SCORELCA

ETUDE N° 2020-04

PRODUCTION D'ICV POUR LES PROCEDES DE RECYCLAGE DES BATTERIES SUR LES 3 FILIERES PRINCIPALES : TRAITEMENT A HAUTE TEMPERATURE (PYROMETALLURGIE), TRAITEMENT MECANIQUE (BROYAGE), TRAITEMENT CHIMIQUE (HYDROMETALLURGIE)

RAPPORT FINAL

NOVEMBRE 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.

RÉSUMÉ

L'importance portée aux batteries au lithium a augmenté récemment en raison de leur utilisation dans les véhicules électriques et hybrides dans le cadre du mouvement d'électrification du secteur des transports. De plus, elles sont utilisées dans les systèmes de stockage pour les énergies renouvelables. La production de batteries lithium nécessite des matières premières (MP) critiques (cobalt, lithium et graphite naturel). Par conséquent, celles-ci ont une importance économique élevée et un risque d'approvisionnement puisqu'elles proviennent principalement de l'extérieur de l'Union européenne. Une façon d'atténuer la criticité des MP est le recyclage. Le recyclage comprend les déchets de production de batteries à court terme et les batteries arrivant 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 batteries lithium-ion (LIB) présentent des problèmes économiques et environnementaux, le recyclage présente une source secondaire de MP (cobalt, nickel, lithium…)

En 2020, la Commission européenne a publié 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 de recyclage de plus de 95 % pour le cobalt, le nickel et le cuivre, et de plus de 90 % pour le lithium. Les procédés qui sont élaborés doivent donc être en mesure d'atteindre ces taux. Ce rapport contient des informations sur les procédés de traitement en fin de vie et les projets de R&D en cours, mais encourage également l'élaboration d'inventaires du cycle de vie (ICV) de trois procédés de recyclage : les procédés de pyrométallurgies, d'hydrométallurgies et directs. L'établissement d'inventaires permet de mesurer leurs impacts environnementaux et aide à orienter la prise de décision.

Il existe différents procédés de recyclage pour traiter les batteries en fin de vie. Les procédés de recyclage des LIB combinent des techniques de pyrométallurgie et d'hydrométallurgie avec des procédés de pré- ou post-traitement. Chaque procédé présente des forces et faiblesses et permet de récupérer des matériaux pour différents coûts. Les procédés de pyrométallurgie sont les technologies les plus matures ; ils nécessitent une consommation d'énergie plus élevée. Ces procédés ne récupèrent que des métaux précieux (cobalt, nickel), tandis que le lithium, le manganèse, le graphite et l'aluminium sont perdus dans les scories. Les procédés d'hydrométallurgie ont de bons taux de récupération pour le cobalt, le nickel, le cuivre et l'aluminium mais avec des impacts environnementaux considérables par l'utilisation de produits chimiques nocifs. Le recyclage direct permet la récupération des matériaux actifs de la cathode. Cependant, il nécessite une présélection avant le recyclage pour avoir un flux homogène. De plus, le recyclage direct est encore au stade de R&D et n'a pas encore prouvé sa faisabilité industrielle.

La majeure partie du recyclage des batteries a lieu en Asie de l'Est (Chine, Corée du Sud et Japon). Cependant, l'Europe développe ses activités pour répondre aux besoins et améliorer l'efficacité du recyclage. Les principaux acteurs européens du recyclage sont l'Allemagne, la France, la Belgique et la Finlande. L'Allemagne possède plusieurs installations industrielles de procédés mécaniques, de pyro, d'hydro et thermiques. En France, les leaders sont SNAM, avec des procédés mécaniques, thermiques, pyro et hydro, et Eurodieuze, avec des procédés mécaniques et hydro. La France développe également des projets pilotes, notamment Sanou Koura pour un procédé de recyclage innovant (procédé mixte) et Mecaware, qui développe de nouvelles technologies.

Les analyses du cycle de vie (ACV) pour les différents procédés de recyclage LIB sont limitées, car les technologies de LIB sont en cours de développement. Les études antérieures sur l'ACV ont utilisé différentes hypothèses, en se basant sur des données anciennes et des ICV peu fiables. De plus, ces ICV sont basées sur des procédés et de la littérature qui ne représentent plus les technologies et les procédés actuels. Nous avons donc effectué une évaluation de la qualité des données DQR pour les bases de données disponibles et des ICV pour les procédés de recyclage LIB. Le DQR a révélé que les bases de données et les inventaires disponibles ont au mieux une « bonne qualité », la majorité des données ayant une « qualité correcte ». Cependant, les bases de données et les ICV doivent obtenir la note « excellent » ou « très bon » pour être fiable.

Le défi le plus critique pour les études d'ACV sur les procédés de recyclage LIB est la rareté de données fiables pour les ICV, les modèles à impact fixe et les normes d'allocation. De nombreuses ressources et le soutien des producteurs de batteries au lithium, des recycleurs et des gouvernements sont nécessaires pour surmonter ces défis. En analysant les méthodes de recyclage et les informations présentées dans ce rapport, les inventaires peuvent être développés et utilisés pour les technologies de recyclage d'aujourd'hui et de demain.

MOTS-CLÉS

Procédés de recyclage, analyse du cycle de vie, procédé de recyclage pyrométallurgique, procédé de recyclage hydrométallurgique, procédé de recyclage direct, inventaires du cycle de vie, recyclage des batteries au lithium

SOMMAIRE

RÉSUMÉ 3

DEFINITIONS ET ABBREVIATIONS 7

ETAT DE L'ART 8

INTRODUCTION 8

1. Procédés de recyclage des LIB 8

1.1. Pré-traitement 9

1.2. Procédés de recyclage par pyrométallurgie 10

1.3. Procédés de recyclage par hydrométallurgie 12

1.4. Procédés de recyclage direct 13

1.5. Procédés et installations de recyclage industriel pour les LIB 15

1.6. Comparaison des scénarios de fin de vie et des procédés de recyclage pour les LIB 17

2. Études d'ACV pour le recyclage LIB 18

3. Inventaires du cycle de vie disponibles pour les procédés de recyclage LIB 19

3.1. (Mohammad Ali Rajaeifar, 2021) Inventaire pour la modélisation de différents procédés de pyrométallurgie pour traiter les batteries au lithium NMC111. 20

3.2. (Marit Mohr, 2020) inventaire pour la modélisation des procédés de pyrométallurgie, hydrométallurgie et hydrométallurgie avancée pour le traitement des chimies des batteries NCA, NMC, LFP et SIB 20

3.3. (Rebecca E. Ciez, 2019) inventaire pour la modélisation des procédés de pyrométallurgie, d'hydrométallurgie et de recyclage direct des cathodes pour le traitement des chimies de batteries NMC-622, NCA et LFP. 21

DESCRIPTIF DES PROCEDES 24

1. Présentation des procédés 24

1.1. Type de batteries recyclées 24

1.2. Préparation de la black mass 24

1.3. Hydrométallurgie 25

1.4. Pyrométallurgie 28

MODÉLISATION SIMAPRO 31

1. Définition du champ d'étude 31

2. Méthode d'Analyse d'impacts de Cycle de Vie 32

3. Interprétation des résultats 33

3.1. Hypothèses 33

3.2. Qualité des données 34

3.3. Impacts environnementaux de la préparation de Black Mass 35

3.4. Impacts environnementaux du procédé de recyclage d'hydrométallurgie par précipitation 37

3.5. Impacts environnementaux du procédé de recyclage d'hydrométallurgie par solvant 37

3.6. Impacts environnementaux de la pyrométallurgie 38

3.7. Impacts environnementaux du procédé mixte 39

3.8. Analyse de sensibilité 40

4. Modélisation des crédits 42

REFERENCES.....44
ANNEXE 1 : INSTALLATIONS MONDIALES DE RECYCLAGE (NON EXHAUSTIVE) 46
ANNEXE 2 : LISTE DES PROJETS DE R&D POUR LES PROCÉDÉ DE RECYCLAGE (NON EXHAUSTIVE) 48
ANNEXE 3 : INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES POUR LES PROCÉDÉS DES BASES DE DONNÉES 52
ANNEXE 4 : INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES POUR LES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE LIB (SOUS-SCÉNARIOS) 53
ANNEXE 5: Valeurs absolues des impacts des procédés de recyclage 56

INDEX DES FIGURES

Figure 1: Voies de recyclage possibles des LIB (WeLOOP 2021) 9
Figure 2: Procédé de préparation de la black mass du VTT 10
Figure 3: Traitement pyrométallurgique direct des LIB (WeLOOP 2021) 12
Figure 4: Schéma du procédé de recyclage Valibat TES (France) 13
Figure 5: Brevet américain 2016/0043450 A1 du recyclage direct LIB 15
Figure 6: Installations de recyclage des LIB en Europe (WeLOOP 2021) 16
Figure 7: Installations de recyclage des LIB en France (WeLOOP 2021) 16
Figure 8: LIBs recycling facilities worldwide (WeLOOP 2021) 17
Figure 9: Suivi des sources de données de l'inventaire de Rajaeifar (WeLOOP 2021) 20
Figure 10: Suivi des sources de données de l'inventaire de Mohr (WeLOOP 2021) 21
Figure 11: Suivi des sources de données de l'inventaire de Ciez (WeLOOP 2021) 21
Figure 12: Composition de la BM récupérée avec le procédé URT 25
Figure 13: Schéma de procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par précipitation sélective 25
Figure 14: Bilan massique du procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par précipitation sélective 26
Figure 15: Schéma de procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par extraction par solvant 27
Figure 16: Bilan massique du procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par extraction par solvant 28
Figure 17: Schéma du procédé de traitement des batteries utilisé par Umicore 28
Figure 18 : Schéma procédé de traitement des batteries développé par TND 30
Figure 19: Schéma de la modélisation des impacts et crédits de recyclage basés sur les différentes méthodes d'allocation en fin de vie 31
Figure 20: Résultat en single score des impacts environnementaux de la préparation de Black Mass pour l'unité fonctionnelle 36
Figure 21: Résultat en single score de l'étape de chauffage de la préparation de Black Mass pour 1kg de BM chauffée 36
Figure 22: Résultat en single score du procédé de recyclage par hydrométallurgie par précipitation pour l'unité fonctionnelle 37
Figure 23: Résultat en single score du procédé de recyclage par hydrométallurgie par solvant pour l'unité fonctionnelle 38
Figure 24: Résultat en single score de la pyrométallurgie pour l'unité fonctionnelle 39
Figure 25: Résultat en single score du procédé mixte pour l'unité fonctionnelle 40
Figure 26: Analyse de sensibilité de l'impact de l'origine de l'énergie pour chaque procédé de recyclage 41
Figure 27: Modélisation sur SimaPro de la méthode CFF pour la préparation de BM 43
Figure 28: Procédé LithoRec , Allemagne (Duesenfeld) 52
Figure 29: Procédés de démantèlement et de recyclage PEF/OEF 52
Figure 30: Remplacement de l'extraction par coprécipitation Bis du précurseur NMC(WeLOOP 2021) 54
Figure 31: Procédé breveté pour le recyclage du graphite CN105552468A 2016, (WeLOOP 2021) 54
Figure 32: Brevet Umicore 2012(WO2012/072619A1) (WeLOOP 2021) 54
Figure 33: Brevet Brunp 2011(CN102285673B) (WeLOOP 2021) 55

INDEX DES TABLES

Table 1: Résumé des procédés de recyclage des LIBs 17
Table 2: Comparaison entre les procédés pyro, hydro et de recyclage direct 18
Table 3: Poursuite de la comparaison entre les procédés pyro, hydro et de recyclage direct 18
Table 4: Bases de données disponibles sur les procédés de recyclage des LIB (WeLOOP) 22
Table 5: Evaluation de la qualité des données (DQR) selon la méthode PEF pour les CLI disponibles pour les procédés de recyclage des LIB (pour une portée européenne) (WeLOOP) 23
Table 6: Détails des installations de recyclage des LIB en Europe (WeLOOP 2021) 46
Table 7: Détails des installations de recyclage des LIB dans le monde entier (WeLOOP 2021) 46
Table 8: Projets européens de R&D et de recyclage des LIB (WeLOOP 2021) 48
Table 9: R&D et LIBI Futurs projets de recyclage dans le monde entier (WeLOOP 2021) 50

DEFINITIONS ET ABBREVIATIONS

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ICV : Inventaire de Cycle de Vie

LIB: Batterie Lithium-ion

NMC: Batterie lithium-manganèse-oxyde de cobalt

LFP: Batterie lithium fer phosphate

LCO : Batterie au lithium-cobalt

LMO: Batterie au lithium-ion à l'oxyde de manganèse

PVDF: difluorure de polyvinylidène utilisé comme liant de base

BM: Black mass

Préparation de la black mass: Les batteries au lithium sont traitées mécaniquement par démontage, broyage, évaporation des électrolytes, séparation et tri pour obtenir la « black mass », qui contient les composants de l'électrode tels que les oxydes de lithium métal (LMO) et le graphite.

Recyclage direct : il s'agit simplement d'une séparation mécanique et d'un reconditionnement pour les matériaux de cathode ou d'anode de LIB à utiliser directement dans une nouvelle cellule, où la cathode active ou le matériau de l'anode est réutilisé sans retourner aux métaux ou sels primaires (ce qui est le cas pour les procédés de recyclage par pyrométallurgie et hydrométallurgie)

Hydrométallurgie : l'utilisation de solutions aqueuses pour lixivier le métal désiré du matériau de la cathode, la combinaison la plus courante de réactifs de lixiviation est H2SO4 / H2O2. L'étape de lixiviation est suivie de réactions de précipitation pour récupérer les métaux en manipulant le pH de la solution.

Pyrométallurgie : utilisation d'un four à haute température pour réduire les oxydes métalliques en un alliage de Co, Cu, Fe et Ni. Ce procédé est déjà établi commercialement pour les LIB grand public.

Procédé mixte : une combinaison de procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques, le procédé mixte utilise la black mass prétraitée, c'est un procédé robuste avec une efficacité de recyclage élevée.

ETAT DE L'ART

INTRODUCTION

Les batteries au lithium rechargeables sont utilisées pour alimenter des appareils électroniques portables tels que des téléphones portables, des ordinateurs portables et d'autres petits appareils électroniques. De plus, les batteries au lithium sont utilisées dans les véhicules électriques et hybrides en raison de leurs caractéristiques attrayantes, de leur densité énergétique élevée, de leur faible effet mémoire et de leurs cycles de charge importants. Avec l'électrification du système de transport, la production et l'utilisation de batteries au lithium devraient continuer à augmenter dans le futur proche. Par conséquent, un nombre considérable de batteries au lithium atteindront leur stade de fin de vie dans les années à venir.

Le développement de technologies de recyclage durables et viables est essentiel pour traiter les batteries au lithium en fin de vie. La conception et la chimie des batteries au lithium continuent d'évoluer, remettant en question leur recyclage en raison de flux de sortie de recyclage instables. Les procédés actuels de recyclage LIB se concentrent principalement sur la récupération de composants économiquement précieux tels que le cobalt, le cuivre et l'aluminium.

La mise en décharge n'est pas un bon choix pour les LIB en raison de la contamination possible du sol et des eaux souterraines par l'électrolyte et la lixiviation des métaux. De plus, lorsque les LIB usées entrent en contact avec l'humidité, elles libèrent des gaz toxiques tels que le HF, ce qui entraîne une inflammation par le feu (Winslow, 2018).

La récupération des matériaux par le recyclage des batteries au lithium réduit l'extraction des ressources de l'exploitation minière. De plus, lorsque le recyclage durable est effectué, il peut également réduire la consommation d'énergie et les impacts environnementaux associés à la production de batteries. La valeur économique des métaux récupérés à partir des matériaux de cathode des LIB représente 90% de la valeur économique totale du procédé de recyclage LIB (Elena Mossali, 2020).

1. Procédés de recyclage des LIB

Il existe différents procédés de recyclage pour le traitement des batteries au lithium en fin de vie ; procédés de pyrométallurgies, d'hydrométallurgies et mixtes. Généralement, les procédés de recyclage des LIB sont une combinaison de techniques de pyrométallurgies et d'hydrométallurgies avec des procédés de prétraitement ou de post-traitement (Yaocai Bai, 2020), comme le montre la Figure 1. Les procédés de recyclage de pyrométallurgie sont les procédés dominants de recyclage des batteries au lithium en raison de leur flexibilité (Elena Mossali, 2020) (Weiguang Lv, 2017)

Les procédés actuels de recyclage des LIB se concentrent principalement sur la récupération des métaux de grande valeur tels que le Co et le Ni. Les procédés de recyclage actuels des batteries au lithium ne récupèrent que le Co, Ni, Cu, Al et l'acier. Les fractions de plastique sont principalement brûlées pour la valorisation énergétique, et le graphite, le Mn et le Li sont rarement récupérés (Jo Dewulf, 2010). Néanmoins, les prix du lithium ne cessent d'augmenter, ce qui rend inévitable pour les recycleurs de LIB d'améliorer le taux de récupération du lithium. Les procédés de recyclage industriel des LIB se concentrent principalement sur les batteries à haute teneur en cobalt, telles que les batteries LCO (Lithium cobalt $LiCoO_2$) et NMC (Lithium Manganese Cobalt Oxide). En comparaison, d'autres technologies de batterie de moindre valeur ne sont pas un intérêt principal des procédés de recyclage industriels, telles que les batteries LMO (oxyde de manganèse lithium-ion) et LFP (batterie lithium-fer phosphate) (Kevin M.Winslow, 2018).

Les batteries au lithium des véhicules électriques conservent environ 80% de leurs performances à leur stade de fin de vie. Par conséquent, les batteries au lithium peuvent être utilisées dans des applications de seconde vie, en tant que systèmes de stockage stationnaires. Cependant, la réutilisation de la batterie au lithium pour l'application de seconde vie nécessite d'abord un démontage et des tests de dégradation et de défaillance. Ensuite, si la batterie est en bon état, certains ajustements sont effectués ; ajout de matériel électrique, de systèmes de contrôle et de sécurité et d'emballage pour la deuxième utilisation (Leila Ahmadi, 2015). L'application de seconde vie des batteries au lithium peut être confrontée à plusieurs défis, tels que leur durabilité et leurs performances et les risques de sécurité associés au vieillissement des batteries. De plus, donner une seconde vie aux batteries au lithium réduit leur empreinte carbone (Batteries Europe, 2020).

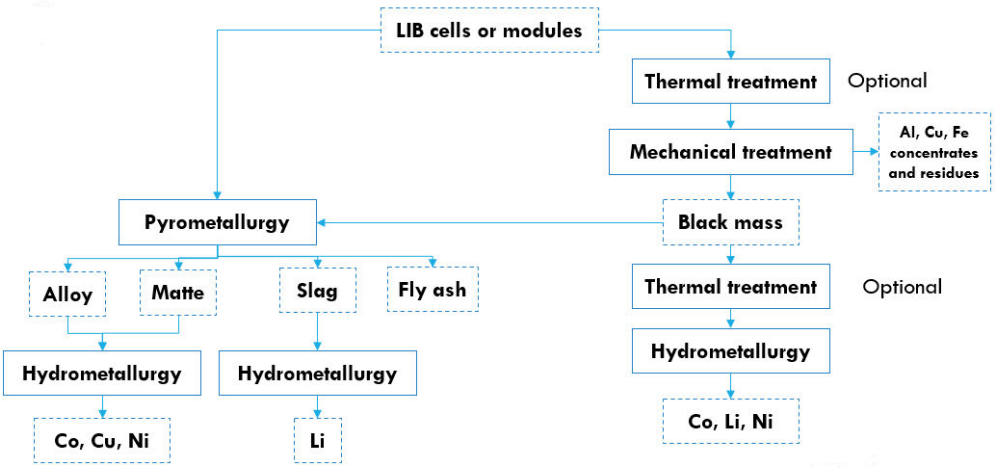


Figure 1: Voies de recyclage possibles des LIB (WeLOOP 2021)

1.1. Pré-traitement

Les batteries au lithium usagées sont traitées en fonction de leur taille, de leur chimie, de leur format et de leur puissance électrique. Deux catégories de batteries au lithium usées sont introduites dans les usines de recyclage. La première catégorie comprend les batteries de petite taille, y compris les batteries d'appareils portables, de petits équipements électroniques et de vélos électriques, avec divers types, tailles et produits chimiques. Un tri est nécessaire avant de commencer le procédé de traitement. La deuxième catégorie est celle des batteries en fin de vie des véhicules électriques et hybrides, et des dispositifs de stockage d'énergie stationnaires. Cette catégorie comprend les modules de batterie composés de cellules individuelles, de cadres en acier ou en aluminium, de câbles électriques, de cartes de circuits imprimés, de composants en plastique et de matériaux d'isolation thermique. Généralement, ces batteries sont démontées manuellement en modules ou en cellules individuelles avant de commencer le procédé de recyclage. Ce démantèlement doit se faire avec précaution, car les travailleurs pourraient être exposés à de graves risques électriques (François Larouche, 2020).
Le prétraitement est une étape cruciale des procédés hydrométallurgiques et de recyclage direct. Le prétraitement aide à maximiser la récupération des matériaux précieux, la manipulation et l'élimination sûres des composants dangereux, à réduire les risques de sécurité et à réduire la quantité d'aliments entrant dans le procédé de recyclage. Si les procédés de prétraitement sont effectués localement, cela pourrait réduire les coûts de transport, qui représentent une part essentielle du coût global des procédés de recyclage des batteries au lithium (François Larouche, 2020). Les procédés de prétraitement pourraient inclure le prétraitement physique, le prétraitement chimique et le prétraitement thermique, avec ces étapes distinctes : démantèlement de la batterie, tri, décharge, réduction de la taille (concassage et broyage), séparation, récupération d'électrolytes, séparation du liant, traitement thermique et lavage.
Le prétraitement peut donner différentes formes de matière active :

- Un mélange de matériaux de cathode et d'anode, composé de Cu, Al, graphite, carbone, PVDF et matériaux actifs cathodiques.
- Matériau cathodique uniquement, composé d'Al, de carbone, de PVDF et de matière active cathodique.
- Matériau actif, où le liant (principalement PVDF) est dissous à l'aide d'un solvant, ou un traitement thermique est effectué pour dégrader le liant et le carbone.
- La black mass (BM) contenant de grandes quantités de métaux précieux tels que Co, Ni et Mn. Al et Cu sont éliminés mécaniquement, manuellement ou dissous dans une solution alcaline. D'autre part, la black mass contient du PVDF et du carbone. En général, lors de la préparation de la black mass, l'anode est séparée de la cathode en début de procédé. Par conséquent, la black mass pourrait encore avoir un peu d'Al et de Cu en raison de la contamination provenant de l'entrée dans les collecteurs de courant pour préparer la black mass.
- BM calcinée, où le traitement thermique est effectué en soumettant la matière active à une température élevée dans une atmosphère oxydante, ce qui entraîne l'oxydation des composés inorganiques et la combustion du liant et du carbone. (François Larouche, 2020).

Les étapes suivantes résument une préparation de black mass :

- Prétraitement mécanique et physique : cette étape vise à enlever le boîtier extérieur, à séparer les matériaux précieux, à réduire le volume des rebuts et à augmenter la surface.

Le pré-traitement se déroule selon les étapes suivantes : première étape de broyage, séparation magnétique (pour éliminer les fractions d'acier), deuxième broyage fin (pour séparer les collecteurs de courant et les fractions organiques), tamisage et séparation par air, séparation par courants de Foucault (pour séparer et éliminer Al, Cu), séparation de table densimétrique (pour éliminer les fractions de plastique), puis finalement une étape de lavage et de flottation.

- Prétraitement thermique : cette étape vise à décomposer le liant, à éliminer le carbone et à améliorer l'efficacité de la récupération du lithium. Plusieurs procédés pourraient être utilisés pour le traitement pré thermique : calcination, chauffage sans oxygène dans une atmosphère de N2, environnement sous vide fermé, pyrolyse sous vide
- Prétraitement chimique et mécanochimique : utilisation de solvants organiques et de fluides supercritiques pour extraire l'électrolyte ou dissoudre le liant. Réduction de la taille des particules pour augmenter la surface, ce qui améliore la lixiviation (dans le cas d'un traitement hydrométallurgique ultérieur). Plusieurs procédés de prétraitement chimique et mécanochimique comprennent la dissolution de l'électrolyte avec le CO2 supercritique, un solvant anhydre avec du T<80 °C bouillant, la dissolution du liant (avec NMP, DMF, jus d'agrumes ou DMAC) et un prétraitement mécanochimique avec de l'agent chélate CEDTA dans une broyeuse. (Elena Mossali, 2020).

MTB est une entreprise française spécialisée dans la préparation de black mass
La Figure 2 mets en évidence les principales étapes de leurs procédés

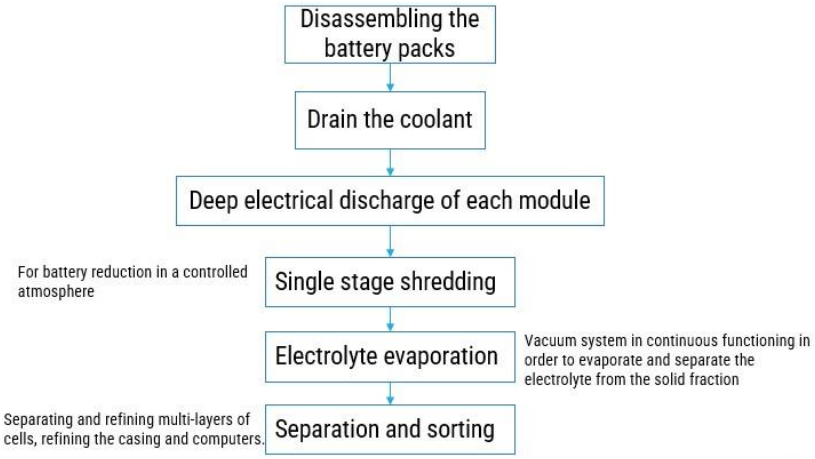


Figure 2: Procédé de préparation de la black mass de MTB

1.2. Procédés de recyclage par pyrométallurgie

Les procédés de pyrométallurgie sont basés sur un traitement à haute température pour réduire les oxydes métalliques présents dans les batteries au lithium usées afin d'obtenir des alliages métalliques de Co, Cu, Fe et Ni, comme le montre la figure 3. Des fours à haute température sont utilisés pour la fusion des batteries. Les procédés de pyrométallurgies sont déjà bien établis pour le recyclage des LIB usagés provenant d'appareils électroniques portables, où les batteries au lithium peuvent être traitées avec d'autres types de déchets, ce qui contribue à améliorer la thermodynamique du procédé. Cela peut être adapté aux batteries au lithium provenant de véhicules électriques. De plus, les procédés de pyrométallurgies peuvent être utilisés pour des cellules ou des modules entiers car le collecteur de courant métallique améliore le procédé de fusion ; cela permet de supprimer l'étape de passivation préalable. (Gavin Harper, 2019). Les procédés de pyrométallurgie produisent des alliages métalliques, des scories et des produits gazeux. Les gaz sont constitués de matières organiques volatiles provenant de la combustion de l'électrolyte et des composants du liant (à moins de 150 ° C). Les fractions polymères sont décomposées à des températures plus élevées. Le laitier contient des métaux tels que l'Al, le Mn et le Li, qui peuvent être envoyés pour être utilisés dans d'autres industries (par exemple, l'industrie du ciment) ou être récupérés par d'autres procédés d'hydrométallurgies. Les procédés d'hydrométallurgies peuvent également traiter l'alliage métallique pour récupérer les métaux constitutifs (Gavin Harper, 2019).
Le principe des procédés de pyrométallurgies est d'utiliser des températures élevées pour récupérer et

purifier les métaux, où les métaux passent par une série de transformations physiques et chimiques. Les transitions de phase et les changements structurels se produisent à une température plus basse, tandis que les réactions chimiques se produisent à des températures plus élevées. Les procédés de pyrométallurgie dépendent de divers paramètres : température, temps, ajout de flux et types de gaz de purge.

Les méthodes de traitement thermique utilisées dans les procédés de recyclage par pyrométallurgie des LIB sont la calcination et la fusion. En général, la calcination est composée de réactions exothermiques gaz-solide à haute température. Pour le recyclage des LIB, une étape de prétraitement est nécessaire avant le procédé de calcination pour obtenir les matériaux de la cathode. Le matériau actif de la cathode peut être récupéré par réduction carbothermique ; il est chauffé avec un agent réducteur (carbone, charbon ou coke). Cette méthode produit des résidus de carbone et un mélange de métaux et d'oxydes impurs qui nécessitent un raffinage supplémentaire (Brian Makuza a, 2021).

