

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

RAPPORT FINAL

Juin 2020

Responsables scientifiques :

- **Mathilde Fiorletta & Camilla Tomasetta**

Vertech Group, 11 Rue Défly, 06000 Nice



- **Michel Bonnemaïson**

E-Mines, 10 Allée de l'Ecole, 09600 DUN



- **Frédéric Lai**

BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45100 Orléans



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.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Julie Clavreul, Camille Jeandaux, Anne Prieur-Vernat – ENGIE ; Denis Le Boulch, Anne Grau – EDF; Jean-Paul Cazalers – Total ; Daniel Dunet, Natalia Quisel, Jessica François – Veolia R&I ; Barbara Forrière, Violaine Poulain – Renault ; Jean-Louis Bergey, Alain Geldron – ADEME ; Françoise Lartigue-Peyrou, Jean-François Viot – SOLVAY ; Mélanie Bordignon, Manuelle Diemer – Alstom ; Jade Garcia, Philippe Osset – SCORE LCA.

RESUME

Lors de la réalisation d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV), les données concernant l'extraction des métaux sont très souvent modélisées grâce à des bases de données telles que ecoinvent ou GaBi. Cependant, pour certains produits et certaines applications, l'impact de ces activités peut s'avérer très important sur le cycle de vie. En effet, selon les objectifs et la portée de l'ACV, la façon dont ces données sont modélisées, les frontières des différents systèmes, les types d'allocation utilisés, l'origine des sources ainsi que leur représentativité sont des paramètres importants à prendre en compte pour optimiser la vraisemblance des résultats de l'analyse d'impact du produit ou du procédé. Ainsi, cette étude permet de faire un point sur les données représentatives des procédés d'extraction de certains métaux, leur pertinence et leurs limites selon plusieurs critères comme par exemple l'analyse approfondie de la situation de l'industrie minière dans le monde aujourd'hui et des caractéristiques des gisements étudiés. D'autres données, notamment issues de la littérature et pouvant potentiellement être implémentées dans les bases de données afin d'améliorer les études ACV sont également analysées. Les métaux analysés dans ce rapport sont ceux qui pourraient s'avérer critiques à court ou moyen terme selon SCORE LCA : le cuivre, l'aluminium, le lithium, les platinoïdes, les terres rares, le nickel, le cobalt et le cadmium. Le corps de l'analyse a permis de relever des limites spécifiques à la modélisation de chaque métal selon les sets de données disponibles pour leur modélisation. Certaines limites générales ont également été identifiées, notamment concernant l'accès aux données et leur transparence, la représentativité géographique, l'allocation, l'obsolescence et la complétude. Des recommandations sont ensuite avancées pour la modélisation de chacun de ces métaux en ACV, ainsi que pour l'utilisation et l'amélioration de ces sets de données. Finalement, ce rapport a pour ambition d'aider les praticiens à mieux connaître les processus modélisés pour l'extraction de ces métaux et de fournir des recommandations pour une meilleure utilisation de ces données dans la modélisation de leurs produits ainsi que pour l'amélioration de celles-ci.

MOTS CLES

Analyse de Cycle de Vie, Bases de Données, Exploitation minière, Matières premières, Inventaires, Représentativité

LEXIQUE

ACV	- Analyse de Cycle de Vie
BDD	- Base de données
CA-QC	- Canada (Québec)
CDI	- Cobalt Development Institute
CN	- Chine
EAA	- European Aluminium Association
EF	- Environmental Footprint
EI	- Ecoinvent
EICV	- Evaluation des Impacts du Cycle de Vie
ELCD	- European Reference Life Cycle Data System
GES	- Gaz à effet de serre
GIEC	- Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GLO	- Global
IAI	- International Aluminium Institute
ICA	- International Copper Association
ICV	- Inventaire de Cycle de Vie
LCDN	- Life Cycle Data Network
LCE	- Lithium Carbonate Equivalent
MCO	- Mine à Ciel Ouvert
MGP	- Métaux du Groupe du Platine
OTR	- Oxydes de Terres Rares
PCR	- Product Category Rule
PEF/OEF	- Product Environmental Footprint/Organisation Environmental Footprint
RDC	- République Démocratique du Congo
RoW	- Reste du monde
RU	- Russie
SHG	- Special High Grade
SIM	- Société de l'Industrie Minérale
TMS	- Travaux Miniers Souterrains
ZA	- Afrique du Sud

Index

1.	Introduction.....	7
1.1.	Vocabulaire minier	7
1.1.1.	Minerai	7
1.1.2.	Mine	8
1.1.3.	Gisement.....	8
1.1.4.	Gîte minéral.....	9
1.2.	Définition de l'exploitation minière	9
1.3.	Problématiques liées à l'analyse du secteur minier	13
1.3.1.	Importation de métaux.....	13
1.3.2.	Production de métaux	13
1.3.3.	Obsolescence des réserves annoncées	14
1.3.4.	Prospective minière.....	14
1.4.	Bases De Données en ACV	15
2.	Approche méthodologique	17
2.1.	Phase 1 : Etat de l'art sur la modélisation ACV des activités minières.....	18
2.1.1.	Inventaire de Cycle de Vie des activités minières dans les BDD ACV	18
2.1.2.	Modélisation ACV des activités minières dans la littérature et données complémentaires	18
2.2.	Phase 2 : Analyse de l'état de l'art	19
2.2.1.	Analyse des inventaires	19
2.2.2.	Modélisation ACV dans la littérature.....	19
2.2.3.	Identification des limites	19
2.3.	Phase 3 : Recommandations	20
3.	Résultats de l'analyse	21
3.1.	Cuivre	21
3.1.1.	Etat de l'art.....	21
3.1.2.	Analyse de l'état de l'art	28
3.1.3.	Recommandations	43
3.2.	Aluminium	45
3.2.1.	Etat de l'art.....	45
3.2.2.	Analyse de l'état de l'art	50
3.2.3.	Recommandations	60
3.3.	Lithium	62
3.3.1.	Etat de l'art.....	62
3.3.2.	Analyse de l'état de l'art	68
3.3.3.	Recommandations	77
3.4.	Terres rares	79
3.4.1.	Etat de l'art.....	79
3.4.2.	Analyse de l'état de l'art	86
3.4.3.	Recommandations	98
3.5.	Platinoïdes	99
3.5.1.	Etat de l'art.....	99
3.5.2.	Analyse de l'état de l'art	104
3.5.3.	Recommandations	113
3.6.	Nickel et cobalt.....	115
3.6.1.	Extraction du nickel et du cobalt dans le monde.....	115
3.6.2.	Nickel	117
3.6.3.	Cobalt	137
3.7.	Cadmium.....	147
3.7.1.	Etat de l'art.....	147
3.7.2.	Analyse de l'état de l'art	152
3.7.3.	Recommandations	159
4.	Conclusions	161
4.1.	Remarques additionnelles	161

4.2. Limites générales des BDD	162
4.3. Recommandations générales	163
5. Références	166
Annexe A	172
Annexe B	172
Annexe C	172
Industrie minière	172
Aluminium	173
Annexe D	174

1. Introduction

L'exploitation minière constitue un secteur d'activités essentiel à la société actuelle, et fournit des matières premières pour de nombreuses industries à l'origine de la plupart des biens que nous utilisons quotidiennement (Carvalho, 2017). Même si l'avenir des mines n'est pas menacé dans un futur proche (Elshkaki et al., 2018), cette industrie peut causer de sérieux dommages sur l'environnement, en impactant les paysages mais aussi les ressources en eau et la qualité de l'air. À l'échelle mondiale, le secteur minier représente actuellement 2,7% de la consommation d'énergie, contribuant par la même occasion à la formation d'émissions de gaz à effet de serre (GES), (IPCC, 2007). Pour assouvir la frénésie consommatrice du 21^{ème} siècle, la demande en matières premières est en constante augmentation, tandis que faute d'une exploration correctement anticipée, la qualité et la teneur des gisements de minerai sont logiquement sur le déclin.

L'objectif de l'étude est de vérifier comment et dans quelle mesure le cadre complexe de l'exploitation minière est représenté dans les bases de données pour l'Analyse du Cycle de vie (BDD ACV) actuellement disponibles et s'il existe des informations complémentaires pour surmonter les limites identifiées. Cela servira de base pour produire des recommandations sur l'utilisation correcte et fonctionnelle des BDD. En effet, la qualité d'une ACV dépend fortement de la disponibilité et de la qualité (en termes de validité et crédibilité) des données utilisées lors de sa réalisation (Joliet et al., 2010).

1.1. Vocabulaire minier

Entre exploration et exploitation, les termes se ressemblent souvent, mais ils cachent parfois des distinctions profondes qui induisent ensuite des incompréhensions de la part des lecteurs, même déjà bien avertis. Le but de cette section est d'apporter quelques précisions sur l'usage des termes les plus courants du vocabulaire minier.

1.1.1. MINERAI

Une excellente définition est donnée dans l'ouvrage de Michel Jebrak et Eric Marcoux « Géologie des ressources minérales ».

« Un minerai est un minéral ou une roche dont on peut extraire avec profit un ou plusieurs éléments. Cependant, cette définition lapidaire est ambiguë. »

En effet, pour le minéralogiste, le minerai est le minéral qui contient l'élément à récupérer : la galène (PbS) pour le plomb, la chalcopryrite (CuFeS₂) pour le cuivre, etc., c'est le minerai au sens strict.

Pour le mineur par contre, le minerai désigne la masse de matériau abattu en mine dans son ensemble, et non pas le seul minéral valorisable : c'est le minerai au sens large. Un grès imprégné d'hématite est ainsi un minerai de fer, et du quartz à galène un minerai de plomb, bien que la proportion de minerais « vrais », l'hématite et la galène, y soit au plus de quelques dizaines de pourcents.

Dans le cas de l'or, le minerai est souvent un quartz à sulfures et or, dans lequel le minerai strict, l'or natif, ne représente que quelques grammes par tonne. Cette acception plus large

est très proche de la définition du dictionnaire Larousse (« roche contenant des minéraux utiles en proportion notable »), et n'a pas de connotation d'exploitation. Cette notion de minerai rejoint celles de gisement et de teneur, qui possèdent une dimension économique essentielle.

Après l'extraction du minerai, l'obtention d'un produit commercialisable nécessite une suite d'opérations complexes désignée sous le nom de minéralurgie. Celle-ci débute par un concassage et un broyage plus ou moins poussés, et se poursuit par des opérations physiques et/ou chimiques comme la flottation ou la cyanuration destinées à séparer le minéral économique des autres. Le produit commercialisable est habituellement un concentré dans lequel le ou les minéraux économiques sont fortement enrichis par rapport au minerai de départ. Le concentré subit ensuite une opération chimique, souvent une fusion, qui fournit le ou les éléments recherchés : un solide (cuivre, or, plomb...), un liquide (mercure) ou un gaz (fluor, brome...). »

1.1.2. MINE

La mine est l'opération industrielle correspondant à l'extraction. Il n'y a pas de relation directe entre la taille de la mine et celle du gisement ; cette relation est fonction d'un choix politique et économique.

On peut vouloir une petite mine sur un gros gisement si l'on souhaite prioriser la durée de vie de l'exploitation ou limiter l'investissement initial (CAPEX), ou ne pas impacter un marché, ou toute autre raison.

On peut aussi vouloir une grosse mine sur un petit gisement, si les conditions techniques le permettent et si on veut au contraire « terminer » le gisement au plus vite par crainte (par exemple) d'un risque politique ou social jugé trop fort.

La durée de vie de la mine s'établit sur ses réserves, c'est-à-dire le volume de minerai dont on a déterminé avec certitude les tonnages et les teneurs et qui satisfait à tous les critères économiques et techniques de son exploitabilité (de l'extraction au traitement et à sa commercialisation). En général, ces réserves garantissent la durée de vie pour au moins les 10 années à venir et une exploitation responsable devra investir dans les sondages nécessaires pour les maintenir à ce niveau s'il est jugé acceptable.

Le calcul des réserves dépend donc de la politique de la société minière, pas nécessairement des qualités intrinsèques du gisement. Dans les périodes de difficulté économique, l'investissement nécessaire au maintien des réserves sera souvent sacrifié, et les réserves baisseront rapidement au gré de la production. Cela ne signifie pas nécessairement que le gisement s'épuise rapidement.

Au contraire, si la société envisage de vendre sa mine ou de lever des fonds en bourse, elle aura tendance à investir dans son augmentation des réserves afin de rassurer les investisseurs potentiels.

1.1.3. GISEMENT

Le gisement est le volume de minerai défini par la géologie. On l'estime par ses **ressources** en minerai. A ce stade, on ne considérera que les critères économiques du minerai, les considérations sur l'ensemble des paramètres de l'exploitabilité ne seront pas encore prises

en compte. En fait les réserves résultent donc d'une étude plus approfondie d'une partie des ressources.

« Dans la classification de la SIM ou Société de l'Industrie Minérale (2000) repris par la norme 43-101 de la bourse de Toronto, une **ressource minérale** est une concentration de matériel naturel, solide, inorganique ou fossilisé dans la croûte dont la forme, la quantité et la teneur, ou la qualité pourraient permettre l'extraction économique. On distingue trois catégories de **ressources** : mesurées, indiquées ou inférées :

- Les **ressources minérales mesurées** (*measured mineral resources*) sont celles qui présentent un intérêt économique intrinsèque, et dont on connaît avec un haut degré de certitude le tonnage, la densité, la forme, les caractéristiques physiques, la qualité, la teneur et la continuité ;
- Les **ressources minérales indiquées** (*indicated mineral resources*) présentent également un intérêt économique intrinsèque, mais leurs caractéristiques sont connues avec un degré de certitude moins élevé que les ressources minérales mesurées ; la fiabilité est cependant plus élevée que pour les ressources minérales inférées ;
- Les **ressources minérales inférées (ou supposées)** (*inferred mineral resources*) sont celles qui présentent un intérêt économique intrinsèque, mais avec un degré de certitude limité, et un faible niveau de confiance. Elles ne sont que des espérances qui n'ont qu'une faible probabilité de devenir des ressources mesurées. » (Jébrak & Marcoux, 2008)

1.1.4. GITE MINERAL

Un gîte minéral est un volume de roche minéralisée en métaux qui ne présente nécessairement pas encore une économie intrinsèque. Le travail du géologue d'exploration consiste généralement à découvrir un gîte minéral et ensuite de l'évaluer pour savoir s'il peut constituer un gisement. A ce stade, on ne pourra pas parler de ressources, mais en fonction de caractéristiques précises de ces gîtes, un géologue minier confirmé (gitologue) sera généralement à même d'identifier des modèles connus de minéralisations et de prédire la probabilité qu'aura ce gîte à évoluer vers un gisement.

Ces études s'effectuent à partir d'évidences de roches minéralisées découvertes au gré d'affleurements ou par des sondages d'exploration géologique. Ces évidences de minéralisations, dont l'économie reste encore inconnue, sont qualifiées d'indices.

Ainsi pour résumer l'historique d'une mine, on peut dire qu'une mine commence par la découverte d'un ou de plusieurs indices, qui permettent de cerner un gîte, qui va évoluer à la suite de travaux de développement d'abord vers un gisement, dans lequel on définira des réserves si les ressources sont jugées suffisantes. En général, moins de 1% d'indices « sérieux » évoluent vers une mine.

1.2. Définition de l'exploitation minière

La production de matières premières minérales passe par plusieurs étapes : l'extraction et la concentration du minerai qui sont réalisées sur site, puis en aval l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie, le plus souvent réalisées hors site. Lors de cette étude, le consortium se

concentrera sur la base de tout cycle de vie d'un produit ou d'un service, à savoir l'extraction des matières premières (Figure 1), qui comprend également les séparations physiques entre les minerais et les stériles, les résidus (les minéraux inutiles) étant généralement stockés dans l'ancienne exploitation (*backfilling*).

Selon Poulard et al. (2017) différents types de mines peuvent être identifiés en fonction de :

- La géologie du corps minéralisé (nature, morphologie, profondeur, épaisseur, fracturation, etc.),
- L'occupation de la surface et la géographie du site,
- Les objectifs économiques,
- Le savoir-faire de l'exploitant et le respect des bonnes pratiques.

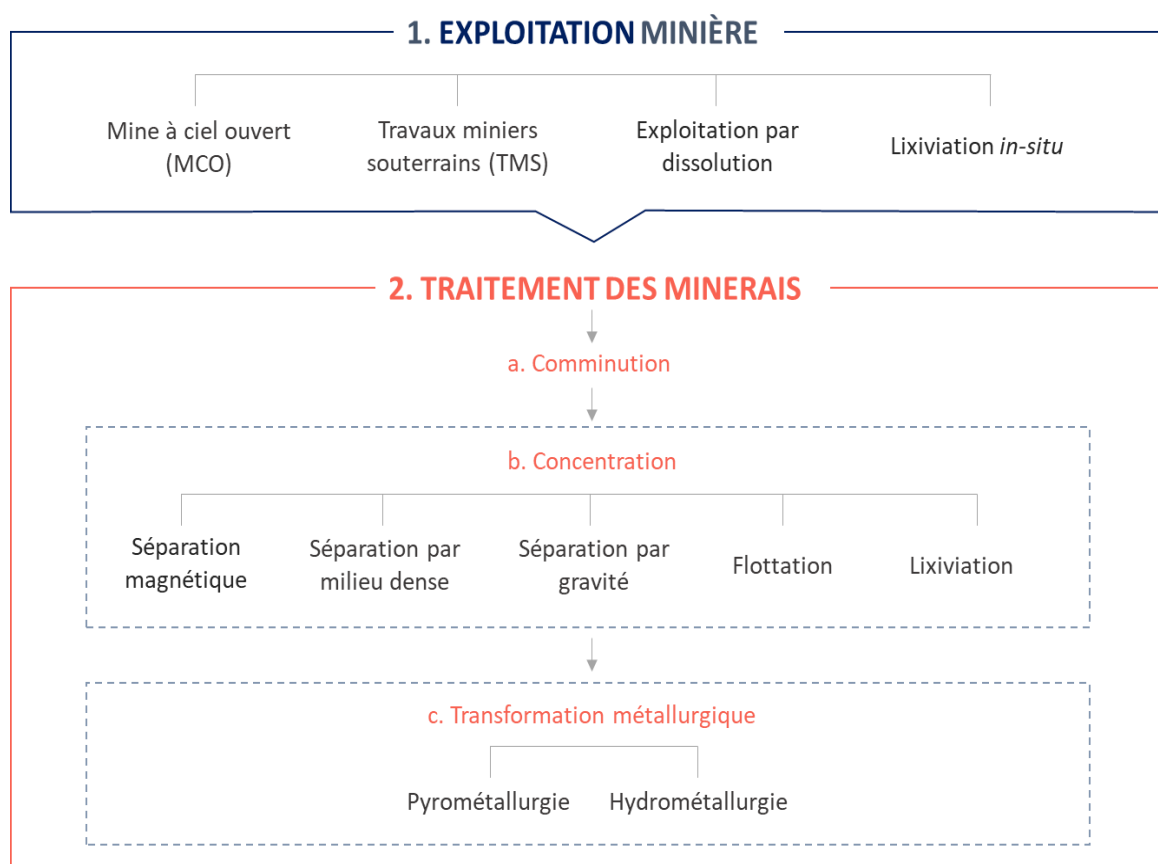


Figure 1. Schéma générique des typologies de mines et des étapes du traitement métallurgique dans le cadre d'une exploitation minière.

