



25^e ANNIVERSAIRE
2000-2025

Q & A

QUESTIONS ET RÉPONSES

RECYCLAGE DES BATTERIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Mars 2025

www.no-burn.org/batteries/#ev





25TH ANNIVERSARY
2000-2025

questions et réponses

Recyclage des batteries de véhicules électriques

CONTENTS:

Pourquoi le recyclage des batteries de véhicules électriques est-il important ?

Que deviennent les batteries des véhicules électriques une fois qu'elles sont retirées d'un véhicule ?

À quoi ressemble un recyclage efficace des batteries de véhicules électriques ?

Quelles sont les voies actuellement proposées pour le recyclage des batteries de véhicules électriques ?

Comment se comparent la pyroméallurgie, l'hydroméallurgie et le recyclage direct ?

Quels sont les obstacles à la mise à l'échelle des nouvelles technologies de recyclage des batteries de véhicules électriques ?

Au-delà de la mise à l'échelle, quels sont les autres défis liés au recyclage des batteries ?

Le recyclage des batteries de véhicules électriques permettra-t-il de réduire l'exploitation minière primaire ?

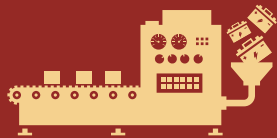
Quelles sont les recommandations de GAIA pour l'avenir ?

Glossaire



Pourquoi le recyclage des batteries de véhicules électriques est-il important ?

Selon le [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat \(GIEC\)](#), en 2019, le secteur des transports représentait environ 15 % des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) et 23 % des émissions mondiales de CO2 liées à l'énergie, les véhicules routiers générant 70 % des émissions directes liées au transport.



Le passage du secteur des transports de la dépendance aux combustibles fossiles à l'électrification est [considéré](#) comme une étape nécessaire et cruciale pour que les pays réduisent leurs émissions de gaz à effet de serre. Cette conviction se reflète dans l'augmentation des investissements publics, privés et financiers dans l'électrification du secteur des transports à l'échelle mondiale, ainsi que dans un marché de plus en plus concurrentiel pour les véhicules électriques (VE), notamment les trains, les bus, les voitures particulières, les deux-roues et trois-roues, les vélos électriques, etc. L'électrification des transports entraîne [une explosion de la demande d'extraction](#), de traitement et de raffinage [des minéraux de transition \(également appelés « minéraux critiques »\)](#). De plus, [la capacité de production de batteries dépasse largement la demande prévue, au moins jusqu'en 2030.](#)

L'augmentation de la demande en minéraux et la fabrication de batteries s'accompagnent d'un risque d'émissions toxiques et climatiques, de violations des droits humains et d'impacts écologiques concentrés dans certaines régions du Sud et [souvent sur les terres autochtones](#), et risquent de nous mener au-delà des limites planétaires. Les batteries en fin de vie exposent les communautés, les travailleurs et les récupérateurs de déchets à des risques liés aux déchets dangereux, aux incendies et aux explosions.

Compte tenu des considérations géopolitiques, la gestion de fin de vie par la récupération des minéraux – en particulier le recyclage des batteries de véhicules électriques – est considérée par les gouvernements, l'industrie et de nombreux groupes de la société civile comme une solution pour répondre à la demande en [minéraux de transition](#) et aux objectifs nationaux de production de batteries. L'engagement en faveur du recyclage des batteries comprend une réduction des émissions de gaz à effet de serre, de l'utilisation des terres et de l'eau, ainsi que d'autres impacts environnementaux [par rapport à l'extraction et au raffinage](#) des minéraux primaires. [Le recyclage est une étape dans un cadre plus large de solutions zéro déchet](#) visant à conserver les matériaux et à réduire les émissions de GES.

La première étape consiste à repenser et à reconcevoir les systèmes et les produits afin [d'éviter la surproduction de batteries](#) et l'empreinte écologique des matériaux qui les composent, tout en prolongeant la durée de vie des batteries des véhicules électriques (et en réduisant les émissions totales de GES intégrées) grâce à la réparation et à la réutilisation, et en veillant à ce que les matériaux puissent être recyclés et récupérés en toute sécurité pour servir de matière première à la fabrication de nouvelles batteries pour véhicules électriques.



Que deviennent les batteries des véhicules électriques une fois qu'elles sont retirées d'un véhicule ?



(c) Electric Scooter Insider

La plupart des batteries de véhicules électriques fabriquées sont encore en circulation aujourd'hui. Cela commencera à changer [vers 2030, lorsqu'un grand nombre de batteries de véhicules électriques arriveront en fin de vie](#). À l'heure actuelle, on sait peu de choses sur le sort des batteries usagées une fois qu'elles sont retirées d'un véhicule électrique. La plupart des informations relayées aujourd'hui dans les médias et les rapports sur le devenir des batteries de véhicules électriques en fin de vie sont basées sur le recyclage des déchets de fabrication (une matière première homogène et prévisible) ou des appareils électroniques grand public, et sur des spéculations quant à ce qui pourrait se passer à l'avenir dans le cadre d'une exploitation à l'échelle commerciale.

Quelques références affirment que [moins de 5 % des batteries lithium-ion pour véhicules électriques sont recyclées](#) dans le monde, mais ces données sont difficiles à vérifier pour de nombreuses raisons. En Chine, par exemple, les statistiques se limitent à celles communiquées par les quelques recycleurs agréés (ou inscrits sur la liste blanche) par le gouvernement chinois, et excluent les batteries collectées et stockées en vue d'un traitement ultérieur par les milliers de récupérateurs informels.

[Les batteries massives](#) pesant environ 450 kg utilisées dans les véhicules électriques seraient retirées du véhicule une fois que leur capacité tombe en dessous [de 80 % de leur capacité initiale](#), généralement après 10 à 20 ans d'utilisation, selon les technologies actuelles. Cette durée de vie estimée est basée sur les compositions chimiques actuelles des batteries, qui évoluent rapidement et pourraient conduire à des durées de vie nettement plus longues à l'avenir. Une fois retirées d'un véhicule, les batteries de véhicules électriques qui répondent à certains critères de qualité et de conception peuvent être [réutilisées pour une seconde vie en tant que stockage stationnaire](#), avec une durée de vie supplémentaire de plus de 10 ans. Il n'existe pratiquement aucune donnée sur le nombre de batteries réutilisées ou recyclées pour une seconde vie, ni sur leur devenir final. Il est nécessaire d'améliorer la transparence de la chaîne de contrôle d'une batterie tout au long de son cycle de vie : de la fabrication au véhicule, en passant par la seconde vie, le recyclage et l'élimination.



À quoi ressemble un recyclage efficace des batteries de véhicules électriques ?

Un processus efficace de recyclage des batteries de VE consiste à traiter et à convertir en toute sécurité tous les composants, uniquement lorsque toutes les autres utilisations ont été épuisées, en matériaux réutilisables dans des applications industrielles identiques ou équivalentes. Ce processus évite l'utilisation de produits chimiques dangereux, la combustion des batteries et les impacts négatifs sur l'environnement, en particulier les émissions atmosphériques toxiques et les sous-produits dangereux.