La fusion consiste à chauffer le matériau au-dessus de son point de fusion. Pour le procédé de recyclage des LIB, la fusion facilite la séparation des métaux dans la phase liquide en raison des réactions de réduction et de la formation de couches non miscibles fondues. Lors du recyclage des LIB par fusion, les cellules et les modules peuvent être introduits directement dans le four à haute température sans étape de passivation préalable. La fusion comporte deux phases ; la première phase consiste à chauffer le matériau à une température plus basse pour évaporer l'électrolyte. Cette étape doit être effectuée avec précaution car un chauffage intensif provoquerait une évaporation trop soudaine de l'électrolyte, ce qui entraînerait une surpression qui provoquerait l'explosion de la batterie. La deuxième phase consiste à chauffer le matériau à haute température pour faire fondre les flux traités ; au cours de cette phase, toute la matière organique est brûlée par une réaction exothermique qui fournit de l'énergie pour le procédé. Le carbone et l'aluminium agissent comme réducteurs pour le procédé de fusion. La fusion est effectuée dans un haut fourneau ou four électrique avec un flux ajouté pour produire du métal fondu (alliage), des scories et des gaz. Les impuretés indésirables réagissent avec le flux, ce qui conduit à la formation de scories. (Brian Makuza a, 2021).

Les avantages des procédés de pyrométallurgie sont :

- Techniques simples pour extraire des métaux de transition de grande valeur (par exemple, Co & Ni).
- Procédé flexible et facile.
- Rentabilité à long terme.
- Faisabilité commerciale immédiate.
- Préparation technologique optimale.
- Peu de risque pour la sécurité : aucune étape préalable de passivation n'est requise car le procédé se situe au niveau des cellules ou des modules ; les dangers sont contenus dans le procédé.
- Bien que l'aluminium des feuilles et de l'emballage ne puisse pas être récupéré car il est scorifié sous forme d'Al2O3, cette réaction produit une grande quantité d'énergie, diminuant les besoins en énergie et contribuant au procédé de réduction pour la récupération des métaux.
- Comme la combustion des électrolytes et des fractions plastiques est une réaction exothermique, l'énergie nécessaire au procédé est réduite.

Les inconvénients des procédés de pyrométallurgies sont :

- Consommation d'énergie élevée.
- Un nombre limité de matériaux sont récupérés.
- Coûts d'investissement et d'exploitation élevés.
- Pas de récupération des fractions d'électrolyte et de plastique qui représentent 40 à 50% du poids total de la batterie.
- Pas de récupération des sels de lithium.
- Exigence d'étape de pré-tri pour les batteries contenant du Co.
- Impacts environnementaux résultant de la production de polluants gazeux (ces gaz toxiques doivent être captés et traités). (Gavin Harper, 2019) (Yaocai Bai, 2020)

Les procédés de pyrométallurgie peuvent être précédés d'un procédé de prétraitement composé d'étapes de décharge, de démontage pour séparer les électrodes et récupérer l'électrolyte, de réduction de taille et de criblage pour séparer les fractions métalliques (Al, Cu, Fe, etc.) des fractions graphite et plastique. Cette étape de prétraitement est suivie de l'étape de fusion pour récupérer les métaux de transition de grande valeur (Ni, Co et Cu)

L'un des défis des procédés de pyrométallurgie est la perte de lithium dans la scorie. Plusieurs recherches ont été effectuées pour relever ce défi : par exemple, la récupération du lithium par une combinaison de procédés de pyrométallurgies et d'hydrométallurgies. Certaines de ces recherches se basent sur l'incorporation du lithium dans les scories, l'évaporation sous vide et la calcination sous atmosphère inerte (Yaocai Bai, 2020). Dans une certaine mesure, ces méthodes empêchent la perte de lithium ; en collectant les composés du lithium, puis en les récupérant par des étapes d'hydrométallurgies supplémentaires.

En raison de leur faisabilité commerciale, de leur rentabilité à long terme et de leurs étapes de traitement

flexibles et simples, plusieurs entreprises ont utilisé des procédés de pyrométallurgie pour recycler les batteries au lithium usagées : Accurec (Allemagne), Umicore (Belgique) et Sumitomo-Sony (Japon).

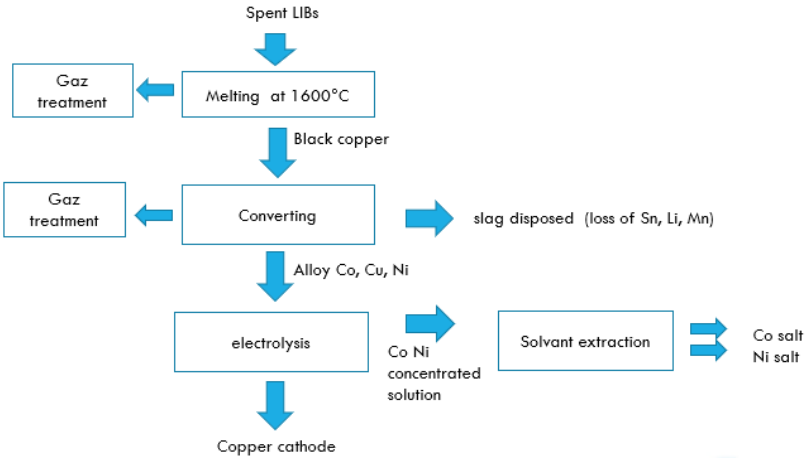


Figure 3: Traitement pyrométallurgique direct des LIB (WeLOOP 2021)

1.3. Procédés de recyclage par hydrométallurgie

Les procédés de recyclage par hydrométallurgie sont définis comme l'utilisation de solutions aqueuses pour lixivier les métaux ciblés, suivie de l'étape de séparation/purification, et enfin, de la récupération des métaux ciblés par précipitation ; les procédés d'hydrométallurgie sont précédés de procédés de prétraitement, de préparation de black mass ou de pyrométallurgie (François Larouche, 2020).

1.3.1. Lixiviation

La lixiviation est une technique permettant d'introduire les métaux ciblés dans la solution. Les métaux précieux de la cathode des batteries au lithium sont lixiviés à l'aide d'agents de lixiviation (les acides inorganiques sont les plus courants). L'agent de lixiviation est souvent utilisé avec un agent réducteur tel que H2O2 et Na2SO3 : il aide à dissoudre facilement les formes métalliques dans les solutions de lixiviation acides (ceci en oxydant les formes métalliques à un état d'oxydation plus élevé) (Liu Yun, 2018). Cependant, l'utilisation d'acides inorganiques comme agents de lixiviation présente certains inconvénients ; il n'est pas économiquement bénéfique par rapport aux acides organiques. De plus, la lixiviation avec des acides inorganiques libère des gaz toxiques tels que le SO3 et le Cl2, qui ont un impact sur l'environnement et la santé humaine ; par conséquent, ces émissions doivent être traitées. L'utilisation d'acides organiques comme agents de lixiviation pourrait être une alternative aux acides inorganiques ; plusieurs recherches ont été effectuées pour étudier ce sujet ; néanmoins, il est encore en phase de recherche et de développement, et il n'a pas encore prouvé son efficacité (Liu Yun, 2018). Le type de lixiviation industrielle le plus courant est la lixiviation des acides inorganiques à l'aide d'acides inorganiques tels que H2SO4, HNO3 ou HCl. Le réactif le plus couramment utilisé est une combinaison d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène H2SO4/H2O2. Il existe d'autres types de lixiviation, comme la lixiviation à l'acide organique, la lixiviation à l'acide alcalin, la lixiviation biosourcée, la lixiviation intensifiée et la lixiviation sélective. Néanmoins, ces procédés ne sont pas encore commercialisés (François Larouche, 2020).

1.3.2. Séparation et purification

La lixiviation est suivie de l'étape de précipitation et de purification pour séparer sélectivement les métaux précieux dissous dans la solution en manipulant le pH de la solution pour récupérer les métaux. Dans l'industrie, des procédés d'extraction par solvant et de précipitation chimique sont utilisés, et le dépôt électrochimique peut être utilisé (Liu Yun, 2018). L'extraction par solvant est une méthode d'hydrométallurgie utilisée pour extraire et séparer les ions métalliques des filtrats en utilisant des extracteurs tels que D2EHPA, ACORGA, DEHPA, etc. La précipitation chimique est une méthode d'hydrométallurgie utilisée pour précipiter les métaux ciblés ; par exemple, lors du recyclage des batteries lithium, le Co, le Ni et le Mn sont souvent précipités à l'aide de NaOH, NH4OH et KMnO4, Lorsque Li est précipité en utilisant Na2CO3, H3PO4 et H2C2O4. Généralement, l'extraction par solvant et la précipitation chimique assurent une séparation très efficace (Liu Yun, 2018).

1.3.3. Récupération des métaux/Précipitation des métaux

La dernière étape du traitement par hydrométallurgie est la récupération des métaux ou la précipitation des métaux pour récupérer les métaux, les sels métalliques et les composés métalliques ciblés de la solution. Les procédés industriels utilisent la recristallisation, la précipitation ionique et la réduction électrolytique ; d'autres procédés peuvent être utilisés pour récupérer les métaux, tels que la réduction au gaz et la réduction électrochimique (François Larouche, 2020).

Plusieurs entreprises de recyclage utilisent des procédés d'hydrométallurgie pour recycler les batteries au lithium, comme Batrec en Suisse et Lithorec en Allemagne, où les sels CoO et Li sont récupérés. TES en France a développé le procédé VALIBAT. TES utilise la lixiviation acide et l'hydrolyse pour récupérer Co(OH)2 et Li2CO3. Retriev au Canada et aux États-Unis a développé le procédé Toxco (Elena Mossali, 2020). À titre d'exemple du procédé de recyclage par hydrométallurgie des batteries au lithium, la figure 4 présente le schéma du procédé de recyclage Valibat par la société TES en France.

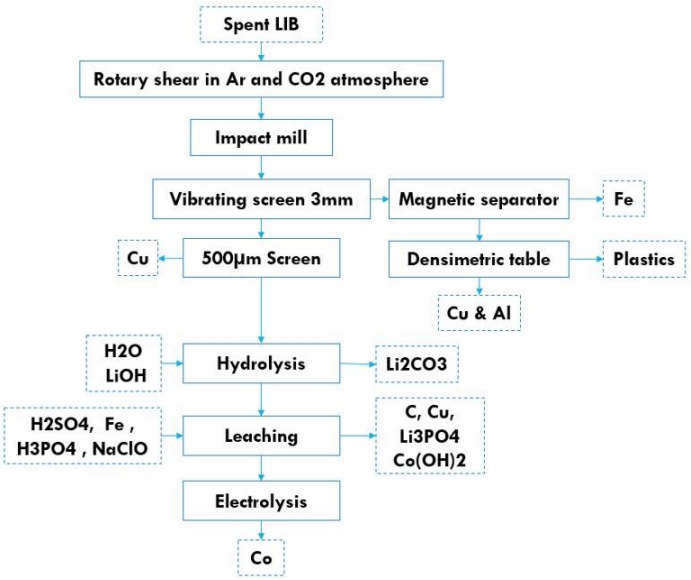


Figure 4: Schéma du procédé de recyclage Valibat TES (France)

Avantages des procédés de recyclage par hydrométallurgie

- Haute efficacité de récupération,
- Sorties de haute qualité,
- Bonne préparation technologique,
- Consommation d'énergie modérée,
- Pas d'émissions gazeuses,
- Récupération de tous les métaux cathodiques des LIB,
- Peu de conditions de réaction

Inconvénients des procédés de recyclage par hydrométallurgie

- Production d'eaux usées,
- Recyclage incomplet du liant/électrolyte,
- La complexité de la procédure,
- Besoin de pré-traitements,
- Sélectivité des réactifs,
- Utilisation de solvants nocifs
- Le mélange des matériaux de l'anode et de la cathode au début du procédé de recyclage complique le traitement en aval,
- Très demandant en ressources (Omar Velázquez-Martínez, 2019).

1.4. Procédés de recyclage direct

Le recyclage direct peut être défini comme la séparation de la cathode ou de l'anode suivie d'un reconditionnement pour que la matière active soit directement utilisée dans une nouvelle cellule. Ici, le matériau actif de la cathode ou de l'anode est directement réutilisé sans extraire les métaux ou sels primaires (Gavin Harper, 2019). Dans le recyclage direct, la matière active ne se dissout pas entièrement. Au lieu de cela, l'idée est de réactiver le matériau actif et de récupérer ses propriétés

perdues au cours de sa durée de vie. Différentes méthodes de recyclage direct ont été signalées. En général, ces méthodes peuvent impliquer la séparation physique du matériau actif des électrodes, l'élimination du liant par lavage, traitement thermique, re-lithiation du matériau actif (ce qui signifie reconstituer le lithium du matériau actif), et se terminer par un traitement thermique (François Larouche, 2020).

Le recyclage direct n'est pas encore commercialisé. Néanmoins, certaines entreprises prétendent intégrer des procédés de recyclage direct dans leurs activités de recyclage. Par exemple, OnTo Technology aux États-Unis utilise des procédés de recyclage direct pour récupérer les matières actives des batteries au lithium. Le CO2 supercritique accède au matériau actif et au démontage/découpe, et les composants précieux sont récupérés par chauffage à 400-900°C avec une solution alcaline LiOH. (François Larouche, 2020). En 2014, Retriev (une entreprise de recyclage aux États-Unis et au Canada) a breveté un procédé de recyclage direct avec une capacité de récupération de 95%. Leur procédé comprend : des étapes de concassage et de criblage, de traitement thermique (pour enlever le liant et modifier la surface du carbone), de flottation sélective (pour éliminer le carbone), de re-lithiation du matériau actif dans une solution d'hydroxyde de lithium et de calcination à 500–800 °C (brevet américain n°. 8 882 007 B1, 2014).

D'autre part, de nombreux projets de R&D développent des procédés de recyclage direct. Par exemple, Panpan Xu et al. ont signalé une régénération directe des cathodes LiFePO4 (LFP) usées. Leur méthode est basée sur une réparation ciblée des défauts, combinant séparation physique et re-lithiation dans une solution aqueuse à basse température suivie d'un post-recuit rapide. Leur procédé récupère le matériau actif de la cathode (Panpan Xu, 2020). En 2016, Steven E. Sloop (brevet américain n° 0043450 A1, 2016) a breveté des méthodes pour recycler le matériau de cathode d'une batterie lithium-ion, où le matériau d'électrode utilisé par Harvest est chauffé sous pression dans une solution concentrée d'hydroxyde de lithium. Ensuite, le matériau de l'électrode positive est séparé de la solution d'hydroxyde de lithium et rincé dans un liquide de base. Enfin, le matériau de l'électrode positive est séché et fritté. En 2017, Steven E. Sloop a breveté une nouvelle méthode pour recycler le matériau de la cathode d'une batterie lithium-ion. Le nouveau procédé comporte des étapes similaires à celles du précédent. Le dernier ajout est que la re-lithiation du matériau de l'électrode positive se produit dans une solution conciliant le lithium-ion et un agent oxydant. (Brevet américain n° 0200989 A1, 2017). En 2019, Steven E. Sloop a breveté une autre méthode pour recycler le matériau de cathode recouvert d'une batterie lithium-ion, des étapes similaires aux brevets précédents. Le nouvel ajout est la re-lithiation du matériau recouvert d'électrode positive dans une solution conciliant le Lithium-ion et un agent oxydant. En conséquence, le matériau à électrode positive peut être rétabli en utilisant des températures de procédé plus basses que le matériau à électrode positive non revêtu (brevet américain n° 0260100 A1, 2019). Le procédé détaillé du brevet US 2016/0043450 A1 est représenté à la figure 5.

En 2021, le LRCS Laboratoire réactivité et chimie des solides UMR CNRS en France a lancé le projet RecyBat-Li dans lequel WeLOOP est impliqué pour réaliser l'analyse du cycle de vie du procédé. Le projet utilise un procédé innovant de recyclage direct pour traiter les batteries au lithium en fin de vie. Il s'agit de reconditionner des matériaux de l'électrode positive (lamellaire de formule générale LiNixCoyMnzO2 (NMC)) et du graphite de l'électrode négative pour leur donner une seconde vie. L'objectif est de réutiliser les matériaux des électrodes positives comme matières premières pour des applications électrochimiques et de produire de nouvelles batteries.

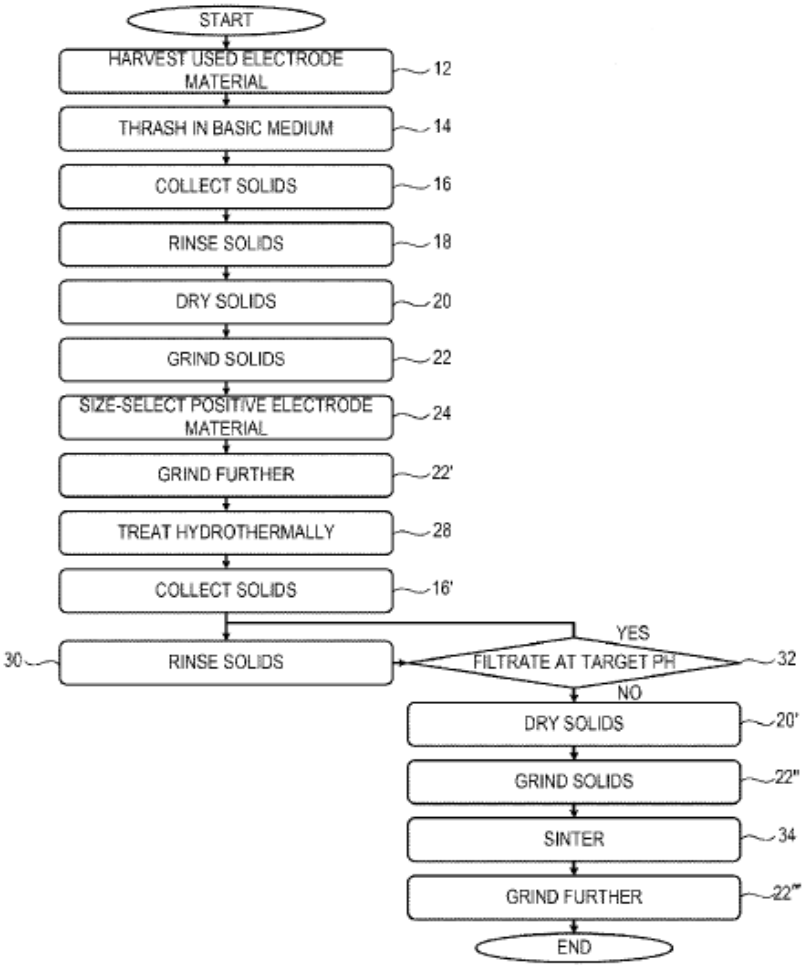


Figure 5: Brevet américain 2016/0043450 A1 du recyclage direct LIB

Avantages du recyclage direct :

- Permet le traitement des technologies de batteries au lithium de faible valeur (par exemple, LFP).
- Comporte moins d'étapes et un procédé chimique plus court.
- Il aurait des avantages économiques par rapport à la lixiviation, car il nécessite moins d'étapes. Mais d'un autre côté, il y a des arguments affirmant que pour refonctionnaliser complètement la matière active, le recyclage direct pourrait nécessiter au moins le même nombre d'étapes que la récupération des métaux par lixiviation puis resynthèse de la matière active (François Larouche, 2020).
- Réduit considérablement la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Inconvénients du recyclage direct :

- Il n'a pas encore prouvé la restauration complète de la capacité de la cathode.
- Conçu pour des batteries spécifiques ; par conséquent, il est sensible aux variations du marché et à l'introduction de chimies de batterie.
- Nécessite un flux d'entrée homogène, ce qui signifie une séparation précise des batteries,
- Il n'a pas encore prouvé sa faisabilité industrielle.

(François Larouche, 2020) (Omar Velázquez-Martínez, 2019)

1.5. Procédés et installations de recyclage industriel pour les LIB

En 2018, 97000 tonnes de batteries au lithium ont été recyclées dans le monde. Sur cette quantité, 67000 tonnes avaient été recyclées en Chine, ce qui représente environ 69% de la capacité mondiale de recyclage des LIB. La Corée du Sud est arrivée en deuxième position avec 18000 tonnes (18,5%), le reste étant recyclé principalement par l'UE et l'Amérique du Nord (Danino-Perraud, 2020). En Chine, on estime que moins de 40% des matériaux des batteries au lithium sont récupérés par des procédés de recyclage (Jiali Song, 2019). La figure 8 cartographie les

installations de recyclage des batteries au lithium dans le monde, à l'exclusion des acteurs européens.



Figure 6: Installations de recyclage des LIB en Europe (WeLOOP 2021)

Les acteurs européens les plus distingués sur le marché du recyclage des batteries au lithium ; sont Accurec (Allemagne), AkkuSer (Finlande), Duesenfeld (Allemagne), Redux (Allemagne), Umicore (Belgique), SNAM (France) et Eurodieuze (France), voir Figure 6 et Figure 7. Plus d'informations sur les détails, la capacité et les matériaux récupérés de leurs procédé de recyclage peuvent être trouvés dans **l'ANNEXE 1.**

Plusieurs futures installations européennes de recyclage des LIB sont en construction, telles que Northvolt et STENA en Suède, Fortum en Finlande et Orano, Mecaware et Sanou Koura en France.

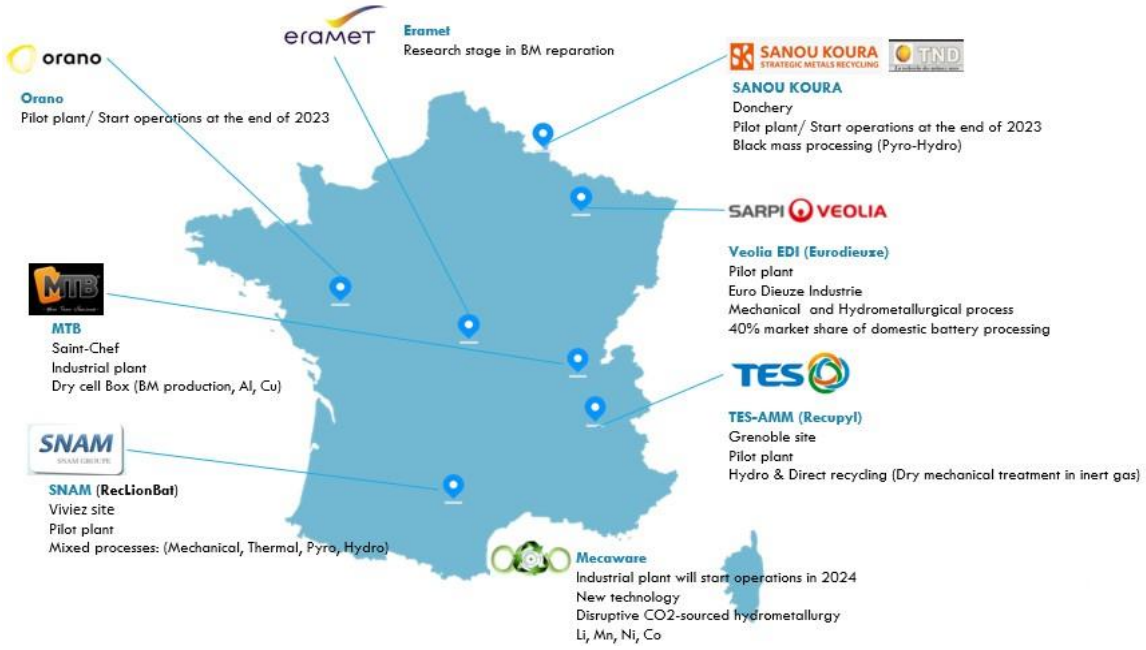


Figure 7: Installations de recyclage des LIB en France (WeLOOP 2021)

SNAM et Eurodieuze EDI dominent principalement le marché du recyclage des batteries de véhicules électriques en France. Cependant, des investissements pour des capacités à grande échelle sont encore nécessaires pour faire face à la quantité substantielle de batteries au lithium usées qui entreront bientôt sur le marché (Danino-Perraud, 2020). La figure 7 montre les installations de recyclage en France.

Plusieurs projets de R&D ont été réalisés sur le marché Français du recyclage des batteries au lithium. Entre 2020 et 2021, plusieurs projets ont été lancés, pour n'en citer que quelques-uns : Eramet, Suez et BASF ont intensifié leurs efforts pour recycler les batteries usagées des véhicules électriques. Là où Suez collecte et démantèle les LIB usagés, Eramet développe le procédé de recyclage pour récupérer la black mass et affiner cette black mass afin de produire des matériaux précurseurs pour les électrodes LIB. Enfin, BASF utilise ces précurseurs pour produire de nouveaux matériaux de cathode, qui sont utilisés dans les batteries.

Le projet Tonso-bogo de TND développe un procédé innovant de recyclage mixte pour les batteries au lithium. Solvay et Veolia ont mis en place une usine de démonstration pour le recyclage des métaux LIB. Maintenant, les partenaires ont l'intention de construire une usine de démonstration qui présentera et exploitera toutes les unités de procédés industriels d'exploitation. Le projet BaCLEM de l'IPGP Institut de Physique du Globe de Paris travaille sur le recyclage bio-assisté en boucle fermée des métaux de mobilité électrique à partir de déchets de PCB et de batteries Li-Ion.
Le site TES de Grenoble a été l'un des premiers sites de recyclage à utiliser un procédé de broyage inerte qui écrase en toute sécurité les batteries au lithium. TES-REC dispose en France d'une usine pilote complète pour le traitement de poudre mixte cathodique-anode à l'aide d'un procédé d'hydrométallurgie durable avec libération d'eau libre. L'augmentation de la technologie a conduit à la première installation industrielle en Asie utilisant l'hydrométallurgie à 6000 T / an. Plus d'informations sur les projets de R&D Français et européens dans le domaine du recyclage LIB sont détaillées dans **l'ANNEXE** 1**.**
Sur le marché mondial du recyclage des LIB, les installations asiatiques sont les principales, telles que GEM, Brunp, Huayou Cobalt et Ganxhou en Chine. SungEel HiTech à Shouth Korea, Dowa et Kyoei Sriko au Japon (voir Figure 8). Il existe plusieurs acteurs importants aux États-Unis et au Canada, tels que Li-Cycle, RETRIEV et On To Technology.



Figure 8: LIBs recycling facilities worldwide (WeLOOP 2021)

1.6. Comparaison des scénarios de fin de vie et des procédés de recyclage pour les LIB

Dans l'échelle de Lansink, la réutilisation (application de seconde vie ou de seconde utilisation) est l'option préférable car elle minimise les impacts environnementaux et maximise la valeur économique. Plusieurs entreprises à travers le monde ont lancé des projets visant à améliorer les tests et la surveillance des batteries au lithium en fin de vie afin de vérifier les caractéristiques des batteries pour une application de seconde vie dans le stockage d'énergie stationnaire. Ces projets comprennent le projet ReLiB au Royaume-Uni, le projet ReCell aux États-Unis et le projet ReLieVe, le projet Lithorec et le projet Amplifll en Europe (Gavin Harper, 2019).

Table 1: Résumé des procédés de recyclage des LIBs

	Input	Process	Industrial implementation	Output	Major pros	Major cons	Production Cost
Hydro	Shredded LIBs or BM	Chemical treatment	Implemented	Metal salts andoxides	Moderated energy consumption	Wastewater productions Use of harmful solvents	++
Pyro	Battery packs, modules, cells, or shredded LIBs	High-temperature treatment	Implemented (Mature technology)	Metal alloys	Mature technology, straightforward, and flexible	High energy consumption	+
Mix	Pre-treated BM	High-temperature treatment and Chemical treatment	Pilot stage	Metal salts + Li and Mn recovery	High recycling efficiency	Loss of Carbon	+/++

Direct	Sorted LIBs used to prepare a treated BM	Mechanical treatments a nd minorchemical treatment	R & D stage	Active cathode materials	Significantly reduces energy usage and greenhouse gas emissions Partial recovery of lithium and carbon	Has not proven its industrial feasibility not yet provencomplete restoration of the cathode capacity	+++

Le recyclage des batteries au lithium de véhicules électriques est essentiel pour éviter la mise en décharge et sécuriser l'approvisionnement secondaire des éléments stratégiques et critiques. Dans le tableau 1, un résumé général des procédés de recyclage des LIB est réalisé. Lorsque l'on compare les différents procédés de recyclage des LIB usagés du point de vue de l'état de préparation technologique, les procédés de pyrométallurgies prennent la tête en tant que meilleure technologie, tandis que les procédés d'hydrométallurgies viennent en deuxième position. Il en va de même pour la complexité, où le procédé de pyrométallurgie est moins complexe que les procédés d'hydrométallurgies. D'autre part, la quantité et la qualité des matériaux récupérés sont meilleures lors de l'utilisation de procédés d'hydrométallurgies, comme le montrent les tableaux 2 et 3, ce qui représente une notation comparative pour les trois principaux procédés de recyclage.