Globalement, il existe deux grands types de minerais selon qu'ils soient riches en sulfures ou en soient quasiment dépourvus. En surface, ces minerais seront soumis à une altération supergène et une érosion, ce qui en modifiera la composition et les propriétés physiques et chimiques sur une plus ou moins grande profondeur suivant les cas. Dans la famille des gisements sulfurés on distinguera deux types de minéralisation (Figure 2) :

- Les minerais de sulfures massifs (Figure 3), de forte densité, forment des couches, des amas ou des filons suivant les modèles de gisement. Les tonnages de ces gisements varient de quelques millions de tonnes à une centaine de millions de tonnes.
- Les minerais à sulfures disséminés, dans lesquels les minéraux utiles ne constituent qu'une petite fraction de la composition du minerai. Les minéraux de cuivre peuvent

être finement dispersés au sein du minerai ou s'organiser en réseaux plus ou moins denses de veines et de veinules au sein de la roche encaissante (Figure 4). Les corps de minerais présentent des morphologies plus diffuses, en amas, couches ou couloirs de fractures, et des volumes souvent extrêmement importants, pouvant atteindre plusieurs milliards de tonnes.

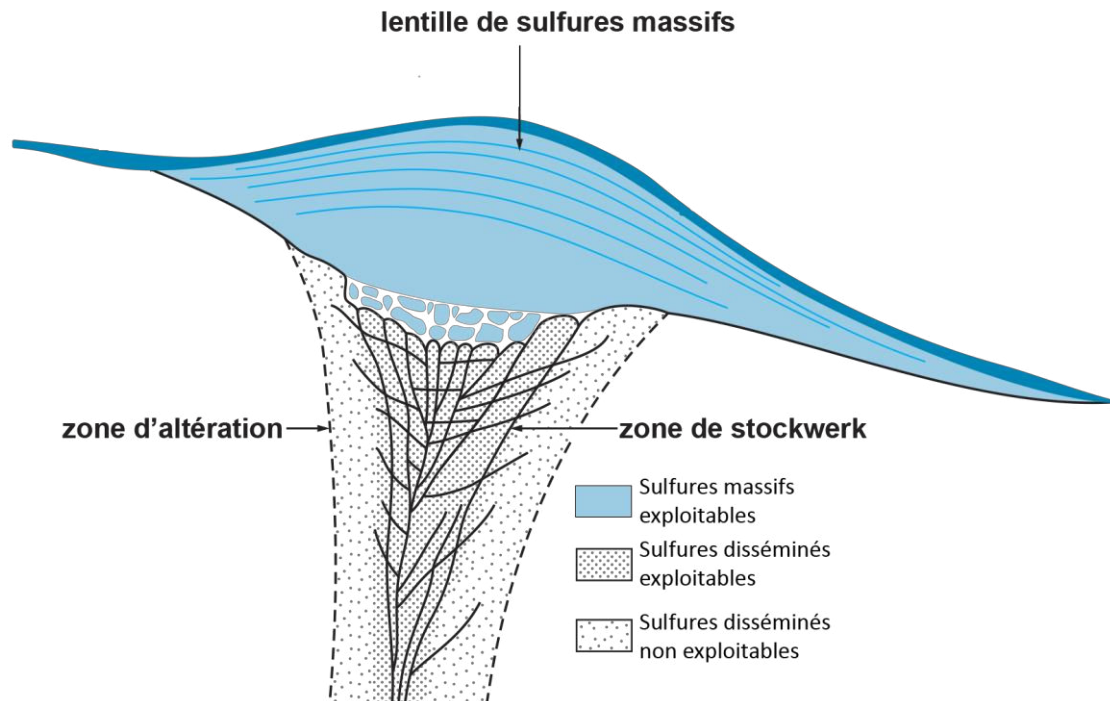


Figure 2. Coupe schématique d'un amas sulfuré.

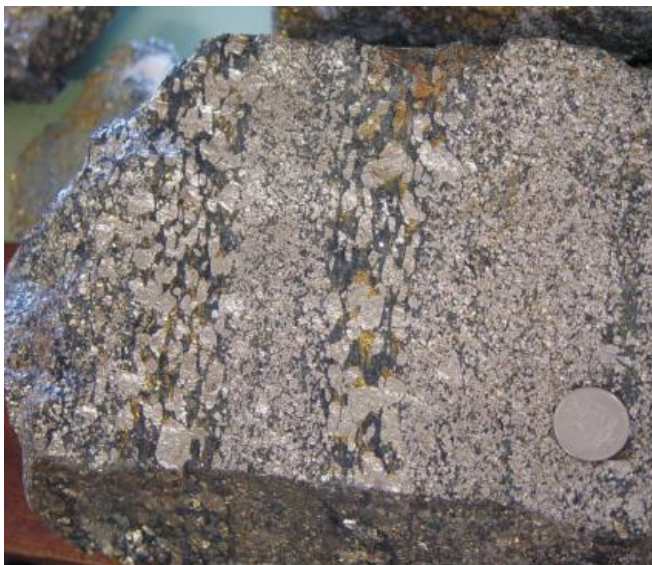


Figure 3. Minerai de type sulfure massif.

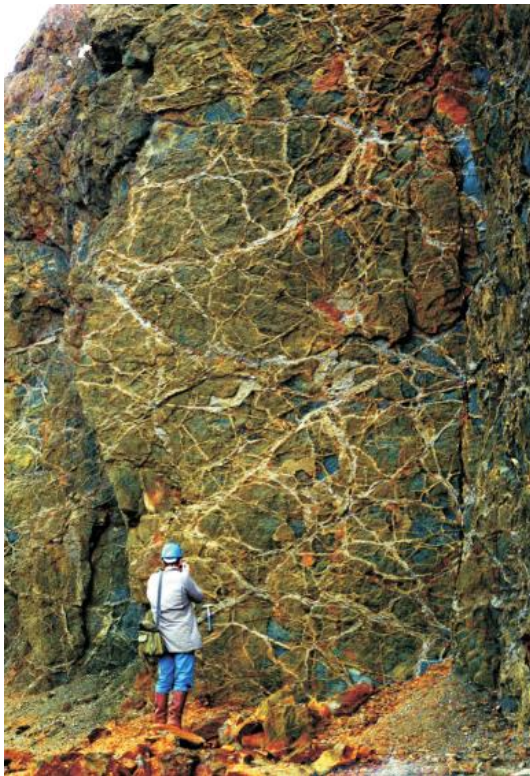


Figure 4. Stockwerk, veinules de quartz et de sulfures (Rio Tinto, Espagne)

Le traitement de ces minerais varie peu d'un type à l'autre : il faut séparer les minéraux contenant le métal des autres minéraux (principalement sulfures de fer, silicates, carbonates) qui seront rejetés. Les minéraux contenant les métaux fourniront un concentré et les autres des rejets qui constitueront généralement la plus grande partie du volume traité. Cette étape de concentration s'effectuera en plusieurs étapes sur des fractions granulométriques de plus en plus fines en utilisant plusieurs techniques qui pourront être combinées (gravimétrie, flottation, etc.). Le broyage sera effectué jusqu'à ce que les minéraux contenant le métal soient parfaitement isolés afin d'être séparés (maille de libération).

La composition minéralogique peut varier grandement d'un gisement à un autre, ou même au sein d'un même gisement. Ainsi, le traitement du minerai sera adapté afin de produire des concentrés spécifiques à chacun d'eux.

Ces deux types de minéralisations (sulfures massifs et disséminés) sont susceptibles de s'oxyder en surface (les 100 premiers mètres). Les sulfures sont détruits pour laisser place à des carbonates ou des oxydes que l'on peut traiter sur le site de la mine par lixiviation en tas. En général, on utilisera un acide sulfurique dilué, qui se forme également de manière naturelle par réaction des sulfures avec l'eau de pluie.

Ensuite, les concentrés subissent une transformation métallurgique pour obtenir un métal raffiné, sans ou avec le moindre d'impuretés. Dans cette phase, les concentrés peuvent être traités par hydrométallurgie (lixiviation ou biolixiviation) ou pyrométallurgie.

Dans le cas de l'hydrométallurgie, les traitements sont généralement effectués sur le site de l'extraction ou à proximité immédiate. Dans le cas des traitements pyrométallurgiques, les concentrés de sulfure sont envoyés vers des usines de traitement, très souvent lointaines du site d'extraction. Par exemple, la fonderie de Huelva (Espagne) traite les concentrés de cuivre en provenance d'Indonésie.

Ainsi, la pyrométallurgie doit s'étudier de manière dissociée par rapport aux gisements.

Dans les grandes lignes, les porphyres cuprifères (corps intrusifs de granites spécialisés à gros cristaux fournissant les plus gros gisements de cuivre), qui par leur géologie affleurent en zone de forte altération, contiennent une grande partie de minerai oxydé : la lixiviation sera une technologie principale au début de l'exploitation, puis, au fur et à mesure de l'approfondissement de l'extraction, les sulfures seront exploitées et les procédés de pyrométallurgie prendront une place prépondérante.

1.3. Problématiques liées à l'analyse du secteur minier

L'analyse du secteur de l'industrie minière peut mener à des confusions de lecture notamment concernant l'importation, la production, l'obsolescence des réserves et les perspectives minières (réserves ou ressources).

1.3.1. IMPORTATION DE METAUX

Les données d'importation accessibles proviennent généralement des statistiques douanières des pays concernés. Les importations, exprimées en métal y sont notées, leur origine identifiée. Cependant, il est extrêmement difficile d'avoir une idée précise du flux de métal importé lorsque celui-ci se trouve dans la composition d'un bien de consommation. Par exemple, l'importation de casseroles en aluminium en provenance de Chine ne sera pas référencée dans la rubrique « Aluminium » mais dans celle de « casserole », ... et la quantité d'aluminium importée entachée d'erreur.

1.3.2. PRODUCTION DE METAUX

La production d'un métal peut s'exprimer sous forme différente suivant la source des données, les sociétés annonçant plutôt leurs chiffres en fonction de leur production commerciale : **métal** pour l'affineur ou **concentré** pour l'exploitant. Si la production minière du métal par pays peut se déduire facilement des chiffres obtenus à partir de la production de concentrés, il est plus complexe d'analyser cette production minière à partir du métal produit dans le pays. En effet, certains pays peuvent disposer de fonderies fonctionnant (en totalité ou en partie) à partir de concentrés importés (ou de produits du recyclage) sans pour autant disposer de suffisamment de mines en production pour l'expliquer, et qui à leur tour peuvent par ailleurs exporter tout ou partie de leur production. Dans le détail, il est donc très difficile d'avoir un rapprochement précis et fiable entre la production minière d'un pays et sa production de métal. Toutefois, les données existent car elles sont liées à une activité humaine qui sera néanmoins plus ou moins traçable en fonction du pays ; les synthèses seront d'autant plus pertinentes qu'elles couvriront un large domaine économique, car en fin de compte, au niveau mondial la production sera toujours le résultat du traitement des concentrés et du recyclage, quel que soit le lieu où l'activité de production se déroule.

1.3.3. OBSOLESCENCE DES RESERVES ANNONCEES

Il pourrait également exister une obsolescence des réserves annoncées par les producteurs. En effet, les réserves sont établies en tonnage de minerai exploitable pour lequel on connaît avec beaucoup de précision (95%) la teneur. Il est donc facile de les exprimer également en métal contenu. Cependant, pour chaque gisement, les variations annuelles de ces réserves peuvent évoluer au gré des choix stratégiques de l'exploitant. La gestion bien menée d'une exploitation conservera des réserves permettant au moins 5 à 10 ans d'exploitation future. On peut donc considérer qu'à l'échelle d'un grand pays producteur, pour un métal largement distribué et donc non critique, il existera un certain équilibre entre les mines qui investissent dans un accroissement de leurs réserves et celles qui entament un processus de diminution. Ainsi, sur une décennie, on peut considérer comme assez faible l'obsolescence des données concernant les réserves publiées. Cependant, si le calcul des réserves obéit à un standard bien précis dans les économies de l'Ouest (NI 43 101 au Canada, JORC en Australie), cela n'est pas le cas dans certains grands pays producteurs (Chine, Russie ...) pour lesquels la frontière entre ressources et réserves reste extrêmement floue.

1.3.4. PROSPECTIVE MINIERE

Où extraira-t-on les métaux dans 20 ans et plus ? Bien que considérée comme « long terme » cette durée est en fait assez brève si l'on considère qu'il se passe au moins 10 ans, souvent plus, entre le moment où l'on découvre un gisement et le moment où il entre en exploitation. Dans un gisement, les réserves consomment les ressources. L'avenir à long terme de la production repose donc sur le renouvellement de ces ressources. Il s'agit là d'une toute autre opération que celle du renouvellement des réserves car elle implique la nécessité de la découverte de nouveaux gisements.

Avant même son exploitation, le gisement a été cerné par ses ressources et ce n'est que lorsqu'elles ont été jugées suffisantes que l'opération du calcul de réserves et par la suite la décision d'exploitation ont été prises. On cherche donc les réserves dans le « connu » alors que les ressources seront à rechercher dans « l'inconnu ».

Certains gisements, comme les grands gisements de cuivre (en particulier les porphyres cuprifères) présentent des ressources tellement énormes que le renouvellement des réserves à partir de ces ressources ne sera pas un véritable problème avant plusieurs décennies si la consommation mondiale de cuivre ne subit pas un fort accroissement, comme par exemple avec l'avènement de la voiture électrique.

La SIM¹ estime que si le parc mondial des voitures électriques augmentait à 125 millions en 2030, il faudrait produire par rapport à 2017 :

- 69 fois plus de nickel
- 50 fois plus d'aluminium et de cuivre
- 49 fois plus de graphite
- 46 fois plus de lithium

¹ Société de l'Industrie Minérale « Recyclage et Valorisation » n°66 septembre 2019 p. 44

- 31 fois plus de cobalt
- 18 fois plus de manganèse

Et le journaliste Guillaume Pitron, auteur de cette étude de conclure : « on imagine difficilement les conséquences sur l'exploitation minière, la minéralurgie et l'environnement ».

Dans tous les cas, sans bouleversement profond de l'économie mondiale, il est probable que la production actuelle bien qu'augmentée d'une meilleure capacité de recyclage soit très insuffisante pour assurer les futurs besoins en métaux. L'anticipation d'une crise de l'approvisionnement risque fort de devoir passer par la mise en exploitation de nouveaux gisements et l'arrivée de nouveaux pays dans les rangs des grands producteurs.

Par exemple, hors toute considération géopolitique, l'Iran possède un sous-sol potentiellement très riche en gisements de cuivre appartenant au modèle porphyre cuprifère ; la valorisation de ce potentiel pourrait élever ce pays au rang des grands producteurs mondiaux tel que le Chili.

Dans l'étude en cours, l'obsolescence des données concernant les réserves pour le cuivre n'apparaît donc pas un problème, les ressources des gisements en production étant largement suffisantes pour que les réserves soient maintenues pour encore de longues années. Les inventaires de réserves listés dans les BDD ACV, bien documentées sur la situation des dix dernières années, restent donc vraisemblables et utilisables aujourd'hui.

Le problème est plutôt lié à la capacité d'augmenter la production dans des proportions importantes, telles qu'envisagée dans le cadre de la transition énergétique ; cela suppose de nouvelles découvertes de gisements et leur mise en exploitation à plus ou moins brève échéance.

La réponse se trouverait dans le développement des projets émergents, mais pour des raisons diverses les gisements de bien des métaux se consomment aujourd'hui plus vite qu'ils ne se régénèrent. Le recyclage apporterait une solution raisonnable à consommation mondiale constante, mais il ne peut compenser une augmentation importante de cette consommation.

Pour des métaux stratégiques et critiques, aux gisements rares et bien mal distribués sur la planète, le problème du maintien des réserves peut être des plus délicats. Les découvertes de nouveaux gisements de cobalt ou de platine sont exceptionnelles et toute forme de prospective sur ces métaux hasardeuse.

1.4. Bases De Données en ACV

Il existe de nombreuses bases de données (BDD) utilisées par les experts en ACV, recensant un grand nombre de matières premières issues de l'exploitation des mines et les impacts environnementaux associés à cette exploitation. Ces données peuvent avoir une influence considérable sur les résultats finaux de l'ACV d'un produit ou d'un service et doivent par conséquent être mises à jour régulièrement, notamment par rapport aux techniques d'extraction, procédés ou autre évolution liée au secteur minier. Les BDD ACV analysées dans cette étude sont Ecoinvent (EI), GaBi, le nœud ELCD du LCDN et éventuelles études PEF/OEF.

Toutes les BDD ACV suivent un même modèle qui voit un flux d'intrants et d'extrants pouvant provenir de l'environnement naturel (sans transformation de la part de l'être humain) ou de l'environnement industriel/technologique (Figure 5). Ces échanges sont présents au niveau de

tous les sous-procédés et étapes d'un processus de production. Cependant, les inventaires ACV ne fournissent pas toujours toutes les informations relatives aux sous-procédés (Figure 6). En général, les BDD de GaBi et ELCD sont moins transparentes et fournissent des données agrégées, tandis que Ecoinvent fournit une version agrégée définie comme « System » et une version désagrégée, définie comme « Unit ».

L'agrégation des données rend parfois assez compliquée l'analyse de la contribution relative des sous-procédés et des substances à l'impact potentiel total. Cette analyse, intéressante et utile dans le cadre d'une démarche d'écoconception, est aussi recommandée par la norme ISO 14044. De plus, cela ne permet pas de reconstruire la méthode d'allocation entre les éventuels sous-produits ou co-produits, dans le cas où la documentation ne reporterait pas cette information.

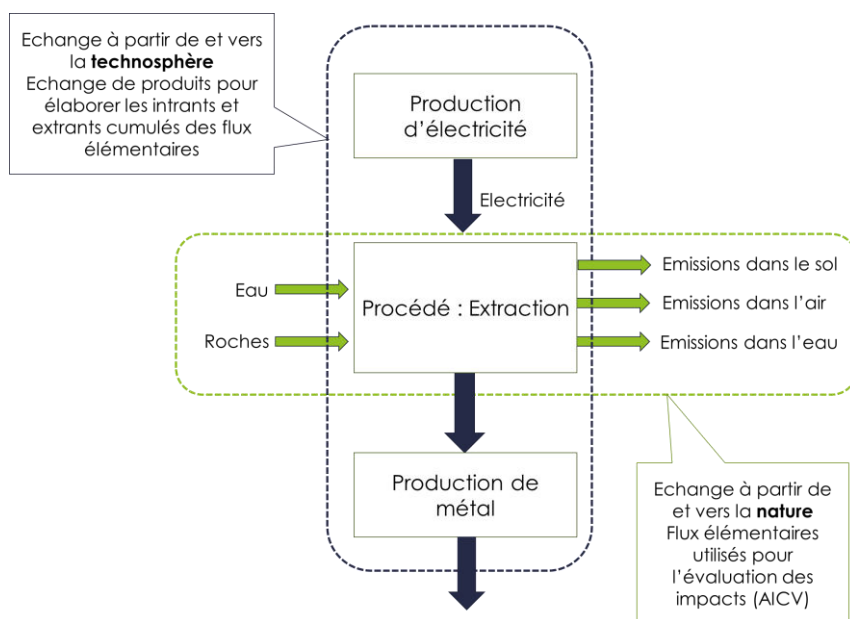


Figure 5. Schéma général d'un procédé de BDD ACV.