Critères de justice environnementale proposés pour évaluer le recyclage des batteries de VE

GAIA a élaboré les questions suivantes afin d'évaluer l'efficacité des processus de recyclage des batteries de véhicules électriques proposés, en maximisant chacun des indicateurs positifs et en minimisant les critères négatifs :



RÉCUPÉRATION DES MATÉRIAUX ET INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE



Quels sont les **taux de récupération** réels de tous les matériaux (et pas seulement des minéraux de transition) recyclés à partir des batteries de véhicules électriques en fin de vie ?



Quel est le **devenir de tous les matériaux** (bilan massique) qui entrent dans le flux de recyclage, y compris ceux qui sont incinérés, mis en décharge ou éliminés d'une autre manière ?



Quelle est **l'intensité des émissions et la consommation d'énergie** du processus de collecte, de logistique et de recyclage, y compris les émissions intégrées des intrants (par exemple, pour produire les acides et les produits chimiques utilisés dans les processus de recyclage) ?



RISQUES LIÉS À L'AIR, À L'EAU ET À LA TOXICITÉ



Quels sont les **risques liés à la toxicité des émissions de polluants atmosphériques et les impacts** sur les communautés et les terres résultant de l'ensemble du processus de collecte et de recyclage ?



Quels sont les **effluents et les risques de contamination** pour les communautés en première ligne ?



Quelle est **l'intensité de la consommation d'eau et la charge en eaux usées des** différentes options de recyclage ? Que deviennent les eaux usées : quelles quantités sont traitées, de quelle manière et où sont-elles éliminées ? Et où vont-elles ?



RESPONSABILITÉ DU FABRICANT



Quelle est la consommation d'énergie, l'impact environnemental et le coût du système logistique permettant de collecter et de transporter les batteries usagées depuis le lieu où elles ont été retirées du véhicule jusqu'à l'usine de recyclage ? Qui assume la responsabilité de son fonctionnement et de son coût ?



Dans quelle mesure les batteries sont-elles **conçues** pour un recyclage sûr et efficace ? Comment inciter les fabricants de batteries à concevoir des batteries permettant une utilisation aussi longue que possible des matériaux ?



PARTAGE DES AVANTAGES



Quels **avantages sont créés pour les communautés et les secteurs marginalisés impliqués** dans la chaîne de valeur du recyclage des batteries de véhicules électriques ? Quel est le processus permettant d'établir ces avantages et comment peuvent-ils être maximisés, tout en minimisant les risques et les charges pour les communautés ?



COMMERCE DES DÉCHETS



Quels **sont** les systèmes et les **garanties mis en place pour les exportations de batteries usagées** afin d'assurer une gestion responsable des déchets de batteries en fin de vie, y compris un recyclage sûr et efficace ?



Quelles sont les voies actuellement proposées pour le recyclage des batteries de véhicules électriques ?

Le domaine du recyclage des batteries évolue rapidement et il existe de nombreux processus de recyclage proposés qui combinent différentes étapes de différentes manières, souvent en utilisant une terminologie incohérente.

Les moteurs des véhicules électriques utilisent des batteries de traction, dont le type le plus répandu est la batterie lithium-ion (LIB), qui est complétée par des batteries au plomb dans la plupart des véhicules. Les batteries lithium-ion se déclinent en une variété de compositions chimiques différentes, notamment l'oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC), l'oxyde de lithium-nickel-cobalt-aluminium (NCA), l'oxyde de lithium-cobalt (LCO),

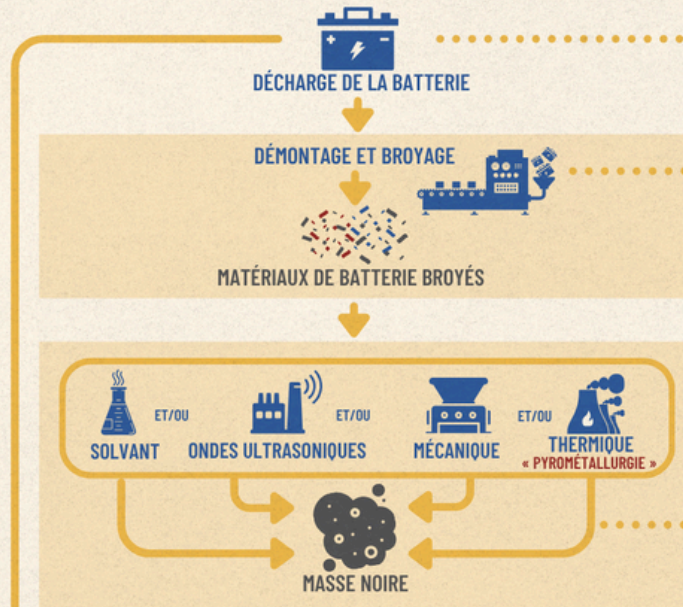
l'oxyde de lithium-manganèse (LMO) et le phosphate de fer lithié (LFP), entre autres, qui ont une incidence sur les stratégies de récupération et la valeur des batteries lithium-ion en fin de vie. Toutes les voies ci-dessous ne constituent pas des options viables pour toutes les compositions chimiques des batteries lithium-ion pour véhicules électriques.

Dans le but de fournir un guide général, certaines des voies les plus courantes pour le recyclage des batteries lithium-ion (généralement avec des cathodes riches en cobalt et/ou en nickel) peuvent être expliquées comme un processus en plusieurs étapes, comme suit :

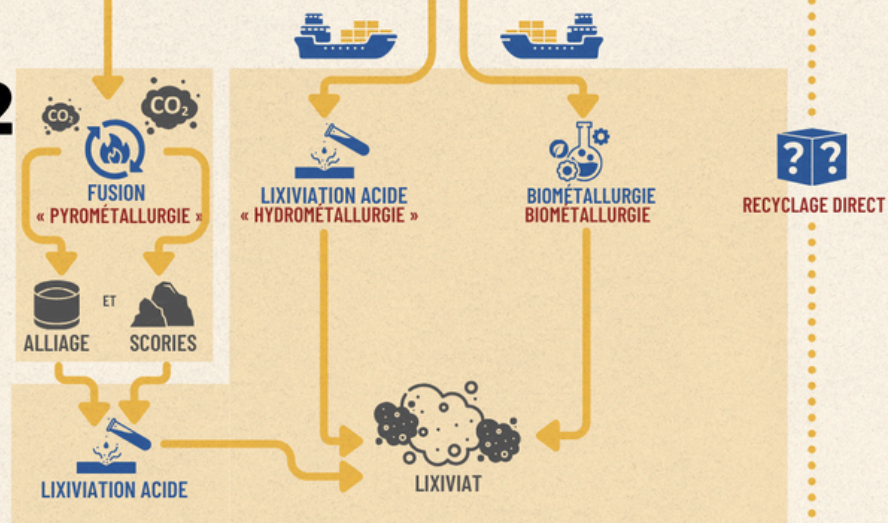
Étapes des voies proposées pour le recyclage des batteries de véhicules électriques