Table 2: Comparaison entre les procédés pyro, hydro et de recyclage direct

	Technology readiness	**Complexity**	**Quality of recovered material**	**Quantity of recovered material**	**Waste generation**	**Energy usage**	**Capital cost**	**Production cost**	**Presorting of batteries required**
Pyro	5	5	1	3	2	1	1	5	5
Hydro	4	3	3	4	3	3	3	3	4
Direct recycling	2	1	2	5	4	3	3	1	1

Où 5 est le meilleur score et 1 est le pire score.

Table 3: Poursuite de la comparaison entre les procédés pyro, hydro et de recyclage direct

	Cobalt recovered	**Nickel recovered**	**Copper recovered**	**Manganese recovered**	**Lithium recovered**	**Aluminum recovered**	**Cathode morphology preserved**	**Material suitable for direct reuse**
Pyro	5	5	5	3	1	No	No	No
Hydro	5	5	4	3	3	5	No	No
Direct recycling	5	5	5	5	5	5	5	4

2. Études d'ACV pour le recyclage LIB

L'analyse du cycle de vie est un outil efficace pour une évaluation complète des impacts environnementaux des produits et services. Cependant, les études d'analyse du cycle de vie sur les procédés de recyclage des batteries au lithium sont limitées puisqu'elles sont considérées comme une technologie émergente (Joule A. Bergerson, 2019). Par conséquent, il est difficile d'obtenir des données de bonne qualité à partir de procédés réels, ce qui conduit à des inventaires du cycle de vie non fiables (JB Dunn, 2015). En outre, il y a un manque d'études d'ACV liées à la collecte, au transport, au tri, au démantèlement et à la préparation de la black mass des batteries au lithium usées. Ces étapes de traitement pourraient entraîner des répercussions considérables (Anna Boyden, 2016).
En conséquence, les études d'ACV sur les procédés de recyclage des batteries au lithium se sont concentrées sur l'évaluation des impacts associés à la récupération des métaux précieux (Yue Yang, 2021). Il n'existe qu'un nombre limité d'études d'ACV sur les procédés de recyclage des batteries au lithium. Ces études d'ACV diffèrent par leur objectif et leur portée, les procédés de recyclage, les types et les chimies des batteries au lithium et la méthode d'évaluation utilisée dans l'étude.
Par exemple, (Jennifer B. Dunn, 2012) et coll. ont mené une étude d'ACV du berceau à la tombe pour évaluer les charges environnementales (consommation d'énergie et émissions) des automobiles qui utilisent des batteries LMO (matériau de cathode LiMn2O4). Leur étude a calculé la consommation d'énergie et les émissions atmosphériques lors de la récupération de LiMn2O4, Al et Cu grâce à trois

procédés de recyclage (recyclage par hydrométallurgie, physique intermédiaire et recyclage physique direct) en étudiant comment le recyclage en boucle fermée affecte les impacts environnementaux de la production de batteries. Cependant, il est à noter que les auteurs ont utilisé des estimations théoriques, ce qui pourrait conduire à une grande marge d'incertitude sur leurs résultats.
(Tobias Elwert, 2016) et al. ont mené une étude d'ACV pour évaluer l'impact environnemental du procédé de recyclage par hydrométallurgie (procédé de recyclage Lithorec) des batteries NMC ($LiNiMnCoO_2$). Ils ont constaté que les impacts des émissions générées lors de la récupération des plaques d'électrodes Cu et Al dépassaient les crédits de récupération de ces métaux. Ils ont également constaté que la récupération du boîtier extérieur en acier et du Co et du Ni à partir du matériau actif de la cathode représente la plupart des avantages environnementaux. (Rebecca E. Ciez, 2019) ont réalisé une étude d'ACV attributionnelle pour examiner les émissions de GES et les intrants énergétiques associés à la production et au recyclage des batteries au lithium NMC-622, NCA et LFP. Ils ont comparé trois procédés de recyclage : le recyclage par pyrométallurgie, le recyclage par hydrométallurgie et le recyclage direct par cathode. Cette étude a montré que les procédés de pyrométallurgies et d'hydrométallurgies ne réduisent pas considérablement les émissions de GES au cours du cycle de vie. D'autre part, le recyclage direct des cathodes peut réduire les émissions.
(Marit Mohr, 2020) et coll. ont mené une étude d'ACV pour comparer les procédés de recyclage par pyrométallurgie et par hydrométallurgie pour différentes chimies cellulaires NCA, NMC, LFP et SIB (batteries sodium-ion). Ces procédés ont été utilisés comme référence pour évaluer un procédé de recyclage par hydrométallurgie avancé modélisé sur la base de données primaires obtenues auprès d'une société de recyclage appelée Duesenfeld GmbH. L'objectif était de quantifier la réduction potentielle des impacts environnementaux que le recyclage de différentes chimies cellulaires peut atteindre. Ils ont déclaré que le recyclage des batteries au lithium pourrait réduire considérablement les impacts environnementaux de leur produit, en fonction de la chimie des cellules. Ils ont constaté que le recyclage de la CNG et de la NCA par le procédé d'hydrométallurgie avancé a le plus faible impact en raison de la récupération du Co et du Ni, en particulier sous les aspects d'épuisement des ressources. D'autre part, pour les cellules faites de matériaux abondants et bon marché, tels que le LFP (phosphate de fer de lithium), le recyclage peut avoir d'autres impacts environnementaux. Ils ont conclu que la récupération maximale des matériaux n'était pas toujours favorable sous l'angle de l'environnement. Par conséquent, les procédés d'hydrométallurgies doivent être adaptés à la chimie cellulaire spécifique pour atteindre le maximum d'avantages environnementaux.
(Mohammad Ali Rajaeifar, 2021) et al., ont fait une étude d'ACV pour comparer trois procédés de recyclage par pyrométallurgie concernant le potentiel de réchauffement climatique et la demande d'énergie cumulée. Ces procédés de pyrométallurgie sont la technologie de fusion au plasma en courant continu, la même technologie de fusion au plasma CC précédée d'un prétraitement et un four UHT à ultra-haute température. Le type de cathode de batterie au lithium est NMC111. Leurs résultats ont montré que la technologie de fusion au plasma DC précédée d'un prétraitement réduit le potentiel de réchauffement climatique jusqu'à 5 fois par rapport à l'utilisation du four à ultra-haute température.
Le défi le plus critique pour les études d'ACV sur les procédés de recyclage des batteries au lithium est la rareté de données fiables pour les ICV, les modèles à impact fixe et les normes d'allocation (Xiaoxiao Zhang, 2018). Pour surmonter ces défis, de nombreuses ressources et un soutien sont nécessaires de la part des producteurs de batteries au lithium, des recycleurs et des gouvernements (Yue Yang, 2021).

3. Inventaires du cycle de vie disponibles pour les procédés de recyclage LIB

La constitution de l'inventaire du cycle de vie (ICV) est une étape cruciale dans toute étude d'ACV. La disponibilité et la qualité des données définissent la fiabilité de l'ICV. Malheureusement, les ICV des procédés de recyclage des batteries au lithium ne disposent pas de données fiables. Les données primaires recueillies auprès des recycleurs de batteries au lithium sont soumises à des accords de confidentialité ; par conséquent, elles ne peuvent pas être utilisées facilement. Les données secondaires sont des données obtenues à partir des bases de données des outils logiciels d'ACV. Bien que la construction de l'ICV à partir de données primaires soit préférable et fiable, les données secondaires peuvent être un substitut valide basé sur des modèles et des hypothèses solides. La plupart des études d'ACV utilisent des données primaires et secondaires, et très peu d'études utilisent uniquement des données primaires ou secondaires. La base de données Ecoinvent est utilisée pour effectuer la phase ICV dans la plupart des ACV disponibles (environ 66% des études), la base de données BatPac est mentionnée dans 17% (Rosario Tolomeo, 2020).
Nous avons recueilli trois inventaires récents du cycle de vie des procédés de recyclage des LIB (Mohammad Ali Rajaeifar, 2021), (Marit Mohr, 2020) et (Rebecca E. Ciez, 2019)

3.1. (Mohammad Ali Rajaeifar, 2021) Inventaire pour la modélisation de différents procédés de pyrométallurgie pour traiter les batteries au lithium NMC111.

Rajaeifar et al. ont obtenu les données pour la fusion de plasma à courant continu de la société Tetronics, et ces données ont été quantifiées et modélisées par (Johnson, 2019). Le deuxième scénario étudié dans cette évaluation était la fusion de plasma DC précédée d'un prétraitement (broyage). Ce dernier a été adopté à partir de la base de données Ecoinvent 2019 et (Roland Hischier, 2007). L'élimination des composants volatils a été modélisée et adaptée du procédé de calcination décrit par le modèle GREET développé par Argonne National Laboratory (ANL, 2019). Le troisième scénario consistait à modéliser un procédé de pyro-hydrométallurgie industriel. Les données sur les fours UHT ont été adaptées de la littérature évaluée par des pairs (J. B. Dunn, 2014), du brevet Umicore (brevet belge n° 7 169 206 B2, 2007), (Umicore est une installation de recyclage commerciale en Belgique) et du modèle EverBatt (Qiang Dai, 2019). L'alliage généré est soumis à une série de traitements par hydrométallurgie dans les trois scénarios. Cependant, comme l'objectif de cette étude est d'évaluer les procédés de pyrométallurgies, les auteurs ont utilisé le modèle GREET préexistant (J. B. Dunn, 2014) et des données complémentaires tirées de la littérature sur la partie traitement par hydrométallurgie (Qiang Dai, 2019) (Li Li, 2013).
Nous avons travaillé sur le suivi des sources de données utilisées dans l'inventaire (Mohammad Ali Rajaeifar, 2021), présenté à la figure 9.

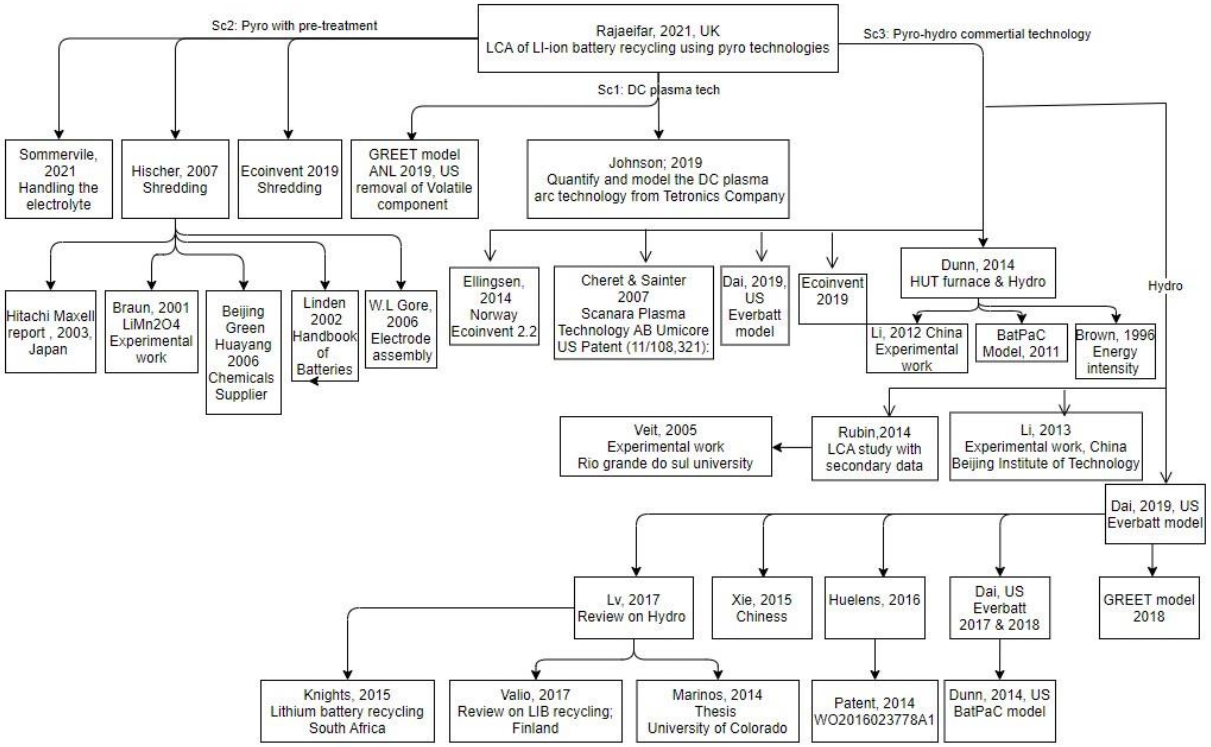


Figure 9: Suivi des sources de données de l'inventaire de Rajaeifar (WeLOOP 2021)

3.2. (Marit Mohr, 2020) inventaire pour la modélisation des procédés de pyrométallurgie, hydrométallurgie et hydrométallurgie avancée pour le traitement des chimies des batteries NCA, NMC, LFP et SIB

Mohr a obtenu les données sur les procédés actuels de recyclage par pyrométallurgie et hydrométallurgie (Karen Fisher, 2006). Le rapport de Fisher couvrait différents types de batteries [ZnO, ZnC, AlMn], [LiMn, Li, Li-ion], [AgO] [NiCd, NiMH] [PbA]. L'inventaire de Fisher était basé sur un mélange de données primaires et secondaires, les données primaires ont été obtenues auprès de recycleurs de batteries, où des procédés de recyclage des batteries au lithium ont eu lieu dans l'UE.
Le procédé d'hydrométallurgie a été modélisé sur la base du procédé Valibat de Recupyl. Deouis 2004, Recupyl est une entreprise de recyclage en France qui porte désormais le nom de TES. Dans le procédé Valibat de Recupyl, les déchets les batteries sont d'abord déchiquetées sous gaz inerte, puis traitées chimiquement. Les sorties de procédé résultantes sont les constituants métalliques contenus dans le matériau de la cathode (sels de lithium et autres métaux respectifs) ainsi que des parties séparées du boîtier de la cellule (aluminium, cuivre et plastique). Le procédé de pyrométallurgie a été modélisé sur la base du procédé de recyclage Batrec (Suisse, 2004). Le procédé précis de l'écoulement n'est pas divulgué, on sait seulement que le procédé implique une étape de concassage avant la neutralisation

et le traitement ultérieur.
L'inventaire fourni par Fisher est relativement ancien, présente des incohérences et plusieurs ambiguïtés, et utilise des données secondaires pour quantifier les fardeaux évités de la production de matières premières grâce au recyclage. En outre, (Marit Mohr, 2020) a pris la base de données de la base des procédés respectifs dans Ecoinvent (Roland Hischier, 2007), cette base de données ne fait pas la différence entre les chimies cellulaires et ne fournit que des résultats génériques. (Marit Mohr, 2020) a adapté les données à des chimies cellulaires distinctes NCA, NMC, LFP et SIB. Enfin, le procédé avancé de recyclage par hydrométallurgie a été modélisé sur la base de données primaires obtenues auprès d'une société de recyclage allemande appelée Duesenfeld GmbH à partir de l'année 2014. Nous avons travaillé sur le suivi des sources de données utilisées dans l'inventaire de (Marit Mohr, 2020), il est présenté en figure 10.

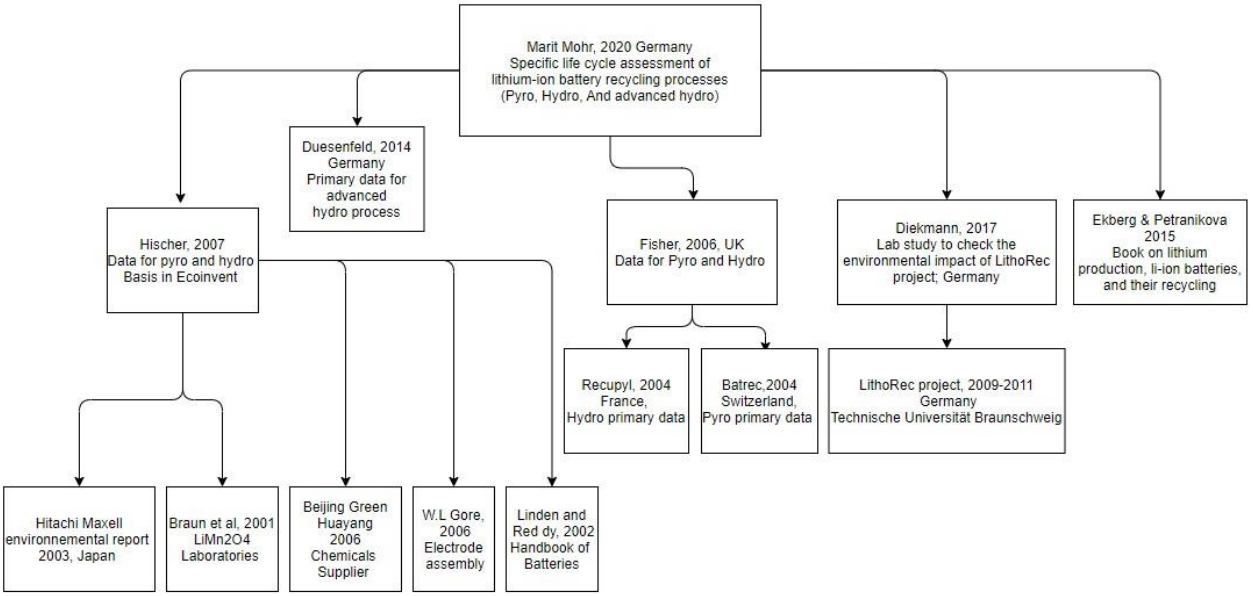


Figure 10: Suivi des sources de données de l'inventaire de Mohr (WeLOOP 2021)

3.3. (Rebecca E. Ciez, 2019) inventaire pour la modélisation des procédés de pyrométallurgie, d'hydrométallurgie et de recyclage direct des cathodes pour le traitement des chimies de batteries NMC-622, NCA et LFP.

Ciez a obtenu les données pour le procédé de pyrométallurgie à partir du brevet Umicore (brevet belge n° 7 169 206 B2, 2007). Le procédé d'hydrométallurgie a été modélisé à partir de la littérature évaluée par les pairs (modèle GREET) (J. B. Dunn, 2014), les hypothèses relatives aux émissions et à l'énergie intrinsèque proviennent du modèle Ecoinvent et GREET 2016. Le recyclage direct des cathodes a été modélisé sur la base de travaux expérimentaux effectués par (Martin Gr¨utzke, 2015) à l'Université de Munster, en Allemagne.
Nous avons travaillé sur le suivi des sources de données utilisées dans l'inventaire de (Rebecca E. Ciez, 2019), présenté à la figure 11.

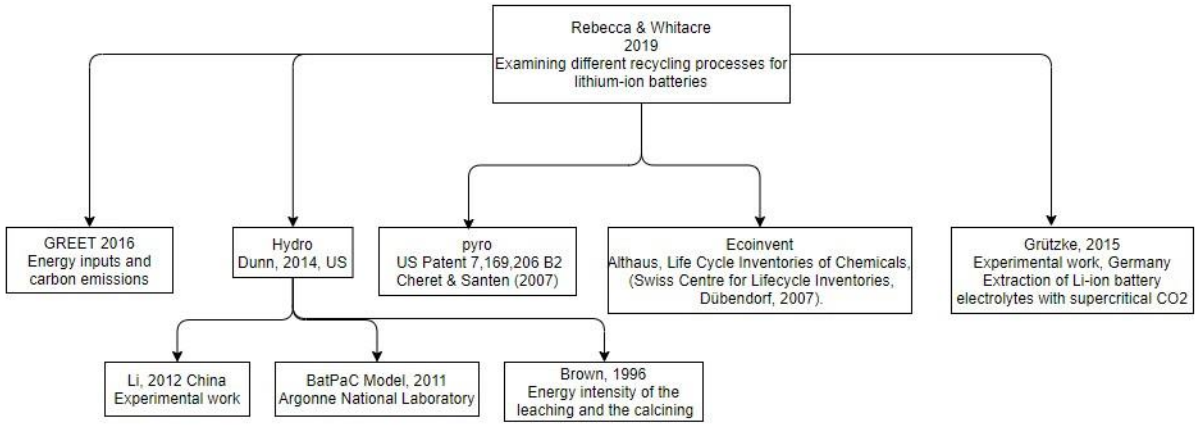


Figure 11: Suivi des sources de données de l'inventaire de Ciez (WeLOOP 2021)

Les bases de données disponibles pour les procédés de recyclage des batteries au lithium sont énumérées dans le tableau 4. Ecoinvent a deux procédés de pyrométallurgie et d'hydrométallurgie. Les données ont été tirées d'anciennes références (Fisher, 2006), et les données ont été extrapolées de 2005 à 2021. GaBi a un procédé de pyrométallurgie prenant des données du projet allemand LitthoRec (voir Figure 28 dans **l'ANNEXE 3**). L'EcoSystem a développé une base de données française pour les ICV DEEE ; cette base de données n'inclut pas les batteries/batteries/accumulateurs dans leurs ICEC en fin de vie des DEEE. De plus, il n'y a pas de projets visant à étendre leurs ICV aux procédés de recyclage des batteries au lithium. Le procédé PEF/OEF est un procédé mixte (une enquête est en cours de notre côté). La Figure 29 de **l'ANNEXE 3** montre les détails du procédé de recyclage utilisé dans la base de données PEF/OEF. Nous avons effectué une évaluation de la qualité des données (DQR) pour les ICV disponibles pour les procédés de recyclage des LIB, voir tableau 5. Ce DQR recalculé est conforme à la méthode EEP appliquée à l'utilisation des données dans le contexte européen pour l'année 2022.

Table 4: Bases de données disponibles sur les procédés de recyclage des LIB (WeLOOP)

Data-base	Process	Date	Reference	Technology	Geographical representation
Ecoinvent	Pyro	2021-2024	Fisher 2006	This dataset represents the treatment of Li-Ion batteries from electric and electronic devices by a pyrometallurgical process. It includes energy & auxiliary consumption, waste production, emission (to air/to water) production and rough estimations of the effortsfor infrastructure & transportation. Treatment of used Lithium-ion battery Crushing the batteries, followed by a neutralization and processing step.	Global
	Hydro		Fisher 2006	This dataset represents the treatment of Li-Ion batteries from electric and electronic devices by a hydrometallurgical process. It includes energy & auxiliary consumption, waste production, emission (to air/to water) production and rough estimations of the effortsfor infrastructure & transportation. Treatment of used Lithium-ion battery Shredder, followed by chemical treatment to separate the various fractions produced.	Global
GaBi	Pyro	2021-2024	Project LithoRec	The process consists of mechanical treatment, pyrometallurgical, and hydrometallurgical processes. The mechanical process includes dismantling the battery (e.g., removing aluminum housing and copper cables). In the pyrometallurgical process, the material is heated in a furnace so that metals such as copper, aluminum, cobalt, and nickel are separated by melting. The separated active materials are treated with caustic soda to dissolve the lithium in the hydrometallurgical process. Finally, plastic waste from the battery is incinerated with energy credit.	Germany
EIME	No additional information				
EcoSystem	This database has not included batteries/cells/accumulators in their LCIs on the end of life ofWEEE.				
PEF/OEF	Mixed Pyro-Hydro	2021	Dewulf J, et al. 2009 J. Xua et al. 2008 Umicore 2009	E-mobility Dismantling process of the battery Pyrometallurgical treatment process for the cell Then, Hydrometallurgical treatment process for the cell.	Europe

Table 5: Evaluation de la qualité des données (DQR) selon la méthode PEF pour les ICV disponibles pour les procédés de recyclage des LIB (pour une portée européenne) (WeLOOP)

LCI	Process	Source	TiR	TeR	GR	Average	OverallDQR
(Mohammad Ali Rajaeifar, 2021) UK	DC plasma smelting	Tetronics company, UK, 2019	3	3	2	2.6	Good quality
	UHT Furnace	Umicore patent, Belgium,2007	5	5	2	4	Fair quality
	Hydro	GREET model, lab experiment, US, 2014	5	5	5	5	Poor quality
(Marit Mohr, 2020) Germany	Hydro	Recupyl, France, 2004 (Fisher, 2006)	5	4	2	3.6	Fair quality
	Pyro	Batrec, Switzerland, 2004 (Fisher, 2006)	5	4	2	3.6	Fair quality
	Advanced hydro	Duesenfeld, Germany, 2014	5	3	2	3.3	Fair quality
(Rebecca E. Ciez, 2019) Germany	Pyro	Umicore patent, Belgium,2007	5	5	2	4	Fair quality
	Hydro	GREET model, lab experiment, US, 2014	5	5	5	5	Fair quality
	Direct	Lab-scale experiment, Germany, 2015	5	4 or 3	2	3.6 or3.3	Fair quality
Ecoinvent	Pyro	Batrec, Switzerland, 2004 (Fisher, 2006)	5	4	2	3.6	Fair quality
	Hydro	Recupyl, France, 2004 (Fisher, 2006)	5	4	2	3.6	Fair quality
GaBi	Pyro	Project LithoRec, Germany, 2018	3	2	2	2.3	Good quality
PEF/OEF	Mixed Pyro-Hydro	Dewulf J, et al. 2009 J. Xua et al. 2008Umicore 2009	5	5	2	4	Fair quality

Sur la base de ce DQR, on peut voir que la plupart des bases de données et des ICV disponibles ont juste une qualité raisonnable (score: >3 à ≤ 4.0). Cependant, aucune des bases de données et des ICV disponibles n'a obtenu d'excellente ou de très bonne qualité.

Selon la méthode PEF, ces données ne peuvent pas être utilisées pour les procédés les plus pertinents d'une entreprise. Par exemple, les données ne peuvent pas être utilisées pour évaluer les voitures ou les vélos électriques, car la fin de vie est l'un des procédés les plus pertinents pour ces produits.

DESCRIPTIF DES PROCEDES

L'objectif du projet ScoreLCA est de compléter et mettre à jour les connaissances concernant les procédés de recyclage de batteries de voitures électriques et leurs impacts environnementaux, en réalisant des ICV sur différents procédés de recyclage.

Sur la base d'une étude bibliographique et les calculs réalisés par TND, WeLOOP a donc développé les ICV des différents procédés suivants :

- Préparation de Black Mass ;
- Recyclage hydrométallurgique par précipitation et par extraction de solvant ;
- Recyclage pyrométallurgique ;
- Recyclage mixte.

WeLOOP est propriétaire des ICV et des résultats, et fournit aux membres de ScoreLCA une licence pour l'usage des inventaires au format CSV, compatibles avec le logiciel SimaPro.

1. Présentation des procédés

1.1. Type de batteries recyclées

Les évaluations comparatives des différents procédés ont été menées à partir d'un même flux entrant : un mix de batteries NMC issues de la petite mobilité et de batteries LiCO provenant des DEEE.

Tableau 1: Proportion des types de batteries recyclées

%	NMC+LiCo
C	20
Co	10,2
Ni	3,4
Mn	2,3
Li	2
Cu	10,9
Fe	10
Al	15
O	7,5
plastic	3,7
electrolyte	15
	100

Source : analyses TND

1.2. Préparation de la black mass

Le procédé du spécialiste allemand URT (Unwelt und Recyclingtechnik) est ici pris comme référence.
Sous azote, les batteries sont broyées, puis chauffées à 120 °C par contact dans une vis transporteuse. L'azote est produit dans l'atelier et permet d'éviter les départs de feu.
La vis est chauffée par une huile, elle-même chauffée électriquement. A cette température, l'électrolyte et une partie des solvants sont évaporés, refroidis pour être condensés, et collectés. Le sel LiPF6 pur, utilisé dans l'électrolyte, est thermiquement stable jusqu'à 107°C dans une atmosphère sèche inerte, et son chemin de décomposition est une simple dissociation produisant du LiF comme solide et du PF5 (te -84°C) comme produit gazeux. Le PF5 est fixé sur du charbon actif et de la soude.

La matière ainsi « séchée » est alors criblée. La matière est séparée en deux fractions : la black mass (particules inférieures à 0.5 mm) que l'on traitera par la suite, et la fraction grosse, qui est traitée dans une machine de séparation dans un flux d'air appelée machine zig-zag.
La fraction grosse est séparée en fractions dites lourde et légère par la machine zig zag. Les lourdes, sont traitées par un champ magnétique pour récupérer le fer, puis par un courant de Foucault pour récupérer l'aluminium. Les légères sont traitées par criblage, ce qui permet de séparer l'aluminium, le cuivre et le résidu de black mass.
L'énergie électrique dépensée est de 410 kWh par tonne de batteries traitée.