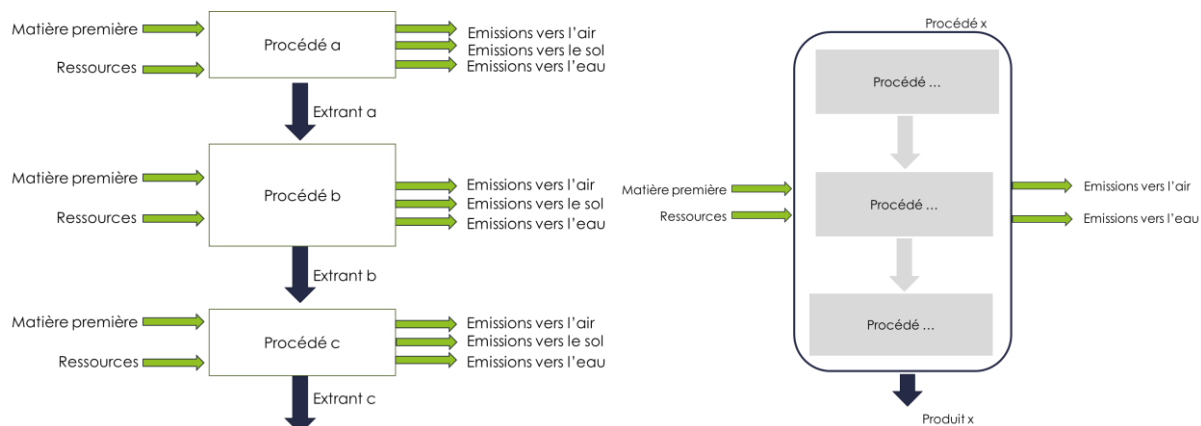


Figure 6. Schéma d'un procédé de BDD ACV avec des sous-procédés distingués (à gauche) et agrégés (à droite).

2. Approche méthodologique

La réalisation de l'état des lieux de l'environnement minier en termes de modélisation ACV permet de répondre aux objectifs selon les étapes suivantes :

- Evaluation de la pertinence des données et pratiques existantes en ACV sur les activités minières, en réalisant un état des lieux de l'environnement minier en termes de modélisation ACV.
- Recherche de données complémentaires qui permettraient d'améliorer la représentativité et la qualité des données existantes, aussi dans une perspective d'évolution des marchés. Les données complémentaires sont recherchées dans la littérature scientifique, sur les sites des associations de secteur et elles seront aussi issues directement des connaissances d'E-Mines.
- Une fois les bases de l'étude établies, mise en place de recommandations sur l'utilisation et l'amélioration future de ces données, en analysant de manière critique l'état de l'art sur la modélisation ACV des activités minières. Les recommandations fourniront des indications pertinentes en ce qui concerne les données, leur utilisation, les analyses de sensibilité associées, leurs limites, etc.

Le plan de travail pour l'étude se déroule donc en 3 étapes comme décrit en Figure 7.

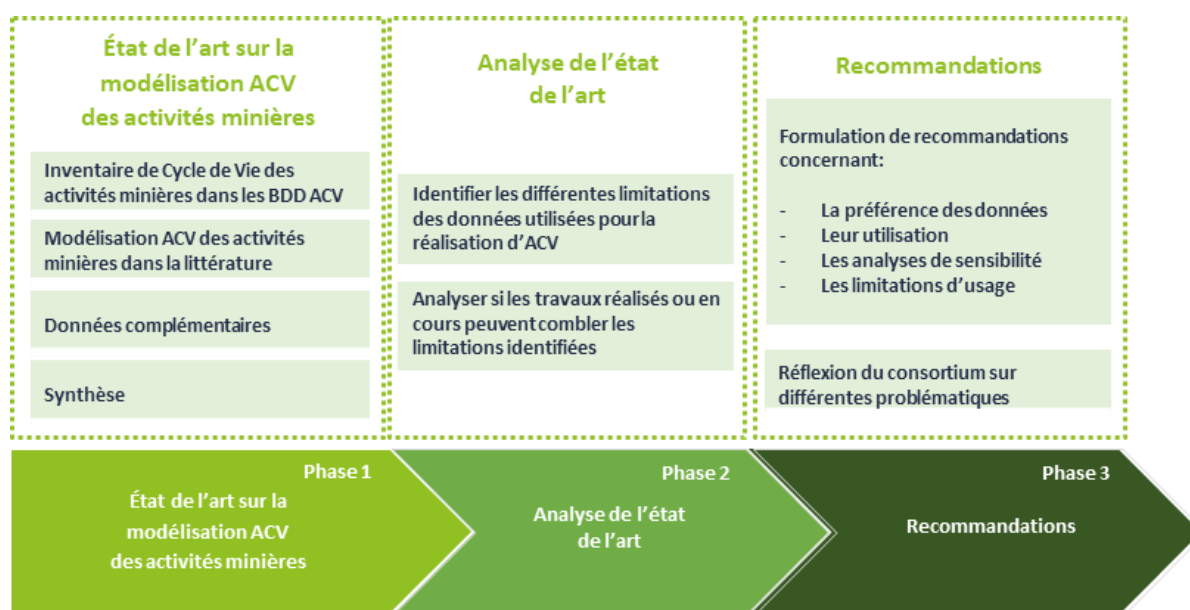


Figure 7. Plan de travail.

2.1. Phase 1 : Etat de l'art sur la modélisation ACV des activités minières

2.1.1. INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE DES ACTIVITES MINIERES DANS LES BDD ACV

Lors de cette première tâche, le consortium s'emploiera à réaliser un état de l'art des données existantes et des modes de modélisation des activités minières. Les BDD ACV analysées dans le cadre de cette étude sontecoinvent v3.6, GaBi v8.7 et le nœud ELCD du Life Cycle Data Network (LCDN). ELCD a officiellement été suspendu en Juin 2018, mais il a été remplacé par le LCDN, dont il représente un nœud : *“Several data providers have nowadays the capacity to create and maintain their own nodes and share the data through the Life Cycle Data Network (LCDN)”* (European Commission, n.d.). Les données du LCDN doivent toujours être conformes avec les “ILCD entry level requirements” ou le Product and Organisation Environmental Footprint (PEF et OEF) framework. Les matières premières traitées dans l'étude sont les suivantes :

- Cuivre
- Aluminium
- Lithium
- Terres rares
- Platinoïdes
- Cobalt
- Cadmium
- Nickel

2.1.2. MODELISATION ACV DES ACTIVITES MINIERES DANS LA LITTERATURE ET DONNEES COMPLEMENTAIRES

Cette tâche consistera à identifier dans la littérature différents cas d'étude mettant en lumière le calcul des impacts environnementaux des activités minières. Pour ce faire, différents articles traitant de modélisation ACV seront analysés mais aussi certaines études n'impliquant pas forcément cette approche. A l'issue de cette recherche bibliographique, les articles les plus pertinents seront disséqués pour mettre en avant les aspects suivants :

- Le sujet de l'étude et les limites du système ;
- La couverture géographique et temporelle ;
- Les principaux impacts.

Il conviendra aussi, dans le cadre de cette recherche de données, de se pencher sur les travaux ACV réalisés par les fédérations professionnelles des métaux.

Enfin des projets européens pourront être pris en compte pour vérifier - sous réserve de leur disponibilité au moment de l'étude - la capacité ou non d'éventuels nouveaux inventaires à pallier les limitations de ceux identifiés dans les bases de données.

2.2. Phase 2 : Analyse de l'état de l'art

L'analyse de l'état de l'art inclut les étapes suivantes :

- Analyse des inventaires ;
- Modélisation ACV dans la littérature ;
- Identification des limites ;

Ces étapes permettront enfin de tirer des conclusions et recommandations sur l'utilisation des BDD ACV dans le cadre de l'exploitation minière des matières premières considérées.

2.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les différents sets de données seront analysés pour connaître la liste des intrants et extrants principaux, leurs quantités relatives, éventuelles relations entre les différents procédés et avec les impacts potentiels. La méthode d'analyse d'impact utilisée dans l'étude est la méthode Environmental Footprint (EF), initiée par la commission européenne, a été développée pour être utilisée avec les sets de données EF, utilisant la nomenclature de la liste de flux ILCD. Dans le but de la rendre compatible avec les autres sets de données fournis par ecoinvent, les noms des flux ont été alignés avec la nomenclature de SimaPro et les flux non utilisés dans les bibliothèques de SimaPro ont été enlevés, comme les flux d'occupation régionalisée des sols. Si nécessaire, des aspects particulièrement déterminants et importants dans le cadre d'une analyse ACV sur l'exploitation minière (ou sur la production d'un produit semi-finis ou finis utilisant la matière première étudiée), seront mis en avant, comme, par exemple, des aspects liés au traitement des résidus.

2.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Une fois toutes les limites recensées, une analyse des sources complémentaires repérées permettra d'évaluer si certains travaux réalisés ou en cours peuvent pallier ces dernières en apportant les solutions aux problématiques identifiées précédemment.

2.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

L'état de l'art sur la modélisation ACV des activités minières réalisé en premier lieu permettra d'avoir une vue d'ensemble de l'environnement minier en ce qui concerne l'accès aux données et leur amplitude lors d'une approche ACV. On pourra donc procéder par la suite à l'identification des différentes limitations en ce qui concerne les données utilisées pour la réalisation d'une ACV.

Les principales limites attendues sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Limites attendues dans les procédés relatifs aux activités minières dans les BDD ACV.

Limites identifiées	Détails
Accès aux données : bases de données privées	L'approche ACV est souvent décrite pour la difficulté d'obtention des données d'ICV. Bon nombre d'études requièrent l'acquisition de données additionnelles, ce qui tend à alourdir les campagnes de collecte et le temps de réalisation. De plus l'accès à certaines bases de données privées peut parfois être complexe.
Problèmes de représentativité, de complétude, de variabilité	Les données de l'inventaire sont souvent des moyennes (pondérées ou pas) annuelles, géographiques, sectorielles ou des données spécifiques sont utilisées en lieu d'autres données (proxies). Toutes les variations entre les différents scénarios possibles ne sont généralement pas prises en compte.
Problèmes d'obsolescence des données	Beaucoup de modèles ACV sur l'activité minière reposent aujourd'hui sur des données relativement anciennes (15 – 20 ans) comme cela peut être le cas dans la base de données Ecoinvent. Cela peut constituer un manque de représentativité pour les modélisations actuelles, l'activité minière ayant quelque peu évolué ces dernières années (peu d'évolution technologies, mais baisse de la qualité des minerais par exemple).
Allocation	L'approche ACV décrit souvent des procédés <i>multi-output</i> et une solution doit être trouvée pour allouer les impacts entre les différents produits. Cela est en particulier le cas des activités minières où l'on retrouve souvent différentes matières premières dans le même minerai.

2.3. Phase 3 : Recommandations

Une fois l'état de l'art sur la modélisation ACV des activités minières et son analyse réalisée, les informations acquises permettront de formuler des recommandations pertinentes et logiques afin de conclure l'étude.

Les partenaires prendront en compte l'ensemble des travaux réalisés afin d'énoncer des recommandations à partir des conclusions d'analyse de l'état de l'art et des limites identifiées, mais également à partir des recherches pour l'accès à des données de meilleure qualité et dépendantes du contexte de l'étude.

3. Résultats de l'analyse

3.1. Cuivre

3.1.1. ETAT DE L'ART

3.1.1.1. EXTRACTION DE CUIVRE DANS LE MONDE

Le cuivre a toujours été d'une grande importance dans une multitude de secteurs et il représente aujourd'hui le métal lourd non-ferreux le plus utilisé grâce à ses propriétés chimiques et physiques, en particulier sa conductivité électrique et thermique (qui est deuxième seulement après celle de l'argent), sa ductilité exceptionnelle et sa résistance à la corrosion. Les gisements de cuivre font partie de la famille des gisements sulfurés. La composition minéralogique peut varier grandement d'un gisement à un autre, ou même au sein d'un même gisement. Avec les minéraux de cuivre, il est ainsi possible de rencontrer des minéraux d'autres métaux qu'il est souhaitable de récupérer : plomb, zinc, argent, nickel, cobalt, or, platine, etc. Les cathodes de cuivre commercialisées actuellement ont un degré de pureté de 99.95% à 99.97%. Les alliages du cuivre, en particulier avec le laiton et le bronze, sont également particulièrement importants.

Avant l'utilisation finale, le cuivre est manufacturé en « semi-transformés », généralement sous forme de lingots. La plupart des produits semi-transformés nécessite des phases de fabrication ultérieures pour être transformée en tiges, fils, autres formes moulées et pour être ensuite intégrée dans les produits finaux. Les secteurs de l'automobile et de l'immobilier consomment aujourd'hui environ 79% de la demande de cuivre mondiale. Les phases principales de l'exploitation du cuivre, jusqu'à la fabrication de produits semi-finis sont montrées en Figure 8.

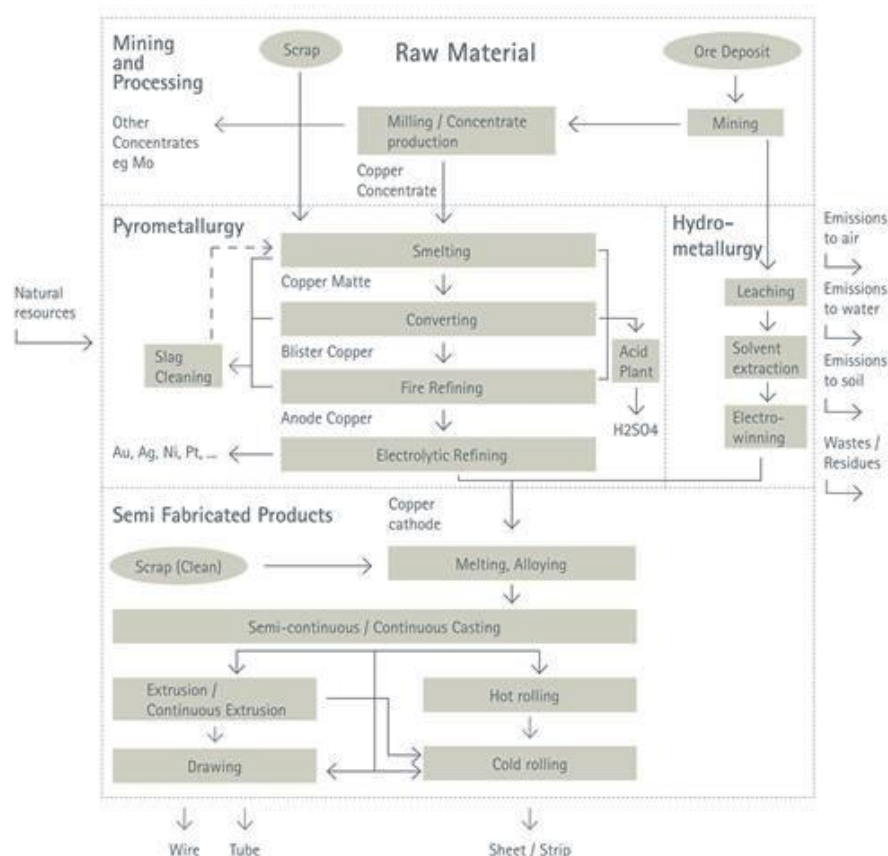


Figure 8. Phases principales de l'exploitation et du traitement du cuivre (European Copper Institute, 2018).

Les principaux pays producteurs de minerais de cuivre et de cuivre métallique sont reportés dans le Tableau 2. Ils ont été établis par E. Marcoux et M. Jebrak en 2015. Il est important de noter qu'ils sont exprimés en milliards de tonnes de minerai brut avant traitement, contenant en moyenne 0.4% de cuivre et qu'ils sont estimés à partir d'une synthèse des ressources géologiques des gisements. D'autres informations intéressantes sont fournies, notamment sur les réservoirs miniers et sur le type de minerai. Les données sont récoltées directement par E-Mines, à partir de différentes sources, indiquées en Annexe A.

Tableau 2. Principaux pays producteurs de minerai de cuivre et cuivre métallique (2015).

PAYS	EXTRACTION CU (KT)	EXTRACTION CU %	RESSOURCES GEOLOGIQUES (MT DE MINERAI BRUT)	PRODUCTION METAL (KT)	MINERAI
CHILI	5,800	28%	47,952	1,496	M + D + O
PEROU	2,400	11%	6,478	328	M + D + O
CHINE	1,600	8%	7,020	5,500	M + D + O
ETATS UNIS	1,200	6%	17,810	527	M + D + O
RDC	950	5%	1,104	-	M + D + O
AUSTRALIE	870	4%	15,029	442	M + D + O
ZAMBIE	780	4%	3,378	649	M + D + O
INDONESIE	780	4%	5,607	200	M + D + O

MEXIQUE	760	4%	3,598	256	M + D + O
RUSSIE	710	3%	5,796	660	M + D + O
CANADA	700	3%	8,975	280	M + D
JAPON	-		-	1,176	
INDE				790	
EUROPE	855	4%	7,471	1,819	M + D
RDM	3,579	17%	29,390	1,577	M + D + O
TOTAL	20,984	100%	159,607	15,700	

M	Massif : sulfures massifs
O	Oxydé : minéralisation oxydée
D	Disséminé : Minéralisation disséminée

Un autre aspect important lié à l'utilisation des matières premières et dans le cadre d'une maximisation de l'économie circulaire est le potentiel de recyclage et par conséquent la disponibilité de matière première secondaire. Un aperçu des flux du cuivre dans ses différentes formes devient donc intéressant.

Le centre de recherche Fraunhofer a publié un article dans le cadre d'un projet ayant pour objectif la description du flux global de cuivre. Le modèle résultant de cet effort est visible en Figure 9. Un flux de « ferraille neuve » (ou « ferraille récupérée ») est issu de la fabrication de produits finaux. Cette ferraille neuve est majoritairement récupérée (environ 80 %) par les usines produisant des produits semi-finis et est directement refondue. Le reste entre dans le système de traitement des déchets, où il est de nouveau séparé entre cuivre et alliages pouvant être directement refondu (10 % du total de la ferraille neuve) et le cuivre ou alliages transformés (10 % également) ainsi que la ferraille en fin de vie avant d'être fondu et raffiné. Des données comparables ont été publiées par des modèles régionaux. La valeur de cette ferraille est généralement élevée car elle est souvent très pure et la composition des alliages est connue de manière précise (Glöser et al., 2013).

Il est donc important de considérer une fraction de cuivre secondaire dans les procédés qui décrivent la production de cuivre raffiné. Selon le modèle considéré, au niveau global, environ 17% du cuivre raffiné est composé de matière première secondaire, tandis que ce pourcentage monte à environ 35% pour les produits semi-finis. Selon l'ICA, le pourcentage de cuivre secondaire dans les produits semi-finis est de 21%.

