

**PRODUCTION D'ICV POUR LES PROCÉDES DE RECYCLAGE DES
BATTERIES SUR LES 3 FILIERES PRINCIPALES :**

**TRAITEMENT A HAUTE TEMPERATURE (PYROMETALLURGIE),
TRAITEMENT MECANIQUE (BROYAGE), TRAITEMENT CHIMIQUE
(HYDROMETALLURGIE)**

SYNTHESE

OCTOBRE 2022

Responsable scientifique – *Naeem ADIBI et Christian THOMAS / WeLOOP et TND*



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.

- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Abstract

L'importance des batteries au lithium a augmenté récemment en raison de l'électrification du secteur des transports et de leur utilisation dans le stockage de l'énergie à partir d'énergies renouvelables. Un nombre important de batteries au lithium atteindront leur fin de vie dans les années à venir et les déchets de production des giga-factories deviendront un défi majeur ; il est donc important de développer des procédés de recyclage durables pour les batteries au lithium. Les procédés de recyclage développés ou en développement sont les procédés pyrométallurgiques, hydrométallurgiques, mixtes et directs.

Bien que le recyclage présente une source secondaire de matières premières (telles que le cobalt, le nickel, le lithium, etc.), les procédés de recyclage s'associent cependant à plusieurs problèmes économiques et environnementaux. Ces problématiques mettent en avant la pertinence d'évaluer les impacts associés aux différentes technologies de recyclage des batteries à l'aide d'études d'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Actuellement, les études d'ACV pour les différents procédés de recyclage des batteries sont limitées pour plusieurs raisons :

- Les procédés de recyclage des batteries au lithium sont considérés comme des technologies émergentes.
- Les technologies de batteries sont encore en cours de développement.
- Le manque de données et inventaires fiables du cycle de vie des ICV pour les procédés de recyclage des batteries.

Les études antérieures sur l'ACV ont utilisé différentes hypothèses, en utilisant principalement des données anciennes et peu fiables et des inventaires du cycle de vie basés sur des procédés et de la littérature datés. De plus, les données primaires pour les procédés de recyclage des batteries sont soumises à des accords de confidentialité, ce qui rend difficile la collecte de données d'ACV auprès des recycleurs de batteries. Tous ces facteurs font que les ICV ne sont plus représentatives des procédés actuels de recyclage des batteries ainsi que des chimies et technologies actuelles des batteries.

Grâce à l'analyse des méthodes de recyclage et des informations disponibles dans la littérature, les inventaires peuvent être développés et utilisés pour les technologies de recyclage d'aujourd'hui et de demain. WeLOOP en collaboration avec TND (experts en métallurgie) a travaillé sur la collecte de données d'ACV récentes auprès de plusieurs recycleurs de batteries européens et de données secondaires de la littérature récente. Cela a permis de construire des inventaires de cycle de vie (ICV) fiables et robustes des différents procédés de recyclage existants (préparation de la masse noire, pyrométallurgie, hydrométallurgie, méthodes mixtes) pour les différents types de batteries au lithium. Ces ICV ont été partagés avec les membres du collectif SCORELCA et le public.

L'établissement d'inventaires fiables du cycle de vie nous permet de mesurer les impacts environnementaux associés et aide à guider la prise de décisions concernant la législation sur le recyclage des batteries. Les résultats de l'ACV montrent que les principaux défis environnementaux des procédés de recyclage sont la consommation d'électricité (four pour le recyclage pyrométallurgique et l'évaporation des effluents pour le recyclage hydrométallurgique) mais aussi les différentes substances chimiques et leur traitement en fin de vie utilisé dans les différents traitements chimiques de tous les procédés de recyclage. De plus, du CO₂ est émis, notamment lors du recyclage par pyrométallurgie.

Synthèse

Dans le cadre du mouvement d'électrification du secteur des transports, l'essor des batteries au lithium ne cesse d'augmenter en raison de leur utilisation dans les véhicules électriques et hybrides principalement, mais également dans les systèmes de stockage d'énergie pour les énergies renouvelables. La production de batteries au lithium nécessite des matières premières critiques, telles que le cobalt, le lithium et le graphite naturel. Les matériaux critiques ont donc une grande importance économique et représente un risque d'approvisionnement. L'approvisionnement en matières premières critiques et non critiques pour les batteries provient principalement de l'extérieur de l'Union européenne. Le recyclage est un moyen d'atténuer la criticité des matières premières. Le recyclage englobe les déchets de production des batteries à court terme et les batteries arrivant progressivement en fin de vie dans les années à venir. Il est donc important de développer des procédés de recyclage durables pour les batteries au lithium. Bien que les procédés de recyclage des LIB suscitent des enjeux économiques et environnementaux, le recyclage présente une source secondaire de matières premières telles que le cobalt, le nickel, le lithium, etc.

