 2024.
- [42] W.-H. Chen et I.-Y. L. Hsieh, « Techno-economic analysis of lithium-ion battery price reduction considering carbon footprint based on life cycle assessment », *J. Clean. Prod.*, vol. 425, p. 139045, nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139045.
- [43] E. Kallitsis, A. Korre, et G. H. Kelsall, « Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs », *J. Clean. Prod.*, vol. 371, p. 133636, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133636.
- [44] M. Bruno et S. Fiore, « Review of lithium-ion batteries' supply-chain in Europe: Material flow analysis and environmental assessment », *J. Environ. Manage.*, vol. 358, p. 120758, mai 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120758.
- [45] IEA 2021, « The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions- World Energy Outlook Special Report ». 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [46] A. Zorin, T. Song, D. Gastol, et E. Kendrick, « Acid-Assisted Separation of Cathodic Material from Spent Electric Vehicle Batteries for Recycling », *Metals*, vol. 13, n° 7, p. 1276, juill. 2023, doi: 10.3390/met13071276.
- [47] « The Obstacle Course on the Path to

Repurposing Used Electric Vehicle Batteries (EVB). Part III: Lack of Critical Battery Information ». [En ligne]. Disponible sur:

<https://rejouleenergy.com/blog/the-obstacle-course-on-the-path-to-repurposing-used-electric-vehicle-batteries-evb-part-iii-lack-of-critical-battery-information>

[48] J. Zhu *et al.*, « End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries », *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 2, n° 8, p. 100537, août 2021, doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.

[49] D. Latini *et al.*, « A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling », *J. Power Sources*, vol. 546, p. 231979, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231979.

[50] J. Asenbauer, T. Eisenmann, M. Kuenzel, A. Kazzazi, Z. Chen, et D. Bresser, « The success story of graphite as a lithium-ion anode material – fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites », *Sustain. Energy Fuels*, vol. 4, n° 11, p. 5387-5416, 2020, doi: 10.1039/D0SE00175A.

[51] A. Sarkar, R. May, S. Ramesh, W. Chang, et L. E. Marbella, « Recovery and Reuse of Composite Cathode Binder in Lithium Ion Batteries », *ChemistryOpen*, vol. 10, n° 5, p. 545-552, mai 2021, doi: 10.1002/open.202100060.

[52] S. Kim *et al.*, « A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling », *J. Clean. Prod.*, vol. 294, p. 126329, avr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126329.

[53] D. Yu, Z. Huang, B. Makuza, X. Guo, et Q. Tian, « Pretreatment options for the recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review », *Miner. Eng.*, vol. 173, p. 107218, nov. 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107218.

[54] M. Bruno et S. Fiore, « Review of lithium-ion batteries' supply-chain in Europe: Material flow analysis and environmental assessment », *J. Environ. Manage.*, vol. 358, p. 120758, mai 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120758.

[55] FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, « Lithium

Ion Battery Recycling Market Size, Share & Industry Analysis, By Chemistry (Lithium Cobalt Oxide, Lithium Iron Phosphate, Lithium Manganese Oxide, Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide, and Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide), By Source (Electronics, Electric Vehicles, Power Tools, and Others), By Process (Physical/Mechanical, Hydrometallurgical, and Pyrometallurgical), and Regional Forecast, 2024-2032 ». [En ligne].

Disponible sur:

<https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/lithium-ion-battery-recycling-market-100244>

[56] D. Thompson, C. Hyde, J. M. Hartley, A. P. Abbott, P. A. Anderson, et G. D. J. Harper, « To shred or not to shred: A comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in LIB supply chains », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 175, p. 105741, déc. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105741.

[57] H. E. Melin, M. A. Rajaeifar, A. Y. Ku, A. Kendall, G. Harper, et O. Heidrich, « Global implications of the EU battery regulation », *Science*, vol. 373, n° 6553, p. 384-387, juill. 2021, doi: 10.1126/science.abh1416.

[58] C. Xu, Q. Dai, L. Gaines, M. Hu, A. Tukker, et B. Steubing, « Future material demand for automotive lithium-based batteries », *Commun. Mater.*, vol. 1, n° 1, p. 99, déc. 2020, doi: 10.1038/s43246-020-00095-x.

[59] C. Xu, Q. Dai, L. Gaines, M. Hu, A. Tukker, et B. Steubing, « Supplementary information - Future material demand for automotive lithium-based batteries », *Commun. Mater.*, vol. 1, n° 1, p. 99, déc. 2020, doi: 10.1038/s43246-020-00095-x.