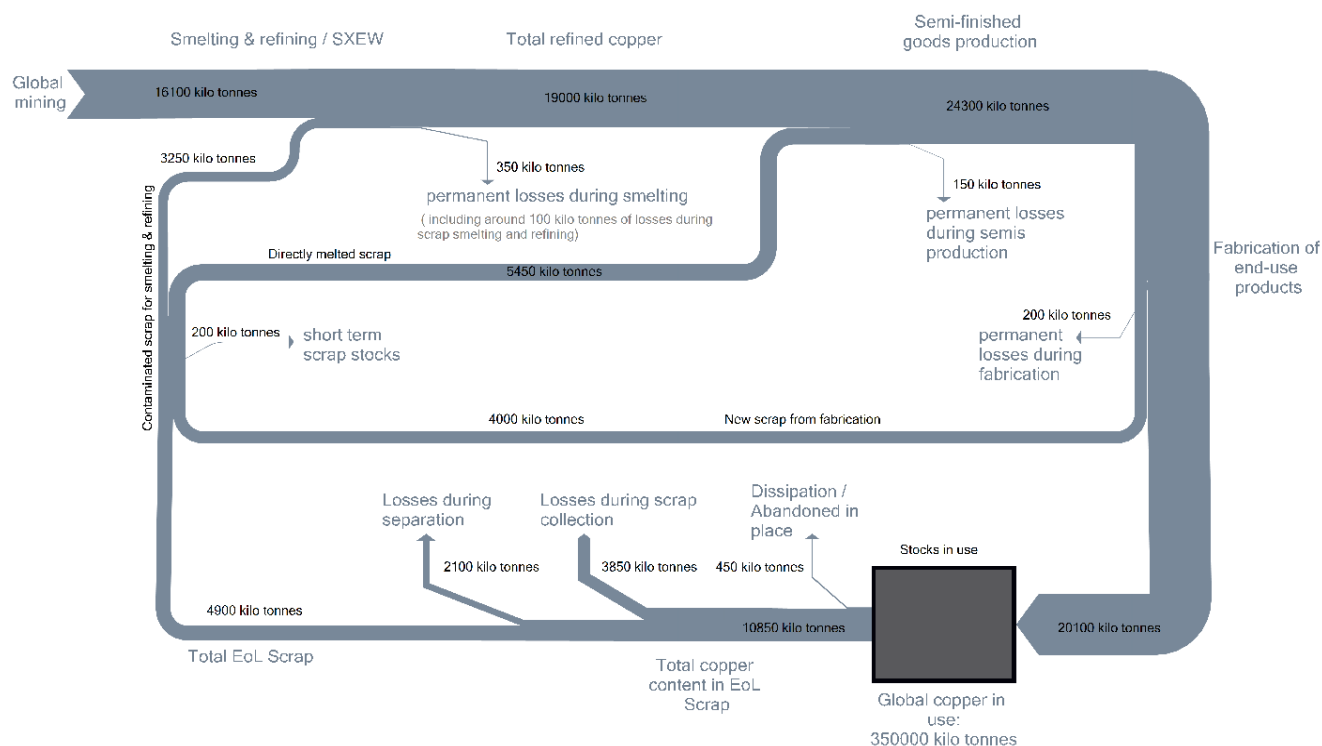


Figure 9. Diagramme de Sankey de tous les flux de cuivre agrégés pour l'année de référence 2010. Source : Glöser et al., (2013).

3.1.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction du cuivre dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 3. Plusieurs procédés sont identifiés pour la production de concentré de cuivre sur ecoinvent. A l'inverse, GaBi ne propose des procédés que pour la production de cuivre raffiné. Parmi les procédés GaBi, deux d'entre eux sont à acheter sur demande.

Tableau 3. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de concentré de cuivre et de cuivre. Les procédés grisés ne sont pas disponibles avec la licence standard des logiciels.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Concentré de cuivre	○ Copper concentrate, sulfide ore {AU} copper mine operation, sulfide ore	Pas de procédé.
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RAS} copper mine operation, sulfide ore	
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RER} copper mine operation, sulfide ore	
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RLA} copper mine operation, sulfide ore	
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RNA} copper mine operation, sulfide ore	
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RoW} copper mine operation, sulfide ore	
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RoW} copper mine operation, sulfide ore	
	○ Copper concentrate, sulfide ore {RoW} copper mine operation, sulfide ore	

Cuivre raffiné	○ Copper {GLO} nickel mine operation, sulfidic ore ○ Copper {RU} platinum group metal mine operation, ore with high palladium content ○ Copper {ZA} platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content ○ Copper {RoW} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ○ Copper {SE} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ○ Copper, from solvent-extraction electro-winning {GLO} copper production, solvent-extraction electro-winning	○ Copper (99.99%; cathode) from pyrometallurgical (including secondary) and hydrometallurgical production GLO ○ Copper mix (99,999% from electrolysis); from electrolysis; consumption mix, to consumer GLO ○ Copper (99.999%; electrolyte copper) production; technology mix; production mix, at plant IN² ○ Copper; from electrolysis; production mix, at plant; 99,999% Cu SE²

▪ ELCD

Le nœud ELCD inclut des procédés qui décrivent la production de produit finis (une plaque, un tuyau et un fil de cuivre), avec les limites du système “cradle-to-grave”, mais avec des données d’inventaires agrégées qui rendent très compliquée l’extraction de l’inventaire relatif aux activités d’extraction.

▪ PEF/OEF

Dans le cadre des pilotes PEF, il existe trois études qui prennent en compte des produits contenant cuivre : “*Batteries and accumulators*”, “*Metal sheets*” et “*Hot and cold-water supply pipes*”. Cependant, ces études ne représentent pas un apport complémentaire pour ce projet car elles décrivent la production de produits finis et les procédés miniers et métallurgiques sont agrégés. En effet, les étapes liées à l’extraction et à l’affinage des métaux sont considérées comme des données d’arrière-plan et proviennent notamment de la base de données GaBi (Eurometaux, 2015).

Dans le cadre des pilotes OEF, une étude fournit une liste exhaustive des intrants et extrants (substances, activités et émissions) à prendre en compte ainsi qu’une indication des procédés à utiliser dans les BDD existantes « *Copper production (OEF)* ». Dans la documentation de ce set de données, si les différentes phases de production sont reportées et les sous-procédés à utiliser sont indiqués, les quantités associées ne sont pas détaillées. De façon similaire, une liste exhaustive des intrants et extrants à prendre en compte est fournie par un document du Product Category Rule (PCR) : “*Copper ores and concentrates*”. Il s’agit pourtant d’un PCR qui est de-registrée validé par Environdec jusqu’à l’année 2017.

3.1.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Comme mentionné précédemment, la littérature ACV du secteur minier est analysée pour vérifier la présence d’éventuelles données d’inventaire complémentaires et pour confronter les informations et les résultats issus des BDD ACV.

9 articles scientifiques portant sur l’ACV du cuivre ont été analysés dans le cadre de cette étude :

- Giurco et al., 2001 - Decision-making to support sustainability in the copper industry: technology selection
- Adachi and Mogi, 2006 - Inventory Analysis of CO₂ Emission for Copper Ingot Production Including Mining and Mineral Processing Processes by Cost Estimating System
- Norgate and Haque, 2007 - Assessing the environmental impact of metal production processes

- Norgate and Haque, 2010 - Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations
- Memary et al., 2012 - Life cycle assessment: a time-series analysis of copper
- Yang et al., 2014 - The life cycle assessment of copper metallurgical process
- Kulczycka et al., 2015 - Environmental Impacts of Energy-Efficient Pyrometallurgical Copper Smelting Technologies: The Consequences of Technological Changes from 2010 to 2050
- Song et al., 2017 - Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway
- Hong et al., 2017 - Life cycle assessment of copper production: a case study in China

Ces différents articles ont été sélectionnés sur la base de critères tels que la qualité scientifique (en privilégiant les publications de rang A), le cas d'étude considéré (en privilégiant les cas d'étude industriels), la présence de données d'ICV ou non et la date de publication.

Pour chacune de ces études, divers aspects méthodologiques ont été décortiqués, tels que :

- Unité fonctionnelle,
- Technologies prises en compte,
- Caractéristiques des ressources,
- Phases du cycle de vie incluses,
- Couverture géographique,
- Disponibilité ou non des inventaires,
- Nature des flux d'inventaire,
- Sources des données,
- Méthode d'allocation mise en œuvre,
- Evaluation des impacts,
- Interprétation des principaux résultats.

3.1.1.4. DONNEES COMPLEMENTAIRES

Des données complémentaires éventuelles ont été recherchées sur le site de l'association de secteur Copper Alliance®. Il s'agit d'un réseau de centres régionaux et d'acteurs industriels principaux dans la filière du cuivre, gérés par l'International Copper Association (ICA).

Des informations intéressantes sur les tonnages, les flux, l'utilisation du cuivre dans les différents secteurs industriels, le développement durable et les données d'inventaire peuvent être retrouvées dans le document "Copper environmental profile" (International Copper Association - Copper Alliance, 2017).

Un extrait du document qui reporte les données d'inventaire est présenté en Figure 10. Pour ces données, les unités fonctionnelles sont : une tonne de cuivre concentré et une tonne de cuivre raffiné. Les données d'avant-plan font référence à l'année 2013, tandis que les données d'arrière-plan vont de 2010 à 2013. Selon la Copper Alliance, le set de données inclut la production de quatre continents et représente 21% de la production annuelle mondiale de cuivre concentré pour l'année de référence 2013. Le point faible de ce set de données pour l'intérêt de notre étude est le manque de données d'inventaires relatives à l'activité d'extraction véritable, car le périmètre est limité au traitement des minerais.

Life Cycle Inventory

LCI is a key step in the LCA process. The LCI catalogues all the environmental inputs and outputs of a product system. Data may be collected firsthand from measurements and estimates of key activities, or the data may be based on information drawn from existing LCI databases.

For the global LCI on copper cathode, specific primary data for the study was provided by member companies of the International Copper Association and modeled using GaBi 2014 databases. The dataset includes production from four continents and represents 21 percent of the annual world production volume of copper cathode for the reference year 2013.

An excerpt of the complete LCI can be found in Table 1. Results are shown for copper cathode and copper concentrate, the main upstream material used to produce primary copper metal.

Type	Flow	Concentrate (28% Cu)	Cathode	Unit
Energy resources	Crude oil	4,700	15,000	MJ
	Hard coal	4,800	17,000	MJ
	Lignite	580	2,600	MJ
	Natural gas	2,700	11,000	MJ
	Uranium	200	1,500	MJ
	Primary energy from hydro power	1,100	2,800	MJ
	Primary energy from solar energy	290	950	MJ
	Primary energy from wind power	130	450	MJ
Material resources	Copper ore – Hydro route (0.4% Cu, avg.)	-	81,000	Kg
	Copper ore – Pyro route (0.6% Cu, avg.)	40,000	85,000	Kg
	Limestone	58	150	Kg
	Sand	0.6	190	Kg
	Water use (input)	850,000	2,100,000	Kg
	Secondary copper containing materials (Cu content variable)	-	210	Kg
Deposited goods	Overburden	2,100	6,300	Kg
	Slag	-	300	Kg
	Tailings	29,000	47,000	Kg
	Tailings (leaching)	-	110,000	Kg
	Waste rock	59,000	180,000	Kg
	Waste (deposited)	9.0	130	Kg
	Hazardous waste (deposited)	0.0029	0.0030	Kg
Emissions to air	CO ₂	990	3,800	Kg
	CH ₄	1.7	6.5	Kg
	N ₂ O	0.13	0.36	Kg
	NO _x	4.3	17	Kg
	SO ₂	4.9	43	Kg
	NM VOC	0.54	1.8	Kg
	CO	1.8	12	Kg
	Dust (> PM10)	0.098	0.36	Kg
	Dust (PM10)	1.3	2.0	Kg
	Dust (PM2.5 - PM10)	0.20	0.64	Kg
	Arsenic	0.00015	0.14	Kg
	Copper	0.00050	0.0011	Kg
	Lead	0.00038	0.0021	Kg
	Zinc	0.0011	0.0029	Kg
Emissions to water	Ammonium/ammonia (NH ₄ ⁺ / NH ₃)	0.021	0.069	Kg
	Nitrate (NO ₃ ⁻)	0.10	0.38	Kg
	Phosphate (PO ₄ ³⁻)	0.011	0.031	Kg
	Biological Oxygen Demand	0.017	0.10	Kg
	Chemical Oxygen Demand	2.2	7.2	Kg
	Arsenic	0.00068	0.0078	Kg
	Copper	0.0010	0.0026	Kg
	Lead	0.00067	0.0017	Kg
	Zinc	0.00023	0.00081	Kg



Figure 10. Inventaire relatif à la production de cuivre concentré et raffiné. Source : Copper Alliance, 2018.

D'autres sources ont été examinées, notamment certains projets financés par l'Union Européenne. Les projets pertinents identifiés sont les suivants :

- SUPRIM ;
- ERA-MIN ;
- ITERAMS.

Malheureusement aucun projet ne fournit à présent d'information sur les inventaires qui pourraient être utilisés dans le cadre de cette étude. Cependant, ces projets sont des apports intéressants dans le domaine de l'exploitation des matières premières. Pour cette raison une brève description des trois projets est présentée en Annexe .

3.1.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.1.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les sets de données complets relatifs aux activités minières du cuivre dans le cadre d'une analyse ACV recensés sont les suivants :

- Ecoinvent fournit 12 procédés unitaires concernant la production de concentré de cuivre et de cuivre raffiné dont la consultation est gratuite, mais les données sont agrégées, autrement il faut consulter la BDD payante ;
- GaBi fournit 4 procédés de la production de cuivre raffiné avec une documentation générale gratuite, même si la consultation de l'inventaire est payante ;
- ELCD/PEF ne présente pas de sets de données pour l'exploitation du cuivre.

En premier lieu il est à noter que les frontières des systèmes sont différentes selon les procédés recensés (Figure 11). En effet, certains modélisent la production de cuivre concentré et d'autres la production de cuivre raffiné selon des méthodes différentes (pyrométallurgie ou hydrométallurgie).

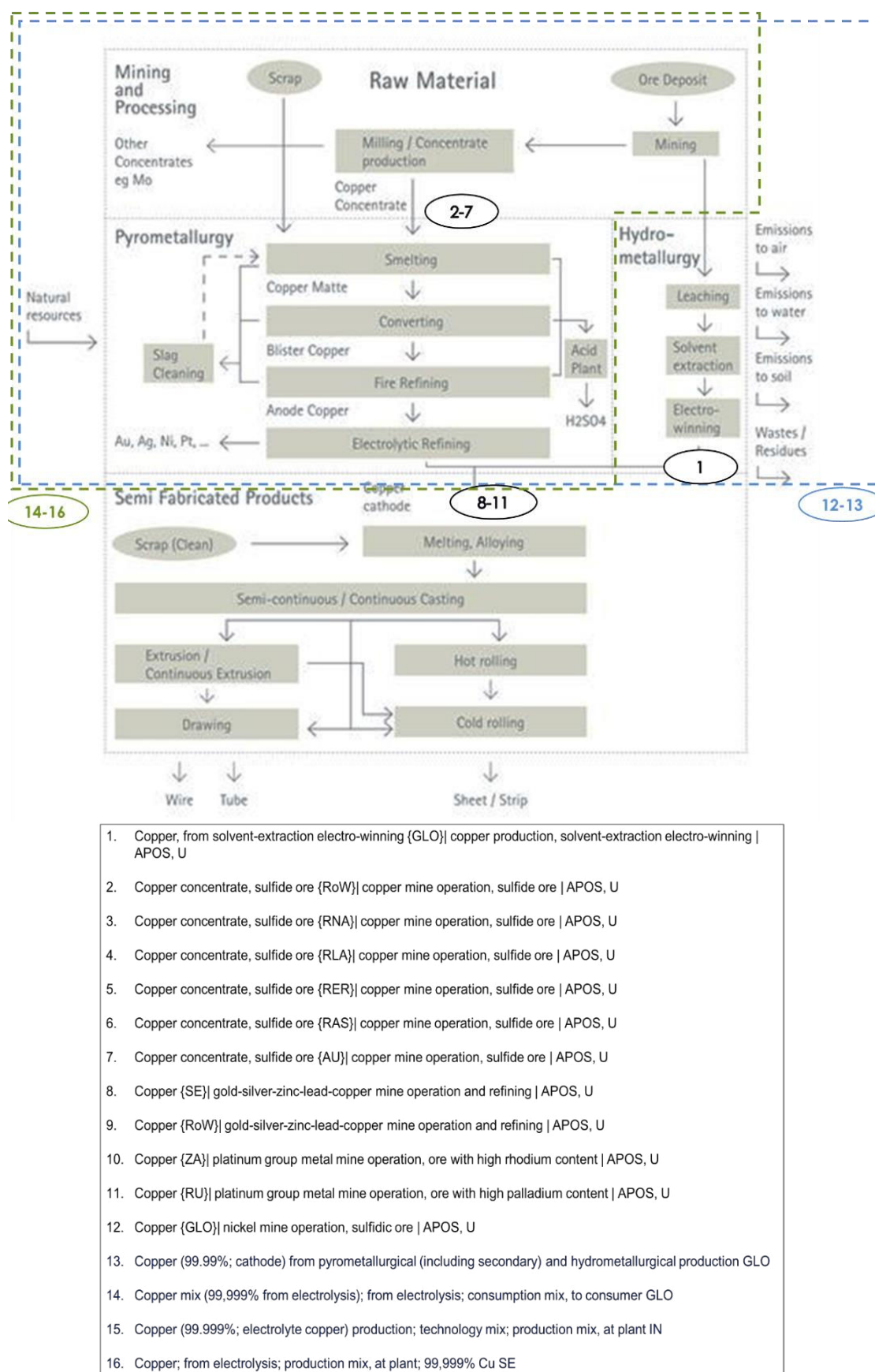


Figure 11. Limites du système des différents procédés relatifs aux activités minières du cuivre dans les BDD Ecoinvent et GaBi.

La liste d'intrants des inventaires d'ecoinvent décrivant l'exploitation matière du cuivre est visible en Figure 12. Les procédés Gabi ne sont pas comparés aux inventaires ecoinvent dû au fait que les inventaires sont présentés de manière désagrégée. Une comparaison des quantités dans les différentes couvertures géographiques est également présentée, avec la région européenne (RER) utilisée comme référence (100%). Toutes les autres régions ont des quantités d'intrants et d'extrants plus importantes par rapport à l'Europe. Cet aspect est confirmé en outre par le Tableau 4, qui se concentre sur la consommation énergétique, et incluant les procédés décrivant la production de cuivre raffiné.