ÉTAPE 1 PRÉTRAITEMENT



ÉTAPE 2 EXTRACTION DU MÉTAL



ÉTAPE 3 PRÉPARATION DU PRODUIT FINAL



L É G E N D E :
 ACTION
 RÉSULTATS
 TYPE DE TECHNOLOGIE
 (TEL QUE COURAMMENT
 DÉSIGNÉ PAR
 L'INDUSTRIE)



Étape 1 - Prétraitement

Au cours de cette étape, les batteries sont déchargées et démontées. Ensuite, pour retirer le séparateur, l'électrolyte et les colles fluorées, des processus tels que le démontage mécanique, le broyage / concassage humide et sec, la dissolution par solvant, la séparation assistée par ultrasons et [les traitements thermiques](#) à des températures comprises entre 400 et 700 °C (tels que la pyrolyse ou la calcination) sont appliqués. L'étape de prétraitement produit une masse noire, qui est ensuite traitée dans une deuxième étape. Le prétraitement peut être ignoré lorsque les matériaux des batteries sont brûlés ou fondus.



Étape 2 - Extraction des métaux

Il existe plusieurs façons d'extraire les métaux des matériaux des batteries :



Les processus à haute température de combustion ou de fusion (souvent appelés **pyrométallurgie**, qui englobent un large éventail de traitements thermiques) des batteries lithium-ion usagées ou des matériaux de batteries mixtes à des températures comprises entre 1 400 et 1 700 °C produisent un alliage. L'alliage obtenu est ensuite traité par un processus hydrométallurgique.



La lixiviation acide (connue sous le nom **d'hydrométallurgie**) est actuellement l'option la plus privilégiée pour lixivier les métaux de la masse noire ou de l'alliage, avec l'utilisation d'énormes quantités d'acides et de solvants toxiques ; ce procédé produit des lixiviats (liquides contenant des métaux).



De nouvelles propositions ont vu le jour, telles que la lixiviation avec des acides inorganiques ou organiques (appelée **biométallurgie**) ou l'utilisation de l'électricité comme catalyseur pour aider à séparer et à extraire les matériaux précieux des batteries (appelée **électrométallurgie**) ; ces procédés produisent des lixiviats.



Toute combinaison et séquence des procédés ci-dessus et d'autres en cours de développement.



Étape 3 - Préparation du produit final

Cette étape vise à séparer les métaux du lixiviat pour obtenir des matériaux de qualité batterie, notamment des précurseurs de matériaux actifs cathodiques et des matériaux anodiques. Ce processus peut utiliser l'extraction par solvant, la flottation, la cristallisation ou la précipitation chimique, etc. La préparation du produit final est complexe et peut être coûteuse.

MASSE NOIRE



(c) Nadine Michollek/DW

La masse noire est un produit intermédiaire de certains processus de recyclage des batteries, créé par le broyage des batteries lithium-ion, comme le montre l'étape 1 (prétraitement) du schéma ci-dessus.

Il n'existe pas de définition standardisée de ce qui constitue la masse noire, et sa composition exacte varie en fonction des batteries traitées et du processus de traitement utilisé. Il s'agit d'une [poudre noire contenant un mélange de matériaux de batterie](#), notamment du graphite, du lithium, du nickel, du cobalt, des composés fluorés inorganiques et des solvants organiques halogénés.

De nombreux composés présents dans la masse noire, notamment les composés fluorés inorganiques et les solvants organiques halogénés, sont répertoriés comme [déchets dangereux dans les conventions internationales](#) et sont nocifs pour la santé humaine. Cependant, la masse noire n'est pas toujours classée comme déchet dangereux pour des raisons économiques et politiques, dans le but d'assouplir les réglementations en matière d'importation. La masse noire est souvent produite dans un pays et exportée vers un autre pour y être transformée, comme [la Chine](#) ou [la Corée du Sud](#).

RECYCLAGE DIRECT DES BATTERIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Le recyclage direct consiste à récupérer, régénérer et réutiliser divers composants des batteries, tels que les cellules individuelles et les électrolytes, [sans dégrader leur structure chimique](#). Cette filière de recyclage est moins étudiée et moins avancée, même si elle pourrait offrir de nombreux avantages : les taux de récupération les plus élevés pour tous les matériaux, des coûts moins élevés, une réduction des émissions de carbone et de l'intensité énergétique, et moins de risques d'impacts toxiques sur les communautés en première ligne. Bien que ce processus soit encore en cours de développement, les propositions actuelles suggèrent qu'il peut inclure le broyage, la séparation magnétique, la flottation par moussage, la précipitation dans une solution à base d'eau, les ondes ultrasonores, [le traitement thermique](#) et [la relithiation](#) pour raviver les matériaux actifs cathodiques dégradés.



Comment se comparent la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie et le recyclage direct ?

Une grande partie de la littérature actuelle vise à classer les propositions de recyclage des batteries de véhicules électriques en trois catégories distinctes : la pyrométallurgie, l'hydrométallurgie et le recyclage direct.

Comme décrit ci-dessus, la réalité est plus complexe, la plupart des procédés utilisant plusieurs étapes thermiques et à base de solvants.

Les raisons suivantes rendent difficile et quelque peu trompeuse la comparaison de ces procédés :

Ces termes ne sont pas définis de manière uniforme et prêtent à confusion. Par exemple, si le terme « pyrométallurgie » est traditionnellement considéré comme synonyme de fusion, il désigne souvent un large éventail de traitements thermiques à haute température allant au-delà de la fusion. Cela signifie que certains processus de prétraitement pour la voie hydrométallurgique, tels que la calcination, peuvent être considérés comme un type de pyrométallurgie.

De plus, comme le montrent les trois étapes ci-dessus, la « pyrométallurgie » et l'«hydrométallurgie » sont étroitement [liées](#). Le recyclage implique le plus souvent à la fois la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie ; [Umicore](#) est l'un des [nombreux exemples](#) de ces techniques de recyclage combinées.

À l'exception de la fusion, la plupart des filières de recyclage par hydrométallurgie sont des technologies encore en cours de maturation, qui nécessitent une optimisation supplémentaire pour atteindre une échelle commerciale. Le recyclage direct en est encore largement au stade de la recherche et du développement.