Les procédés de recyclage et cartographie des acteurs et maturité du marché

Il existe différents procédés de recyclage sur le marché pour le traitement des batteries au lithium en fin de vie ; procédés pyrométallurgiques, hydrométallurgiques et mixtes. Très souvent, les procédés de recyclage des LIB combinent des techniques pyrométallurgique et hydrométallurgique avec des procédés de prétraitement ou de post-traitement. Chaque procédé permet de récupérer différents matériaux, et a ses avantages et inconvénients sur les volets techniques, économiques et environnementaux.

Les procédés pyrométallurgiques sont les technologies les plus matures ; ils traitent directement les batteries et nécessitent une consommation d'énergie plus élevée en raison du chauffage des fours à une température de près de 1600°C. Les procédés pyrométallurgiques sont la plupart du temps associés à un procédé hydrométallurgique pour récupérer les métaux à haute valeur économique. En effet, les procédés pyrométallurgiques ne récupèrent que le cobalt et le nickel à l'aide d'une extraction par solvant ainsi que le cuivre par une électrolyse, tandis que le lithium, le manganèse, le graphite et l'aluminium sont principalement perdus dans les scories. Les taux de récupération pour le cobalt, le nickel, le cuivre et l'aluminium de ces procédés sont bons. Néanmoins, les impacts environnementaux des procédés pyrométallurgiques sont considérables en raison de l'utilisation de produits chimiques nocifs, pour le traitement chimique de récupération du cobalt et du nickel, mais également des importantes émissions en CO₂ dues aux fours.

Les procédés pyrométallurgiques peuvent être précédés d'un pré-traitement comme les procédés hydrométallurgiques. Le pré-traitement permet d'optimiser la récupération des matériaux de valeur, faciliter la manipulation et l'élimination en toute sécurité des composants dangereux et de réduire la quantité d'entrant dans le procédé de recyclage. Le pré-traitement peut être mécanique, chimique ou thermique. Les étapes du pré-traitement sont habituellement les suivantes : démantèlement des packs batteries, tri, déchargement, broyage et déchiquetage, séparation, récupération de l'électrolyte, séparation des liants, traitement thermique et lavage. Les pré-traitements peuvent donner différentes formes de matières actives mais la plus commune est la Black Mass (BM) riche en métaux à hautes valeur économique : cobalt, nickel, manganèse, aluminium et cuivre.

Pour traiter cette BM, les procédés hydrométallurgiques se caractérisent par la succession des étapes suivantes : lixiviation des métaux ciblés à l'aide de solution aqueuse, séparation, récupération des métaux ciblés par précipitation ou extraction par solvant. Les taux de récupération de ces procédés sont très élevés et la qualité des métaux récupérés est bonne. Contrairement aux procédés

PRODUCTION D'ICV POUR LES PROCÉDES DE RECYCLAGE DES BATTERIES

pyrométallurgiques la consommation en énergie et les émissions CO₂ sont très faibles, cependant l'hydrométallurgie est un procédé complexe et coûteux, qui utilise des solvants toxiques et génère une grande quantité d'effluents dont le traitement en fin de vie peut générer une forte consommation d'énergie en fonction du type de traitement.

Le recyclage direct est intéressant car il permet la récupération directe des matériaux actifs des cellules de batteries et non des éléments. Il consiste à séparer les matériaux actifs d'anode et de cathode et à les régénérer à l'aide d'un procédé de re-lithiation, pour ensuite les réutiliser directement comme matériaux actifs dans une nouvelle cellule. Cependant, le recyclage direct nécessite un flux d'entrée homogène, ce qui signifie que les batteries doivent être triées en amont du recyclage. Le recyclage direct est à ce jour encore au stade de la R&D, car la faisabilité à l'échelle industrielle de l'étape de séparation des matières actives des collecteurs de courant n'a pas encore été prouvée.

Actuellement, la majeure partie du recyclage des batteries au lithium a lieu en Asie (Chine, Corée du Sud et Japon) et utilise des procédés hydrométallurgiques. Cependant, l'Europe développe des installations industrielles pour répondre aux besoins croissants en matière de traitements en fin de vie et améliorer l'efficacité du recyclage. En 2020, la Commission européenne publie une proposition concernant l'efficacité du recyclage. En 2030, l'efficacité globale du recyclage devrait être d'au moins 70 %, avec un taux d'efficacité du recyclage supérieur à 95 % pour le cobalt, le nickel et le cuivre, et supérieur à 90 % pour le lithium. Les procédés qui sont développés doivent donc être en mesure de respecter ces réglementations.