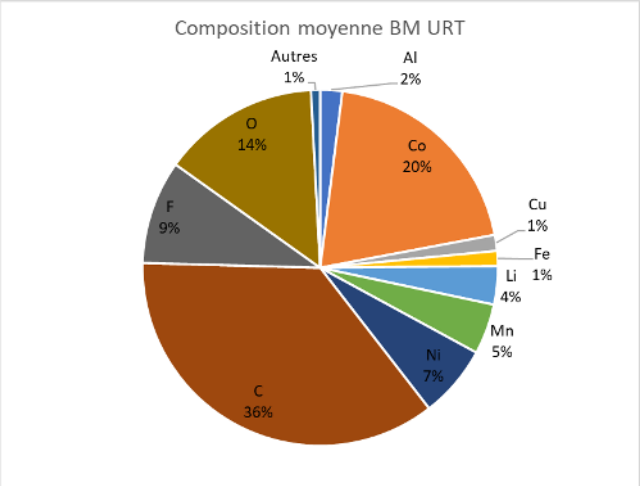


Figure 12: Composition de la BM récupérée avec le procédé URT

Tableau 2: Récupération des métaux

Cuivre	85 %
Aluminium	85 %
Fer	85 %
Black Mass	95 %

1.3. Hydrométallurgie

La première étape du procédé d'hydrométallurgie est toujours une étape de lixiviation de la Black Mass par de l'acide sulfurique H2SO4, suivie d'une filtration de la matière non attaquée (Carbone + métaux non attaqués). Deux voies sont ensuite envisageables pour séparer les nombreux métaux présents dans la solution : une séparation par précipitation sélective (procédé en cours de développement au sein de la SNAM) et une séparation par extraction par solvant (procédé en cours de développement au sein d'Eramet Ideas). Ces procédés, décrits dans la suite du rapport, sont des procédés en partie théoriques, s'appuyant sur la chimie des éléments présents et sur les recherches menées principalement au stade laboratoire dans la littérature. Les données utilisées sont des estimations issues de calculs théoriques, car aucune donnée industrielle n'est accessible publiquement.

1.3.1. Hydrométallurgie 1 : procédé par précipitation sélective

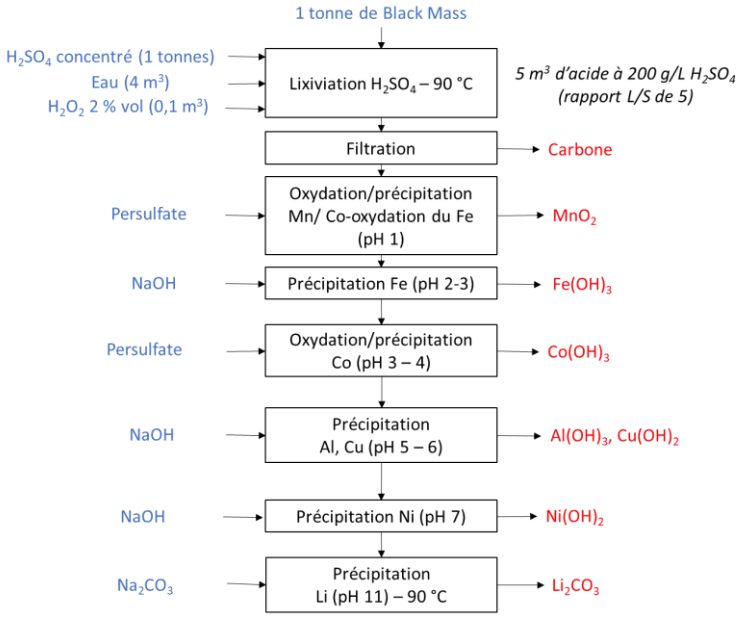


Figure 13: Schéma de procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par précipitation sélective

Le procédé de séparation par précipitation sélective est décrit sur la Figure 13. Le pH lors de la précipitation exercera une influence sur le métal qui sera précipité avec un même solvant.
Le procédé comprend une première étape d'oxydation/précipitation du manganèse par ajout de persulfate de sodium, de manière à produire un oxyde de manganèse MnO2 solide récupéré par filtration. Le fer présent en solution est également oxydé en fer +III au cours de la réaction. Le fer +III est ensuite précipité sous forme de Fe(OH)3 solide par ajout de soude puis récupéré par filtration. Le cobalt est ensuite oxydé et précipité par ajout de persulfate de sodium, puis récupéré sous forme de Co(OH)3 solide par filtration. Les traces de cuivre et d'aluminium éventuellement présentes en solution sont précipitées par ajout de soude à pH 5-6, afin de récupérer par filtration un précipité mixte de Cu(OH)2 et de Al(OH)3. Le nickel restant est précipité par ajout de soude, puis récupéré par filtration sous forme de Ni(OH)2 solide. Enfin, le lithium est précipité par du carbonate de sodium à chaud à pH 11 pour former un carbone de lithium récupéré par filtration. L'effluent aqueux final peut être évaporé afin de produire du sulfate de sodium solide. Les masses de produits entrants et sortants ont été calculées de façon théorique et sont indiquées sur la Figure 14. Les produits sortants du procédé de précipitation ne sont généralement pas purs (pureté d'environ 80-90 %), car d'autres métaux sont généralement entrainés dans les précipités.

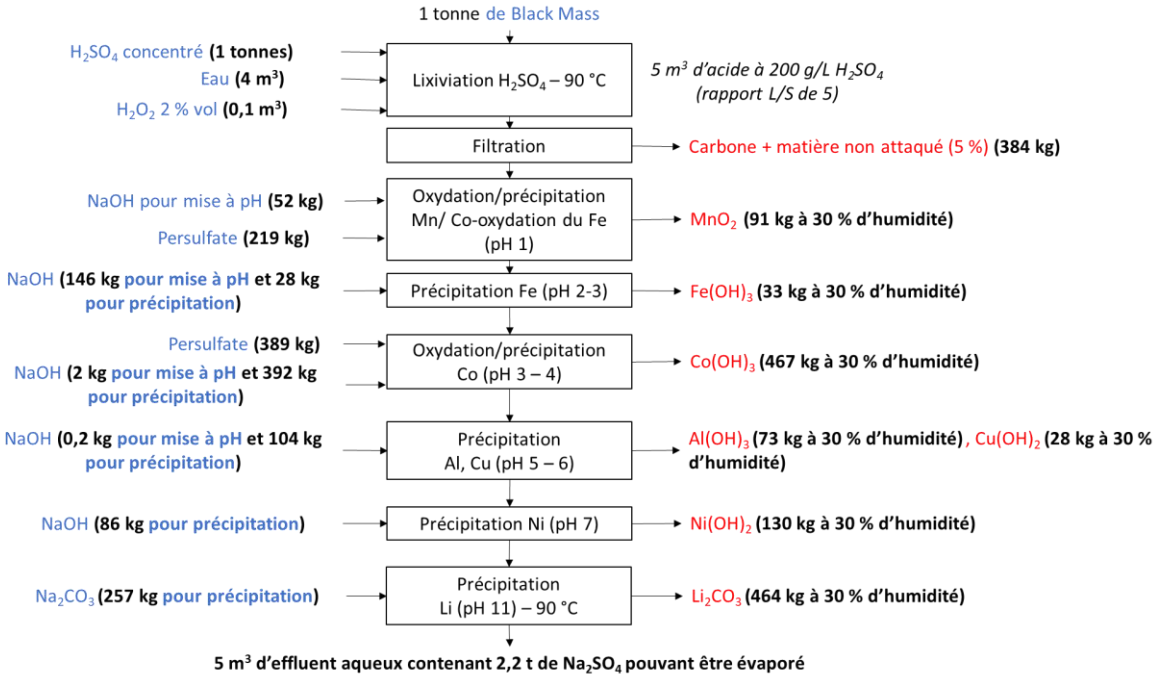


Figure 14: Bilan massique du procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par précipitation sélective

1.3.2. Hydrométallurgie 2 : procédé par extraction par solvant (SX) :

Le procédé de séparation des métaux présents en solution par extraction par solvant est donné dans la Figure 15.

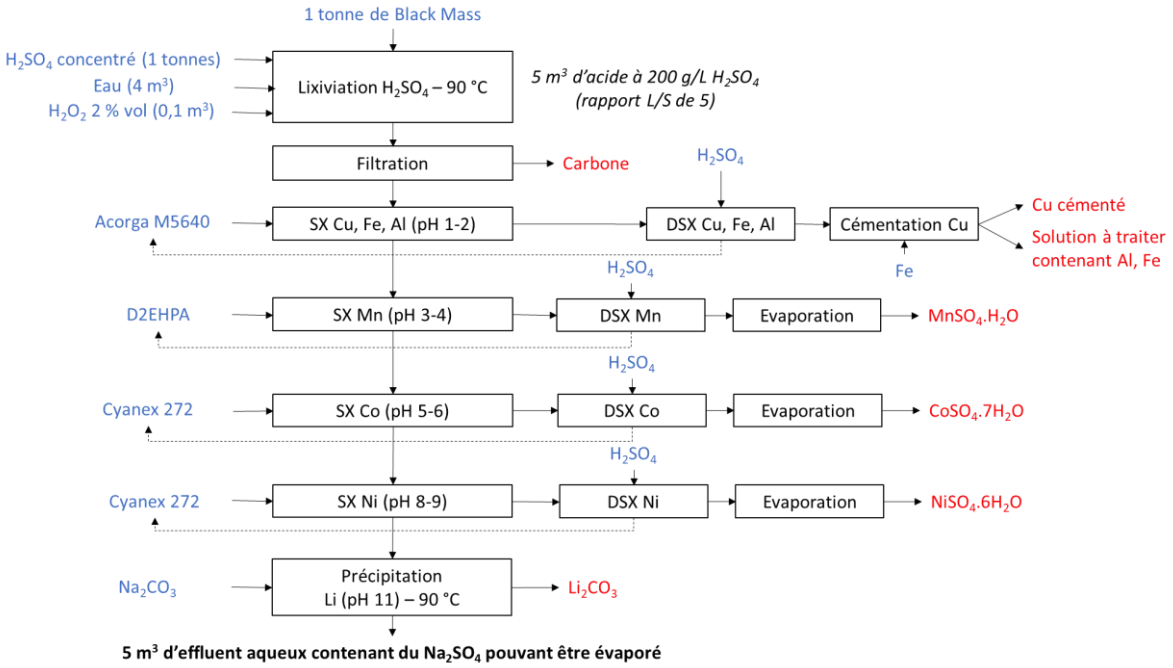


Figure 15: Schéma de procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par extraction par solvant

La première étape de séparation par solvant (noté SX Cu, Fe, Al) vise à extraire le cuivre, les traces d'aluminium et les traces de fer présentes en solution. L'extractant Acorga M5640 peut être utilisé ici, dilué dans du kérosène. L'extraction se fait à pH 1-2. Le cuivre provenant de la solution de désextraction (DSX Cu, Fe, Al) peut être récupéré par la suite, par cémentation de la poudre de fer. La solution de lixiviation restante, appauvrie en cuivre et contenant des traces d'Al et de Fe, peut être traitée en installation de déchet dangereux. La solution de lixiviation après l'étape de SX Cu, Fe, Al est ensuite traitée pour extraire le Mn à pH 3-4 par l'extractant D2EHPA, toujours dilué dans du kérosène. Le Mn peut ensuite être désextrait de la phase organique (DSX Mn sur le schéma) par de l'acide sulfurique dilué, puis récupéré sous forme de solide MnSO4.H2O par évaporation de la solution. Le cobalt présent dans la solution de lixiviation est ensuite récupéré par extraction par solvant à pH 5-6 (SX Co sur la figure). L'extractant utilisé ici est le Cyanex 272 dilué dans du kérosène. Le cobalt est ensuite désextrait par de l'acide sulfurique (DSX Co), puis cristallisé sous forme de CoSO4.7H2O. Le nickel présent dans le lixiviat est extrait à pH 8-9 par du Cyanex 272, toujours dilué dans le kérosène (SX Ni), récupéré par désextraction à l'aide d'acide sulfurique dilué (DSX Ni) et cristallisé par évaporation pour produire du NiSO4.6H2O. Pour finir, le lithium est précipité à 90 °C à pH 11 par ajout de carbonate de sodium pour produire un carbonate de lithium de haute pureté. Tous les produits sortants du procédé d'extraction par solvant ont une pureté élevée (> 99%). Les extractants étant utilisés en boucle fermée, leur consommation est très faible et a été estimée à 5 % de leur masse totale. Ces 5% correspondent aux pertes pouvant se produire dans les différentes étapes. La mise à pH entre les différentes étapes est réalisée par ajout de soude.

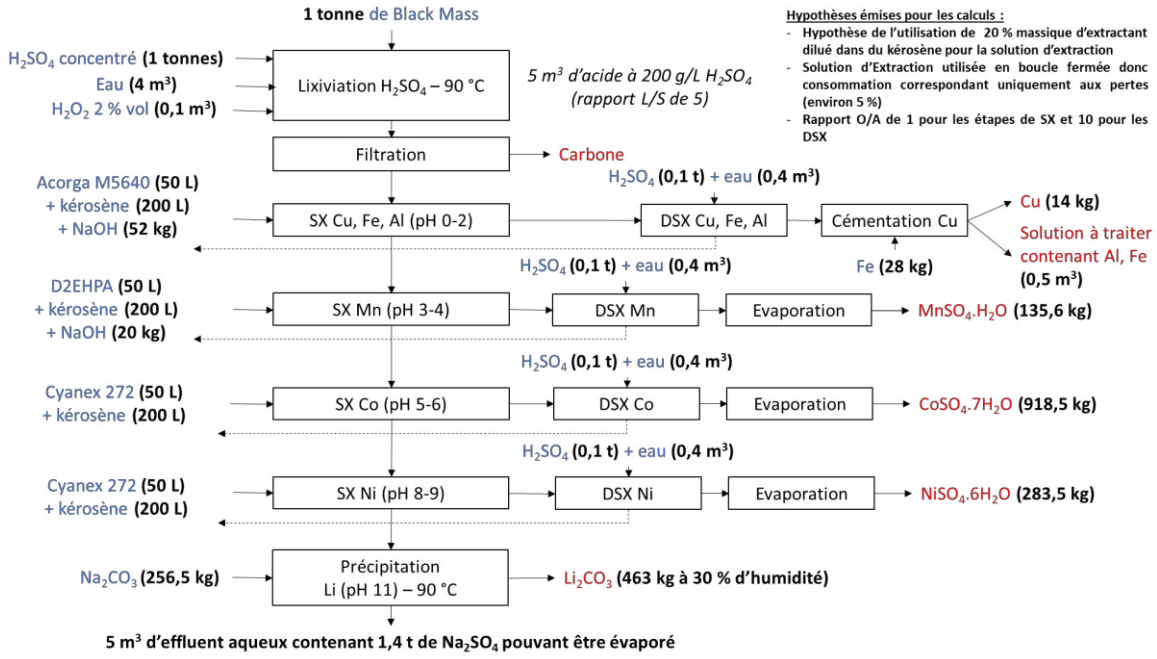


Figure 16: Bilan massique du procédé de traitement hydrométallurgique de la Black Mass par extraction par solvant

1.4. Pyrométallurgie

1.4.1. Pyrométallurgie 1 : four à plasma

Le procédé décrit par la Figure 17 décrit la technologie utilisée par Umicore pour le traitement des batteries par pyrométallurgie.

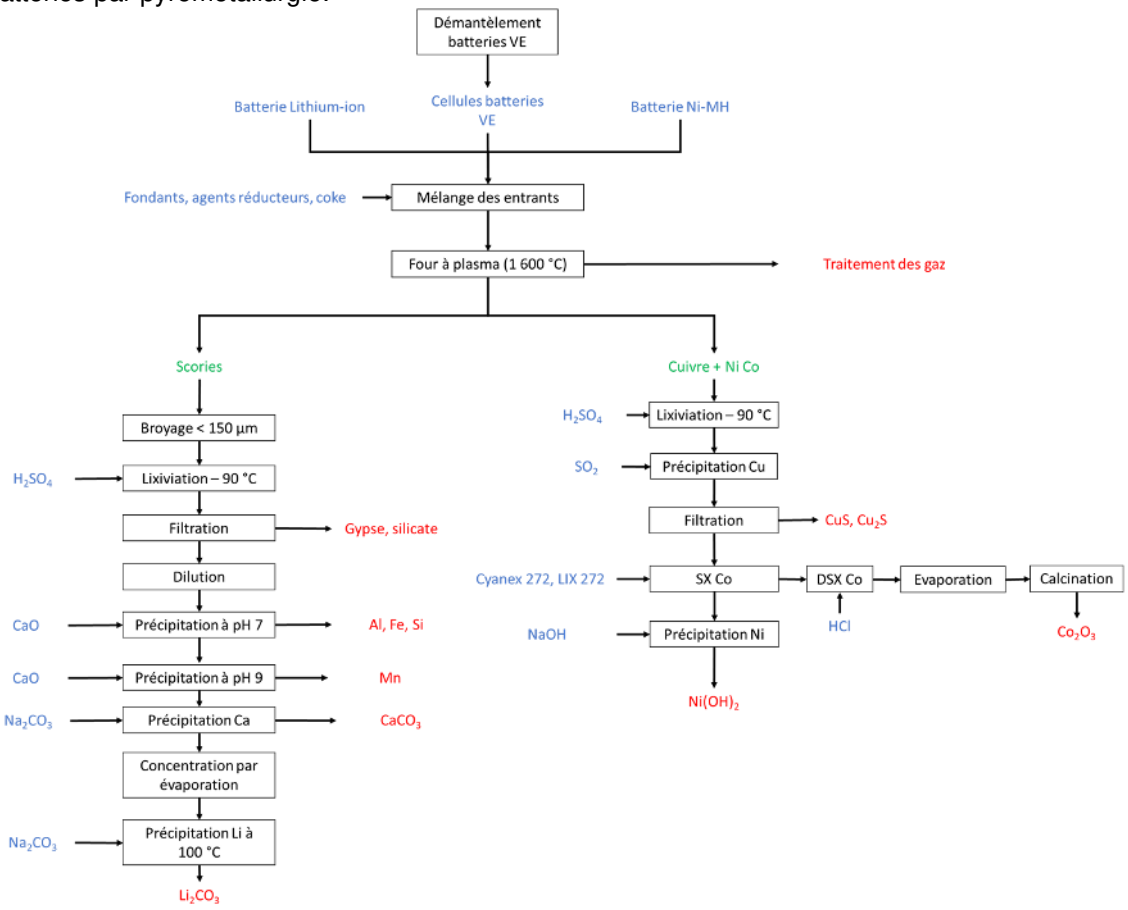


Figure 17: Schéma du procédé de traitement des batteries utilisé par Umicore

Le four est chauffé par une ou plusieurs torches plasma d'une puissance de 2 000 kW. Les batteries sont introduites dans le four en continu et traitées à 1600°C. Le carbone contenu dans les batteries est suffisant pour réduire les oxydes de cobalt et de nickel. Trois phases peuvent alors être identifiées :

- Un alliage Cuivre, Nickel, cobalt
- Une scorie (silice/alumine/chaux) obtenue grâce à l'ajout de CaO et SiO2 dans le four de fusion. La scorie contient du manganèse et du lithium en quantités très diluées. (La teneur en lithium est de l'ordre de 2%). Le fer est ensuite oxydé et entre dans la composition de la scorie. Le fluor est capté sous la forme de fluorure de calcium.
- Un gaz contenant des poussières, du fluor, du phosphore qui sera traité (par ajout de Ca(OH)2.).

L'alliage cuivre nickel cobalt est traité par hydrométallurgie. Il est dans un premier temps lixivié dans de l'acide sulfurique puis le cuivre est précipité sous forme de CuS et Cu2S par injection de SO2 à haute température. Les traces de fer résiduel sont ensuite précipitées en ajustant le pH de la solution. La solution concentrée en Ni et Co est ensuite envoyée vers un atelier d'extraction par solvant. L'extractant utilisé est un acide phosphonique de type Cyanex 272 ou LIX 272. La solution de Ni, Co est séparée en 2 phases : une phase organique (contenant du cobalt) et une phase aqueuse (contenant du nickel). La phase organique est traitée avec de l'acide chlorhydrique, afin de désextraire le cobalt. La solution traitée résultante est ensuite envoyée dans un four de calcination en présence d'oxygène, afin de former un oxyde de cobalt Co2O3. La phase concentrée en nickel est quant à elle traitée par de la soude afin de récupérer le nickel sous forme de Ni(OH)2.

Le traitement de la scorie pour en extraire le lithium n'est pas utilisé industriellement. La première étape du procédé est un broyage des scories permettant d'atteindre une taille de particule de l'ordre de 150 µm. La matière broyée est ensuite passée sur un séparateur magnétique afin de séparer les alliages éventuellement présents. S'en suit une étape de lixiviation à l'acide sulfurique 1-1,5 M à 60 °C, où les insolubles de silicate et de gypse sont séparés par filtration. La solution est ensuite diluée afin d'éviter une précipitation du lithium. Le pH est alors augmenté à environ 7, via ajout de CaO, afin de précipiter les traces éventuelles de Fe, Al et Si ayant été lixiviées. Le pH est ensuite augmenté à 9 afin de précipiter le Mn. Après filtration de la solution, le Ca est ensuite précipité sous forme de carbonate par ajout de Na2CO3. La solution obtenue après filtration est ensuite concentrée par évaporation puis précipitation du lithium sous forme de Li2CO3 à 100 °C par ajout de Na2CO3.

1.4.2. Pyrométallurgie 4 : Procédé de fusion utilisé au sein de TND

Le procédé développé par TND est décrit par la Figure 18. La Black mass est produite à l'aide du procédé décrit dans le chapitre « Préparation de la black mass », puis traitée dans un four de fusion du cuivre à environ 1 200 °C. Le principe est d'utiliser le cuivre comme solvant du cobalt et du nickel.

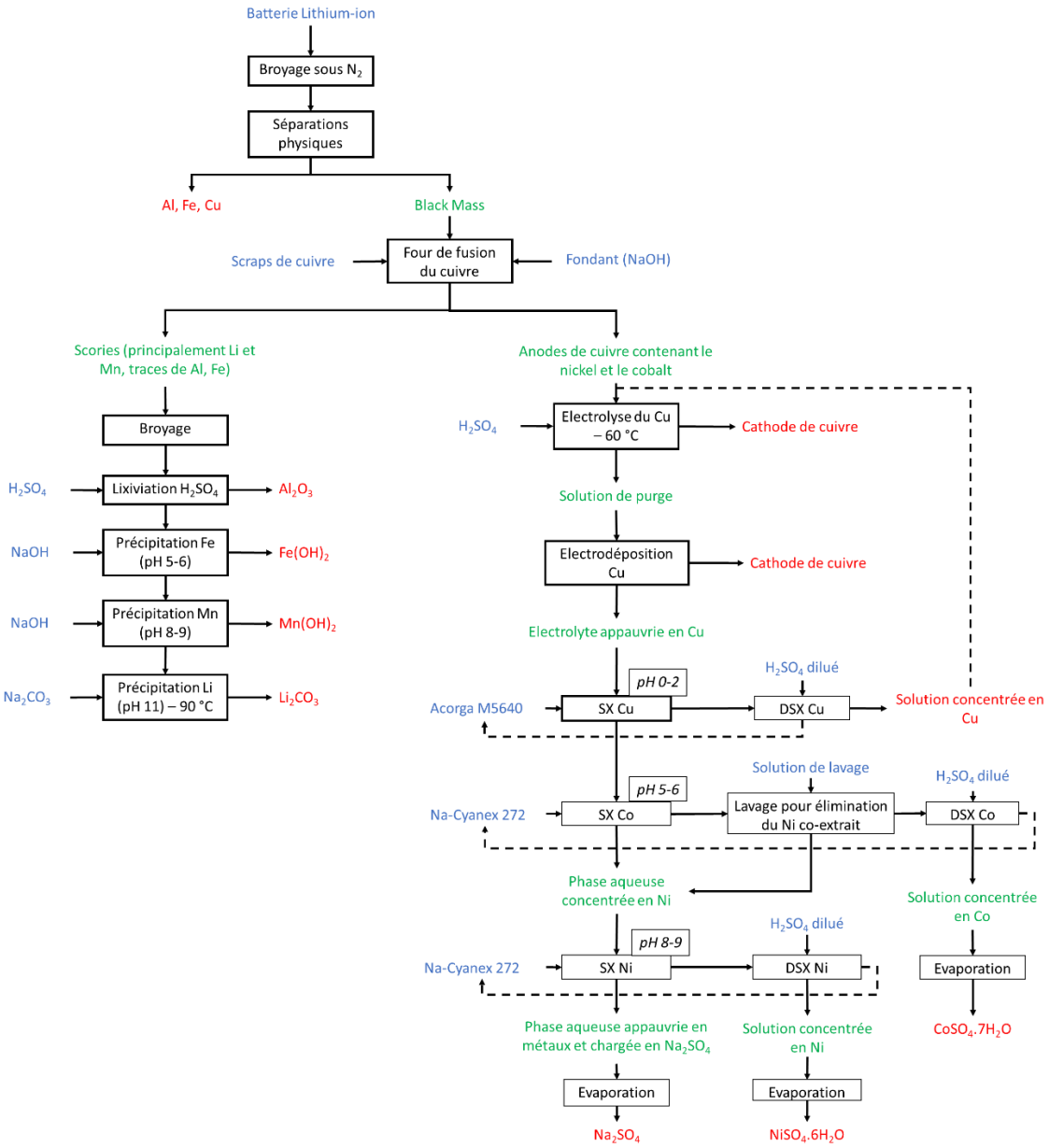


Figure 18 : Schéma du procédé de traitement des batteries développé par TND

L'opération se conduit de la façon suivante :

- Ajout de scraps de cuivre (pouvant être des déchets de cuivre) à 1 200 °C dans un four de fusion avec la black mass. Le carbone contenu dans la black mass permet de réduire les oxydes de cobalt et de nickel, qui se dissolvent dans le cuivre fondu. Le lithium, le manganèse, les traces d'aluminium, de fer et autres impuretés sont collectées dans la scorie. De la soude est ajoutée comme fondant.
- L'alliage cuivre cobalt nickel est traité dans une électrolyse en bain d'acide sulfurique à 200 g/L d'acide. L'acide sulfurique utilisé est un déchet provenant de l'usine de traitement de batteries au plomb de Métal Blanc. Le bain est maintenu à 60°C. Le cuivre se dépose à la cathode. Le cobalt et le nickel s'oxydent à l'anode et sont collectés dans la purge d'électrolyse.

- Le cuivre de la purge est d'abord extrait par électrodéposition puis extraction par solvant. Le cobalt puis le nickel sont extrait par solvant afin de produire du sulfate de cobalt et du sulfate de nickel de qualité batterie. Pour ce faire, le pH est graduellement augmenté par ajout de soude. La solution de lixiviation finale, appauvrie en métaux, est neutralisée puis cristallisée pour produire du sulfate de sodium commercial.
- Le laitier présente une concentration élevée de lithium et de manganèse. Il est traité par hydrométallurgie. La première étape du traitement est une lixiviation à l'acide sulfurique à 200 g/L

pouvant provenir de l'usine Métal Blanc. L'alumine présent dans la scorie n'est pas attaquée et est récupérée sous forme de précipité par filtration sur un filtre presse. Le fer présent dans le lixiviat est ensuite récupéré par précipitation à la soude sous forme de Fe(OH)2, après passage sur un filtre presse. Le manganèse du lixiviat est par la suite précipité sous forme d'hydroxyde de manganèse Mn(OH)2 par ajout de soude, puis récupéré par filtration sur filtre presse. Le lithium est ensuite précipité sous forme de carbonate par ajout de carbonate de sodium à 90 °C. Le précipité de Li2CO3 est récupéré par filtration sur filtre presse. L'effluent restant est ensuite évaporé pour récupérer un sulfate de sodium commercialisable.

MODÉLISATION SIMAPRO

Cette section présente les résultats d'analyse d'impacts pour les catégories d'impact identifiées et présentées dans le Tableau 3. Il convient de rappeler que ces résultats représentent des impacts potentiels, c'est-à-dire qu'ils sont des approximations des incidences sur l'environnement qui pourraient se produire si les émissions suivaient la trajectoire d'impact établie et remplissaient certaines conditions dans l'environnement récepteur.

La modélisation est réalisée sur le logiciel SimaPro 9.3.0.3, en utilisant la base de données EcoInvent 3.8 et la méthode Cut-Off.

Les modélisations des différents procédés ne prennent pas en compte les crédits liés au recyclage des matériaux en fin de vie. Ces produits et co-produits sont actuellement modélisés avec des procédés vides. Cependant, des éléments sont fournis dans la suite du rapport pour permettre la modélisation ultérieure des crédits des matériaux revalorisés par les membres SCORELCA.