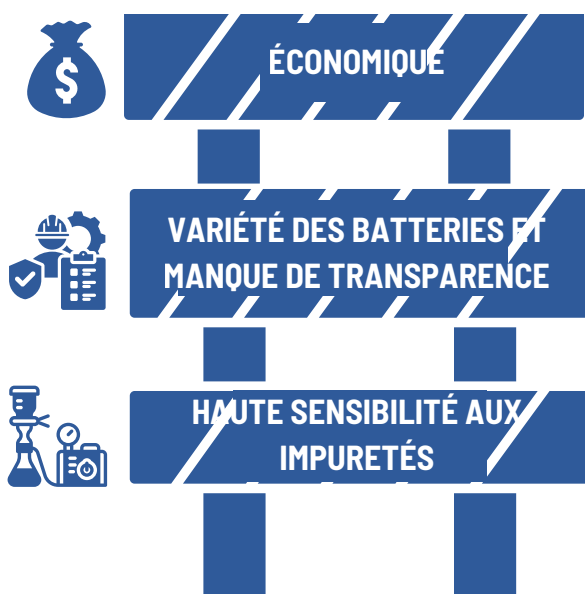


Quels sont les obstacles à la mise à l'échelle des nouvelles technologies de recyclage des batteries de véhicules électriques ?

Il existe peu de données disponibles pour démontrer la capacité de traitement réelle, les taux de récupération, la rentabilité et la capacité à traiter à la fois les déchets de fabrication et les batteries de véhicules électriques post-consommation au-delà d'un petit volume.

Une série d'obstacles techniques et économiques doivent encore être surmontés pour passer avec succès d'un processus de recyclage des batteries lithium-ion à l'échelle pilote ou laboratoire, fonctionnant dans des conditions optimales, à un processus à grande échelle commerciale. La plupart des filières de recyclage proposées se concentrent également principalement sur l'extraction de quelques composants de valeur, avec le risque que la majeure partie du bilan massique soit gaspillée.

Voici quelques-uns des obstacles à la mise à l'échelle:



ÉCONOMIQUES

Le recyclage pour la récupération de matériaux autres que ceux à haute valeur ajoutée, tels que le cobalt et le nickel, est coûteux. Les nouvelles filières de recyclage proposées nécessiteront probablement des prix plus élevés, des mécanismes de péage et un partage des revenus pour les recycleurs ou des subventions afin d'être économiquement viables. Les coûts du traitement de récupération des matériaux peuvent être supérieurs à la valeur économique, en particulier pour le lithium, le graphite et le manganèse présents dans les matériaux actifs de la cathode et dans l'anode. Bien que des taux de récupération élevés du lithium aient été atteints en laboratoire dans des conditions optimales, cela reste difficile à réaliser pour des raisons thermodynamiques et donc économiquement défavorable.

En raison des conditions du marché, il peut rester moins coûteux d'acheter des matériaux extraits plutôt que recyclés ; les faibles prix du marché des métaux (en particulier le lithium, le graphite et le manganèse) rendent la récupération des matériaux de qualité batterie à partir du recyclage non rentable.

Les installations de recyclage qui ont besoin de prix élevés sur le marché pour fonctionner de manière rentable peuvent cesser leurs activités. Par exemple, en 2023, des recycleurs de batteries chinois ont fait faillite en raison des faibles prix du lithium.



BATTERIES VARIABLES ET MANQUE DE TRANSPARENCE

En raison du manque d'informations et d'étiquetage sur les configurations et les compositions chimiques très variables des batteries, il est difficile de trier et de tester les batteries en toute sécurité afin de les réutiliser, les recycler et les valoriser de manière optimale. Les matières premières destinées au recyclage, à savoir tous les types de batteries usagées présentant des configurations et des compositions chimiques différentes provenant de dizaines de fabricants, seront très variables et imprévisibles. Jusqu'à présent, la réglementation n'a pas imposé de divulgation avec des exigences strictes en matière d'étiquetage, ce qui rend très difficile le tri en vue d'une réutilisation optimale et le recyclage de batteries très complexes.

FORTE



(c) Oeko-Institut

La fusion est une technologie qui permet de recycler de nombreux types de batteries au lithium, comme l'[usine de recyclage de batteries Umicore en Belgique](#). Cependant, il ne s'agit pas d'une nouvelle technologie de recyclage, et elle ne convient en grande partie qu'aux [batteries riches en cobalt ou en nickel](#). Si la fusion suivie d'une hydrométallurgie permet de récupérer efficacement le cobalt, le nickel, le cuivre et le fer dans des quantités très proches de leur concentration initiale dans la batterie, cette méthode plutôt bon marché et rudimentaire nécessite une consommation d'énergie très élevée, produit des poussières toxiques, des cendres volantes et des gaz, et brûle la majeure partie de la masse de la batterie, comme le graphite, les liants et l'électrolyte.



HAUTE SENSIBILITÉ AUX IMPURETÉS

ce qui a un impact à la hausse sur les intrants et les processus chimiques, hydriques et énergétiques. L'efficacité des nouvelles filières de recyclage qui incluent une étape d'hydrométallurgie pour le recyclage des batteries [réside principalement dans le prétraitement thermique effectué pour convertir une batterie usagée en masse noire](#). Les techniques hydrométallurgiques sont très sensibles aux impuretés.

Si celles-ci ne sont pas éliminées, la contamination entraînera un faible rendement, des produits de mauvaise qualité ou l'utilisation de plus de produits chimiques, d'énergie et d'étapes de traitement. La qualité souvent très variable de la masse noire produit des substances contaminées qui nécessitent un traitement important pour être converties en matériaux de qualité batterie. Pour obtenir des résultats hydrométallurgiques de haute qualité, il faut beaucoup de temps, d'efforts, de ressources et une grande superficie d'usine, tous ces éléments étant directement liés à l'étendue du prétraitement.

Si le prétraitement n'est pas bien effectué, les impuretés et la contamination présentes dans la masse noire rendent l'étape d'extraction des métaux beaucoup plus difficile sur le plan technique et économique. Les ratios d'apport chimique devront probablement être fortement revus à la hausse, tandis que les niveaux de contamination supplémentaires nécessiteront davantage d'apports et de ressources pour produire des matériaux de qualité batterie.



Au-delà de la mise à l'échelle, quels sont les autres défis liés au recyclage des batteries ?

Les batteries des véhicules électriques présentent des risques pour la sécurité lors de toutes les opérations de manipulation, y compris le recyclage.

Les batteries des véhicules électriques présentent un risque élevé d'incendie lors de toutes les opérations de manipulation, de la collecte au transport, en passant par la réparation, le démontage, le recyclage et l'élimination. Les cellules lithium-ion présentent un [risque très élevé d'incendie en raison d'un emballement thermique](#). Ce phénomène se produit lorsque la chaleur s'accumule dans la batterie plus rapidement qu'elle ne peut être dissipée, provoquant un dégagement gazeux, voire une explosion de la batterie. De [la Chine à la France](#), en passant par [la Hongrie](#), [le Royaume-Uni](#) et [le Missouri](#) aux États-Unis, des incendies se sont déclarés dans des installations de recyclage de batteries lithium-ion, libérant d'épais nuages de fumée contenant des produits chimiques toxiques, causant au moins un décès et obligeant parfois les habitants à évacuer les lieux.

La configuration très variable et propriétaire des batteries des véhicules électriques rend leur démontage difficile.