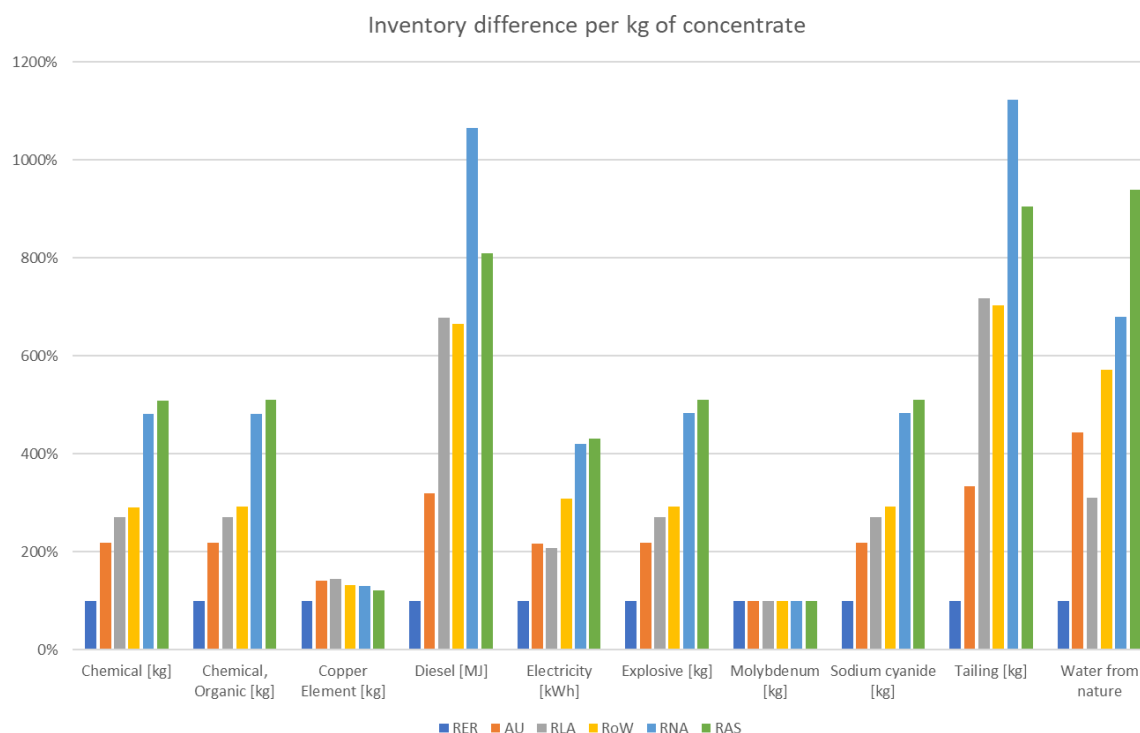


Figure 12. Liste et quantité relative des intrants et des extrants dans les procédés ecoinvent pour le cuivre concentré (avec en référence le procédé RER).

Tableau 4. Consommation énergétique pour l'exploitation minière de cuivre dans ecoinvent. Les procédés en bleu indiquent la production de concentré. Les procédés en noir indiquent la production de cuivre raffiné.

	Elément Cu	Diesel	Electricité
Unité (/ kg de concentré ou de cuivre raffiné)	kg	MJ	kWh
Copper {GLO} nickel mine operation, sulfidic ore APOS, U	0,2611	4,5131	5,8952
Copper {RoW} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining APOS, U	0,9812	1,0732	5,9609
Copper {RU} platinum group metal mine operation, ore with high palladium content APOS, U	0,3821	0,7406	2,8227
Copper {SE} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining APOS, U	0,9813	1,0732	5,9611
Copper {ZA} platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content APOS, U	0,0343	5,8181	6,5342
Copper concentrate, sulfide ore {AU} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	0,2964	0,0011	0,5292
Copper concentrate, sulfide ore {RAS} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	0,2538	0,0027	1,0500
Copper concentrate, sulfide ore {RER} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	0,2095	0,0003	0,2437

Copper concentrate, sulfide ore {RLA} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	0,3050	0,0022	0,5083
Copper concentrate, sulfide ore {RNA} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	0,2724	0,0035	1,0251
Copper concentrate, sulfide ore {RoW} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	0,2763	0,0022	0,7504
Copper, from solvent-extraction electro-winning {GLO} copper production, solvent-extraction electro-winning APOS, U	1,4002	8,1371	8,4015

Un aspect intéressant à analyser est la corrélation entre certains éléments d'inventaire et les émissions de CO₂ eq. des procédés des BDD. En particulier, les consommations d'électricité, de diesel et d'agents chimiques ont été prises en compte (Figure 13, Figure 14 et Figure 15), en montrant, comme attendu, une forte corrélation dans le cas de l'électricité, une bonne corrélation dans le cas du diesel et pas de corrélation dans le cas des agents chimiques. L'écart de corrélation pour certaines régions géographiques est dû principalement au mix énergétique des différentes régions.

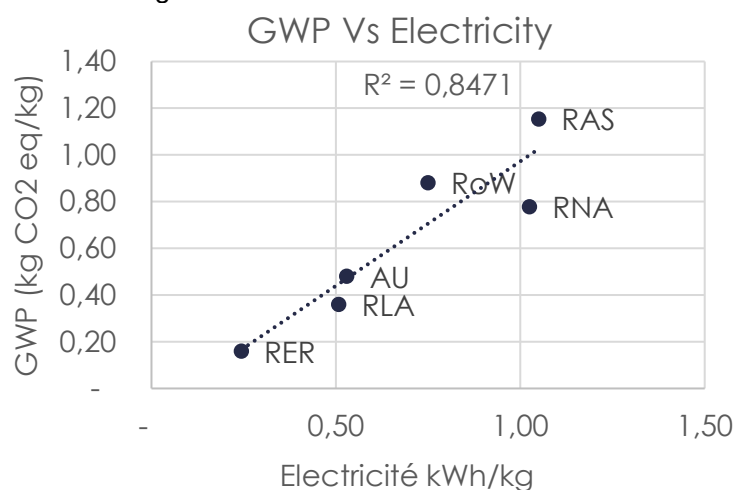


Figure 13. Corrélation entre la consommation électrique et les émissions de CO₂ eq. des procédés d'exploitation de cuivre concentré dans ecoinvent.

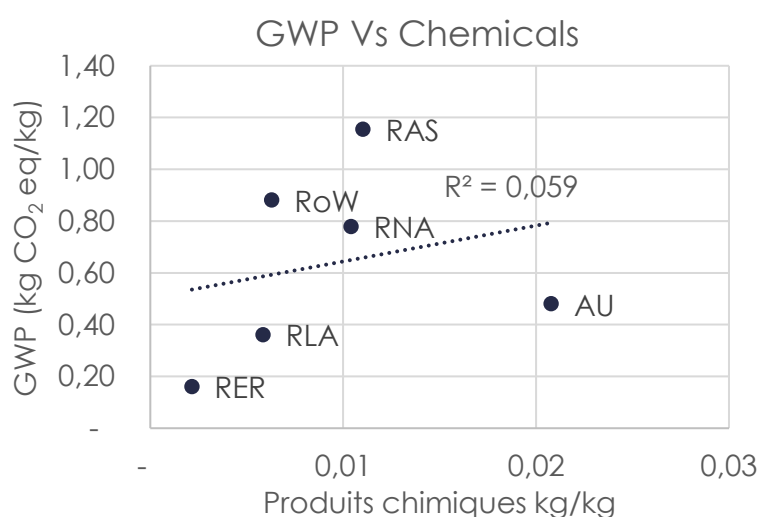


Figure 14. Corrélation entre la consommation d'agents chimiques et les émissions de CO₂ eq. des procédés d'exploitation de cuivre concentré dans ecoinvent.

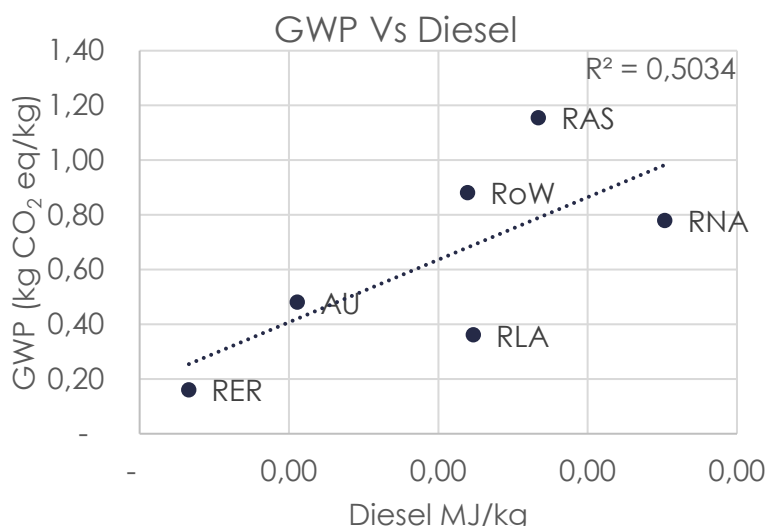


Figure 15. Corrélation entre la consommation de diesel et les émissions de CO₂ eq. des procédés d'exploitation de cuivre concentré dans ecoinvent.

Il peut également être intéressant et utile d'analyser le procédé global d'ecoinvent « market for » pour la production de cuivre primaire. Le procédé date de 2011 et il inclut différents sous-procédés qui décrivent la production de cuivre dans différents pays et avec différentes méthodes, alloués selon une photographie du marché. Différents transports sont inclus également. Les parts de marché des procédés de production de cuivre raffiné au sein du procédé global « market for » sont reportées sur la Figure 16. Ces valeurs représentent la part (en masse) du cuivre raffiné. Pour le procédé *Copper, from solvent-extraction electro-winning {GLO}* une estimation est réalisée en considérant tous les procédés inclus dans les processus "Copper production, primary {...}" au sein de la donnée « market » du cuivre.

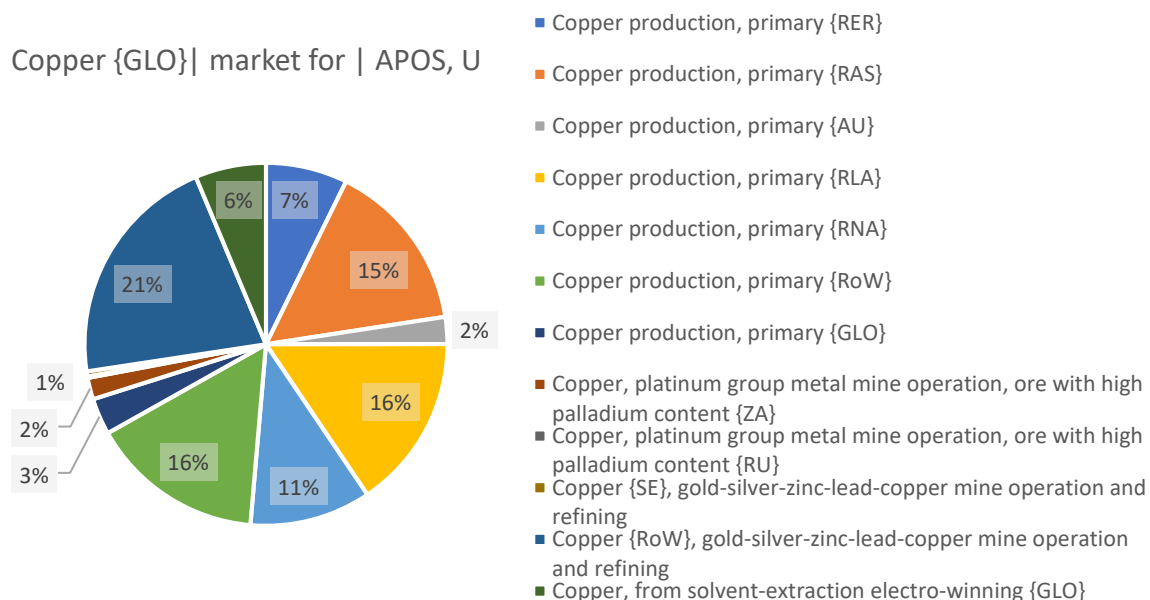


Figure 16. Parts de marché au sein du set de données "market" du cuivre (EI).

D'autre part, une comparaison entre certaines des catégories d'impact de la méthode EF est présentée sur la Figure 17. Les résultats ainsi présentés concernent les différents procédés globaux ({GLO} et {RoW}) décrivant la production de cuivre raffiné. Contrairement aux autres

procédés, la donnée « market » inclut également les transports, mais une analyse plus approfondie montre que l'impact des transports est presque négligeable (représentant moins de 1% de l'impact total). L'impact de tous les procédés est également analysé pour le réchauffement climatique sur la Figure 18.

Enfin, la contribution des matières premières à l'appauvrissement des ressources est analysée sur la Figure 19. Il est possible de remarquer que le cuivre n'est pas toujours le contributeur majeur à cette catégorie d'impacts. En effet, pour la modélisation des mines impliquant plusieurs coproduits telles que les mines or-argent-zinc-plomb-cuivre ou les mines de platinoïdes, les autres métaux contribuent largement aux impacts environnementaux à cause du facteur d'allocation appliqué à la production du cuivre.

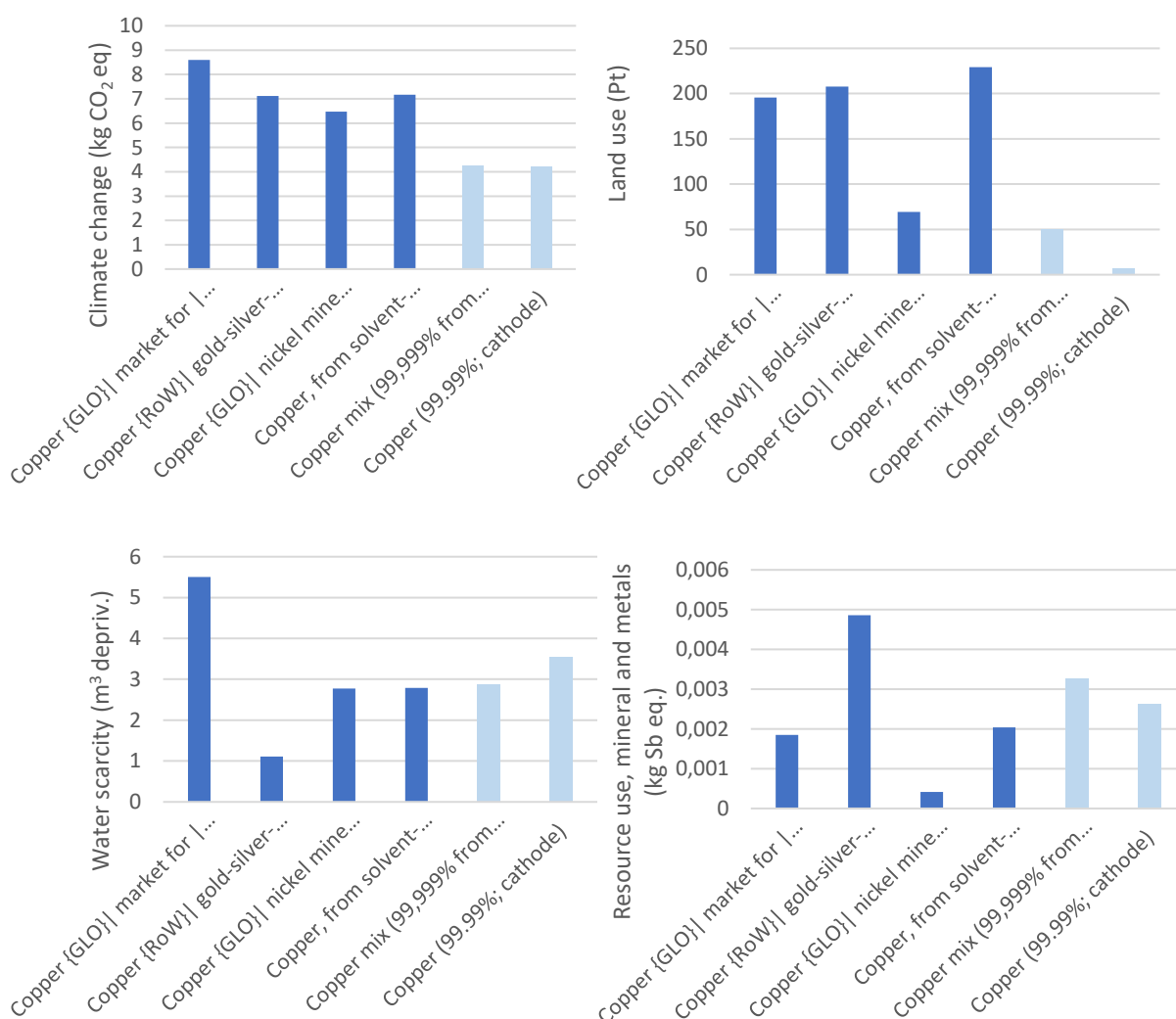


Figure 17. Evaluation des impacts du cycle de vie de différents procédés globaux présents dans les BDD ecoinvent (en bleu foncé) et GaBi (en bleu clair). L'unité fonctionnelle est la production d'1 kg de cuivre raffiné.