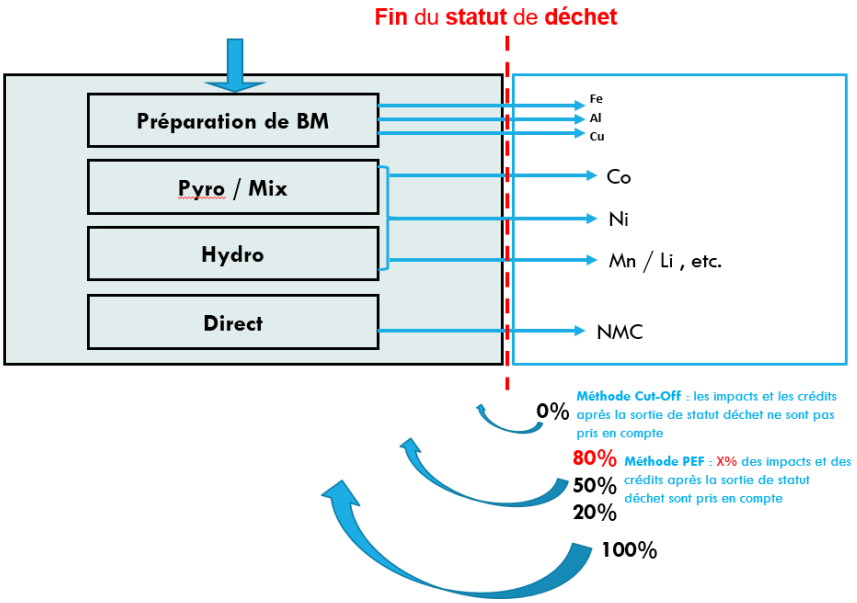


Figure 19: Schéma de la modélisation des impacts et crédits de recyclage basés sur les différentes méthodes d'allocation en fin de vie

1. Définition du champ d'étude

Pour les procédés de préparation de BM, recyclage par pyrométallurgie et recyclage par procédé mixte, l'unité fonctionnelle est la suivante :
« Traiter 1T de batteries par procédé de recyclage ».

Pour les procédés de recyclage par hydrométallurgie (par précipitation et par solvant), l'unité fonctionnelle est la suivante :
« Traiter 1T de BM par procédé de recyclage ».

Tous les procédés peuvent ensuite être ramenés à la même unité fonctionnelle "Traiter 1T de batteries par procédé de recyclage" en considérant le rapport suivant : "1T de batterie produit 500kg de Black Mass"

2. Méthode d'Analyse d'impacts de Cycle de Vie

Les modélisations sont réalisées dans un cadre d'analyses génériques. Chaque technologie a des spécificités qui peuvent potentiellement changer les résultats. Les résultats de l'AICV (Analyse des Impacts du Cycle de Vie) ne sont donc que des expressions relatives et ne prédisent pas les impacts réels, le dépassement des seuils, des marges de sécurité ou des risques.
Les résultats sont calculés en utilisant la méthode EF 3.0 suivant différents indicateurs énumérés dans le Tableau 3 (réchauffement climatique, acidification, etc.). Les émissions sur le long terme (émissions survenant après 100 ans) ont été exclus.

Les sous-catégories relatives au changement climatique sont indiquées séparément, sauf dans le cas où une note de bas de page explique les raisons pour lesquelles ce n'est pas le cas.

Tableau 3: Indicateurs de la méthode EF

Catégorie d'impact EF	Indicateur de catégorie d'impact	Unité	Modèle de caractérisation
Changement climatique	Le forçage radiatif comme potentiel de réchauffement planétaire (GWP100)	kg CO2 eq	Modèle de référence des 100 ans du GIEC (basé sur le GIEC 2013)
Changement climatique-biogénique [barré s'il ne faut pas en rendre compte]			
Changement climatique – utilisation des terres et changement d'affectation des terres [barré s'il ne doit pas être signalé]			
Raréfaction de l'ozone	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	kg CFC-11 eq	ODP à l'état d'équilibre comme dans (OMM 2014 + intégrations)
Toxicité humaine, cancer	Unité comparative toxique pour l'homme (CTUh)	CTUh	USEtox modèle 2.1 (Fankte et al, 2017)
Toxicité humaine, non cancéreuse	Unité comparative toxique pour l'homme (CTUh)	CTUh	USEtox modèle 2.1 (Fankte et al, 2017)
Particules	Impact sur la santé humaine	incidence de la maladie	Méthode PM recommandée par le PNUE (PNUE 2016)
Rayonnements ionisants, santé humaine	Efficacité de l'exposition humaine par rapport à l'U235	kBq U235 eq	Modèle d'effet sur la santé humaine tel que développé par Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)
Formation photochimique d'ozone, santé humaine	Augmentation de la concentration d'ozone troposphérique	kg NMVOC eq	Modèle LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) tel qu'implémenté dans ReCiPe 2008
Acidification	Dépassement accumulé (AE)	mol H+ eq	Dépassement cumulé (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Eutrophisation terrestre	Dépassement accumulé (AE)	mol N eq	Dépassement cumulé (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Eutrophisation, eau douce	Fraction des éléments nutritifs atteignant le compartiment d'extrémité de l'eau douce (P)	kg P eq	Modèle EUTREND (Struijs et al, 2009) tel qu'implémenté dans ReCiPe
Eutrophisation, marine	Fraction des nutriments atteignant le compartiment d'extrémité marin (N)	kg N eq	Modèle EUTREND (Struijs et al, 2009) tel qu'implémenté dans ReCiPe
Écotoxicité, eau douce	Unité comparative toxique pour les écosystèmes (CTUe)	CTUe	USEtox modèle 2.1 (Fankte et al, 2017)
Utilisation des terres	Indice de qualité du sol105Production biotiqueRésistance à l'érosionFiltration mécaniqueApprovision des eaux souterraines	Sans dimension (pt) kg production biotique kg sol · m3 eau m3 eau souterraine	Indice de qualité du sol basé sur LANCA (Beck et al. 2010 et Bos et al. 2016)
Utilisation de l'eau	Potentiel de privation de l'utilisateur (consommation d'eau pondérée par la privation)	m3 monde eq	Disponible WAter REmaining (AWARE) tel que recommandé par le PNUE, 2016
Utilisation des ressources, minéraux et métaux	Épuisement des ressources abiotiques (réserves ultimes ADP)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) et van Oers et al. 2002.
Utilisation des ressources, fossiles	Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles (ADP-fossile)	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) et van Oers et al. 2002

3. Interprétation des résultats

Cette section contient les résultats des modélisations réalisées sur le logiciel SimaPro. Les résultats sont présentés en score unique et les catégories d'impacts prises en compte sont présentées dans le Tableau 3. Les résultats des sous-procédés sont présentés lorsque ceux-ci représentent plus de 80% de l'impact total du procédé de recyclage.
Le score unique se base sur une méthode de normalisation et de pondération qui permet de ramener les valeurs de chaque indicateur à une note unique sans unité (Pt), et donc de rendre comparables les résultats des différents indicateurs d'impacts environnementaux.

3.1. Hypothèses

Plusieurs hypothèses ont été prises en compte pour modéliser les procédés de recyclage.

Les hypothèses de traitement de fin de vie des déchets ont été modélisées de façon à respecter les réglementations européennes, ce qui ne correspond pas nécessairement aux pratiques des acteurs du marché actuel.
La Proposition de règlement du parlement européen et du conseil COM(2020) 798/3, relatif aux batteries et aux déchets de batteries, abrogeant la directive 2006/66/CE et modifiant le règlement (UE) 2019/1020, vise à mettre en place des taux d'efficacité du recyclage et des objectifs de récupération des matériaux de 65% pour l'ensemble des matériaux, de 90% pour le cobalt, le nickel, et le cuivre, et de 70% pour le lithium en 2026 (Commission Européenne, 2020).
À titre d'exemple, les scories contenant du lithium sont actuellement mises en décharge mais sont considérées comme étant recyclées dans la modélisation. Les ICV sont fournis pour que des analyses de sensibilité puissent être effectuées.
Concernant les traitements de fin de vie des déchets non dangereux incinérés, une valorisation énergétique a été modélisées systématiquement.

Le modèle réalisé n'est pas paramétré. En effet, chacune des valeurs est dépendante des autres, il n'est donc pas possible de faire varier une valeur sans modifier le reste. Par ailleurs, les procédés et les quantités associées de chaque composant ont été calculés en se basant sur la composition de BM détaillé dans la Figure 12. La modélisation est donc adaptée pour la BM considérée et si des variations de composition sont acceptées, des variations trop significatives nécessiteront que les procédés soient adaptés, donc la modélisation également.

Cependant, les sous procédés des méthodes de recyclage sont fournis. Il est donc possible de choisir d'exclure certaines étapes et/ou de les remplacer pour réaliser différentes analyses. En cas de manipulation et modification des procédés du modèle, il est nécessaire de conserver une cohérence entre les quantités entrantes et sortantes du système. Le modèle est réalisé de façon à représenter des procédés industriellement viables. Il n'y a donc pas d'effet d'échelle lorsqu'on extrait les résultats pour des grandes quantités de déchets traités.

Tableau 4 : Inventaire et quantités des sous-procédés par procédé de recyclage

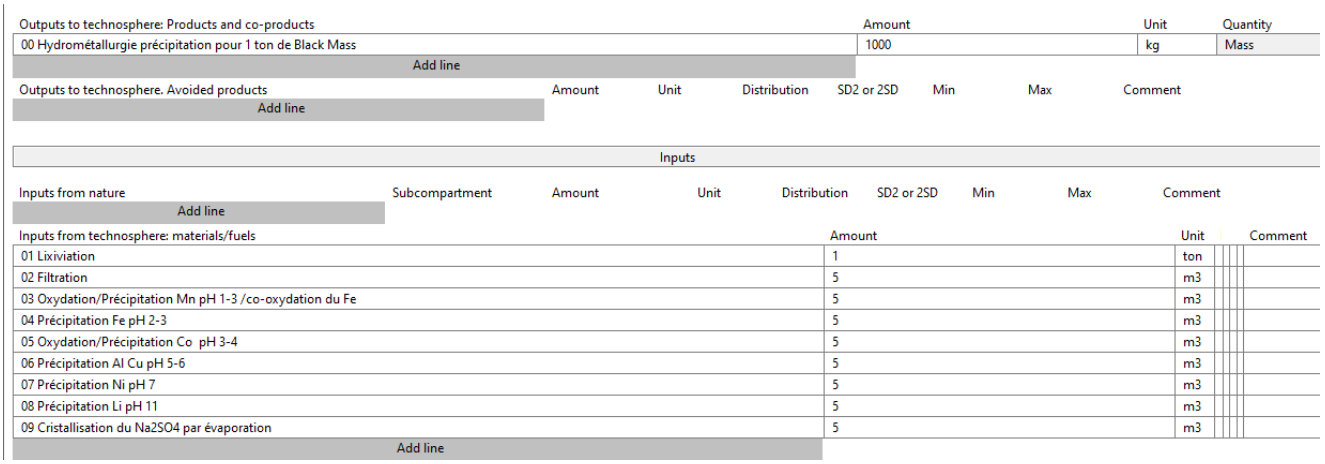
Préparation de Black Mass pour 1 tonne de batterie		
Sous-procédés	*Quantité*	*Unité*
01 Broyage sous azote	1000	kg
02 Chauffage	1000	kg
03 Criblage	890	kg
04 Traitement de la fraction grosse	420	kg
05 Traitement de la fraction légère	200	kg
06 Traitement de la fraction lourde	220	kg

Hydrométallurgie solvant pour 1 tonne de Black Mass		
Sous-procédés	*Quantité*	*Unité*
01 Lixiviation H2SO4	1	ton
02 Filtration - solvant	5	m3
03 SX Cu, Fe, Al	5	m3
04 SX Mn	5	m3
05 SX Co	5	m3
06 SX Ni	5	m3
07 Précipitation Li	5	m3
08 Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	5	m3

Pyrométallurgie pour 1 tonne de batterie		
Sous-procédés	*Quantité*	*Unité*
01 Fusion à 1600°C	1	ton
02 Lixiviation de l'alliage CuNiCo à 90 °C	245	kg
03 Précipitation du Cuivre	2450	L
04 Extraction par solvant du Co	2450	L
05 Précipitation du Ni	2450	L
06 Evaporation de l'effluent	2450	L
02B Lixiviation de la scorie par H2SO4 à 90 °C	1100	kg
03B Filtration	5540	L
04B Précipitation du Fe	5540	L
05B Précipitation du Mn	5540	L
06b Précipitation du Ca	5540	L
07B Précipitation du Li	5540	L
08B Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	5540	L

Hydrométallurgie précipitation pour 1 tonne de Black Mass		
Sous-procédés	*Quantité*	*Unité*
01 Lixiviation	1	ton
02 Filtration	5	m3
03 Oxydation/Précipitation Mn pH 1-3 /co-oxydation du Fe	5	m3
04 Précipitation Fe pH 2-3	5	m3
05 Oxydation/Précipitation Co pH 3-4	5	m3
06 Précipitation Al Cu pH 5-6	5	m3
07 Précipitation Ni pH 7	5	m3
08 Précipitation Li pH 11	5	m3
09 Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	5	m3

00 Procédé mixte pour traiter 1 tonne de batterie		
Sous-procédés	*Quantité*	*Unité*
00 Préparation de Black Mass pour 1 tonne de batterie	1	ton
07 Fusion	500	kg
08A Electrolyse du cuivre	641	kg
09A Electrodéposition du cuivre	5000	L
10A Extraction par solvant Cu	5000	L
11A Extraction par solvant Co	5000	L
12A Extraction par solvant Ni	5000	L
13A Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	5	m3
08B Lixiviation de la scorie à 90°	166	kg
09B Filtration	830	L
10B Précipitation Fe pH 5	830	L
11B Précipitation Mn	830	L
12B Précipitation Li	830	L
13B Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	830	L



Outputs to technosphere: Products and co-products	Amount	Unit	Quantity
00 Hydrométallurgie précipitation pour 1 ton de Black Mass	1000	kg	Mass

Add line

Outputs to technosphere. Avoided products	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment

Add line

Inputs

Inputs from nature	Subcompartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment

Add line

Inputs from technosphere: materials/fuels	Amount	Unit	Comment
01 Lixiviation	1	ton	
02 Filtration	5	m3	
03 Oxydation/Précipitation Mn pH 1-3 /co-oxydation du Fe	5	m3	
04 Précipitation Fe pH 2-3	5	m3	
05 Oxydation/Précipitation Co pH 3-4	5	m3	
06 Précipitation Al Cu pH 5-6	5	m3	
07 Précipitation Ni pH 7	5	m3	
08 Précipitation Li pH 11	5	m3	
09 Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	5	m3	

Add line

L'énergie utilisée pour tous les procédés correspond à un mix énergétique européen représentatif sur l'année 2021. Des analyses de sensibilité ont été réalisées afin de mettre en évidence les variations entre l'utilisation d'un mix européen et d'un mix français.

Cependant, les hypothèses de traitement modélisées ne peuvent être représentatives des pratiques à l'échelle internationale, les politiques et réglementations nationales pouvant varier d'un pays à l'autre. C'est notamment le cas pour le traitement des effluents des procédés de recyclage par hydrométallurgie. L'hypothèse de traitement choisi dans ce procédé a été d'évaporer l'eau de ces effluents afin de correspondre à la réglementation européenne en vigueur. En fonction de la zone étudiée, cette méthode peut être modifiée.

3.2. Qualité des données

Les critères sur lesquels se basent l'évaluation de la qualité des données fournies sont détaillés dans le Tableau 5. La méthode utilisée est celle de la Commission Européenne avec ses indicateurs de qualité des données (précision, temporalité, technologie et géographie).

Tableau 5 : Critères de notation de la qualité des données

Niveau de qualité	Précision	Temporalité	Technologie	Géographie
Très bien (1)	Données mesurées/calculées et vérifiées	Les données peuvent dater de 2 ans maximum par rapport à l'année de référence du fichier de collecte	Les technologies ont été modélisées exactement comme fournis dans le fichier de collecte sans nécessités d'amélioration	Les procédés inclus dans le fichier de collecte sont totalement représentatifs de la localisation géographique
Bien (2)	Données mesurées/calculées/obtenues de la littérature et la plausibilité a été vérifiée par un vérificateur	Les données peuvent dater de 4 ans maximum par rapport à l'année de référence du fichier de collecte	Les technologies ont été modélisées très similairement à ce qui a été fournis dans le fichier de collecte avec des légères modifications	Les procédés inclus dans le fichier de collecte sont représentatifs de la localisation géographique
Satisfaisant (3)	Données mesurées/calculées/obtenues de la littérature et la plausibilité n'a pas été vérifiée par un vérificateur ou la plausibilité des estimations qualificatives basées sur des calculs a été vérifiée par un vérificateur	Les données peuvent dater de 6 ans maximum par rapport à l'année de référence du fichier de collecte	Les technologies ont été modélisées similairement à ce qui a été fournis dans le fichier de collecte avec des modifications nécessaires Certains procédés sont modélisés en utilisant des approximations	Les procédés inclus dans le fichier de collecte sont suffisamment représentatifs de la localisation géographique
Insuffisant (4)	Estimations qualificatives basées sur des calculs, la plausibilité n'a pas été vérifiée par un vérificateur	Les données peuvent dater de 8 ans maximum par rapport à l'année de référence du fichier de collecte	Les technologies modélisées sont différentes du fichier de collecte. D'importantes améliorations sont requises	Les procédés inclus dans le fichier de collecte ne sont que partiellement représentatifs de la localisation géographique
Très insuffisant (5)	Estimations grossières avec des manques connus	Les données peuvent dater de plus de 8 ans par rapport à l'année de référence du fichier de collecte	Les technologies modélisées sont complétements différents du fichier de collecte. D'importantes améliorations sont requises	Les procédés inclus dans le fichier de collecte ne sont pas représentatifs de la localisation géographique
Notation	**2**	**1**	**1**	**2**

Les données utilisées pour la modélisation sont issues du laboratoire TND. Ces données sont basées sur des informations récentes ainsi que des projections futures. Celle-ci ont été vérifiées en interne et sont valables pour 5 ans. La modélisation a pu être effectuée en utilisant uniquement les informations du fichier de collecte sans nécessiter d'améliorations. Les données sélectionnées sont majoritairement des données européennes, notamment pour l'énergie.

3.3. Impacts environnementaux de la préparation de Black Mass

Le traitement d'une tonne de batterie permet de préparer 500 kg de Black Mass. La donnée d'entrée pour le procédé de préparation de BM est la quantité de batterie traitée.

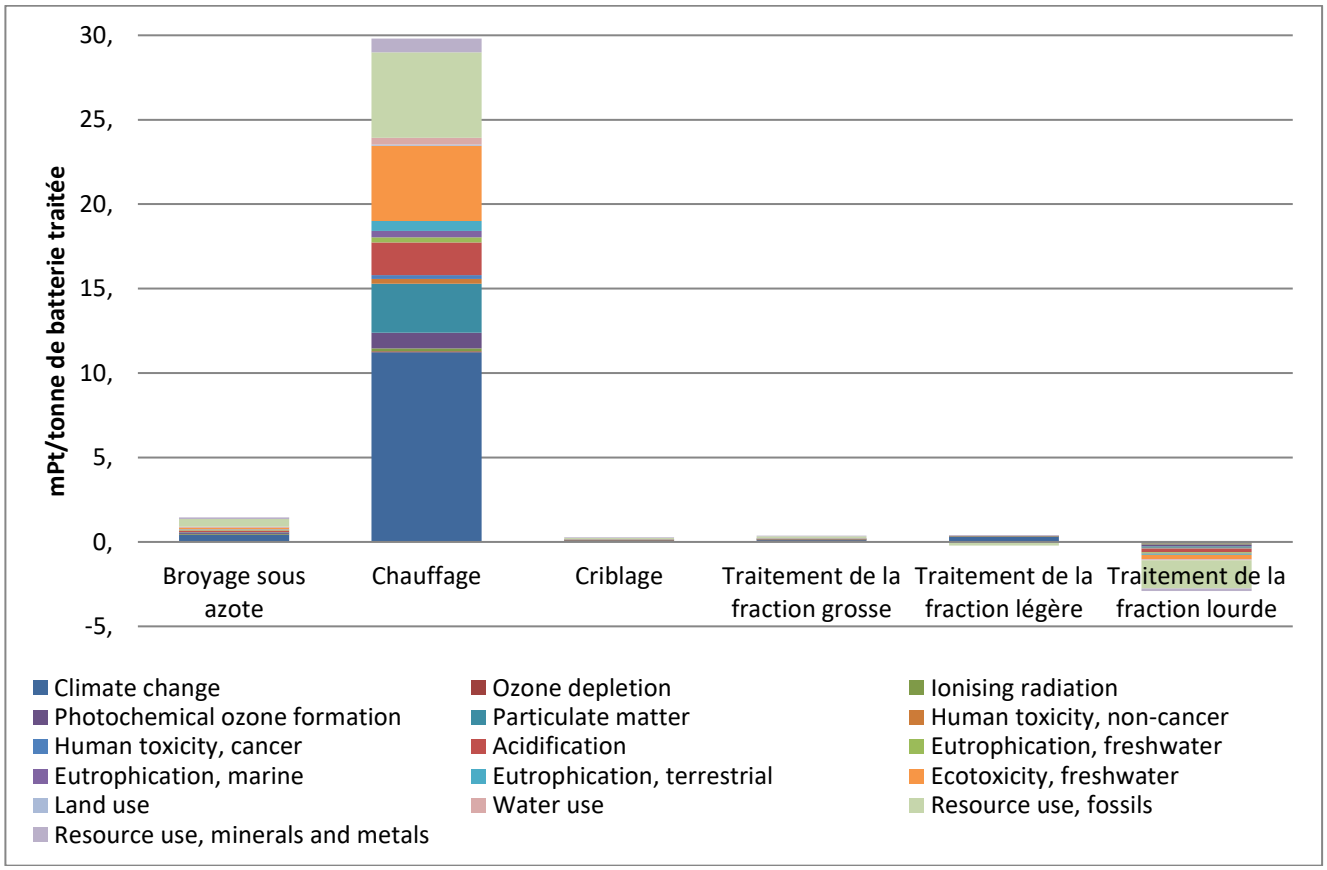


Figure 20: Résultat en score unique des impacts environnementaux de la préparation de Black Mass pour l'unité fonctionnelle

La Figure 20 permet de faire ressortir les étapes les plus impactantes ainsi que les indicateurs les plus importants pour le processus de préparation de BM. Pour ce procédé, l'étape de chauffage est la plus importante et l'indicateur environnemental prédominant est le changement climatique.

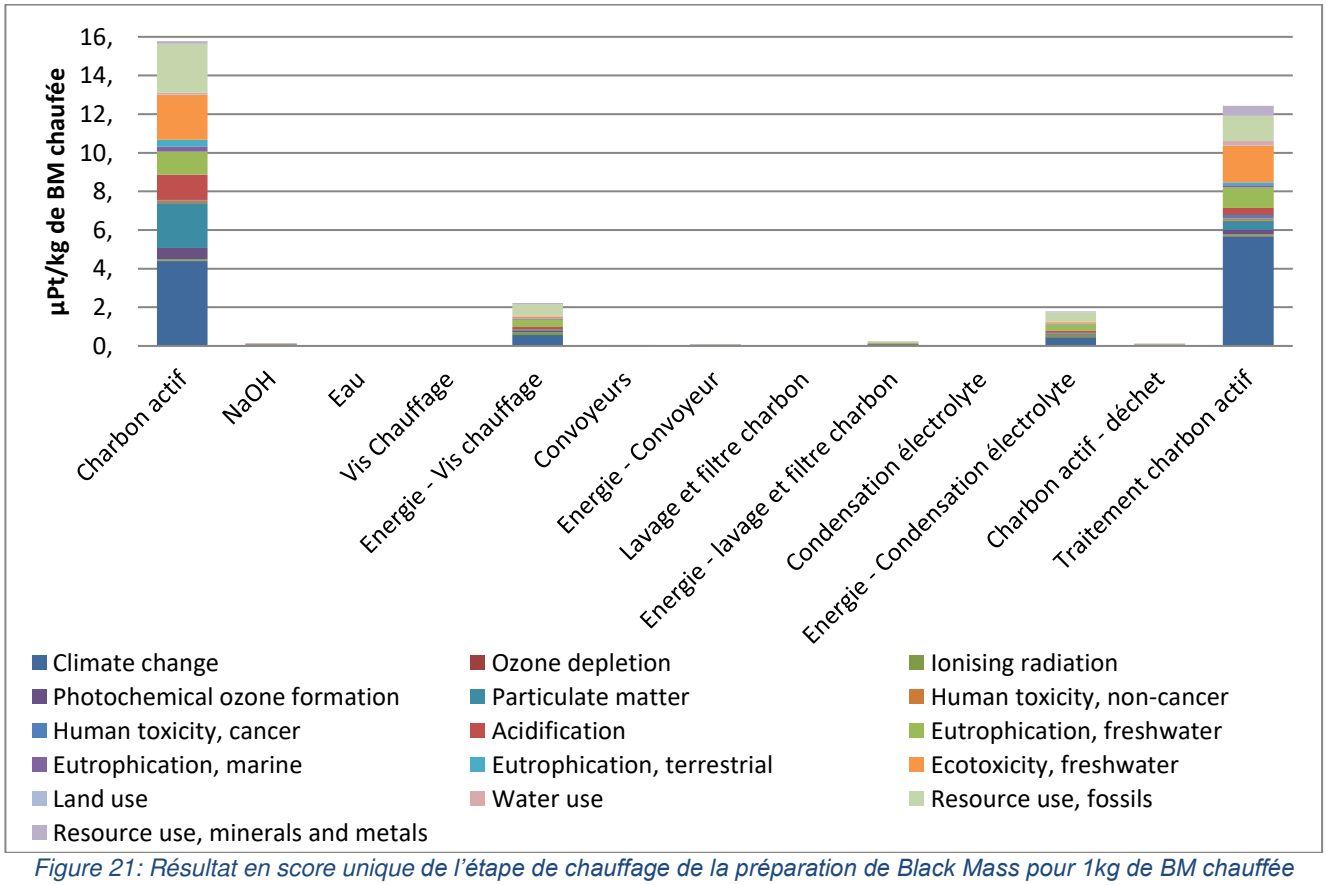


Figure 21: Résultat en score unique de l'étape de chauffage de la préparation de Black Mass pour 1kg de BM chauffée

L'impact du chauffage est principalement dû à la consommation de charbon actif ainsi qu'au traitement de ce dernier.
Ces impacts se répercutent principalement sur le changement climatique ainsi que sur l'utilisation de ressources fossiles et d'écotoxicité de l'eau.

3.4. Impacts environnementaux du procédé de recyclage d'hydrométallurgie par précipitation

Les procédés de recyclage d'hydrométallurgie par précipitation et par solvant traitent la black mass et non la batterie. Les résultats sont présentés dans la
Figure 22 pour le traitement d'1 tonne de Black Mass, soit le traitement de 2T de batteries.