[Les batteries des véhicules électriques ne sont pas standardisées](#) : plus d'une douzaine de fabricants ont chacun leurs propres tailles (des scooters aux véhicules de tourisme en passant par les camions) et formes (par exemple, cylindriques, prismatiques et souples) de batteries.

Les cellules, les packs et les modules de batterie sont ensuite configurés et soudés ensemble à l'aide de divers liants et dans différents boîtiers. Par exemple, si la construction cellule-module-pack est courante, les fabricants optent de plus en plus pour des configurations cellule-pack ou cellule-châssis. Ces configurations alternatives permettent de réduire la quantité de matériaux utilisés, le poids et le temps de production, mais rendent [le démontage beaucoup plus difficile](#) et coûteux. Dans l'ensemble, les batteries des véhicules électriques ne sont pas conçues dans un souci de réparabilité, de réutilisabilité ou de recyclabilité.

Les batteries des véhicules électriques ont des compositions chimiques différentes, dont les parts de marché changent constamment, ce qui entraîne une recyclabilité variable

La plupart des batteries des véhicules électriques actuels sont des batteries lithium-ion, mais il existe de nombreuses compositions chimiques différentes dans cette catégorie, et la part de marché de chacune d'entre elles est en constante évolution. Si l'oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC) reste la composition chimique dominante à l'échelle mondiale, la part des batteries moins coûteuses qui ne contiennent pas de cobalt et de nickel de grande valeur (telles que le lithium-fer-phosphate, LFP) [augmente rapidement pour atteindre plus de 40 % à l'échelle mondiale](#), la plupart d'entre elles étant concentrées en Chine. Cela représente une proportion élevée de batteries qui ne contiennent pas de matériaux de grande valeur qui [justifient généralement](#) leur recyclage.

De plus, les batteries au plomb (LAB) restent courantes dans les pays du Sud, par exemple dans les véhicules électriques à deux et trois roues, dont la plupart proviennent de Chine. À l'avenir, des changements importants à long terme sont à prévoir dans les types de batteries lithium-ion, qu'il s'agisse du passage des anodes à base de graphite à celles à base de silicium, de différentes compositions chimiques des cathodes, ou [de l'abandon](#) complet [des batteries lithium-ion](#) au profit des batteries sodium-ion ou à semi-conducteurs.

Il existe un manque de normes et d'objectifs de performance précis en matière de récupération des matériaux, d'émissions de GES et de bilan énergétique du recyclage des batteries.

La plupart des discussions sur le recyclage des batteries se concentrent sur la récupération des minéraux de transition tels que le cobalt, le cuivre, le nickel, le lithium, le graphite et le manganèse. Cette approche est limitée ; les objectifs de recyclage devraient plutôt s'appuyer sur une analyse complète du bilan massique et du bilan énergétique, incluant les émissions intégrées. L'analyse du bilan massique devrait utiliser [des mesures standardisées](#) et s'étendre à tous les composants des batteries des véhicules électriques, y compris les boîtiers en plastique, les électrolytes et les liants fluorés, les composants électroniques et les métaux tels que l'aluminium, le cuivre et l'acier dans les feuilles, etc.

Les batteries et la masse noire sont intrinsèquement toxiques.

La masse noire contient des concentrations élevées de substances dangereuses, telles que [des oxydes de nickel et de cobalt](#), des PM2.5, du fluor, de l'arsenic, de l'étain et du cadmium. Son traitement par un procédé hydrométallurgique peut entraîner des émissions de sulfure d'hydrogène (H₂S), d'oxydes de soufre, de monoxyde de carbone (CO), de chlorure d'hydrogène et de gaz contenant du fluorure.

Parmi [les nombreuses émissions atmosphériques toxiques, les eaux usées et autres sous-produits](#) pouvant être générés par le processus de recyclage des batteries, les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) constituent une préoccupation particulière, car elles persistent de manière permanente dans l'environnement et dans le corps humain une fois introduites. [Des recherches](#) montrent que le traitement thermique pendant la phase de prétraitement visant à créer de la masse noire (avant le traitement hydrométallurgique) peut entraîner une décomposition incomplète des PFAS, en plus de la production et du rejet de nouvelles substances fluorées persistantes.

Les travailleurs informels sont exclus de l'essor du recyclage et sont touchés de manière disproportionnée par l'augmentation des déchets de batteries.

Les secteurs de l'économie informelle sont largement exclus de l'essor du recyclage des batteries lithium-ion. Cela cause des dommages, en particulier dans les pays du Sud, où les ramasseurs de déchets et les travailleurs du secteur des déchets devront supporter le poids de l'augmentation des déchets

de batteries de véhicules électriques [en l'absence d'infrastructures de gestion des déchets en fin de vie](#). Il existe déjà dans de nombreux pays des écosystèmes informels bien développés pour le recyclage des batteries lithium-ion, où les travailleurs doivent exercer des activités dangereuses sans bénéficier de protections formelles ni de mécanismes de recours.

Les étapes du recyclage sont sous-traitées à plusieurs entreprises.

Toutes les étapes du recyclage des batteries - de la collecte au prétraitement, en passant par l'extraction des métaux et la préparation des matériaux précurseurs - doivent être évaluées dans leur ensemble afin de déterminer le mérite ou la valeur de chacune d'entre elles, car elles sont interdépendantes.

Cela représente un défi de taille, car ces étapes sont généralement sous-traitées à différentes entreprises, sur plusieurs sites, et impliquent souvent des expéditions internationales.

Les coûts logistiques de collecte et de transport pour le recyclage des batteries sont élevés.

Le coût de la collecte et du transport des batteries de véhicules électriques retirées d'un véhicule peut représenter [environ 40 % des coûts de recyclage](#). De plus, les batteries de véhicules électriques peuvent présenter un [risque d'incendie](#) lorsqu'elles sont démontées de manière inappropriée, ce qui nécessite des normes d'emballage et de capacité plus strictes pour leur transport à travers le pays.



Le recyclage des batteries de véhicules électriques permettra-t-il de réduire l'exploitation minière primaire ?

Il est [erroné de supposer que tous les matériaux recyclés remplaceront l'extraction minière primaire pour la production de batteries](#). Pour que le recyclage réduise l'exploitation minière, le processus doit être en boucle fermée, c'est-à-dire qu'il doit produire des matériaux recyclés de qualité batterie qui peuvent concurrencer l'extraction minière primaire pour la production de batteries.