En Europe, les principaux pays acteurs dans le recyclage sont l'Allemagne, la France, la Belgique et la Finlande. L'Allemagne possède plusieurs installations industrielles qui utilisent des procédés mécanique, thermique et pyro/hydro-métallurgiques. En France, les leaders sont SNAM, qui utilisent également les procédés mécaniques, thermiques, pyro/hydro-métallurgiques, et Eurodieuze, qui utilisent des procédés mécaniques et hydrométallurgiques. Cependant, la France développe de nombreux projets pilotes à travers le pays, notamment Sanou Koura avec un procédé de recyclage innovant (procédé mixte) par TND et Mecaware, qui développe également une nouvelle technologie basée sur le CO₂ récupéré d'émissions industrielles et des amines en utilisant la BM produite par MTB. En Europe, plusieurs futures installations de recyclage de LIBs sont en cours de construction également, comme Northvolt et STENA recycling en Suède.

ICV de procédés de recyclage de LIB et résultats d'Analyses d'Impacts du Cycle de Vie

Il existe peu d'Inventaires du Cycle de Vie (ICV) pour les différents procédés de recyclage de LIB, car les technologies LIB sont encore en cours de développement. Les études ACV existantes sur ce sujet se basent sur différentes hypothèses, en utilisant principalement des données et des ICV anciennes peu fiables. En effet, la plupart des ICV disponibles sont basés sur la littérature et non des données industrielles, et les procédés étudiés ne sont plus représentatifs des technologies et des procédés de recyclage des batteries du marché actuel. Le manque de communication de données de la part des industriels entraîne un manque d'inventaires de bonne qualité et fiables. Par conséquent, WeLOOP a réalisé une évaluation de la qualité des données (EQD) pour les bases de données et les ICV disponibles pour les procédés de recyclage des batteries LIB. Le EQD a révélé que les bases de données (Ecoinvent, GaBi, EIME, PEF/OEF) et les inventaires disponibles sont au mieux de "bonne qualité", la majorité des sources de données actuelles étant de "qualité moyenne". Cependant, les bases de données et les ICV devraient obtenir un score "excellent" ou "très bon" pour être utilisés lors de la réalisation d'une étude ACV fiable en suivant les exigences PEF (Product Environmental Footprint de la Commission Européenne).

PRODUCTION D'ICV POUR LES PROCÉDES DE RECYCLAGE DES BATTERIES

TND a réalisé des ICV semi-spécifiques des procédés de préparation de BM, recyclage par pyrométallurgie (qui traite la batterie directement), hydrométallurgie (qui traite la BM) par précipitation et extraction de solvant, et par procédé mixte (procédé Sanou Koura) ; sur la base de d'une étude bibliographique et sur des données provenant de procédés industriels. Les ICV ont été développés en considérant une composition de BM donnée, issue d'un mélange de déchets électriques et électroniques et de batteries de voitures électriques (LiCo et NMC). La validité de ces procédés et des ICV est conservé pour une faible variation en ordre de grandeur des de la composition de la BM. On peut donc considérer que pour une faible quantité de batteries LFP dans la composition de la BM, les procédés seront toujours cohérents et ne feront qu'augmenter la part de récupération du fer. Cependant si la proportion de LFP devient trop importante, les procédés et calculs devront être retravaillés.

Les résultats des Analyses d'Impacts en Cycle de Vie montrent que les impacts environnementaux du procédé de BM reposent principalement sur l'étape de chauffage, en raison de la quantité de charbon actif utilisée et de son traitement en fin de vie. Les impacts du procédé par hydrométallurgie par précipitation sont en majorité liés à la récupération du cobalt qui nécessite une importante consommation en sulfate de sodium, très présent par la suite dans les effluents ce qui requiert une évaporation très énergivore pour sa cristallisation en fin de vie. On retrouve ce dernier point chaud également dans les autres procédés. Le procédé par pyrométallurgie, qui inclue une étape chimique pour traiter les scories, concentre ces impacts en réchauffement climatique notamment, à l'étape de fusion des batteries à 1600°C ainsi que dans les étapes de récupération du calcium. Enfin le procédé mixte, qui regroupe les étapes de procédés hydrométallurgique et pyrométallurgique, présente les étapes de récupération du cuivre, du cobalt et nickel par solvant comme les plus impactantes. La consommation d'énergie ainsi que les consommables et leur traitement en fin de vie ressortent donc comme les enjeux environnementaux majeurs des procédés de recyclage de LIB.