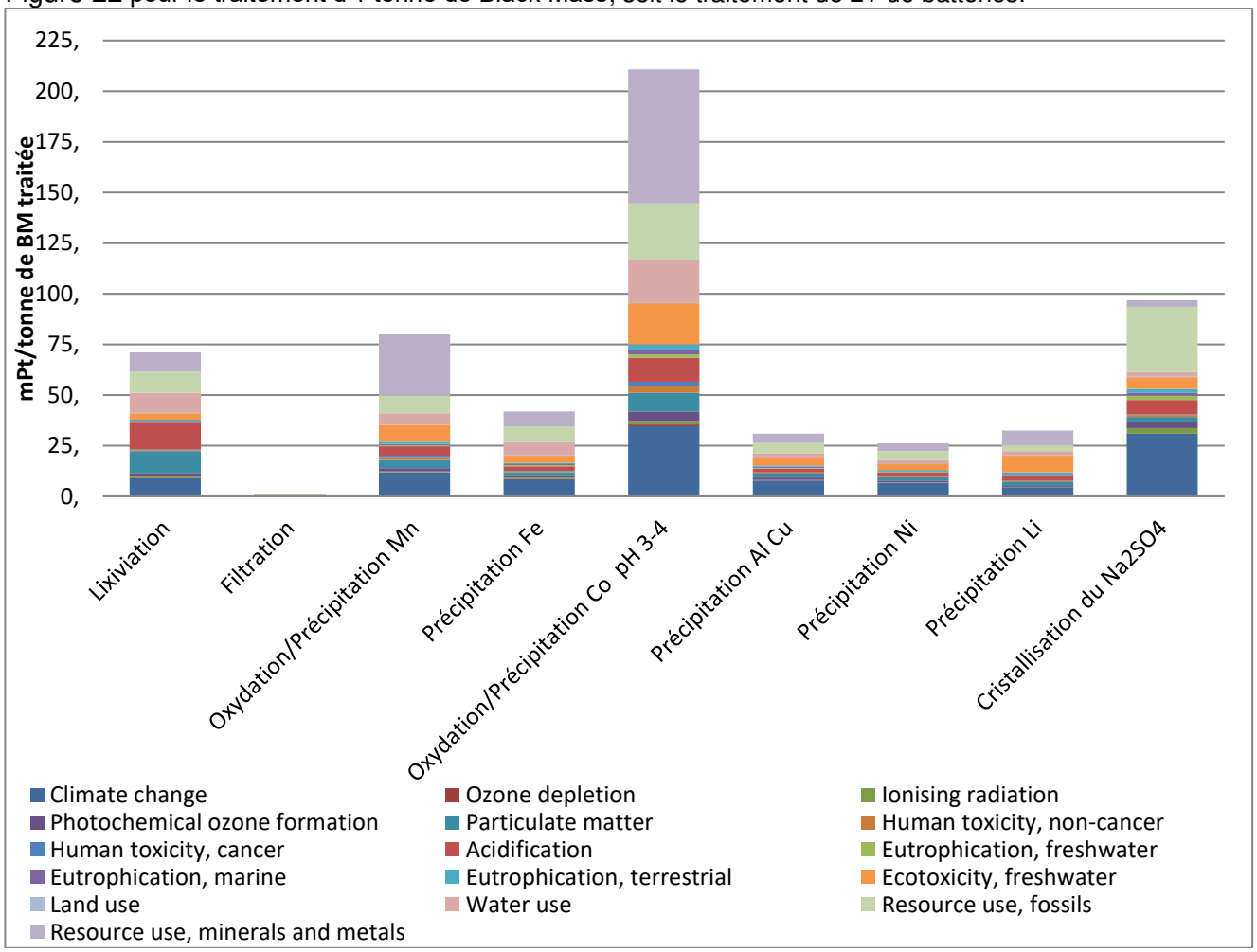


Figure 22: Résultat en score unique du procédé de recyclage par hydrométallurgie par précipitation pour l'unité fonctionnelle

Le procédé de recyclage d'hydrométallurgie par précipitation a majoritairement des impacts sur le changement climatique et sur les ressources, à la fois fossiles et abiotiques (minéraux et métaux).

Contrairement à la préparation de BM, les impacts sont davantage répartis entre les différentes étapes. En effet l'étape d'oxydation et de précipitation du cobalt représente 36% des impacts, alors que les étapes de cristallisation, d'oxydation du manganèse, et de lixiviation représentent respectivement 16, 14 et 12% des impacts.

L'étape de cristallisation est une étape qui se retrouve dans tous les procédés qui suivent. Elle correspond à l'évaporation de l'eau pour récupérer du Na2SO4. L'impact de ce procédé est dû, à plus de 99%, à la consommation d'électricité nécessaire à cette évaporation.

Les impacts des autres étapes sont principalement dus à la consommation de substances actives (notamment l'acide sulfurique et le peroxyde d'hydrogène pour l'étape de lixiviation et l'hydroxyde de sodium, le persulfate de sodium, et le carbonate de sodium pour les étapes d'oxydation et de précipitation).

3.5. Impacts environnementaux du procédé de recyclage d'hydrométallurgie par solvant

Les impacts du procédé de recyclage par hydrométallurgie par solvant sont présentés sur la Figure 23.

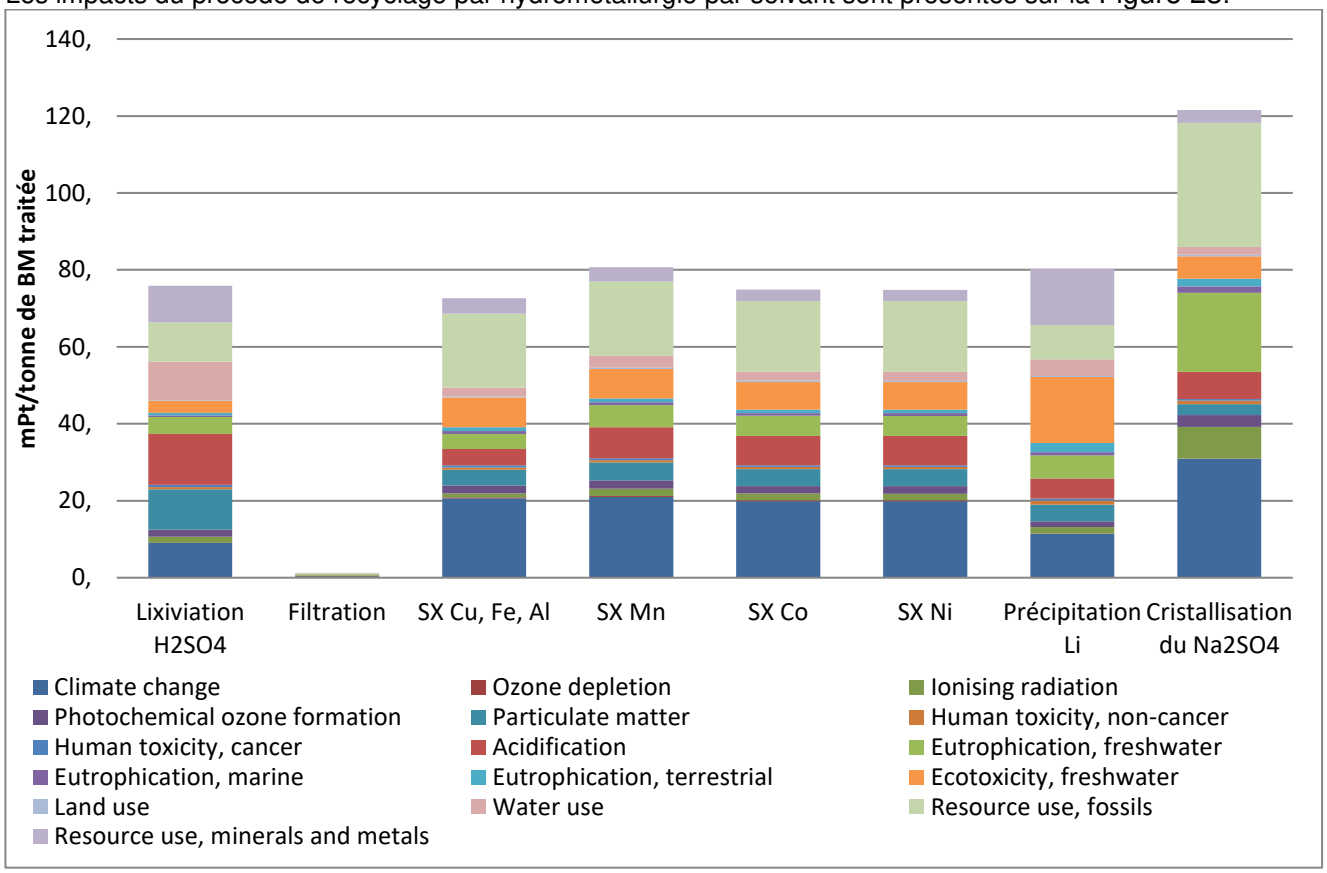


Figure 23: Résultat en score unique du procédé de recyclage par hydrométallurgie par solvant pour l'unité fonctionnelle

Les étapes d'extractions des différents éléments, de précipitation et de lixiviation représentent toutes entre 12 et 14% des impacts du procédé.
Chaque étape d'extraction se déroule de la même façon, notamment avec l'utilisation de kérosène et d'un extractant, comme décrit en détail dans la Figure 15. C'est l'utilisation de kérosène ainsi que son traitement en fin de vie qui représentent la majorité des impacts des étapes d'extraction. Ces impacts se répercutent sur les indicateurs de changement climatique et d'utilisation de ressources fossiles et abiotiques (minéraux et métaux).
L'impact de l'étape de lixiviation est principalement dû à l'acide sulfurique, au peroxyde d'hydrogène, et à l'électricité.
L'étape de cristallisation est ici l'étape la plus impactante, due à la consommation en électricité (impacts sur le changement climatique, l'utilisation des ressources fossiles, et sur l'eutrophisation).

3.6. Impacts environnementaux de la pyrométallurgie

Comme expliqué par la Figure 17, certaines étapes du procédé de recyclage par pyrométallurgie peuvent être effectuées en parallèle. Les étapes réalisées en parallèle sont indiquées par les lettres « A » et « B » sur la Figure 24, les étapes « B » correspondant au traitement de la scorie.

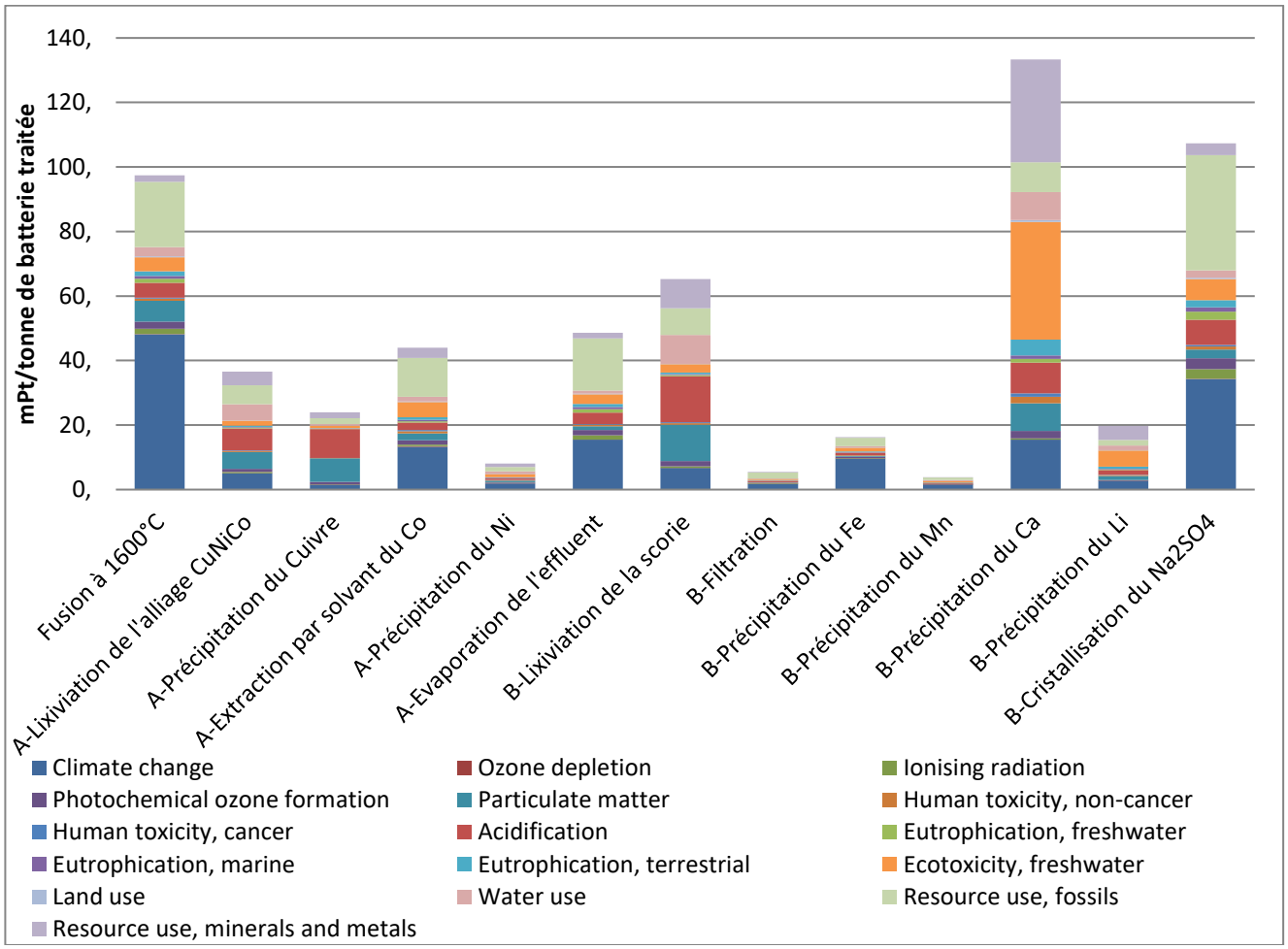


Figure 24: Résultat en score unique de la pyrométallurgie pour l'unité fonctionnelle

La récupération du calcium est la plus impactante, puisque l'étape de précipitation du calcium représente 22% des impacts totaux et a des effets sur l'écotoxicité de l'eau et l'utilisation des ressources minérales et métaux. Ceci est dû à l'utilisation du carbonate de sodium. Les étapes de fusion et de cristallisation représentent respectivement 16 et 18% de l'impact total du procédé. Ces étapes ont des effets principalement sur le changement climatique, l'utilisation des ressources fossiles ainsi que sur l'eutrophisation.

Les impacts de la fusion sont engendrés majoritairement par l'électricité consommée et les émissions de particules liées à cette étape. De nouveau, l'étape de cristallisation entraine une consommation importante d'électricité qui engendre l'entièreté des impacts.

3.7. Impacts environnementaux du procédé mixte

Le procédé mixte inclus la préparation de BM, ainsi que des étapes d'hydrométallurgie et de pyrométallurgie. Les étapes de préparation de BM ont été regroupé puisque l'impact général reste minoritaire.

Comme expliqué sur la Figure 18, certaines étapes du procédé peuvent être effectuées en parallèle. Les étapes réalisées en parallèles sont indiquées par les lettres « A » et « B » sur la Figure 25, les étapes « B » correspondant au traitement de la scorie.

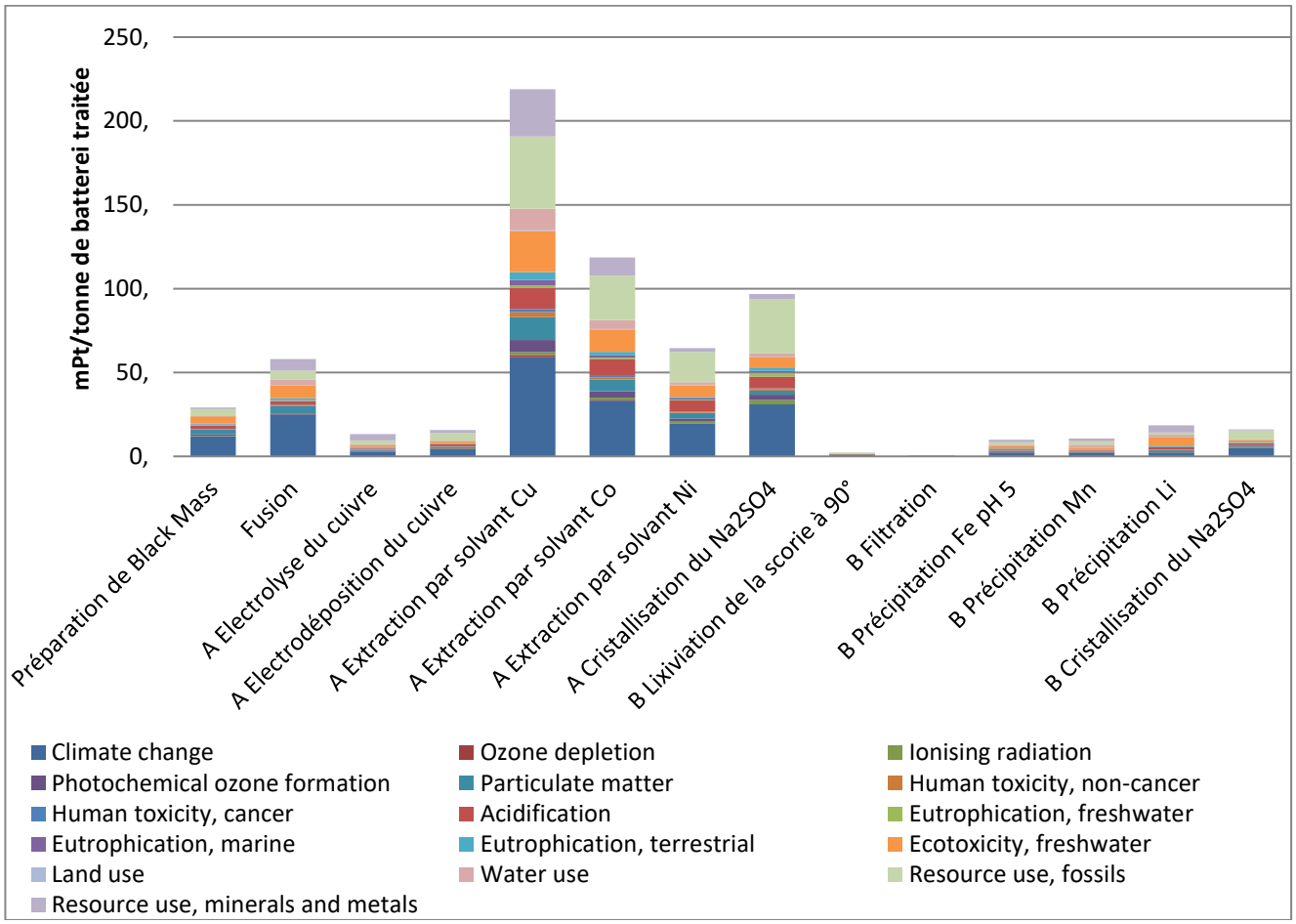


Figure 25: Résultat en score unique du procédé mixte pour l'unité fonctionnelle

Le procédé mixte, qui regroupe des étapes des procédés hydrométallurgie et du procédés pyrométallurgie, présente des impacts similaires.
Les étapes d'extraction représentent entre 10 à 33% de l'impact totale. Les impacts de ces étapes sont importants sur le changement climatique, l'utilisation de ressources fossiles, abiotiques (minéraux et métaux), ainsi que pour l'eutrophisation. L'impact des extractions est notamment causé par l'hydroxyde de sodium. La récupération du cuivre a un impact notable puisqu'elle représente 33% des impacts totaux du procédés, alors les impacts combinés de la récupération du cobalt et du nickel est de 28%.
Finalement, la cristallisation à la suite des extractions représente 16% des impacts. Ces impacts sont causés par l'utilisation d'énergie et se retrouvent dans les indicateurs de changement climatique, d'utilisation des ressources fossiles et d'eutrophisation.

3.8. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité concernant les mix énergétiques utilisés a été réalisée.
Les procédés ont été modélisés utilisant un mix énergétique européen. Cependant, le mix énergétique étant très différent d'un pays à l'autre, l'impact global de chaque procédé peut varier considérablement. Pour cette analyse de sensibilité, on compare les impacts de chaque procédé avec l'utilisation du mix européen et le mix français.

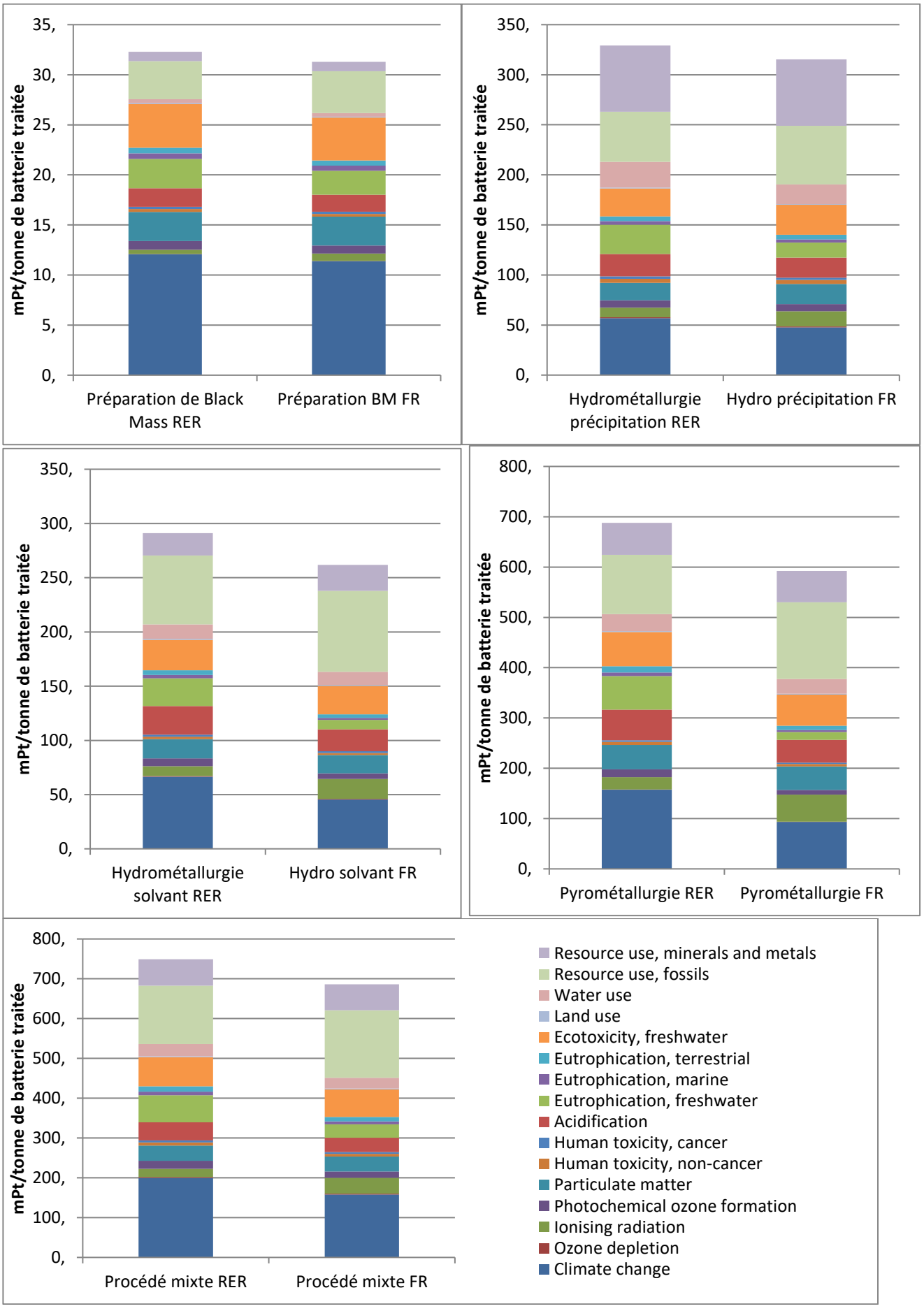


Figure 26: Analyse de sensibilité de l'impact de l'origine de l'énergie pour chaque procédé de recyclage

L'utilisation d'énergie française permet notamment de diminuer l'impact lié au changement climatique. Cependant, l'énergie nucléaire nécessite une utilisation plus grande de ressource et provoque plus de radiation. Malgré cela, l'impact général de chaque procédé est diminué avec le mix français.
Cette diminution est d'autant plus visible lorsque la consommation d'énergie fait partie des points chauds des procédés.

4. Modélisation des crédits

Selon les modalités du projet, les crédits liés au recyclage des matériaux n'ont pas été modélisés. Cependant, il est possible de les modéliser à part en suivant la CFF (Circular Footprint Formula) de la méthode PEF.
En effet, les procédés de recyclage permettent de récupérer des composants (Tableau 6) qui peuvent être réutilisés par la suite comme matière première. Modéliser les crédits de ces composants permet de faire apparaitre les impacts évités par la récupération de matière.

Tableau 6: Produits obtenus pour chaque procédé de recyclage

BM		
Quantité	Unité	Produit
85	kg	Cuivre
125	kg	Aluminium
90	kg	Fer

Hydro - précipitation		
Quantité	Unité	Produit
467	kg	Co(OH)3 (30% d'humidité)
130	kg	Ni(OH)2 (30% d'humidité)
91	kg	MnO2 (30% humidité)
28	kg	Cu(OH)2 (30% d'humidité)
73	kg	Al(OH)3 (30% d'humidité)
33	kg	Fe(OH)3 (30% humidité)
464	kg	Li2CO3 (30% d'humidité)
2200	kg	Na2SO4
384	kg	Carbone + matière non lixivié (5%)

Hydro - solvant		
Quantité	Unité	Produit
918.5	kg	CoSO4. 7H2O
283.5	kg	NiSO4. 6H2O
135.6	kg	MnSO4. H2O
463	kg	Li2CO3 (30% d'humidité)
1450	kg	Na2SO4
384	kg	Carbone + matière non lixivié (5%)

Pyro		
Quantité	Unité	Produit
143.5	kg	Co2O3
69.8	kg	Précipité de Ni(OH)2 (30% d'humidité)
62	kg	Précipité de Mn(OH)2 (30 % d'humidité)
213	kg	Précipité de CuS (30% d'humidité)
206.5	kg	Précipité de Fe(OH)2 (30 % d'humidité)
138.4	kg	précipité de Li2CO3 (30 % d'humidité)
2296	kg	Na2SO4
273	kg	Al2O3
713	kg	Précipité de CaCO3 (30 % d'humidité)

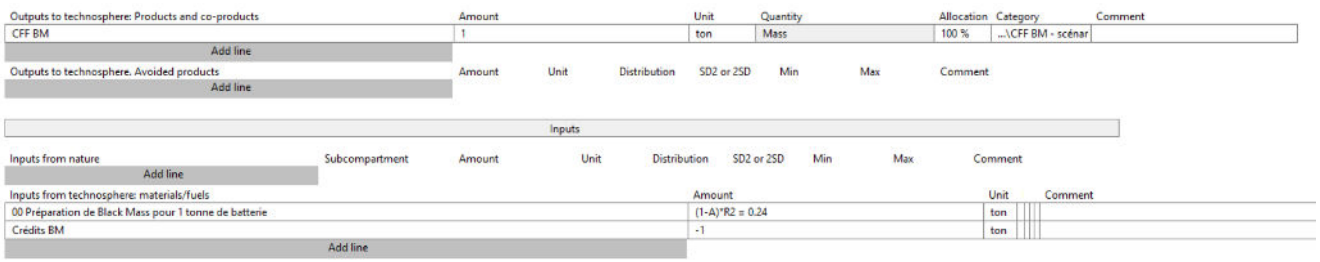
Process mixte		
Quantité	Unité	Produit
477	kg	CoSO4.7H2O
152.2	kg	NiSO4.6H2O
60.3	kg	Mn(OH)2 (30 % d'humidité)
795.081	kg	Cuivre
125	kg	Aluminium
24.7	kg	Al2O3 non attaqué (30 % d'humidité)
90	kg	Fer
14.6	kg	Fe(OH)3 (30 % d'humidité)
138.4	kg	Li2CO3 (30 % d'humidité)
1655.7	kg	Na2SO4

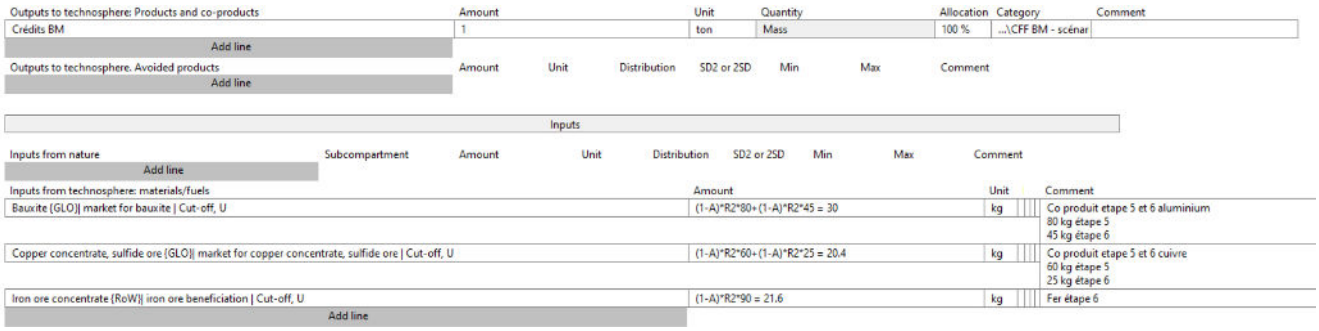
La méthode CFF consiste à attribuer une partie des impacts au procédé en prenant en compte les crédits.
Pour modéliser les crédits, la formule suivante est utilisée

$$(1-A)R_2 * (E_{recyclingEoL} - E_v^* * \frac{Qsout}{Qp})$$

Avec A, le coefficient d'allocation des impacts entre les deux cycles de vie, R_2 le pourcentage de recyclage, $Er_{ecylcingEoL}$ correspondant aux impacts du procédé de recyclage (préparation de BM, pyrométallurgie, hydrométallurgie …), E^*_v correspondant aux impacts évités du produit recyclé et Q_{sout}/Q_p un facteur de qualité de la matière recyclée sortant du processus. Les valeurs des différents facteurs sont établies par la méthode européenne.