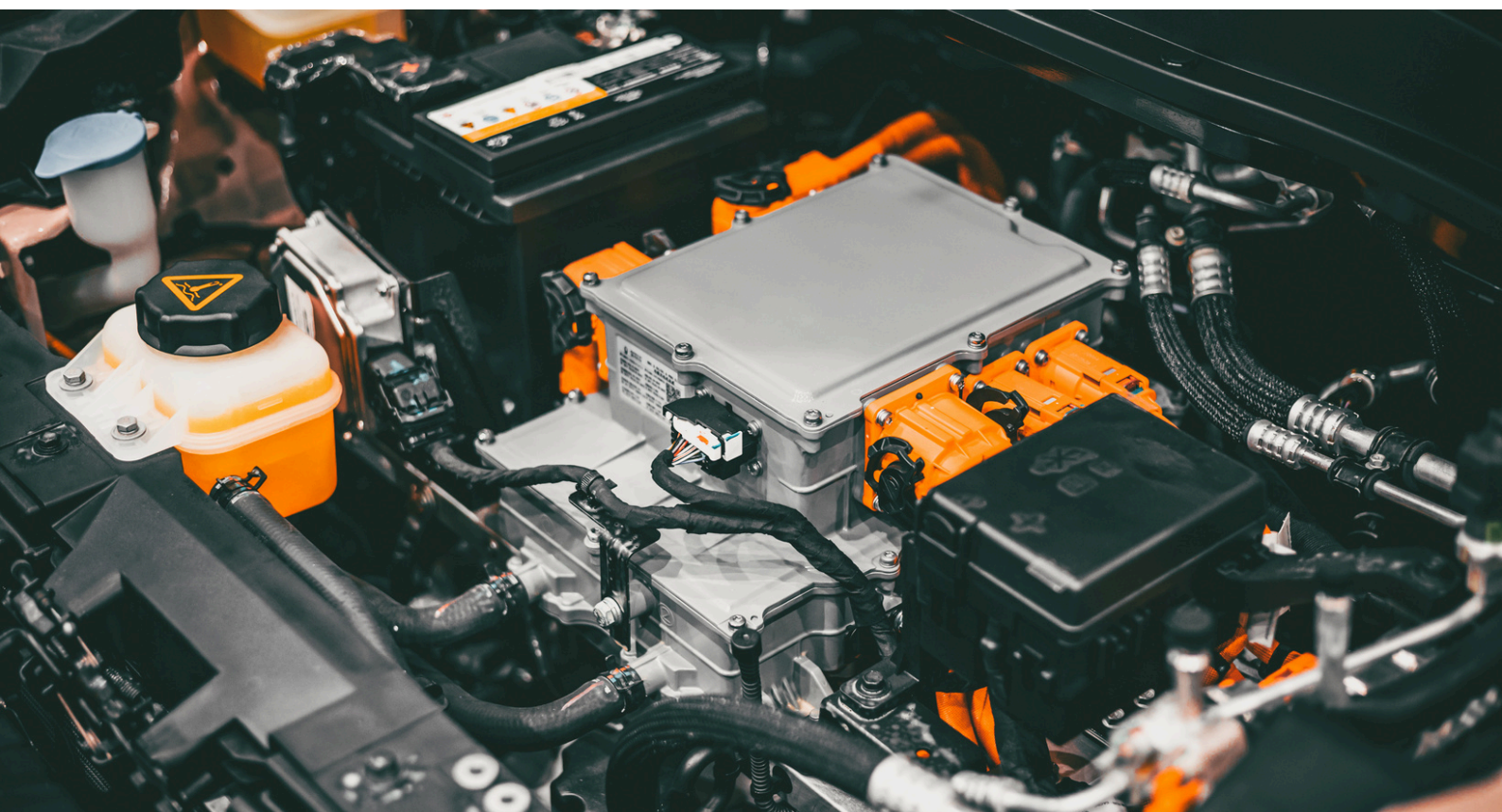
Même si certains rapports affirment que des taux de récupération élevés des batteries réduiront la demande en minéraux et la production de batteries, ces analyses semblent reposer sur des données industrielles non divulguées ou inaccessibles, et sur l'hypothèse que les défis soulignés ci-dessus seront résolus avec succès. On ne sait pas encore si les obstacles à la mise à l'échelle peuvent être surmontés de manière à

- 1 maintenir les taux de récupération très élevés observés en laboratoire,
- 2 produire des matériaux recyclés de qualité batterie suffisamment compétitifs en termes de coûts pour remplacer l'extraction minière primaire et la production de nouvelles batteries, et
- 3 éviter de causer des dommages importants aux communautés et aux écosystèmes.

Bien que le recyclage génère moins d'émissions de GES et de substances toxiques, qu'il nécessite moins d'espace et qu'il dégrade moins l'environnement que l'extraction primaire et le raffinage des minéraux, il reste coûteux pour l'environnement en termes d'émissions de carbone et de substances toxiques liées à la collecte et au transport, ainsi qu'en termes d'énergie, d'eau, de matières toxiques utilisées pour le traitement et d'espace nécessaire aux usines de recyclage des batteries. Ces pressions sur l'environnement ne peuvent être compensées que si le processus de recyclage est efficace et remplace l'extraction primaire des minéraux et la production de nouvelles batteries. Nous avons exposé ci-dessus les nombreux défis à relever pour parvenir à cette circularité. Des données fiables, qui ne sont pas encore divulguées ou disponibles à ce jour, sont nécessaires pour vérifier les affirmations de l'industrie selon lesquelles le recyclage des batteries de véhicules électriques est techniquement et économiquement

possible à l'échelle commerciale, qu'il remplacera l'extraction minière primaire et la production de nouvelles batteries, et dans quels délais cela se produira.

Les stratégies qui visent, par exemple, à éviter la surproduction et à réduire l'empreinte matérielle (taille des véhicules et des batteries) peuvent avoir un impact bien plus important sur la réduction de la demande en minéraux que le recyclage, comme nous l'expliquons dans nos recommandations ci-dessous.





Quelles sont les recommandations de GAIA pour l'avenir ?



Examiner le recyclage des batteries d'un œil critique.



Donner la priorité aux stratégies de conservation des matériaux et de protection de l'environnement conformément à la hiérarchie zéro déchet.



Prévenir les coûts sociaux et environnementaux en réduisant les déchets et la toxicité des batteries des véhicules électriques.



Encourager la réutilisation et le recyclage des batteries de véhicules électriques une fois qu'elles ont été retirées d'un véhicule.



EXAMINER LE RECYCLAGE DES BATTERIES D'UN ŒIL CRITIQUE

En cette période d'innovation et d'opportunités, il est important d'examiner d'un œil critique la promesse du recyclage des batteries de réduire la demande en minéraux primaires et la production de batteries.

Les leçons tirées du recyclage des plastiques montrent que l'industrie fait souvent des déclarations trop optimistes et commercialise la promesse de nouvelles technologies pilotes, pour [finalement voir ces technologies échouer à atteindre leur maturité technique et économique à l'échelle commerciale](#).

GAIA propose les recommandations politiques suivantes concernant le recyclage des batteries de véhicules électriques:



Exclure les processus qui détruisent les matériaux. Éviter d'inclure la combustion des batteries dans la législation en tant que « recyclage ». Les politiques de circularité et d'économie circulaire doivent [exclure les processus qui détruisent les matériaux](#).



La réglementation et le financement doivent être renforcés pour la conception de batteries permettant un recyclage sûr. La caractéristique la plus fondamentale qui influe sur l'efficacité du recyclage des batteries ne réside pas dans l'ajustement des processus de recyclage dans une suite de traitements sophistiqués de haute technologie, mais plutôt dans la conception, la configuration et la composition chimique de la batterie lors de sa fabrication.