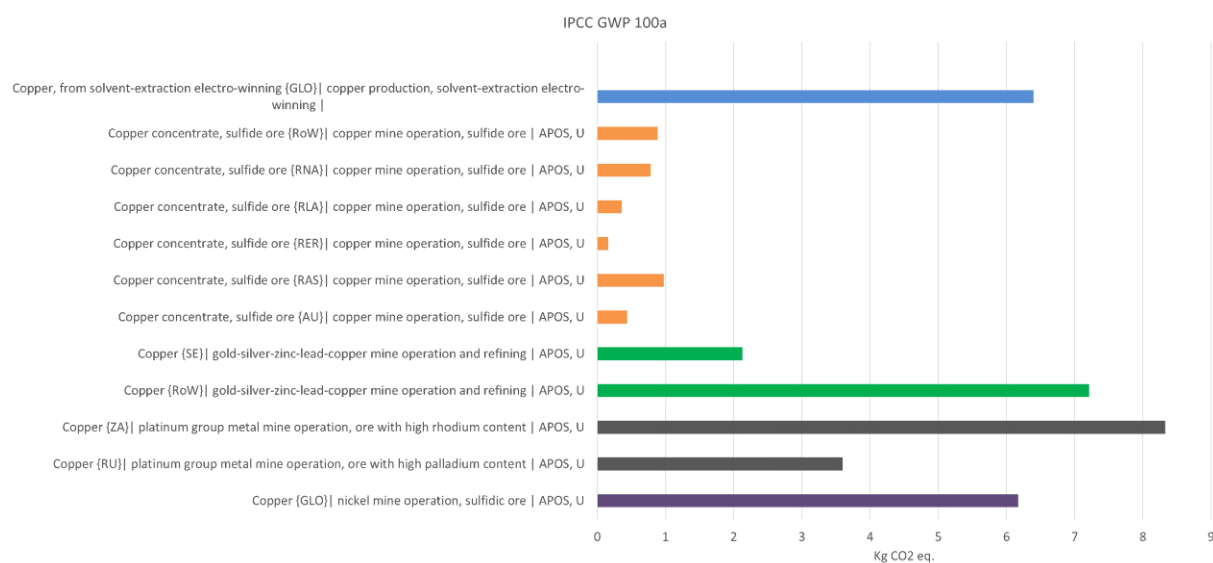


Figure 18. Emissions de CO₂ eq. selon IPCC GWP (100a) des différents procédés relatifs aux activités minières du cuivre dans la BDD Ecoinvent. L'unité fonctionnelle correspond à la production d'1 kg de cuivre raffiné ou concentré.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

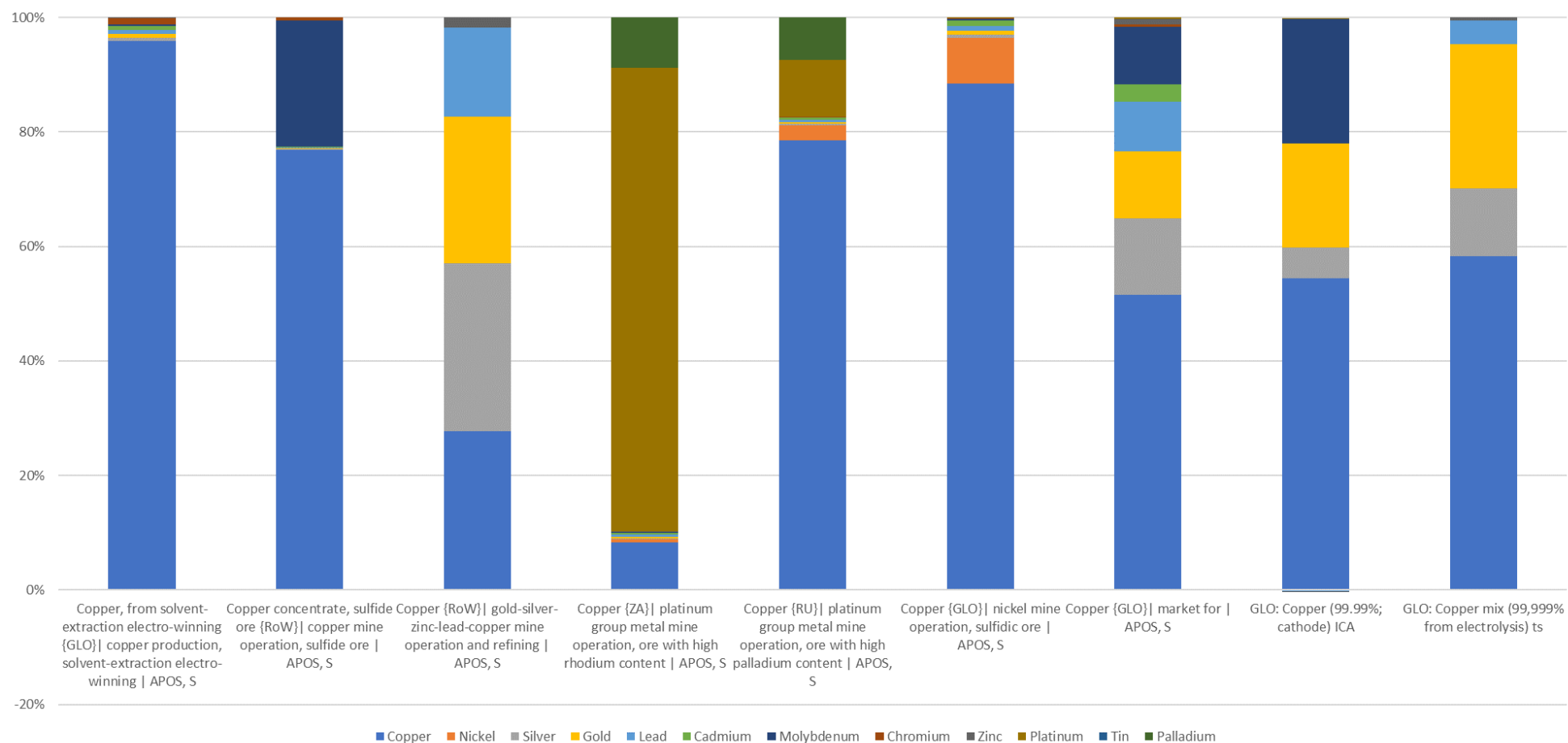


Figure 19. Contribution des matières premières à l'appauvrissement des ressources liée à la production de cuivre. Les sept premières barres correspondent aux procédé ecoinvent. Les deux dernières barres correspondent aux procédés GaBi.

3.1.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 6 propose une rapide description des différentes publications sur le cuivre analysées au cours de cette étude, avec pour chaque étude une description de l'unité fonctionnelle considérée, la couverture géographique, la mise en œuvre ou non d'une procédure d'allocation, la disponibilité de l'inventaire du cycle de vie (ICV) et enfin la source des données (le cas échéant). L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B. Ainsi, parmi toutes les études considérées, trois se focalisent sur la production d'un concentré (Norgate and Haque, 2010 ; Mearns et al., 2012 ; Song et al., 2017), tandis que toutes les autres considèrent plutôt le cuivre raffiné en tant qu'unité fonctionnelle.

En termes de couverture géographique, la littérature ACV est légèrement plus vaste en comparaison des BDD ACV (ex : Pologne, Norvège), l'Australie et la Chine étant les 2 pays les plus représentés. En revanche, certains des pays producteurs de cuivre majeurs ne sont pas représentés, tels que le Chili (ou plus globalement l'Amérique du Sud) par exemple.

Par ailleurs, quatre des études analysées mettent à disposition leurs ICV qui peuvent éventuellement constituer des potentielles sources de données en compléments/substituts des BDD ACV existantes : Norgate and Haque (2010), Yang et al. (2014), Song et al. (2017), Hong et al. (2017). Par ailleurs, ces trois dernières études proposent des données d'inventaires issues de sources primaires spécifiques aux cas d'études considérés (données chinoises et norvégiennes). Le Tableau 5 présente quelques valeurs d'empreinte carbone issues des différents cas d'études de la littérature ACV.

Tableau 5. Valeurs d'empreinte carbone de la production de cuivre (concentré ou métal) issues de la littérature.

Cas d'études considéré	Empreinte carbone (t CO ₂ eq/t Cu conc ou raffiné)	Brève description
Norgate and Haque, 2010 (Australie)	0.63	Concentré de cuivre en Australie
Song et al., 2017 (Norvège)	0.69	Concentré de cuivre en Norvège
Giurco et al., 2001 (Pyro - Monde)	15	Cuivre raffiné par voie pyrométallurgique au niveau mondial
Giurco et al., 2001 (Hydro - Monde)	20	Cuivre raffiné par voie hydrométallurgique au niveau mondial
Norgate and Haque, 2007 (Pyro - Australie)	3.3	Cuivre raffiné par voie pyrométallurgique en Australie
Norgate and Haque, 2007 (Hydro - Australie)	6.2	Cuivre raffiné par voie hydrométallurgique en Australie
Yang et al., 2014 (Pyro - Chine)	9.02	Cuivre raffiné par voie pyrométallurgique en Chine
Yang et al., 2014 (Hydro - Chine)	3.08	Cuivre raffiné par voie hydrométallurgique en Chine
Hong et al., 2017 (Pyro - Chine)	1.91	Cuivre raffiné par voie pyrométallurgique en Chine

Les Figure 20 et Figure 21 comparent les valeurs d'empreinte carbone respectivement associées à la production de concentré de cuivre et de cuivre raffiné issues de la littérature scientifique ACV ainsi que des différentes BDD ACV (ecoinvent et Gabi). Par souci de

représentation, toutes les valeurs disponibles n'ont pas été affichées sur ces deux graphiques, seules celles provenant des études les plus pertinentes ont été conservées.

Concernant la production de concentré de cuivre, les valeurs obtenues dans la littérature et dans ecoinvent présentent des ordres de grandeur relativement similaires, variant de 0,2 à environ 1,1 t CO₂ eq / t concentré.

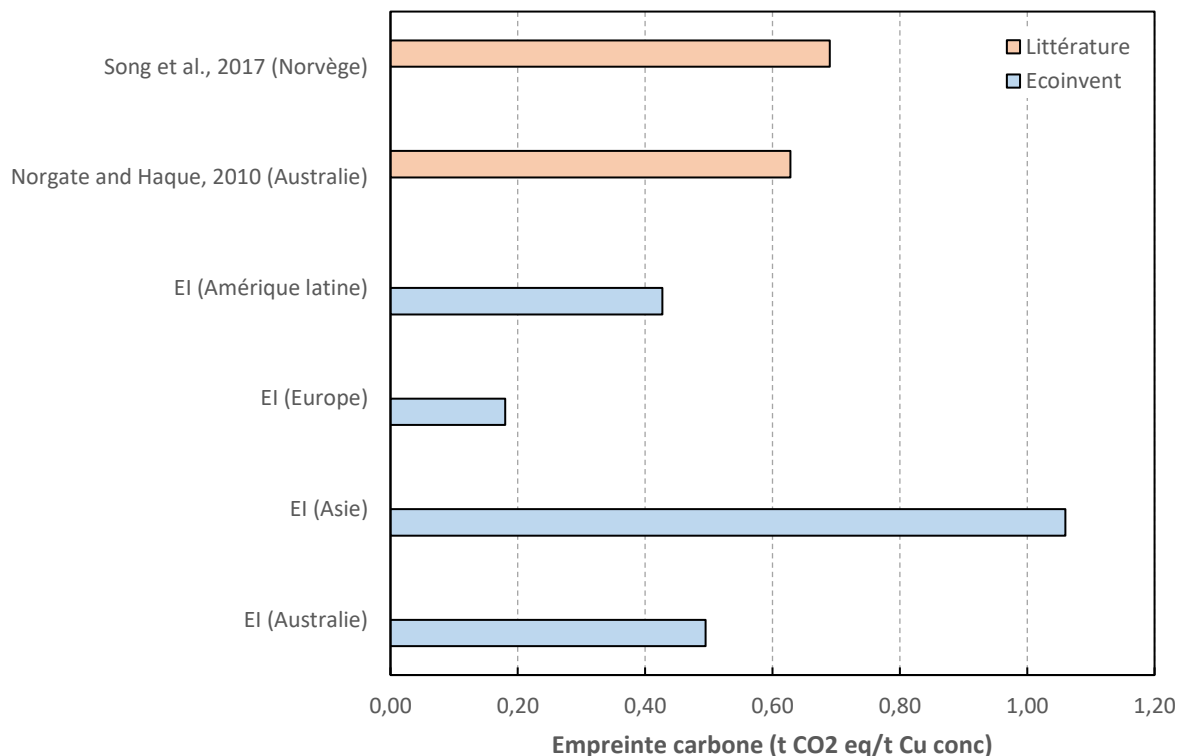


Figure 20. Empreinte carbone de la production de concentré de cuivre issue de la littérature et d'ecoinvent.

Concernant la production de cuivre raffiné, outre les couvertures géographiques différentes, il est possible de distinguer 2 voies de production au travers des différentes études analysées : la voie pyrométallurgique et la voie hydrométallurgique. Globalement, les valeurs obtenues dans la littérature et dans les BDD ACV présentent des ordres de grandeur relativement similaires en termes d'empreinte carbone, à une exception près : la publication de Giurco et al. (2001) présente des valeurs qui sont bien plus élevées que les autres (respectivement 15 et 20 t CO₂ eq / t Cu raffiné par voie pyro et hydro, contre moins de 10 t CO₂ eq pour toutes les autres sources). Cela peut être vu comme un scénario extrême (ou scénario du pire) dans la mesure où les auteurs considèrent une hypothèse de mix énergétique 100% charbonnée.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

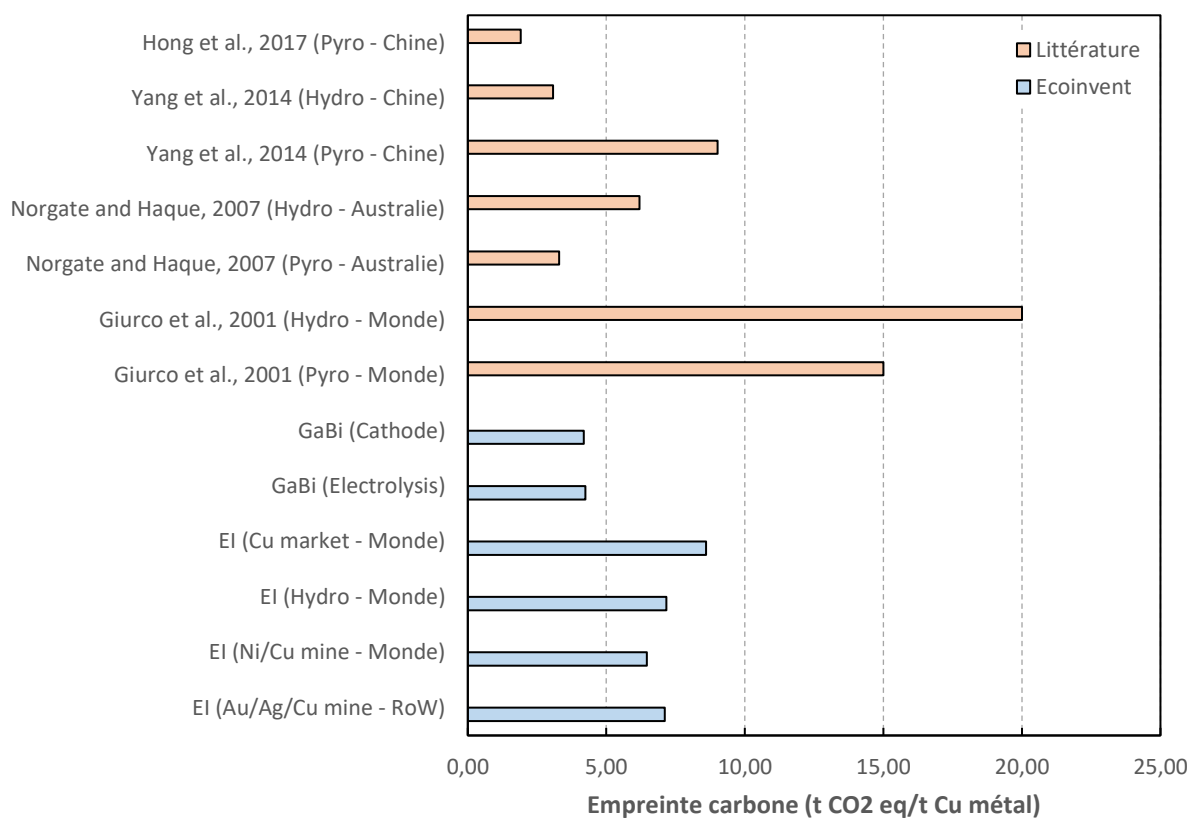


Figure 21. Empreinte carbone de la production de cuivre raffiné issue de la littérature et des BDD ACV (ecoinvent/Gabi).

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 6. Revue de littérature ACV de la production de cuivre – description des différentes études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit – fonctionnelle	Unité	Couverture géographique	Allocation	ICV ?	Source des données
Giurco et al. <i>Decision-making to support sustainability in the copper industry: technology selection</i>	2001	Métal raffiné « 1 tonne of refined copper »		Monde	/	Non	/
Adachi and Mogi <i>Inventory Analysis of CO2 Emission for Copper Ingot Production Including Mining and Mineral Processing Processes by Cost Estimating System</i>	2006	Métal raffiné « 1 kg of Cu ingot »		Japon	/	Non	/
Norgate and Haque <i>Assessing the environmental impact of metal production processes</i>	2007	Métal raffiné « 1 kg of refined metal »		Australie	/	Non	/
Norgate and Haque <i>Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations</i>	2010	Concentré « 1 tonne of ore or concentrate ready for ship loading »		Australie	/	Oui	Données publiques (littérature)
Memary et al. <i>Life cycle assessment: a time-series analysis of copper</i>	2012	Concentré et métal raffiné « One tonne of refined copper for mines with smelters, or one tonne of copper in concentrate for mines without smelters »		Australie	/	Non	/
Yang et al. <i>The life cycle assessment of copper metallurgical process</i>	2014	Métal raffiné « 1 ton of refined copper »		Chine	/	Oui	Données primaires de « Zijin Mining Group » et BDD « PE »
Kulczycka et al. <i>Environmental Impacts of Energy-Efficient Pyrometallurgical Copper Smelting Technologies: The Consequences of Technological Changes from 2010 to 2050</i>	2015	Métal raffiné « 1 metric ton of refined Cu »		Pologne	Substitution	Non	/

Song et al. <i>Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway</i>	2017	Concentré « 1 kg of copper in concentrate »	Norvège	Economique	Oui	Données primaires de « Nussir ASA »
Hong et al. <i>Life cycle assessment of copper production: a case study in China</i>	2017	Métal raffiné « 1 ton of copper »	Chine	Massique	Oui	Données primaires de sites de production chinois

3.1.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Concernant les bases de données, la représentativité géographique par rapport aux producteurs majeurs de minerais de cuivre n'est pas optimale (Tableau 7). Parfois certains pays sont représentés uniquement à l'intérieur d'une région avec une étendue beaucoup plus importante, comme notamment dans le cas du Chili et du Pérou qui sont inclus dans le procédé ecoinvent pour l'Amérique Latine. La Chine aussi est incluse dans la région asiatique, même si la part de mix énergétique chinois est prépondérante dans ce procédé. Le seul pays représenté plus précisément est l'Australie, qui ne produit que 4% du cuivre mondial.

Tableau 7. Représentativité géographique de l'exploitation minière de cuivre dans les BDD ACV.

<i>Pays/Zone géographique</i>	<i>Production</i>	<i>BDD</i>	<i>Autres matières premières</i>	<i>Coproduits BDD</i>	<i>BDD</i>
Chili	28%	✓ (Amérique latine)	Mo, Au	Mo	EI
Pérou	11%	✓ (Amérique latine)	Mo, Au, Pb, Zn, Ag	Mo	EI
Chine	8%	✓ (Asie)	Mo, Au, Pb, Zn, Ag, Ni	Mo	EI
Etats Unis	6%	✓ (Amérique du Nord)	Mo, Au, Pb, Zn, Ag, Ni, Pt	Mo	EI
RDC	5%	× (Reste du monde)	Co, U	Mo (concentrate)/Au, Pb, Ag, Zn (refined)	EI
Australie	4%	✓	Au, Pb, Zn, Ag, U	Mo	EI
Zambie	4%	× (Reste du monde)	Co	Mo (concentrate)/Au, Pb, Ag, Zn (refined)	EI
Indonésie	4%	✓ (Asie)	Mo, Au	Mo	EI
Mexique	4%	✓ (Amérique latine)	Mo, Au, Pb, Zn, Ag	Mo	EI
Europe	4%	✓	Au, Pb, Zn, Ag, Ni	Mo	EI
Russie	3%	✓	Mo, Au, Ni, Pt	Ni, Pd, Pt, Rh	EI
Canada	3%	✓ (Amérique du Nord)	Mo, Au, Pb, Zn, Ag, Ni, Pt	Mo	EI
RdM	17%	-	Mo, Au, Pb, Zn, Ag, Ni, Pt	Mo (concentrate)/Au, Pb, Ag, Zn (refined)/Mo, precious metals and other co-products (GaBi)	EI, GaBi

Cette représentativité partielle des BDD ACV pour les activités minières liées au cuivre ne se retrouve pas seulement dans la couverture géographique : certains inventaires peuvent être moins complets par rapport à d'autres, tout en ayant une dénomination similaire. En

général, les modèles disponibles simplifient la variété de mines et des méthodes d'exploitation existantes.

Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée jusqu'aux années 2000-2005 (fourchette de dates plus récentes). En général, cette obsolescence n'est pas préoccupante car l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible. Cependant, l'exploitation croissante rend les matières premières de moins en moins accessibles, ce qui demandera plus d'effort pour l'extraction. De plus, certaines technologies sont en plein essor. A terme, elles risquent de jouer un rôle important car elles offrent l'avantage d'un coût de traitement et d'un impact environnemental très faibles.

Enfin, les périmètres des différents sets de données peuvent différer. L'écart d'impact environnemental entre les différents procédés (Figure 18) est dû à la divergence des techniques utilisées et de couverture géographique, mais surtout aux différentes limites du système (Figure 11).

Les différentes limites identifiées et les considérations relatives à la modélisation du cuivre via les bases de données sont résumées dans le Tableau 8.

Tableau 8. Exploitation minière du cuivre dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques
Accès aux données et transparence	▪ Dans les BDD gratuites les informations disponibles ne sont pas substantielles. ▪ Consultation publique des BDD payantes (EI, GaBi) permet d'accéder aux spécificités de l'inventaire agrégé ou simplement aux informations supplémentaires. ▪ Documentation non standardisée. ▪ Littérature avec données d'inventaire qui pourraient être utilisées comme complémentaires. ▪ Autres sources : en général, pas d'informations profitables pour améliorer la robustesse des BDD ACV.
Représentativité	▪ Couverture géographique partielle par rapport aux principaux pays qui exploitent les mines de cuivre (voir Tableau 7).
Allocation	▪ EI : La modélisation du système choisie est la méthode « APOS » (Allocation at the point of substitution). Cette méthode utilise la production moyenne et préfère l'allocation économique. Il est difficile d'extrapoler l'allocation spécifique utilisée dans chaque procédé unitaire, car les chiffres reportés dans les flux d'inventaire sont déjà alloués. ▪ GaBi : modélisation attributionnelle uniquement (sans allocation ou allocation économique).
Obsolescence	▪ Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée jusqu'aux années 2000-2005 (fourchette de dates plus récentes). En général, l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible. ▪ Cependant, l'exploitation croissante rend les matières premières de moins en moins accessibles, ce qui demandera plus d'effort pour l'extraction (par exemple en termes de consommation énergétique). ▪ Certaines technologies en plein essor risquent de jouer à termes un rôle important, car elles offrent l'avantage d'un

	coût de traitement et d'un impact environnemental très faibles.
Complétude et étendue	▪ Certains inventaires des BDD peuvent être moins complets par rapport à d'autres, tout en ayant une dénomination similaire. ▪ En général, les modèles simplifient la variété de mines et des méthodes d'exploitation existants.
Vraisemblance	▪ D'après une confrontation avec la littérature et d'après une interrogation d'un expert du secteur (E-Mines) il semble que les inventaires des BDD ACV puissent être considérés vraisemblables (évaluation par ordre de grandeur).

3.1.3. RECOMMANDATIONS

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations. Pour le moment, les scénarios représentés dans les BDD sont les suivants :

- Extraction de cuivre concentré en Europe, Australie, Asie, Amérique du Nord, Amérique Latine et reste du monde,
- Production de cuivre raffiné par électrolyse (pyrométallurgie) dans le monde, en Inde et en Suède,
- Production de cuivre raffiné par électrowinning (hydrométallurgie) dans le monde,
- Production de cuivre raffiné par hydrométallurgie et pyrométallurgie dans le monde,
- Production de cuivre raffiné par voie non spécifiée en Suède, Afrique du Sud, Russie et dans le reste du monde.

Comme montré lors de l'analyse de l'état de l'art, les procédés ne sont pas tous totalement fiables et représentatifs du scénario qu'ils décrivent. En général, il est possible d'affirmer que, si la chaîne des fournisseurs du cuivre utilisées dans la chaîne de production n'est pas bien connue, l'utilisation des procédés ACV de la BDD écoinvent avec couverture géographique globale représente un choix suffisamment fiable, qui modélise la réalité en prenant en compte les différents sets de données actuellement disponibles. Des couvertures géographiques différentes et des typologies de mines et de minerais différentes sont donc incluses lors de la modélisation des procédés globaux. Néanmoins, la méthode d'allocation utilisée pour prendre en compte l'impact des différents sous procédés n'est pas transparente.

La recherche d'informations dans la littérature scientifique et autres sources, comme les associations de secteurs et les projets en cours, a permis d'identifier des données d'inventaires globalement plus récentes (et parfois plus spécifiques et complètes).

Les informations extraites de la littérature permettent surtout une validation partielle des BDD existantes, car les impacts potentiels des activités d'exploitation analysées sont du même ordre de grandeur que les impacts calculés en utilisant les BDD ACV existantes. Cependant, les BDD ACV sont associées à des impacts potentiels globalement mineurs.

Si le pourcentage réel de la consommation de cuivre secondaire n'est pas connu, il est possible d'utiliser une valeur comprise entre 21% et 35%, selon le scénario considéré. En effet, ce sont les pourcentages de produits semi finis composés de matière première

secondaire, selon ICA et - Glöser et al., (2013), respectivement. Gloser et al., (2013) ont estimé cette donnée dans le cadre d'un projet de l'institut de recherche Fraunhofer pour décrire le flux global du cuivre.

3.2. Aluminium

3.2.1. ETAT DE L'ART

3.2.1.1. EXTRACTION DE LA BAUXITE DANS LE MONDE

L'aluminium est un métal relativement jeune car son utilisation commerciale a commencé il y a seulement 150 ans. Néanmoins, il est produit actuellement en plus grandes quantités que n'importe quel autre métal non-ferreux. L'aluminium est l'un des métaux les plus utilisés dans le transport, la construction (toiture, revêtements muraux, fenêtres et portes), les emballages (canettes, aérosols, feuilles et briques) et dans le secteur électrique. Dans tous ces secteurs, il est apprécié pour sa légèreté, résistance, durabilité, flexibilité, imperméabilité, conduction thermique et électrique ainsi que sa non-corrosivité.

Le minerai primaire utilisé pour la fabrication de l'aluminium est la bauxite. La bauxite est non-toxique. Environ 85 % de la bauxite est affinée en alumine (ou produits chimiques dérivés), qui est ensuite fondue en aluminium. 8% servent à la production de dérivés d'alumine et 7% sont utilisés pour la fabrication d'abrasifs, réfractaires, agents de soutènement et dans le ciment. Selon la qualité du minerai, 4 à 6 tonnes de bauxite sont requises pour être affinées en 2 tonnes d'alumine, qui sont ensuite fondues en approximativement 1 tonne de métal (Figure 22), (IAI, 2018).

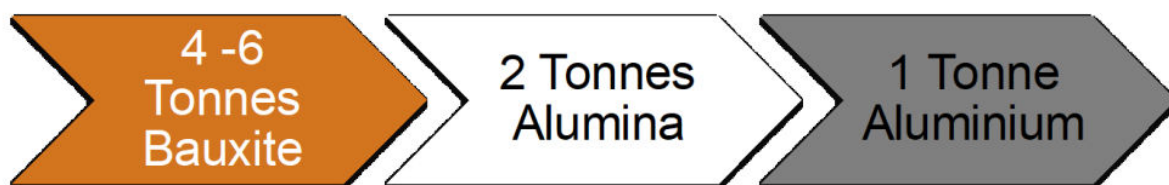


Figure 22. Réduction de masse de la bauxite à l'aluminium. A partir de : IAI, 2018.

La plupart de la bauxite sur terre provient de mines à ciel ouvert situées en zones tropicales et subtropicales, où la bauxite apparaît généralement proche de la surface en couches larges et relativement fines, en dessous de quelques mètres de déblais. Le fait que les couches de bauxite couvrent souvent de grandes zones implique l'altération de grandes superficies territoriales comparé à l'extraction d'autres minerais, mais pour une durée plus courte. Seule une faible proportion de la bauxite mondiale est produite à partir de mines souterraines (IAI, 2018).

Le début du 21^{ème} siècle a été témoin de changements structuraux significatifs dans l'industrie de l'aluminium, y compris concernant la chaîne d'approvisionnement de la bauxite. L'extraction de la bauxite fait traditionnellement partie d'un modèle corporatif d'intégration verticale, avec des entreprises engagées dans des procédés de production en partant de l'extraction des matières premières à la production de métal coulé, et même à la fabrication de produits finis. Aujourd'hui, ces modèles de production et d'approvisionnement traditionnels ont été remplacés ou placés côte à côte avec de nouvelles approches des industries, dans lesquelles les mines de bauxite (et autres procédés de la chaîne de valeur de l'aluminium) sont indépendamment acquises et gérées, devenant parfois détachées des principaux producteurs d'aluminium. La bauxite est aujourd'hui un produit en tant que tel commercialisé et négocié à l'échelle mondiale, répondant en partie à la demande croissante de la Chine et son industrie de l'aluminium primaire, représentant plus de la moitié de la

production mondiale. Cette augmentation de la demande a également conduit le développement de nouvelles régions de production de la bauxite (comme par exemple la Malaisie, les Fiji et la Nouvelle Calédonie) et l'établissement de plusieurs nouvelles opérations dans des pays traditionnellement (par exemple la Guinée, l'Australie et l'Inde) et nouvellement producteurs (Tableau 9).

Le diagramme du Cycle de Vie d'un produit en aluminium, en partant du minerai de bauxite, est décrit sur la Figure 24. Selon le International Aluminium Institute (IAI), l'aluminium primaire est de l'aluminium issu de cellules ou cuves d'électrolyse lors de la réduction électrolytique de l'alumine métallurgique (oxide d'aluminium). C'est la quantité de métal fondu ou liquide issues de ces cuves et qui est pesée avant d'être transférée dans un four de maintien ou avant une transformation ultérieure. Cela exclut donc les additifs d'alliage et l'aluminium recyclé. Le IAI considère les chiffres présentés comme fiables, mais affirme également qu'ils devraient être sujets à révision. Les flux des cycles de l'aluminium pour l'année 2017 sont notamment représentés par l'IAI via un diagramme de Sankey (IAI, 2016).

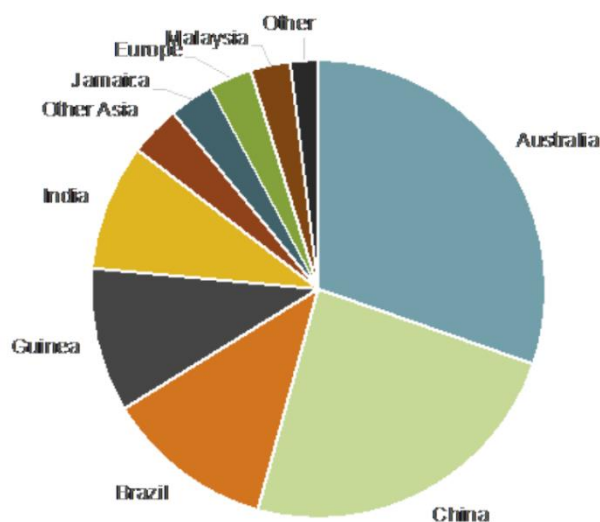


Figure 23. Part de production de la bauxite par pays, 2016.

Les nouvelles mines de bauxite sont parfois gérées par des exploitants dont l'expérience en extraction de bauxite est limitée. Cet afflux de nouveaux concurrents a, dans certaines situations, mené à l'émergence de mauvaises pratiques d'extraction et environnementales, avec certaines autorités imposant des moratoires ou interdictions de l'extraction et envoi de bauxite en réponse. Comme énoncé précédemment, la bauxite est généralement extraite dans des mines à ciel ouvert, avec des méthodes variant selon la localisation. Selon le International Aluminium Institute (IAI), le procédé d'extraction typique implique les étapes suivantes :

- Défrichage du terrain et récupération du bois utile ;
- Collecte des graines, jeunes plants, et boutures lorsqu'approprié et faisable pour une utilisation en revégétalisation ;
- Enlèvement de la terre superficielle (et parfois sous-sol) pour une utilisation en restauration, soit grâce à un remplacement direct des zones épuisées, soit par un stockage pour un usage futur ;
- Enlèvement des déblais (couche entre la terre et la bauxite) ;

- Rupture de la bauxite avec des méthodes comme le défonçage grâce à de grands bulldozers ou, dans certains cas, le forage et dynamitage ;
- Une fois que la bauxite est détachée, chargement dans des camions ou wagons ou convoyeurs, et transport jusqu'à une usine d'enrichissement (si une transformation est requise) ou jusqu'à des espaces de stockage. L'enrichissement est un procédé relativement simple impliquant l'amélioration de la qualité de la bauxite par l'élimination des déchets de matériaux grâce à des étapes de criblage, broyage, lavage, et drainage. Le procédé produit un produit de minerai de grade supérieur et des résidus (principalement argiles et sable fin) ;
- Transport de la bauxite vers les raffineries d'alumine ;
- Une fois que l'enlèvement est terminé, les zones affectées sont restaurées.

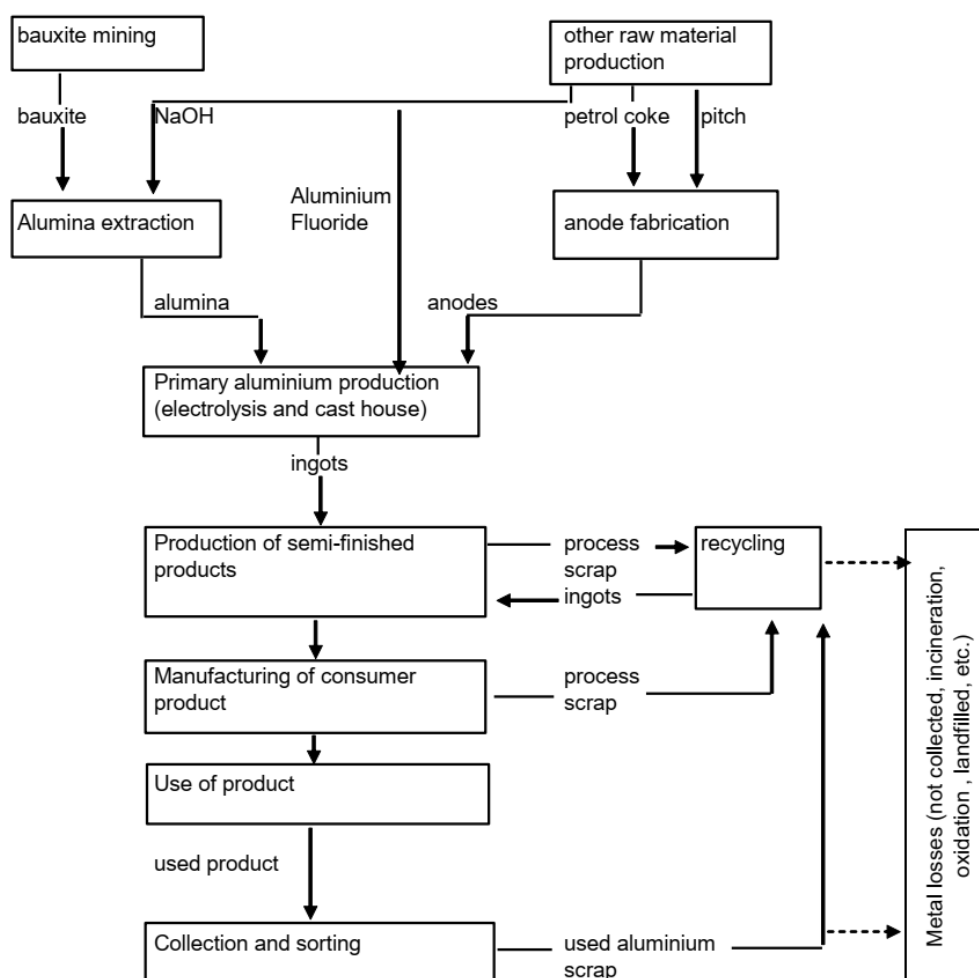


Figure 24. Diagramme du cycle de vie simplifié d'un produit en aluminium. Source : (Thethwayo, 2018).

Les principaux pays producteurs de minerais de bauxite et d'aluminium sont reportés dans le Tableau 9. D'autres informations intéressantes sont également fournies, notamment sur les réservoirs miniers et sur la production d'alumine. Les données sont récoltées directement par E-Mines, à partir de différentes sources, indiquées en Annexe A. L'Australie, la Chine et la Guinée sont les principaux producteurs de minerais d'aluminium. Ensuite, la Guinée exporte la plupart de sa bauxite et la production d'alumine, qui consomme une grande quantité d'électricité, peu disponible dans ce pays.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 9. Pays producteurs de bauxite et d'aluminium (Sources en Annexe A).

AL - 2018 (USGS)	BAUXITE - Ress (Mt)	BAUXITE - Prod (Mt)	ALUMINE - Prod (kt)	ALUMINIUM - prod (kt)	année
Australie	4,400.00	75.00	19,000.00	1,600	2018
Chine		70.00	72,000.00	33,000	2018
Brésil		27.00	7,900.00	660	2018
Inde		24.00	6,500.00	3,700	2018
Guyana		1.70			2016
Guinée	8,200.00	50.00	100.00		
Cameroun	1,000.00				
Ghana		1.60			2016
Sierra Leone		1.37			2016
Jamaïque	2,000.00	10.00	2,500.00		
République Dominicaine		0.28			2016
Vénézuëla		1.20	500.00		2016
Russie		5.00	2,800.00	3,700	2018
Kazakhstan		5.00	1,500.00	256	2018
Vietnam		2.50	1,100.00		
Malaisie		2.00		760	2017
Indonésie		7.10	600.00	219	2017
Canada		-	1,600.00	2,900	2018
Emirats				2,600	2018
Norvège				1,300	2018
Bahrein				1,000	2018
Arabie Saoudite		3.84	1,429.00	916	2017
USA		-	1,500.00	890	2018
Islande				870	2018
Afrique du sud				716	2017
Qatar				650	2017
Mozambique				577	2017
Allemagne			1,900.00	550	2017
Argentine				433	2017
France	30.00		300.00	430	2017
Irlande			1,967.00		2016
Espagne			1,579.00	360	2017
Grèce		1.80	820.00		2016
Iran		0.50	250.00	338	2017
Nouvelle Zélande				337	2017
Roumanie			467.00	282	2017
Egypte				279	2017
Oman				253	2017
Turquie		1.30	280.00		2016
Autres pays		22.00	13,200.00		
Monde	55,000.000				

3.2.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction de la bauxite dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 10. Il n'existe qu'un seul procédé sur ecoinvent contrairement aux quatre disponibles sur GaBi. Les données du procédé EI sont issues d'un sondage de 2015 par le IAI, qui a ensuite donné lieu à une publication (IAI, 2017). Pour les procédés issus de GaBi, deux d'entre eux sont à payer séparément sur demande : le procédé pour l'Amérique du Nord (RNA) et le procédé GLO nommé simplement « Bauxite, at mine ». Des deux autres procédés inclus dans la « Professional database », celui intitulé « *Bauxite, technology mix; consumption mix, to consumer; 89% imported, 11% local production; EU-28* » indique comme source de donnée « Thinkstep » et est un procédé vide, tandis que « *Bauxite mining 2015, bauxite extraction and processing; single route, at plant; minerals gibbsite Al(OH)3, boehmite γ-AlO(OH) and diasporite α-AlO(OH); GLO* » utilise comme source le rapport fournis par l'IAI en 2017.