La modélisation CFF se fait donc en 2 étapes. Une étape où on applique la première partie de la formule sur le procédé étudié et une étape pour laquelle on applique la deuxième partie de la formule sur les crédits obtenus avec le procédé. Un exemple de modélisation sur SimaPro est présenté sur la Figure 27.





Outputs to technosphere: Products and co-products	Amount	Unit	Quantity	Allocation	Category	Comment
Crédits BM	1	ton	Mass	100 %	...\CFF BM - scénar	
Add line						

Outputs to technosphere: Avoided products	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line							

Inputs

Inputs from nature	Subcompartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line								

Inputs from technosphere: materials/fuels	Amount	Unit	Comment
Bauxite {GLO}| market for bauxite | Cut-off, U	(1-A)*R2*80+(1-A)*R2*45 = 30	kg	Co produit etape 5 et 6 aluminium 80 kg étape 5 45 kg étape 6
Copper concentrate, sulfide ore {GLO}| market for copper concentrate, sulfide ore | Cut-off, U	(1-A)*R2*60+(1-A)*R2*25 = 20.4	kg	Co produit etape 5 et 6 cuivre 60 kg étape 5 25 kg étape 6
Iron ore concentrate {RoW}| iron ore beneficiation | Cut-off, U	(1-A)*R2*90 = 21.6	kg	Fer étape 6
Add line			

Figure 27: Modélisation sur SimaPro de la méthode CFF pour la préparation de BM

Il est ensuite possible d'effectuer des analyses de sensibilité en modifiant la qualité des produits obtenues en sortie de procédé

REFERENCES

ANL. (2019). *GREET model (Greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation).* Retrieved from https://greet.es.anl.gov/

Anna Boyden, V. K. (2016). The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. *Procedia CIRP*.

(2020). *Batteries Europe.* European Technology and Innovation Platform on Batteries.

Brian Makuza a, Q. T. (2021). Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal of Power Sources* .

Daniel Cheret, S. S. (2007). *Belgium Patent No. 7,169,206 B2*.

Danino-Perraud, R. (2020). *The recycling of lithium-ion batteries, A strategic pillar for the European Battery Alliance.* IFRI Institut Français des relations internationales.

Elena Mossali, N. P. (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of Environmental Management*.

Eric Gratz, Q. S. (2014). A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries.

François Larouche, F. T. (2020). Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct, Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond. *Materials*.

Gavin Harper, R. S. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*.

J. B. Dunn, L. G. (2014). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *The Royal Society of Chemistry*.

JB Dunn, L. G. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy Environ*.

Jennifer B. Dunn, L. G. (2012). Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries. *American Chemical Society*.

Jiali Song, W. Y. (2019). Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China. *Journal of Cleaner Production*.

Jo Dewulf, G. V. (2010). Recycling rechargeable lithium ion batteries: Critical analysis of natural resource savings. *Resources, Conservation and Recycling*.

Johnson. (2019). *ReLiB project – Faraday battery challenge plasma smelting: Techno-economic assessment study report.* Tetronics Ltd.

Karen Fisher, E. W. (2006). *Battery Waste Management Life Cycle Assessment.* Environmental Resources.

Kevin M.Winslow, S. J. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*.

Leila Ahmadi, S. B. (2015). A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

Li Li, J. B. (2013). Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment. *Journal of Power Sources*.

Liu Yun, D. L. (2018). Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles. *Resources, Conservation & Recycling*.

Marit Mohr, J. F. (2020). Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. *Journal of Industrial Ecology*.

Martin Gr¨utzke, X. M. (15). Extraction of lithium-ion battery electrolytes with liquid and supercritical carbon dioxide and additional solvents. *The Royal Society of Chemistry*.

Mohammad Ali Rajaeifar, M. R. (2021). Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies. *Journal of Industrial Ecology*.

Omar Velázquez-Martínez, J. V.-A.-G. (2019). A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries* .

Panpan Xu, Q. D. (2020). Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing. *Joule*.

Qiang Dai, J. S. (2019). *EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling, Cost and Environmental Impacts Model.* Argonne National Laboratory.

Commission Européenne. (2020). *Proposition de réglement du Parlement Européen et du Conseil relatif aux batteries et aux déchets de batteries.*

Record. (2019). *ETAT DE L'ART SUR LE RECYCLAGE ET LE REEMPLOI.*

Rebecca E. Ciez, J. F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *NatureSustainability*.

Roberto Sommerville, P. Z. (2021). A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. *Resources, Conservation & Recycling*.

Roland Hischier, M. C. (2007). *Life cycle inventories of electric and electronic equipment: Production, use and disposal: Ecoinvent.* Swiss centre for life cycle inventories.

Rosario Tolomeo, G. D. (2020). Application of Life Cycle Assessment to Lithium Ion Batteries in the Automotive Sector. *sustainability*.

Sloop, S. E. (2016). *US Patent No. 0043450 A1.*

Sloop, S. E. (2017). *US Patent No. 0200989 A1.*

Sloop, S. E. (2019). *US Patent No. 0260100 A1.*

Tobias Elwert, D. G. (2016). Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. *Recycling*.

W. Novis Smith, S. S. (2014). *US Patent No. 8,882,007 B1.*

Weiguang Lv, Z. W. (2017). A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *American Chemical Society*.

Winslow, K. L. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources. Conserv. Recycl.*

Xiaoxiao Zhang, L. L. (2018). Toward sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries. *Chemical Society Reviews*.

Yaocai Bai, N. M.-K. (2020). Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: Concept of Battery Identity Global Passport. *Materials Today*.

Yue Yang, E. G. (2021). On the sustainability of lithium ion battery industry –A review and perspective. *Energy Storage Materials*.

Zachary J. Baum, R. E. (2022). Lithium-Ion Battery Recycling, Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Lett*.

ANNEXE 1 : INSTALLATIONS MONDIALES DE RECYCLAGE (NON EXHAUSTIVE)

Dans le tableau 4, nous avons défini les installations de recyclage en Europe avec la capacité annuelle, les détails du procédé etproduits récupérés

Table 6: Détails des installations de recyclage des LIB en Europe (WeLOOP 2021)

Company	Location	Capacity (tons/year)	Process details	Recovered products
Umicore	Belgium	7000	**Pyro-hydro** Combined Pyro and hydro: Dismantling, Shaft furnace (pre-heating, pyrolysis, UTH smelting), Then, the alloy is leached in H2SO4 and polished to extract and crystallize CoSO4 and NiSO4.	CoCl2, LiCoO2, Ni (OH)2, Cu, Fe, and Slag (Al, Si, Ca, Fe, Li,Mn, REE)
Accurec GmBH	Germany	4000	**Pre-treatment - Pyro-Hydro** Pre-treatment (Sorting Dismantling, Milling, separation, agglomeration, filtration, ambient), Pyro (Vacuum thermal treatment, smelting in an arc furnace), Hydro (treating slag with H2SO4 leaching)	Li2CO3, Co-Alloy, and Metallic alloy
Akkuser Ltd	Finland	4000	**Pre-treatment** (High airflow comminution, size separation,second comminution, size separation, magnetic separation)	Co, Cu powder, Fe, Non-ferrous metals
SNAM	*France*	300	**Pre-treatment** Sorting, pyrolysis to remove the electrolyte, crusing, sieving to isolate the valuable electrode powder.	Active material
Batrec Industrie AG	Switzerland	200	**Hydro** Crushing in inert CO2 atmosphere. Leaching and washing in acidifies aqueous solutions. Li is neutralized. Process details were not available in the literature.	Valuable metals
TES Valibat process	France	110	**Pre-treatment-hydro** Pre-treatment (crushing, vibrating screen, secondary screen, magnetic separator, densimetric table) and hydro (Hydrolysis leaching)	Co(OH)2, Li2CO3, LiCO2, Li3PO4, Steel, Cu, Al, C
Duesenfeld LithoRec process	Germany	Unknown	**Pre-treatment - Pyro- Hydro** Pre-treatment (Discharge and disassembly, Gas blanket comminution, mixing, density separation, second comminution, size separation, density separation) Pyro (vacuum drying, calcination), Hydro treatment (Leaching)	High-grade cathode materials Li2CO3, metal oxides(CoO), Al, Cu, plastics

Dans le tableau 5, nous avons défini les installations de recyclage dans le monde entier avec la capacité annuelle, les détails du procédé et les produits récupérés

Table 7: Détails des installations de recyclage des LIB dans le monde entier (WeLOOP 2021)

Company	Location	Capacity (tons/year)	Process details	Recovered products
Glencore	Canada	7000	**Pyro-hydro** Pyrometallurgy combined with hydrometallurgical leaching.	Alloy of Cu, Ni and Co
Inmetco	USA	6000	**Pyro** Treatment in a rotary furnace (to remove organic components), refining in an electric arc furnace.	Co, Ni, and Fe alloy
Retriev Technology (Toxco)	USA/Canada	4500	**Hydro** Wet grinding in a brine solution (to dissolve Li salts and recover Li2CO3), floatation (to remove steel case and plastic), hydrometallurgical processes to recover metals	CoO, Li2CO3
Dowa Eco-System	Japan	6500	**Pyro**	
JX Nippon	Japan	5000	**Pyro**	

Sony SUMIMOTO	Japan	150	**Pyro-hydro** Calcination (to remove plastics and the electrolyte). Pyrometallurgical process(Co–Ni–Fec alloy), leaching to recover Co.	CoO, Cu, stainless steel, Li is slagged
GEM	China	300000	**Hydrometallurgical processes**	Unknown
Huayou Cobalt	China	60000		
Brunp	China	100000	**Pyro-hydro**	
SungEel HiTech	South Korea	8000	**Hydro**	

(Elena Mossali, 2020) (Roberto Sommerville, 2021) (Omar Velázquez-Martínez, 2019) (Zachary J.Baum, 2022)

ANNEXE 2 : LISTE DES PROJETS DE R&D POUR LES PROCÉDÉ DE RECYCLAGE (NON EXHAUSTIVE)

Projets européens de R&D et de recyclage des LIB

Table 8: Projets européens de R&D et de recyclage des LIB (WeLOOP 2021)

Project	Partners	Location	Goals and technologies	Date
RECYVABAT	Orano Group, MTB, Saft, Paprec , CEA	France	Recycling and Recovery of Batteries project. Supported by the French recovery plan (grant of over 6M€), the project will test a new process for purifying and recovering the metals contained in the batteries of electric vehicles (Lithium, cobalt, nickel, etc.)	2021-2023
	Eramet, Suez & BASF	France	Expand their joint efforts in the area of recycling end-of-life electric vehicle batteries. Suez is collecting and dismantling used batteries,Eramet is developing the recyclingprocess for recovering the 'black mass and refining this black mass to produce precursor materials for electrodes. Lastly, BASF is using these precursors to produce new cathode materials, which are used in batteries.	2021
RecyBat-Li	LRCS Laboratoire réactivité et chimie des solides UMR CNRS	France	Repackaging the positive electrode materials, lamellar with general formula LiNixCoyMnzO2 (NMC) and graphite of the negative electrode to give them a second life, to be reused as raw materials for electrochemical applications. Focus on 18650 cell type and materials prepared in the laboratory.	March 2021
Tonso-bogo project	TND	France	The Tonso Bongo Project of the TND research and developmentlaboratory, based in Quesnoy-sur- Deule, which will develop an innovative process dedicated to the recycling of lithium batteries.	2021
	TES	Singapore	The TES site in Grenoble was one of the first recycling sites to use an inert shredding process that safelycrushes lithium batteries and developed several key patents for hydro processes; Lithium carbonate, Cobalt Hydroxide, Graphite. TES- REC has in France a full pilot plant for treatment of mixed cathode- anodes powder using sustainable hydro process with free-water release. Upsizing the technology led to first industrial facility in Asia using hydrometallurgy at 6000T/y.	2021
	Solvay & Veolia	France	Establishing of a demonstration plant for recycling battery metals. After the successful demonstration of the proof-of-concept, the partners now intend to build demo plant that will feature and operate all the units of operation of the industrial process.	2020
SANOU KOURA	TND	Donchery France	Building a pilot plant. Black mass processing (Pyro-Hydro) Extraction of Li, Mn, Sn, Co salts, Ni	The end of 2023

			salts, Sodium sulfate, Copper cathode	
ReLieVe	Eramet, SUEZ, NTNU and ParisTech EIT Raw Materials; EU	Trappes; France	Recover all valuable elements - nickel, cobalt, lithium and manganese - and transform them into new battery-grade metals. Covering all the stages of the value chain, from the collection and dismantling of end-of-life batteries; by hydrometallurgical means.	Started Jan 2020 Completed Dec 2021
BaCLEM	IPGP Institut de Physique du Globe de Paris	France	Bio-assisted Closed loop recycling of E-Mobility Metals from waste PCBs and Li-Ion Batteries – BaCLEM	2020
MiReLIB	LCMCP, IRCP & GEORESSOURCES GéoRessources	France	Improve the hydrometallurgy process to recycle Li-ion battery materials by combining leaching and extraction of strategic cations (Co, Li, Ni, Mn) of the cathode in a single step using a microwave in flux conditions.	2019
LIMEX	IPHC Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien	France	Innovative Membrane Extraction of Lithium for Spent Lithium-Ion Battery Recycling	2019
RELIABLE	IRCP & PHENIX	France	Recycling Lithium Batteries using pyrochemistry. The goal was to use molten salts as solvent in order to dissolve batteries, particularly cathodes, and to selectively recover every metallic species. Eutectic mixtures of molten carbonates will be used but other oxidizing salts will be also investigated. The project aims to build the basic knowledge for the development of a process and a laboratory pilot.	2018
Primobius GmbH	Neometal and SMS group (private German plant manufacturer)	Hilchenbach Germany	Primobius is an incorporated joint venture between Australian Stock Exchange listed company Neometals Ltd. and private German plant manufacturer, SMS group, to commercialise an environmentally friendly recycling solution for end-of-life and scrap lithium-ion-batteries (LIB). The Primobius recycling process offers scaleable, efficient, sustainable recycling that can drastically reduce the CO2 footprint for participants in the LIB supply chain.	Full commercial start (expected in 2024)
Stena Recycling		Halmstad; Sweden	large scale battery recycling plant	2023
Fortum	Fortum, BASF, and Nornickel	Harjavalta Finland.	Building a new, state-of-the-art hydrometallurgical plant for recycling Lithium-ion Battery; combination of mechanical and hydrometallurgical technologies. Industrial-scale, low-CO2 processes to recover lithium, cobalt, manganese and nickel from the battery for reuse in the production of new batteries.	Operate in 2023
	BASF, CATL	Not disclosed; most probably in Germany	CATL is building a local battery recycling network in Europe	Agreement signed late 2021
	BMW/Umicore/Northvolt	Munich; Germany	Sustainable and recyclable battery design. Recycling of battery components at the end of their lifecycle and extensive reuse of raw materials	LATE 2022

	Audi; Umicore	Germany	Closed the loop for cobalt and nickel in the high-voltage batteries of the Audi e-tron, Started working on closed-loop pilot project	December 17, 2019 Test phase completed
URT	URT & Volkswagen	Germany	Volkswagen wants to create its own cycle with more than 90% recycling of its batteries; the first plant for recycling end-of-life e-car batteries from an automobile manufacturer. URT does the black mass preparation.	Beginning of 2021
	Li-Cycle, Norwegian Morrow Batteries and ECO STOR	Norway	Capacity to process up to 10,000 tonnes of Manufacturing Scrap and End-of-life Batteries per year	Expected to operate in 2023
BASF's new recycling prototype plant	BASF	Germany	BASF German-based chemical company, declared to initiate the construction of a new recycling prototype plant at the company cathode active material (CAM) facility site in Schwarzheide, Germany. The company targets to utilize the advance solution and extract cobalt, manganese, Lithium, and Nickel from Lithium-ion batteries reaching the exhaustion period:	June 2021
Northvolt building its first recycling facilities	Northvolt	Sweden	In 2020, Northvolt has produced its first battery cell with 100% recycled nickel, manganese and cobalt and now aims towards scale-up of recycling facilities in Sweden. Start the construction of a pilot plant (Hydrometallurgical processes)	2022 2023
Building pilot plant for	Norsk Hydro and Northvolt	Fredrikstad, Norway	Start building pilot plant for LIBs recycling with a capacity of 8 000 t/a	Started in 2021
ReLiB		UK	Establish a technology pipeline and provide a clear roadmap for the efficient end-of-life management of electric vehicle (EV) lithium-ion batteries in the UK, encompassing both current and future battery chemistries.	2018
	Rio Tinto and InoBat	Serbia	Establishing of a "cradle to cradle" battery manufacturing and recycling value chain in Serbia. The partnership will cover the full commodity life-cycle from mining through to recycling of lithium.	2021

Projets mondiaux de R&D et de recyclage des LIB

Table 9: R&D et LIBI Futurs projets de recyclage dans le monde entier (WeLOOP 2021)

Project	Partners	Location	Goals and technologies	Date
The Lion Project	Lithion recycling, Seneca, Call2recycle, CCETSE, CÉPROCQ	Québec Canada	Pilot plant, able to recycle 200 metric tonnes of batteries per year, to produce strategic materials at the purity required by battery manufacturers.	Srarted 2018
Ganfeng Lithium		Mexico	Build a recycling plant that will supply the growing US electronic vehicle (EV) market and will recycle batteries from Tesla cars, as well as from electric buses that are made in China and used throughout Latin America.	2020
	Li-Cycle and LG	New York, USA	Li-Cycle to Upsize Capacity of First Hub Facility in North America to Meet Accelerating Demand for Battery Recycling; Completed Hub Expected to Position Li-Cycle as a Leading Producer of Battery Grade Nickel, Cobalt, and	June 2020 commissioning and start-up in 2023

			Lithium in North America	
	Li-Cycle and Ultium Cells LLC	Ohio, USA	Leverages Li-Cycle's Existing Long-Term Agreement to Process Ultium Cells' Battery Cell Manufacturing Scrap from the Ohio Plant, New Spoke will Increase Li-Cycle's Processing Capacity by up to 15,000 tonnes of Lithium-ion Battery Materials per year, bringing Li-Cycle's Global Recycling Capacity to 55,000 tonnes per year	Expected completion 2023
Lohum cleantech increasing its recycling capacities	Lohum	India	Boost their production and recycling capacities; with 10-fold increase in recycling capacities from 1000 tonne per annum (TPA) TO 10000 TPA over the next two years.	July 2021
		Canada, Quebec	Émilie Nadeau Sur LaPresse.ca Mechanical engineer and entrepreneur, Émilie Nadeau is the conductor of two major projects. The first Li-ion battery recycling plant in Quebec and a cutting-edge technological development center. Funding up to $125 million.	March 1, 2022 2023
	GS E&C	South Korea	GS E&C to build EV battery recycling plant near POSCO	commercial production from 2023
Posco Hy Clean Metal	Posco and Huayou Cobalt	South Korea	Invest 88 million euros to build a "black mass" processing plant	2023
	LG Energy Solution and Eco Pro	South Korea	Commercialize electric vehicle battery recycling business. recycle more than 40% of 15,000 tons of waste batteries as cathode materials, which are the core material of batteries.	2021
Ningbo Brunp CATL New Energy	Brunp, CATL	China	create a closed loop of battery production – application – cascade utilization – battery recycling	2019
4R Energy Corp	Joint venture between Nissan and Sumitomo	NAMIE, Japan	Japan's first plant specializing in the reuse and recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles is set to open amid growing demand for electric cars.	2018
RE-B-LIVE	Veolia & Renault	France	EDI has € 5 million/year revenue; A 40% market share of domestic battery processing in France; The capacity to process 6,000 car batteries/year;130,000 metric tons: estimated battery processing market by 2030. RE-B- LIVE: budget of almost 47 billion euros, Recover Copper, aluminum, cobalt, nickel, manganese and lithium (for industrial applications).	2011
RecLionBat	SNAM & Floridienne Chimie	France Belgium	Develop a technique for recycling Lithium batteries. The project had a total budget over €1.5 million – including €380 000 of LIFE funding.	2010
EBRA European Battery Recycling Association	Batrec Industrie AG, EDI, G&P Batteries, Recypilas/ Indumetal, Revatech, SAFT AB, Saubermacher, Umicore, Van Peperzeel, Envirobat Espana, PROMESA, TES-AMM	Bruxelles, Belgium	Develop the highest standards of professionalism in the battery recycling industry by promoting best practice in health, safety and environment and by preserving natural resources while respecting the European regulatory framework	

ANNEXE 3 : INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES POUR LES PROCÉDÉS DES BASES DE DONNÉES

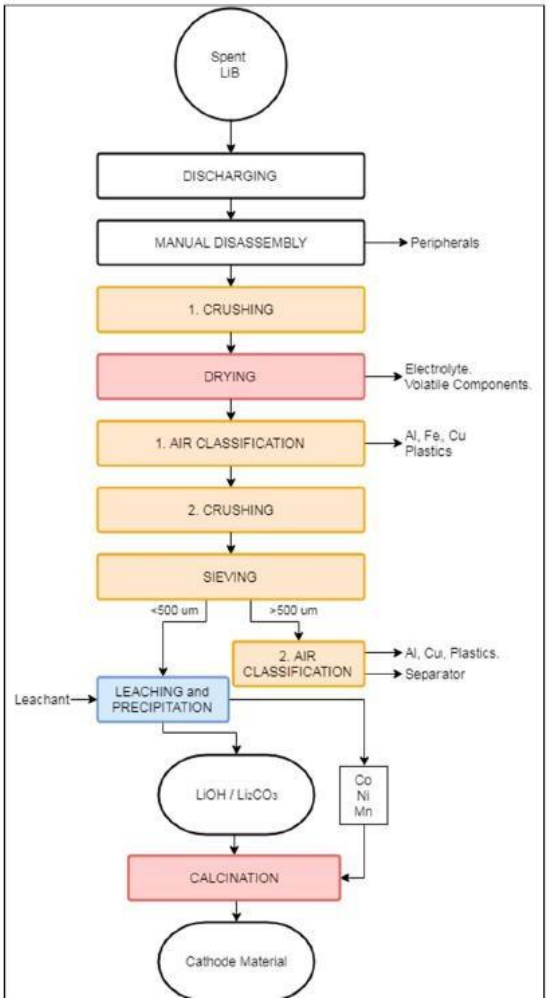


Figure 28: Procédé LithoRec , Allemagne (Duesenfeld)

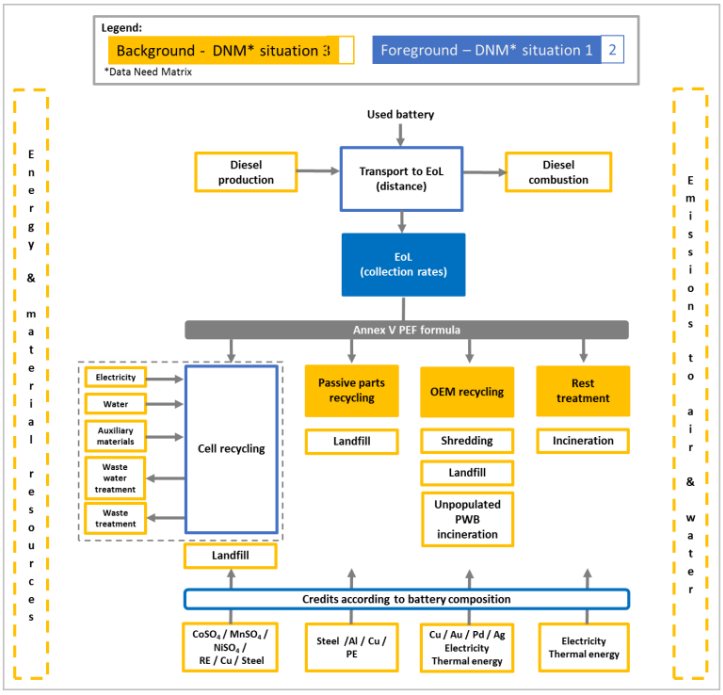


Figure 29: Procédés de démantèlement et de recyclage PEF/OEF

ANNEXE 4 : INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES POUR LES PROCÉDÉS DE RECYCLAGE LIB (SOUS-SCÉNARIOS)

Sous-scénarios des procédés de recyclage des LIB

1- Incinération plastique vs recyclage

- Les plastiques sont de très faible valeur et représentent un très faible pourcentage massique de la cellule totale, il est donc peu probable qu'il soit économiquement judicieux de recycler les fractions de plastique lors du recyclage des LIB usagés.
- Dans les procédés pyrométallurgiques, la pyrolyse initiale de l'électrolyte et du plastique pourrait être utilisée pour fournir de l'énergie pour la récupération des métaux. Accurec utilise la pyrolyse sous vide à 250 ◦C pour enlever l'électrolyte et les plastiques, qui sont condensés et destinés à un « usage thermique », ce qui n'est pas considéré comme du recyclage selon EU/493/2012.
- De nombreuses entreprises séparent les plastiques. Cependant, il n'est pas clair si certains les envoient pour recyclage plutôt que pour élimination. Duesenfeld est l'une des rares entreprises à décrire explicitement le sort des plastiques comme une élimination ou une réutilisation dans la construction.

(Elena Mossali, 2020) (Robert Sommerville, 2021)

2- La récupération du graphite, du solvant d'extraction, du lithium et de l'électrolyte

- Le graphite n'est actuellement pas d'un intérêt majeur pour l'industrie du recyclage des batteries et, dans la plupart des cas, il est perdu lors d'un traitement à haute température, certains procédés l'utilisent comme agent réducteur dans les fours (technologies Umicore, Accurec et OnTo), ou il est filtré lors de l'étape de lixiviation (Recupyl), ou il reste sous forme de fraction de la black mass (Akkuser).
- Le solvant d'extraction (par exemple, H2SO4) peut être recyclé lors de l'extraction par solvant et des étapes d'électro-abattage. Néanmoins, nous n'avons pas rencontré de procédés industriels mentionnant le recyclage et la récupération du solvant d'extraction.
- Le lithium n'est pas récupéré dans la plupart des procédés industriels. Certains procédés industriels récupèrent les composés de lithium Li2CO3, Li3PO4 et/ou LiOH. Par exemple : les technologies Accurec, Battery Resources et OnTo récupèrent le Li2CO3 avec une grande pureté (>99%) où il peut être utilisé dans la synthèse de poudre cathodique.
- L'électrolyte est généralement perdu dans la plupart des procédés industriels. Quoi qu'il en soit, certaines technologies émergentes récupèrent l'électrolyte avec du CO2 supercritique, ce qui peut éliminer les groupes fonctionnels réactifs de la surface du graphite, d'autre part cette étape peut endommager la structure cristalline du graphite (technologie OnTo).

(Omar Velázquez-Martínez, 2019)

3- Remplacement de l'extraction par coprécipitation Bis du précurseur NMC

Dans les procédés hydro ; le remplacement de l'extraction par la coprécipitation Bis du précurseur NMC (Eric Gratz, 2014).