[Des améliorations de conception sont essentielles pour faciliter le démontage et la récupération efficace des matériaux des batteries](#), qui pourraient être renforcées par **des programmes de responsabilité élargie des producteurs (REP)**. Aujourd'hui, les financements publics et privés sont fortement orientés vers le recyclage des batteries, et il convient de les réorienter vers une refonte des systèmes énergétiques et de transport, y compris la conception des batteries.



Tenir les fabricants de batteries et les constructeurs automobiles responsables, par le biais d'une REP obligatoire, de la **collecte, du recyclage et de l'élimination** efficaces et rigoureux des batteries tout au long de leur cycle de vie (retrait du véhicule, réutilisation et réaffectation, recyclage et élimination) et de tous les coûts associés, y compris la récupération des matériaux de moindre valeur.



L'industrie doit divulguer ses données.

Garantir la transparence et l'accès aux données en exigeant des fabricants de batteries, des constructeurs automobiles et des recycleurs de batteries qu'ils divulguent des données complètes sur les batteries à un organisme public ou indépendant chargé de rendre compte. Cela comprend les données sur la batterie elle-même fournies par les fabricants de batteries et les constructeurs automobiles, y compris, mais sans s'y limiter, la composition chimique détaillée, les substances dangereuses, les pièces de rechange, la manipulation en toute sécurité, les instructions de démontage et les manuels de réparation, l'état de santé de la batterie (capacité d'origine, niveau de dégradation, capacité restante), l'historique d'utilisation de la batterie, les événements négatifs et la chaîne de contrôle. Les recycleurs de batteries doivent divulguer

des données sur le bilan massique de récupération des matériaux (entrées et sorties, en donnant la priorité aux minéraux, mais sans s'y limiter), l'énergie, l'eau et les émissions toxiques (y compris par toxine et par effet).



Intensification et développement de la R&D dans le domaine des processus de recyclage plus sûrs

tels que le recyclage direct, qui offrent les taux de récupération des matériaux les plus élevés pour tous les matériaux, avec des coûts, une empreinte carbone et une intensité énergétique moindres, et moins de risques d'impacts toxiques sur les communautés de première ligne. Ces investissements doivent également tenir compte des coûts sociaux de la transition et intégrer des garanties afin de s'assurer que les travailleurs de première ligne disposent de mécanismes accessibles pour prévenir tout préjudice supplémentaire.

RESPONSABILITÉ ÉLARGIE DES PRODUCTEURS (REP)

La responsabilité élargie des producteurs (REP) est un outil politique visant à transférer le coût de la gestion des déchets et de la pollution liés à des produits spécifiques des contribuables aux producteurs, importateurs et distributeurs, et à encourager l'éco-conception. Elle vise à améliorer la performance environnementale et sociale des produits en rendant les producteurs et les propriétaires de marques responsables de l'ensemble du cycle de vie de leurs produits. La capacité des programmes de REP à atteindre ces objectifs dépend de leur configuration et de leurs modalités de mise en œuvre. Par conséquent, le système de REP nécessite une surveillance gouvernementale, la participation des parties prenantes à la prise de décision (y compris toutes les communautés potentiellement concernées) et une réflexion approfondie afin de limiter les conflits d'intérêts.

Le système de REP nécessite également des ressources humaines et matérielles dédiées afin de garantir que les objectifs en matière de prévention, de collecte et de recyclage soient atteints et que le cadre juridique soit respecté, y compris les règles de gouvernance (pour plus d'informations : [GAIA \(2023\). Les avantages et les inconvénients de la REP : les enseignements tirés de l'expérience française](#)).



DONNER LA PRIORITÉ AUX
STRATÉGIES DE CONSERVATION
DES MATÉRIAUX ET DE
PROTECTION DE
L'ENVIRONNEMENT
CONFORMÉMENT À LA
HIÉRARCHIE ZÉRO DÉCHET

Compte tenu des nombreux défis que pose le recyclage des batteries, il est temps de donner la priorité aux stratégies de conservation des matériaux qui se sont avérées depuis longtemps plus efficaces que le recyclage, à savoir la réduction, la réparation, la réutilisation et la réaffectation, qui occupent une place plus importante dans la [hiérarchie zéro déchet](#).

[La réforme des systèmes de transport et d'énergie](#) à court et moyen terme est la mesure la plus efficace selon la hiérarchie zéro déchet des batteries, car elle permet de mettre l'accent sur la suffisance et de réduire la consommation mondiale d'énergie et l'utilisation des ressources. Cela implique un large éventail de mesures, notamment la limitation de la surproduction de batteries et le respect [d'objectifs contraignants de réduction de l'empreinte matérielle](#), tels que la réduction de la taille des véhicules et des batteries.

La réduction de la taille moyenne des batteries des véhicules électriques légers est l'un des [moyens les plus immédiats et les plus efficaces](#) de réduire la demande en matières premières. Des mesures politiques telles que des normes d'efficacité énergétique, [l'adaptation des incitations fiscales à l'achat de véhicules électriques](#) en fonction du poids des véhicules (suppression des incitations pour les véhicules de tourisme et les SUV de très grande taille dépassant un certain poids) et l'extension des réseaux de recharge peuvent contribuer à stimuler cette transition vers des batteries plus petites et, par conséquent, à réduire les émissions de carbone.



PRÉVENIR LES COÛTS SOCIAUX
ET ENVIRONNEMENTAUX EN
RÉDUISANT LES DÉCHETS ET LA
TOXICITÉ DES BATTERIES DES
VÉHICULES ÉLECTRIQUES

La meilleure façon de traiter les déchets est de les prévenir à la source. **Les mesures de prévention des déchets** doivent être prises en compte dès le début de la phase de conception des programmes de REP, en particulier pour réduire l'empreinte matérielle (batteries plus petites).

Les programmes de REP obligatoires devraient pénaliser les configurations et les matériaux de batteries moins durables ou moins respectueux de l'environnement, et récompenser l'utilisation de ceux qui améliorent la durabilité, réduisent la toxicité et sont meilleurs pour l'environnement. Cela peut se faire à l'aide de **critères d'éco-modulation** clairement définis et de redevances élevées associées. Ces critères pourraient inclure, par exemple, des batteries plus petites, des configurations de batteries faciles à démonter, des niveaux réduits de matériaux toxiques (tels que les PFAS), un accès juste et équitable aux données et aux analyses relatives aux batteries, etc. Ces critères doivent être définis et avoir un impact réel sur la prévention : les redevances modulées (les primes et les pénalités) doivent être suffisamment élevées pour orienter les choix des producteurs. La couverture des coûts des systèmes de REP devrait être étendue autant que possible aux coûts en amont, en plus de tous les coûts liés à la fin de vie, à la prévention et à la réutilisation.