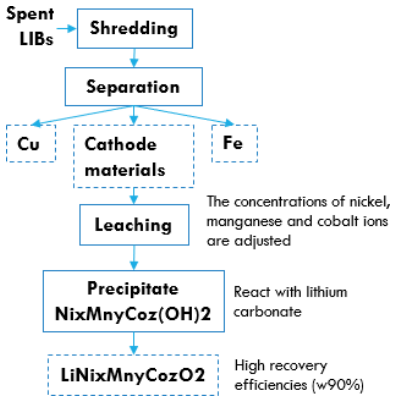


Figure 30: Remplacement de l'extraction par coprécipitation Bis du précurseur NMC(WeLOOP 2021)

4- Procédés de recyclage pour un matériau d'anode en graphite provenant de déchets de batteries lithium-ion, brevet CN105552468A 2016

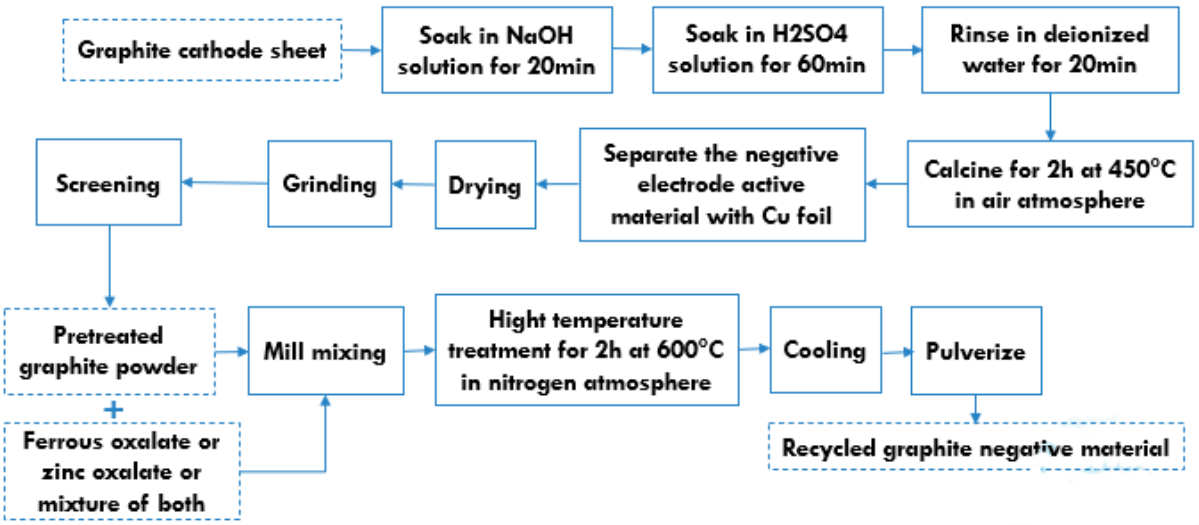


Figure 31: Procédé breveté pour le recyclage du graphite CN105552468A 2016, (WeLOOP 2021)

5- Procédés de recyclage LFP (La récupération du fer et du lithium à partir des LFP)

Brevet Umicore pour le procédé de recyclage LFP

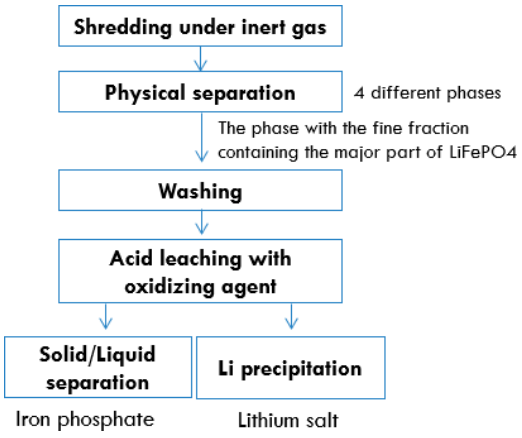


Figure 32: Brevet Umicore 2012(WO2012/072619A1) (WeLOOP 2021)

Brevet Brunp pour le procédé de recyclage LFP

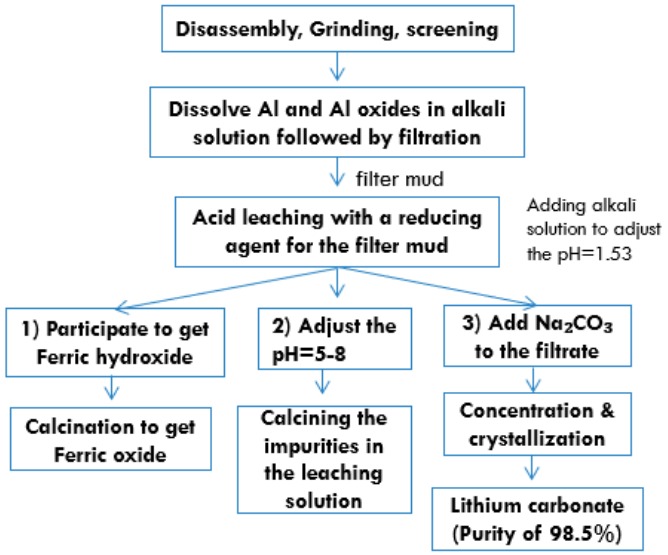


Figure 33: Brevet Brunp 2011(CN102285673B) (WeLOOP 2021)

6- Défis du recyclage des LIB

- La collecte des LIB usagés est coûteuse et nécessite la participation de tous les membres de la chaîne d'approvisionnement (producteurs, vendeurs, gouvernements, gestionnaires et recycleurs de déchets, et utilisateurs).
- La diversité des chimies LIB et l'évolution rapide des technologies rendent le recyclage plus compliqué. (La composition des matériaux de cathode, le matériau de l'anode subit un déplacement de graphite pour le LTO et les matériaux à base de silicium, et les additifs électrolytiques).
- L'évolution rapide des prix du marché des produits de base restreint les marges bénéficiaires des recycleurs, ce qui affaiblit la viabilité de l'industrie. (François Larouche, 2020)

ANNEXE 5: Valeurs absolues des impacts des procédés de recyclage

Tableau 7: Impacts environnementaux du procédé de préparation de Black Mass pour le traitement d'1 tonne de batterie pour les indicateurs de la méthode EF 3.0

Impact category	Unit	Total	Broyage sous azote	Chauffage	Criblage	Traitement de la fraction grosse	Traitement de la fraction légère	Traitement de la fraction lourde
Climate change	kg CO2 eq	464.4645857	16.69930853	432.2229	2.899897	4.066636	11.89584	-3.31996
Ozone depletion	kg CFC11 eq	2.73519E-05	8.31386E-07	3.37E-05	1.45E-07	2.02E-07	-1.4E-06	-6.2E-06
Ionising radiation	kBq U-235 eq	14.57024144	3.139150238	15.63626	0.526185	0.749048	0.44772	-5.92812
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0.735551659	0.037477422	0.782939	0.006738	0.009305	-0.00289	-0.09802
Particulate matter	disease inc.	1.9128E-05	2.44342E-07	1.92E-05	4.86E-08	6.44E-08	4.67E-08	-5.2E-07
Human toxicity, non-cancer	CTUh	3.50783E-06	1.62322E-07	3.53E-06	3.17E-08	4.25E-08	3.26E-08	-2.9E-07
Human toxicity, cancer	CTUh	1.82954E-07	6.71338E-09	1.84E-07	2.26E-09	2.58E-09	9.03E-10	-1.4E-08
Acidification	mol H+ eq	1.664732955	0.089472018	1.736028	0.015605	0.021839	0.002791	-0.201
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0.01701321	0.001769791	0.017549	0.000306	0.00043	0.000266	-0.00331
Eutrophication, marine	kg N eq	0.245233588	0.011885481	0.24736	0.002099	0.002917	0.002304	-0.02133
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	2.700373088	0.136513426	2.781485	0.024082	0.033487	0.012211	-0.28741
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	9678.866203	197.1177225	9921.972	39.6114	52.38478	11.88738	-544.107
Land use	Pt	812.4030328	52.37245564	761.765	24.06949	27.67341	12.1128	-65.5901
Water use	m3 depriv.	54.658206	7.152929879	52.81193	0.699595	0.973101	0.478428	-7.45778
Resource use, fossils	MJ	2969.223418	351.4689274	3949.526	59.8999	84.65893	-164.25	-1312.08
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	0.000784284	9.21569E-05	0.000701	3.4E-05	3.67E-05	4.21E-05	-0.00012
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	463.8171018	16.56544578	431.525	2.877206	4.034487	11.87799	-3.06305
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	0.415173222	0.095028686	0.451134	0.016037	0.022767	0.012627	-0.18242
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	0.23231071	0.038834062	0.246711	0.006654	0.009382	0.005226	-0.0745
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	5.81946E-08	2.67834E-09	6.86E-08	5.39E-10	7.11E-10	-2E-09	-1.2E-08
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1.05918E-06	1.61359E-08	1.09E-06	3.64E-09	4.67E-09	-3.1E-09	-5.4E-08
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	2.41395E-06	1.44671E-07	2.4E-06	2.78E-08	3.74E-08	3.6E-08	-2.3E-07
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	2.56024E-08	1.79446E-09	3.24E-08	5.04E-10	6.05E-10	-1.3E-09	-8.4E-09
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0	0	0	0	0	0	0
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	1.57352E-07	4.91893E-09	1.52E-07	1.75E-09	1.98E-09	2.17E-09	-5.6E-09
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	58.40333712	0.98574319	58.93539	0.209075	0.272493	0.148308	-2.14767
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	3184.055051	11.81608048	3280.794	2.663553	3.356659	-16.5432	-98.032
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	6436.407814	184.3158989	6582.242	36.73877	48.75563	28.28223	-443.927

Tableau 8: Impacts environnementaux du procédé de recyclage par hydrométallurgie solvent pour le traitement d'1 tonne de Black Mass pour les indicateurs de la méthode EF 3.0

Impact category	Unit	Total	Lixiviation	Filtration	Oxydation/Précipitation Mn pH 1-3 /co-oxydation du Fe	Précipitation Fe pH 2-3	Oxydation/Précipitation Co pH 3-4	Précipitation Al Cu pH 5-6	Précipitation Ni pH 7	Précipitation Li pH 11
Climate change	kg CO2 eq	4367.79	351.2418648	11.6711	448.923	324.441	1329.28	297.09	251.88	164.73
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00157	2.69691E-05	5.7E-07	0.00016	0.000268	0.00075	0.0002	0.00014	9E-06
Ionising radiation	kBq U-235 eq	548.1437	44.90646516	2.22873	33.54	49.5231	139.78	19.887	17.6771	13.578
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	12.68683	1.542410995	0.02569	1.45998	0.865266	4.02265	0.8984	0.75639	0.501
Particulate matter	disease inc.	0.000221	6.96915E-05	1.6E-07	2.6E-05	9.41E-06	6.2E-05	1E-05	1.1E-05	1E-05
Human toxicity, non-cancer	CTUh	0.000102	6.64492E-06	1.1E-07	1.8E-05	6.71E-06	4.3E-05	6E-06	5.1E-06	6E-06
Human toxicity, cancer	CTUh	3.71E-06	4.83198E-07	3.3E-09	6.2E-07	2.44E-07	1.5E-06	2E-07	1.5E-07	2E-07
Acidification	mol H+ eq	40.14779	11.8501681	0.06236	4.12699	1.971779	10.5786	1.6971	1.43684	2.0741
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0.366363	0.026690029	0.00124	0.0283	0.031665	0.09973	0.0181	0.01577	0.0188
Eutrophication, marine	kg N eq	3.936632	0.25958743	0.00818	0.45336	0.313803	1.27745	0.3263	0.27749	0.1872
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	46.26001	2.911717669	0.0941	4.86009	3.23621	13.9672	3.3678	2.83547	5.4061
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	124266.2	7191.405066	127.962	18577.6	7793.844	45177.4	7562.1	6383.65	18440
Land use	Pt	17274.97	1353.996959	36.0567	1821.75	1422.28	5603.58	1036.9	876.63	1452.6
Water use	m3 depriv.	6943.914	1351.159947	2.73689	756.532	895.4064	2784.2	322.4	274.935	277.93
Resource use, fossils	MJ	78070.41	7987.734321	247.631	6821.45	6066.486	22001	3989.4	3433.28	2302.1
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	0.111337	0.008076388	2.8E-05	0.02538	0.006176	0.0557	0.0039	0.00323	0.006
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	4320.506	345.7119811	11.5765	441.774	322.0419	1312.71	295.55	250.554	161.7
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	38.72682	4.952709923	0.0673	6.40074	1.687866	14.0814	0.9888	0.85729	2.8353
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	8.556466	0.577173806	0.02729	0.74829	0.711236	2.49312	0.549	0.46857	0.2023
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	3.14E-06	2.36194E-07	1.7E-09	6.6E-07	1.78E-07	1.5E-06	1E-07	1.2E-07	2E-07
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1.12E-05	4.88841E-07	1E-08	1.1E-06	1.22E-06	4E-06	8E-07	7E-07	2E-06
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	8.77E-05	5.95955E-06	9.7E-08	1.6E-05	5.33E-06	3.7E-05	5E-06	4.3E-06	4E-06
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	7.16E-07	6.10034E-08	1E-09	8.9E-08	6.68E-08	2.7E-07	5E-08	4E-08	4E-08
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	2.99E-06	4.22194E-07	2.3E-09	5.3E-07	1.77E-07	1.2E-06	1E-07	1.1E-07	1E-07
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	466.986	53.71932099	0.63562	61.1486	33.73245	165.134	34.402	28.7753	24.835
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	23776.06	850.4130731	6.94441	2151.75	1535.015	6363.22	1165	972.579	10025
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	100023.1	6287.272672	120.382	16364.7	6225.097	38649	6362.6	5382.3	8390.3

Tableau 9: Impacts environnementaux du procédé de recyclage d'hydrométallurgie par solvant pour le traitement d'1 tonne de Black Mass pour les indicateurs de la méthode EF 3.0

Impact category	Unit	Total	Lixiviation H2SO4	Filtration - solvant	SX Cu, Fe, Al	SX Mn	SX Co	SX Ni	Précipitation Li	Cristallisation du Na2SO4 par évaporation
Climate change	kg CO2 eq	5115.866	348.3512	11.67109	792.6051	806.1657	764.3618	764.0137	440.1746	1188.523
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0.000978	2.68E-05	5.74E-07	0.00024	0.00023	0.0002	0.0002	2.31E-05	5.84E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	616.6343	44.768	2.228725	57.08726	82.63187	77.28813	77.23586	48.37138	227.0231
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	12.27377	1.534124	0.025689	1.730815	1.782767	1.670609	1.66967	1.245014	2.615083
Particulate matter	disease inc.	0.000228	6.95E-05	1.58E-07	2.72E-05	3.03E-05	2.87E-05	2.87E-05	2.78E-05	1.6E-05
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5.77E-05	6.55E-06	1.08E-07	7.14E-06	7.28E-06	6.5E-06	6.5E-06	1.27E-05	1.1E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	2.85E-06	4.77E-07	3.29E-09	4.82E-07	4.05E-07	3.76E-07	3.76E-07	4.03E-07	3.32E-07
Acidification	mol H+ eq	47.60908	11.83634	0.062365	3.759743	7.231019	6.818469	6.816338	4.73502	6.349794
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0.317265	0.026563	0.001238	0.020577	0.033467	0.030009	0.029976	0.049303	0.12613
Eutrophication, marine	kg N eq	3.227875	0.257138	0.008184	0.442693	0.434536	0.400327	0.400007	0.451692	0.833297
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	42.96333	2.884417	0.094101	4.948906	4.83885	4.46527	4.461764	11.68875	9.581273
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	124265.3	7127.308	127.9612	17242.74	16858.26	15938.41	15930.18	38028.42	13012.06
Land use	Pt	21656.51	1346.668	36.05627	2030.083	3949.214	3690.665	3689.108	3243.503	3671.216
Water use	m3 depriv.	3570.82	1351.283	2.736888	311.4416	417.478	314.6363	313.6609	580.9694	278.614
Resource use, fossils	MJ	99168.96	7953.773	247.6301	15071.1	15025.6	14348.96	14342.51	6958.145	25221.25
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	0.034733	0.008054	2.79E-05	0.003353	0.003213	0.002488	0.002481	0.012321	0.002797
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	5085.851	342.8344	11.57649	791.3712	803.7912	762.2634	761.9179	433.2086	1178.888
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	22.93328	4.945759	0.067303	0.847223	1.425438	1.246051	1.244271	6.301842	6.855395
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	7.081634	0.571035	0.027294	0.386646	0.949101	0.852331	0.851571	0.664163	2.779494
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	1.46E-06	2.35E-07	1.74E-09	2.4E-07	1.75E-07	1.54E-07	1.54E-07	3.21E-07	1.76E-07
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1.43E-05	4.78E-07	1.03E-08	2.44E-06	2.31E-06	2.17E-06	2.16E-06	3.7E-06	1.05E-06
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	4.23E-05	5.88E-06	9.66E-08	4.52E-06	4.83E-06	4.22E-06	4.21E-06	8.72E-06	9.81E-06
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	6.43E-07	5.88E-08	1.02E-09	1.59E-07	8.32E-08	7.51E-08	7.51E-08	8.75E-08	1.03E-07
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	2.21E-06	4.18E-07	2.27E-09	3.22E-07	3.22E-07	3.01E-07	3.01E-07	3.15E-07	2.29E-07
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	2833.98	53.1825	0.635593	693.9925	658.65	653.6632	653.6259	55.62669	64.60367
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	53940.3	840.2823	6.944299	8275.36	8156.226	7939.909	7938.206	20077.31	706.0585
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	67491.06	6233.843	120.3813	8273.387	8043.38	7344.84	7338.35	17895.48	12241.4

Tableau 10: Impacts environnementaux du procédé de recyclage par pyrométallurgie pour le traitement d'1 tonne de batterie pour les indicateurs de la méthode EF 3.0

Impact category	Unit	Total	Fusion à 1600°C	Lixiviation de l'alliage CuNiCo à 90 °C	Précipitation du Cuivre	Extraction par solvant du Co	Précipitation du Ni	Evaporation de l'effluent	B Lixiviation de la scorie par H2SO4 à 90 °C	B Filtration	B Précipitation du Fe	B Précipitation du Mn	B Précipitation du Ca	B Précipitation du Li	B Cristallisation du Na2SO4 par évaporation
Climate change	kg CO2 eq	6046.707	1851.257	196.6918	59.40393	509.0624	75.13104	595.8193	258.483	67.30951	366.7295	58.02023	593.7568	98.178	1316.864
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0.000451	5.7E-05	1.15E-05	3.97E-06	0.000164	3.72E-05	2.93E-05	1.66E-05	3.31E-06	2.28E-05	3.35E-06	3.25E-05	5.27E-06	6.48E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	704.4292	135.277	33.04097	9.036225	43.80422	6.100521	113.8088	39.37706	12.85389	13.59521	5.183164	32.766	8.048181	251.538
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	13.1884	1.903723	0.808081	0.64118	1.140253	0.220777	1.310975	1.404933	0.148156	0.39679	0.086574	1.930006	0.299487	2.897469
Particulate matter	disease inc.	0.000312	4.31E-05	3.45E-05	4.82E-05	1.4E-05	3.09E-06	8.05E-06	7.48E-05	9.1E-07	2.04E-06	5.27E-07	5.75E-05	7.89E-06	1.78E-05
Human toxicity, non-cancer	CTUh	7.84E-05	8.57E-06	3.34E-06	1.32E-06	8.42E-06	1.51E-06	5.49E-06	5.79E-06	6.24E-07	2.17E-06	5.13E-07	2.49E-05	3.57E-06	1.21E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	2.48E-06	2.17E-07	1.29E-07	5.29E-08	3.04E-07	4.61E-08	1.66E-07	2.37E-07	1.9E-08	2.5E-08	1.21E-08	7.94E-07	1.14E-07	3.67E-07
Acidification	mol H+ eq	54.58816	4.13262	6.110677	8.000462	2.081749	0.428145	3.183224	12.73753	0.359766	0.555214	0.167645	8.558179	1.237482	7.035468
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0.443215	0.071302	0.018895	0.006134	0.020243	0.005658	0.06323	0.023099	0.007143	0.004776	0.003413	0.067769	0.011803	0.13975
Eutrophication, marine	kg N eq	3.812498	0.577257	0.149529	0.068816	0.324695	0.094525	0.417742	0.205308	0.047202	0.11954	0.044494	0.714499	0.125612	0.92328
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	59.54635	6.606818	1.728089	0.575195	3.617275	0.831049	4.803203	2.381652	0.542751	1.146496	0.291468	23.17883	3.227624	10.61589
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	150681.9	9668.474	3465.818	1616.773	10596.93	2091.151	6523.181	5761.958	738.6332	2599.926	847.369	81094.23	11260.35	14417.13
Land use	Pt	21199.28	3388.802	784.7618	271.6513	1425.762	259.7178	1840.423	1183.135	207.9749	677.5585	133.5416	6092.131	866.1747	4067.647
Water use	m3 depriv.	4552.361	393.3981	670.6679	54.75883	199.6953	106.0813	139.6728	1203.321	15.78317	51.35545	47.31502	1166.958	194.6544	308.6997
Resource use, fossils	MJ	92116.99	15740.02	4619.982	1476.703	9405.277	1074.846	12643.66	6495.708	1428.161	2064.609	634.9206	7220.235	1368.121	27944.74
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	0.053392	0.001704	0.003578	0.001524	0.002711	0.000899	0.001402	0.007566	0.000163	0.000154	7.5E-05	0.026911	0.003607	0.003098
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	6003.998	1845.51	195.0942	58.98884	507.6504	74.70453	590.9892	256.372	66.76395	366.2988	57.79986	581.2783	96.35898	1306.189
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	33.85145	3.985214	1.181087	0.299455	0.960896	0.283966	3.436674	1.601997	0.388164	0.339986	0.164771	11.91452	1.699055	7.59567
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	8.857243	1.761708	0.41657	0.115635	0.451178	0.142537	1.39339	0.509011	0.157397	0.090708	0.055601	0.563909	0.119966	3.079634
Human	CTUh	1.74E-06	1.28E-07	1.02E-07	4.26E-08	1.57E-07	3.28E-08	8.82E-08	2E-07	1.01E-08	2.06E-08	5.47E-09	6.67E-07	9.12E-08	1.95E-07

toxicity, non-cancer - organics															
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	2.02E-05	2.35E-06	2.48E-07	9.28E-08	4.27E-06	1.99E-07	5.26E-07	3.91E-07	5.96E-08	1.61E-06	1.89E-07	8.01E-06	1.08E-06	1.16E-06
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	5.68E-05	6.14E-06	3.01E-06	1.19E-06	4.04E-06	1.29E-06	4.92E-06	5.23E-06	5.59E-07	5.46E-07	3.21E-07	1.63E-05	2.41E-06	1.09E-05
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	6.32E-07	6.94E-08	2.75E-08	1.04E-08	9.8E-08	1.19E-08	5.14E-08	4.55E-08	5.84E-09	9.06E-09	3.32E-09	1.62E-07	2.38E-08	1.14E-07
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	1.85E-06	1.48E-07	1.02E-07	4.25E-08	2.06E-07	3.42E-08	1.15E-07	1.92E-07	1.32E-08	1.59E-08	8.77E-09	6.31E-07	9.02E-08	2.54E-07
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	890.9098	139.6385	22.1089	9.60187	350.0603	8.23191	32.38728	38.79914	3.662276	86.06895	10.08999	103.806	14.8751	71.57965
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	59341.64	666.0541	396.7683	196.4479	4363.285	295.8889	353.9604	778.364	40.08766	284.4172	77.78217	45109.43	5996.856	782.3003
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	90449.37	8862.782	3046.941	1410.724	5883.587	1787.03	6136.834	4944.795	694.8833	2229.439	759.4969	35880.99	5248.619	13563.25

Tableau 11: Impacts environnementaux du procédé de recyclage par procédé mixte pour le traitement d'1 tonne de batterie pour les indicateurs de la méthode EF 3.0

Impact category	Unit	Total	Préparation de Black Mass pour 1 tonne de batterie	Fusion	A Electrolyse du cuivre	A Electrodéposition du cuivre	A Extraction par solvant Cu	A Extraction par solvant Co	A Extraction par solvant Ni	A Cristallisation du Na2SO4 par évaporation	B Lixiviation de la scorie à 90°	B Filtration	B Précipitation Fe pH 5	B Précipitation Mn	B Précipitation Li	B Cristallisation du Na2SO4 par évaporation
Climate change	kg CO2 eq	7666.608	464.4646	949.8141	107.2339	168.7868	2273.003	1275.489	755.9826	1188.523	27.62782	3.725694	91.34428	80.68869	82.74102	197.1833
Ozone depletion	kg CFC11 eq	0.002091	2.74E-05	4.3E-06	5.37E-06	8.34E-06	0.001142	0.000513	0.000199	5.84E-05	1.36E-06	1.83E-07	5.26E-05	6.44E-05	4.51E-06	9.7E-06
Ionising radiation	kBq U-235 eq	692.3523	14.57024	18.14638	15.51443	30.05116	138.4918	105.2205	76.59223	227.0231	5.276737	0.710323	5.616917	12.3717	5.102866	37.66394
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	16.85211	0.735552	0.518259	0.312133	0.404949	6.237718	3.187617	1.577505	2.615083	0.060797	0.008218	0.2801	0.214851	0.265457	0.433868
Particulate matter	disease inc.	0.000247	1.91E-05	2.84E-05	3.54E-06	3.2E-06	9.03E-05	4.67E-05	2.22E-05	1.6E-05	3.73E-07	5.09E-08	4.2E-06	2.33E-06	7.68E-06	2.66E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	9.62E-05	3.51E-06	5.81E-06	3.15E-06	2.51E-06	3.79E-05	1.7E-05	6.12E-06	1.1E-05	2.55E-07	3.5E-08	1.97E-06	1.72E-06	3.42E-06	1.82E-06
Human toxicity, cancer	CTUh	3.87E-06	1.83E-07	2.13E-07	2.59E-07	1.48E-07	1.39E-06	6.84E-07	3.59E-07	3.32E-07	7.73E-09	1.1E-09	5.95E-08	6.24E-08	1.09E-07	5.5E-08

Acidification	mol H+ eq	40.8129	1.664733	2.108455	0.634263	0.928794	11.2313	8.742771	5.76168	6.349794	0.147614	0.019925	0.52499	0.490314	1.154791	1.053478
Eutrophication, freshwater	kg P eq	0.425812	0.017013	0.020386	0.010172	0.01738	0.099141	0.057117	0.02951	0.12613	0.002932	0.000395	0.005982	0.008563	0.010165	0.020926
Eutrophication, marine	kg N eq	5.304199	0.245234	0.184651	0.086049	0.123127	2.012248	0.944395	0.392231	0.833297	0.019372	0.002615	0.115418	0.092534	0.114777	0.138251
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	63.61404	2.700373	5.291988	0.970545	1.407416	22.07995	10.40325	4.37049	9.581273	0.222735	0.030065	1.055217	0.808123	3.103007	1.589606
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	162072.5	9678.866	17308.22	2500.26	2432.274	54340.85	28777.02	15581.2	13012.06	302.638	41.16945	2647.677	2202.211	11089.13	2158.943
Land use	Pt	26121.72	812.403	2228.526	368.2714	537.6837	7216.295	5460.762	3630.031	3671.216	85.34433	11.51929	321.1919	350.99	818.4083	609.082
Water use	m3 depriv.	4108.781	54.65821	412.406	33.07256	43.06333	1718.561	736.4858	209.6287	278.614	6.477359	0.875494	130.5647	246.9884	191.1597	46.22477
Resource use, fossils	MJ	114936.7	2969.223	4294.589	1959.399	3442.455	33696.77	20675.27	14082.04	25221.25	586.2472	78.97705	1194.185	1511.252	1040.743	4184.324
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	0.055752	0.000784	0.00584	0.003064	0.001636	0.023762	0.009188	0.001843	0.002797	6.54E-05	9.6E-06	0.001242	0.001492	0.003565	0.000464
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	7631.624	463.8171	946.7312	106.4954	167.4762	2264.634	1270.946	753.9533	1178.888	27.40387	3.695527	90.87242	80.07925	81.04704	195.5849
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	24.42489	0.415173	2.821914	0.488638	0.91633	5.308216	2.764587	1.188049	6.855395	0.159343	0.021455	0.305484	0.432866	1.610097	1.137337
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	10.55866	0.232311	0.260993	0.249902	0.394341	3.060742	1.778304	0.841296	2.779494	0.06461	0.008712	0.166368	0.176572	0.083884	0.461135
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	2.24E-06	5.82E-08	1.39E-07	8.74E-08	5.65E-08	9.72E-07	3.99E-07	1.38E-07	1.76E-07	4.1E-09	5.72E-10	4.44E-08	4.32E-08	8.88E-08	2.92E-08
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1.91E-05	1.06E-06	1.75E-06	4.02E-07	2.85E-07	6.87E-06	3.71E-06	2.14E-06	1.05E-06	2.44E-08	3.37E-09	2.7E-07	3E-07	1.06E-06	1.74E-07
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	7.54E-05	2.41E-06	3.92E-06	2.67E-06	2.18E-06	3.03E-05	1.3E-05	3.87E-06	9.81E-06	2.28E-07	3.13E-08	1.66E-06	1.38E-06	2.28E-06	1.63E-06
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	1.03E-06	2.56E-08	5.33E-08	9.24E-08	5.12E-08	4.01E-07	1.58E-07	7.23E-08	1.03E-07	2.39E-09	3.43E-10	1.53E-08	1.68E-08	2.24E-08	1.7E-08
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	2.84E-06	1.57E-07	1.6E-07	1.67E-07	9.69E-08	9.93E-07	5.26E-07	2.87E-07	2.29E-07	5.34E-09	7.6E-10	4.41E-08	4.56E-08	8.7E-08	3.8E-08
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	2461.619	58.40334	25.98524	16.37313	13.8207	871.7492	714.0264	650.9843	64.60367	1.50279	0.205262	10.87837	8.333709	14.03335	10.71944

Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	52543.5	3184.055	9255.579	142.0563	134.7942	14315.64	10005.99	7877.778	706.0586	16.4225	2.235755	397.7467	400.4267	5987.556	117.1491
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	107067.4	6436.408	8026.66	2341.831	2283.659	39153.45	18057	7052.433	12241.4	284.7127	38.72843	2239.052	1793.451	5087.542	2031.075