La réglementation doit également fixer et appliquer des normes strictes en matière de sécurité et de contrôle qualité pour [les exportations de batteries usagées](#).

Des pays comme l'Égypte et le Bhoutan ont déjà commencé à [assouplir les restrictions à l'importation](#) de véhicules électriques usagés, introduisant ainsi les batteries usagées dans les écosystèmes de fin de vie.



ENCOURAGER LA RÉUTILISATION
ET LE RECYCLAGE DES
BATTERIES DE VÉHICULES
ÉLECTRIQUES UNE FOIS
QU'ELLES ONT ÉTÉ RETIRÉES
D'UN VÉHICULE.

La réglementation doit non seulement garantir que [toutes les lois pertinentes en matière de droit à la réparation](#) s'appliquent aux batteries de véhicules électriques, mais aussi inclure des programmes de REP obligatoires qui définissent les processus et les objectifs de réutilisation et de recyclage des batteries de véhicules électriques une fois

retirées d'un véhicule. Une fois retirée d'un véhicule et dans tous les cas avant d'être recyclée, une batterie de véhicule électrique doit être inspectée et testée en vue d'une seconde vie, telle que la réutilisation, la refabrication ou le recyclage.

Les mesures politiques visant à lever les nombreux obstacles liés aux technologies et logiciels propriétaires afin de garantir [un accès juste et équitable aux informations sur les batteries, leur état de santé et leurs analyses](#) joueront un rôle essentiel pour permettre la réutilisation ou la reconversion des batteries de VE lorsqu'elles sont retirées d'un véhicule à 70-80 % de leur capacité initiale, prolongeant ainsi leur durée de vie de [6 à 30 ans](#) pour différentes applications de seconde vie.



Glossaire

Anode - Composant majeur des cellules au lithium, l'anode est l'électrode chargée négativement par laquelle les électrons quittent un dispositif.

Batteries lithium-ion - Les batteries lithium-ion se composent principalement de quatre éléments : une cathode, une anode, un électrolyte et un séparateur. Une batterie lithium-ion produit de l'électricité grâce à des réactions chimiques du lithium, qui est inséré dans la cathode.

Biométallurgie - Dans les processus biométallurgiques, les acides inorganiques et organiques produits par les activités microbiennes favorisent la lixiviation des métaux contenus dans les batteries lithium-ion usagées.

Calcination - Processus consistant à chauffer des solides à une température élevée, comprise entre 400 et 700 °C, afin d'éliminer les substances volatiles ou d'oxyder une quantité spécifique de masse.

Cathode - Composant majeur des cellules au lithium, la cathode est l'électrode chargée positivement par laquelle les électrons pénètrent dans un appareil.

Déchets de fabrication - Sous-produits et déchets générés lors de la fabrication et de l'assemblage, en plus des batteries défectueuses ou rejetées lors des étapes de contrôle qualité de la production des batteries.

Électrolyte - Sert de milieu permettant le mouvement des lithium-ions uniquement entre la cathode et l'anode. Pour l'électrolyte, on utilise principalement des matériaux à haute conductivité ionique afin que les lithium-ions puissent se déplacer facilement dans les deux sens.

Fusion - Processus d'extraction du métal par application de chaleur et d'un agent réducteur chimique tel que le coca. Il implique généralement la combustion d'une grande partie de la batterie elle-même, nécessitant des températures très élevées comprises entre 1 400 et 1 700 °C, et produisant un alliage, des scories, des cendres volantes et des émissions gazeuses.

Hydrométallurgie - Également appelée lixiviation acide, ce procédé utilise de l'eau traitée chimiquement, généralement chauffée, pour extraire certains métaux d'une matière première, telle qu'un alliage issu de la fusion ou de la masse noire.

Incinération - Décomposition thermique et oxydation rapide des déchets à des températures pouvant atteindre 1 200 °C, avec ajout d'air ou d'oxygène à des niveaux sous-stœchiométriques ou excédentaires. Tous les matériaux sont brûlés et transformés en cendres, dont certaines sont des cendres volantes qui s'échappent dans l'air et d'autres tombent au fond sous forme de cendres de fond. L'incinération utilise parfois la chaleur produite pour générer de l'électricité dans le cadre de [ce qu'on appelle l'incinération avec valorisation énergétique](#).

Masse noire - Poudre contenant des métaux précieux pour les batteries, tels que le lithium, le nickel et le cobalt, provenant de batteries de véhicules électriques broyées.

Pyrolyse - Processus consistant à chauffer des déchets à des températures comprises entre 200 et 550 °C en l'absence d'oxygène afin de produire un combustible liquide ou gazeux. La pyrolyse est un type de [recyclage chimique](#).

Pyrométallurgie - Bien que ce terme soit traditionnellement considéré comme synonyme de fusion, [les processus de recyclage pyrométallurgique](#) désignent un large éventail de traitements thermiques à haute température allant au-delà de la fusion, tels que la pyrolyse, l'incinération, la calcination ou la torréfaction. Le processus pyrométallurgique permet de récupérer certains alliages métalliques tout en brûlant les plastiques, les solvants organiques et d'autres matériaux.

Recyclage direct - Processus qui consiste à récupérer, régénérer et réutiliser directement divers composants de la batterie sans en dégrader la structure chimique. Les méthodes de recyclage direct peuvent inclure : la séparation physique, la relithiation, la séparation magnétique, le tamisage, la flottation par moussage, la précipitation dans une solution à base d'eau, le traitement thermique et les ondes ultrasoniques.

Relithiation - Procédé utilisé dans le recyclage direct pour [régénérer](#) et [restaurer](#) les particules actives cathodiques cyclées et dégradées (LCO, LMO, NCM, NCA et leurs mélanges) afin de leur redonner leurs performances électrochimiques élevées. Les techniques de relithiation [proposées](#) comprennent la relithiation ionothermique, hydrothermique, chimique et électrochimique, ainsi que le frittage à l'état solide.

Séparateur - Couche microporeuse constituée d'une membrane polymère ou d'un matelas en tissu non tissé qui sépare l'anode et la cathode afin d'éviter les courts-circuits. Les séparateurs des batteries lithium-ion sont généralement fabriqués à partir de polyoléfine, principalement du polyéthylène (PE) ou du polypropylène (PP), ou d'une membrane composite telle que (PP/PE/PP). La technologie moderne des séparateurs contribue également à la stabilité thermique et à la sécurité des cellules. Les séparateurs ont un impact sur plusieurs paramètres de performance des batteries, notamment la durée de vie, la densité énergétique et la puissance, ainsi que la sécurité.

Traitement thermique - Tout processus impliquant un traitement à haute température : séchage, gazéification, pyrolyse, calcination, fusion, incinération, etc. Les plages de température commencent à partir de 100 °C. La Convention de Bâle définit le « traitement thermique », mais ne fixe pas de plage de température spécifique avec une limite inférieure. La limite inférieure pourrait être de 200 °C, température à laquelle les hydrocarbures commencent à se décomposer.