Tableau 10. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.5 et GaBi v8.7 pour la production de bauxite.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Bauxite	○ <i>Bauxite, without water {GLO}/ bauxite mine operation</i>	○ <i>Bauxite, primary production; consumption mix, at plant; RNA²</i> ○ <i>Bauxite, technology mix; consumption mix, to consumer; 89% imported, 11% local production; EU-28 3.45E-3</i> ○ <i>Bauxite mining 2015, bauxite extraction and processing; single route, at plant; minerals gibbsite Al(OH)₃, boehmite γ-AlO(OH) and diaspor a-AlO(OH); GLO (empty)</i> ○ <i>Bauxite, at mine; GLO²</i>

▪ **ELCD et OEF/PEF**

Aucun procédé disponible n'a été identifié.

3.2.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Au sein de la littérature ACV, de nombreuses études se sont intéressées à la production de l'aluminium. Dans le cadre de cette étude SCORE LCA, cinq études ont été analysées incluant :

- Norgate and Haque, 2007 - Assessing the environmental impact of metal production processes
- Norgate and Haque, 2010 - Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations
- Liu and Müller, 2012 (revue de littérature) - Addressing sustainability in the aluminum industry : a critical review of life cycle assessments
- Nunez and Jones, 2016 - Cradle to gate : life cycle impact of primary aluminium production
- Zhang et al., 2016 - Environmental footprint of aluminum production in China

Ces différents articles ont été sélectionnés sur la base de critères tels que la qualité scientifique (en privilégiant les publications de rang A), le cas d'étude considéré (en privilégiant les cas d'étude industriels), la présence de données d'ICV ou non et la date de publication.

Comme pour le cuivre, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre, et enfin les résultats d'impacts (EICV).

3.2.1.4. DONNEES COMPLEMENTAIRES

Deux projets qui pourraient représenter des sources de données et d'informations utiles et complémentaires ont été identifiés. Il s'agit de projets qui se concentrent sur l'économie circulaire en récupérant des matières premières à partir des résidus de la filière minière et

² Data on demand.

de la production de l'aluminium. Une brève description de ces projets est fournie en

Annexe .

3.2.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.2.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les BDD ACV analysées permettent de modéliser directement l'étape d'extraction de la bauxite nécessaire à la production d'aluminium raffiné. Les données présentes dans les BDD ACV EI et GaBi ont comme source principale un rapport de l'IAI de 2017, qui se base sur un sondage conduit par cette même association, daté de 2015. Le rapport met à jour le sondage précédent de 2010, dont les résultats ont permis l'élaboration par l'EAA d'un rapport validé par une révision externe en 2013. Les aspects principaux des deux rapports sont analysés dans les paragraphes suivants.

- **European Aluminium Association (EAA) 2013**

Afin de mettre à jour ses différents sets de données d'ICV européen liés aux procédés de l'aluminium, la EAA a décidé d'organiser en 2011 une nouvelle grande enquête environnementale couvrant l'année 2010, dans laquelle les producteurs d'aluminium européens fournissaient des données d'intrants et extrants d'importance environnementale pour leurs installations respectives de production.

Les données d'intrants et extrants ont été extraites de l'enquête internationale de l'IAI basée sur l'année 2010. Ces données, rapportées dans le Tableau 11, font référence à l'extraction et à la préparation d'une tonne de bauxite prête à être livrée à l'usine d'alumine.

Le but était de développer des sets de données d'ICV européen génériques, c'est-à-dire des listes de flux élémentaires quantifiés, associés à la production principale d'aluminium ou aux procédés de transformation.

Ces données environnementales mises à jour et les sets de données d'ICV associés devraient être utilisés pour :

- Des études ACV liées à des produits en aluminium fabriqués en Europe, c'est-à-dire des produits faits en aluminium ou contenant de l'aluminium.
- La mise à jour des différentes bases de données environnementales et d'ICV liés aux procédés d'aluminium en Europe.

La zone géographique couverte par ces sets de données est l'Europe, incluant l'UE-27 et les pays de l'Association européenne de libre-échange ou AELE (Norvège, Suisse et Islande).

Tableau 11. Données d'intrants et extrants directs pour l'extraction et la préparation d'une tonne de bauxite.
Source : EAA, 2013.

	Unité	Extraction de la bauxite World (IAI) 2010
Intrants		
Matières premières		
Eau douce	m3/t	0,5
Eau de mer	m3/t	0,7

Carburants et électricité		
Pétrole lourd	kg/t	0,2
Carburant diesel	kg/t	0,3
Electricité	kWh/t	0,9
Extrants		
Emissions atmosphériques		
Dioxyde de carbone (CO₂)	kg/t	2
Particules	kg/t	0,17
Evacuation de l'eau		
Eau douce	m3/t	0,05
Eau de mer	m3/t	0,7

Aucunes données spécifiques sur l'occupation des terres et sur les conditions de réhabilitation n'ont été collectées lors de l'élaboration d'ICV de l'année 2010. Cependant l'industrie de l'aluminium mondiale collecte des données spécifiques concernant l'occupation des terres et la réhabilitation dans ces enquêtes périodiques. Des données complètes et exhaustives sur la réhabilitation des mines de bauxites sont accessibles dans le rapport « bauxite mine rehabilitation survey » disponible sur le site internet de l'IAI.

- **International Aluminium Institute (IAI)/World Aluminium 2017**

L'International Aluminium Institute (IAI) a publié en 2017 un nouveau rapport actualisant les données de 2010 avec des informations complémentaires collectées en 2015. L'institut a publié un rapport qui vise à recueillir toutes les données d'ICV relatives aux procédés de production primaire d'aluminium, de l'extraction de la bauxite à la production de lingots. Un extrait de l'inventaire est présenté en Annexe D de ce rapport **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Dans l'annexe, les données pour l'Europe font référence aux données générales de l'industrie minière.

L'électricité est un élément important dans le procédé de production de l'aluminium. De ce fait, une attention particulière est portée sur le choix du mix énergétique approprié. L'alimentation électrique des industries est souvent dissociée des réseaux nationaux ou régionaux (notamment en raison des puissances délivrées). Pour être sûrs que ces spécificités ont été prises en considération dans cette étude, les données d'alimentation électrique proviennent directement d'une fonderie d'aluminium. Ces données sont publiées chaque année par l'IAI.

Globalement, les données de l'industrie chinoise de l'aluminium sont incluses pour les flux d'ICV suivant :

- Consommation d'anode,
- Flux entrant d'énergie (électricité comprise),
- Emissions de perfluorocarbures (PFC).

Malheureusement seules les données pour l'industrie chinoise de l'aluminium sont disponibles et de bonne qualité. Cette industrie représentait environ 55% de la production mondiale en 2015.

L'évolution (ou l'absence) de données entre 2010 et 2015 peut être généralement imputée à l'un ou l'autre des facteurs ci-dessous :

- *Différences liées aux données* : les changements dans la composition des indicateurs de suivi, la qualité des réponses au questionnaire ou les taux de déclaration peuvent expliquer les différences entre 2010 et 2015. De tels éléments doivent éveiller l'attention sur le fait que les évolutions apparentes ne sont pas forcément définitives et peuvent même induire en erreur.

- *Différences liées aux performances* : les réelles évolutions des performances de l'industrie sur la période donnée. De telles différences semblent être liées à l'amélioration continue des procédures de management, à l'extension des capacités de production ou l'amélioration de celle-ci, à la fermeture des installations les plus anciennes ou encore à des matériaux de meilleure qualité.

Lorsque l'extraction de la bauxite est incluse, les différences suivantes sont détaillées par l'IAI :

Différences liées aux données

- Les échanges avec l'eau de mer sont nuls, contrairement aux 4 m³/t pour les lingots d'aluminium en 2010. Seule une usine a déclaré utiliser de l'eau de mer en 2010 ; cependant, en 2015 ce n'était plus le cas. Seules les mines situées sur la côte ont la possibilité d'utiliser de l'eau de mer pour nettoyer la bauxite. Les entrées et sorties d'eau de mer sont négligeables d'un point de vue environnemental.
- Les consommations de combustibles et d'électricité sont différentes des valeurs de 2010, avec une augmentation de la consommation de fioul lourd et une diminution de la consommation électrique. Ces changements sont la conséquence d'une meilleure comptabilisation des consommations de fioul lourd et d'électricité. Par exemple, les collecteurs des données ont pu allouer plus facilement les consommations énergétiques à des procédés unitaires et ainsi les données ont évolué pour l'extraction de la bauxite. Il est à noter que la consommation énergétique de l'extraction de la bauxite est faible comparée aux procédés ultérieurs de traitement thermique et électrothermique.
- Les transformations paysagères et occupations foncières liées à l'extraction de la bauxite sont prises en compte pour la première fois dans l'inventaire de 2015 suite aux suggestions faites par des observateurs extérieurs (IAI 2013).

Différences liées aux performances

- L'émission de particules dans l'air semble diminuer de 43%. Les données de 2015 sont plus fiables car les indicateurs de suivi représentent un pourcentage plus important de la production mondiale comparé à 2010. Une importante mine de bauxite dont les données sont disponibles pour 2010 et 2015, indique une nette diminution des particules aériennes émises par tonne de produit grâce à de meilleures pratiques de gestion des poussières.

Les déchets solides miniers sont en augmentation depuis 2010 suite aux changements de la politique d'évacuation des déchets d'une des plus importantes mines de bauxite. Les déchets étaient initialement utilisés sur site pour un autre procédé mais cela a été arrêté récemment et les données de 2015 reflètent l'augmentation de la quantité de déchets industriels envoyés hors site pour traitement.

Une analyse des impacts du procédé de production de bauxite disponible sur ecoinvent est effectuée afin d'identifier la contribution des différents éléments de l'inventaire (Figure 25). Le procédé GaBi n'est pas comparé car l'inventaire correspondant est présenté de manière désagrégée. Il est possible de constater que la chaleur nécessaire au procédé d'extraction est un contributeur majeur de l'impact sur le changement climatique et l'utilisation des ressources fossiles. La remise en culture de la mine est également une source importante d'émissions.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

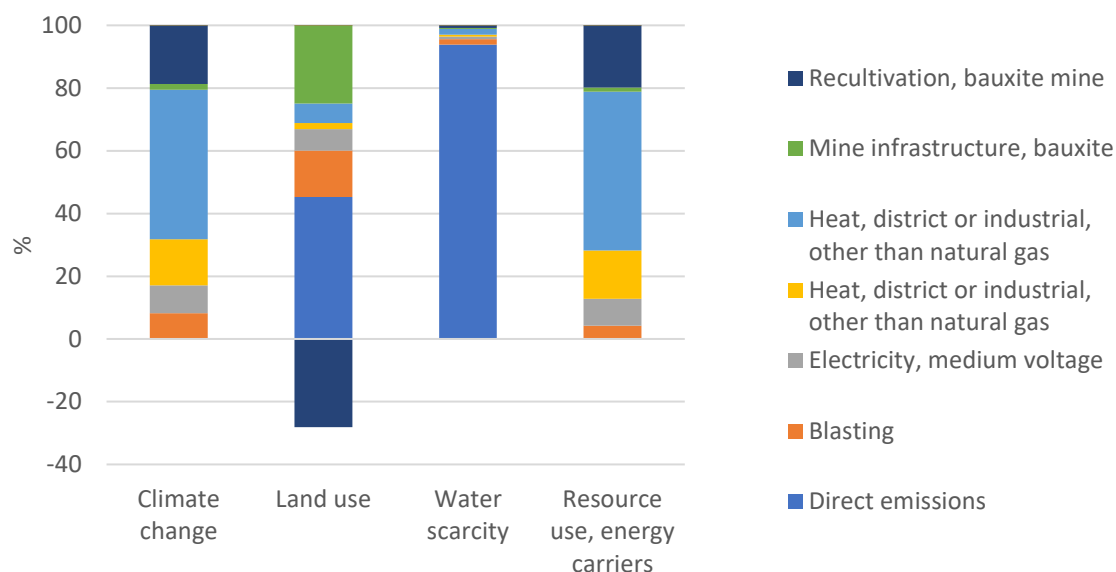


Figure 25. Contribution relative de l'inventaire du procédé EI global d'extraction de la bauxite.

Finalement, une analyse de la contribution du procédé à la catégorie d'impact concernant l'appauvrissement des ressources est effectuée (Figure 26). Il est possible de remarquer que l'aluminium n'est pas un contributeur à cette catégorie d'impact. En effet, le cadmium et le plomb sont les contributeurs majeurs, suivis par l'argent et l'or. Il semblerait dans ce cas de figure que la matière première « bauxite » ne soit pas prise en compte par la catégorie d'impact liée à l'appauvrissement des ressources contrairement au cadmium et au plomb. En effet, le calcul de cette catégorie d'impact est effectué selon les métaux primaires et ne reconnaît pas le minerai en lui-même contenant malgré tout de l'aluminium.

Bauxite, without water {GLO}| bauxite mine operation | APOS, S

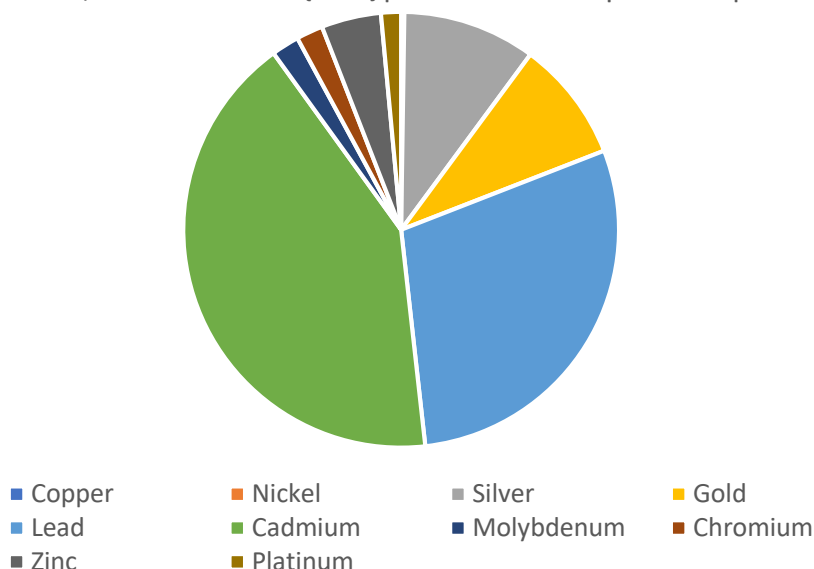


Figure 26. Analyse de la contribution de différents métaux impliqués dans la production de la bauxite (set de données EI) à l'appauvrissement des ressources, minéraux et métaux de la méthode EF.

3.2.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 13 propose une rapide description des différentes publications analysées dans le cadre de cette étude. L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B. Ainsi parmi les cinq études considérées, une se focalise sur la phase d'extraction minière

en tant que telle avec une unité fonctionnelle se rapportant à la production d'un concentré (Norgate and Haque, 2010), tandis que les trois autres cas d'études prennent en compte les étapes de raffinage du métal en plus de l'extraction minière (Norgate et al., 2007 ; Nunez and Jones, 2016 ; Zhang et al., 2016). Des données d'inventaire sont par ailleurs disponibles pour les études réalisées par Norgate and Haque (2010), Nunez and Jones (2016) et Zhang et al. (2016), bien que seuls Nunez and Jones (2016) proposent des données primaires (les deux autres études s'appuient sur des données publiques issues de la littérature ou encore de bases de données).

La revue de littérature réalisée par Liu and Müller (2012) considère, quant à elle, un total de 50 études différentes, avec diverses sources (de 1993 à 2011) telles que des rapports d'associations ou encore des articles scientifiques. Ce nombre élevé d'études implique une certaine variabilité concernant les choix méthodologiques relatifs à chaque étude. Par exemple, diverses unités fonctionnelles ont été considérées, certaines se focalisant sur la bauxite (produit de l'extraction minière), d'autres se focalisant sur l'aluminium raffiné primaire tandis que certaines se focalisent sur la production secondaire. Les frontières du système varient également selon l'étude considérée, certaines préférant des systèmes « cradle-to-gate » tandis que d'autres considèrent des systèmes « gate-to-gate » ou encore « cradle-to-grave ». Globalement, dans cette revue, une bonne partie des études ACV sur l'aluminium provient des années 2008 – 2010. En termes de représentation géographique, l'Australie et la Chine sont les deux pays les plus représentés suivis de la région « monde » (GLO), ce qui semble fidèle à la réalité, la Chine et l'Australie étant deux des principaux producteurs d'aluminium au niveau mondial. La Figure 27 (directement tirée de la revue de littérature de Liu and Müller, 2012) représente l'empreinte carbone associée à la production d'aluminium raffiné. Celle-ci montre que la production d'aluminium en Europe, aux Etats-Unis ou encore dans le monde est globalement moins impactant en termes de CO₂ que la production en Australie ou encore en Chine. Il convient toutefois de noter que toutes les valeurs ne sont pas représentées sur cette figure, les auteurs mentionnant dans l'article que les émissions de CO₂ associées à la production d'aluminium raffiné varient de 5,92 à 41,1 kg CO₂ eq/kg Al (ces deux valeurs n'apparaissent pas sur la figure).

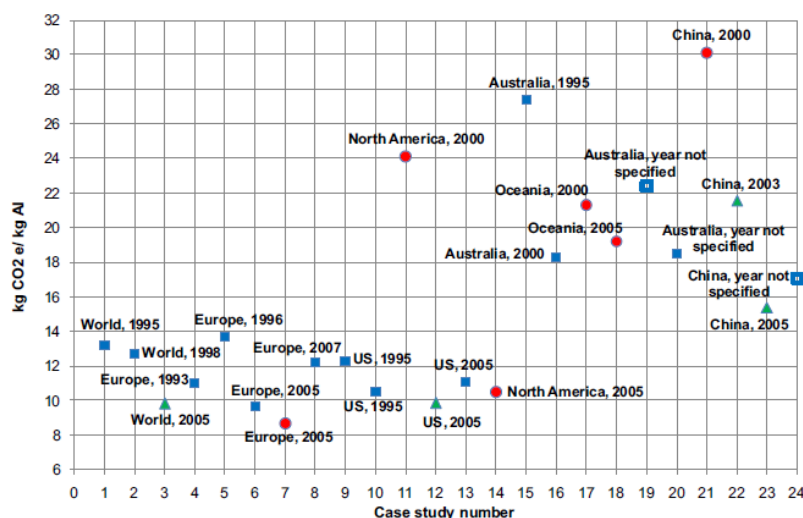


Fig. 2. Variability of GHG emissions intensity and system boundaries for primary aluminum ingot production in selected studies. Note: square = process-based approach + Scope 1–3 (hollow squares = ingot casting not included), triangle = process-based approach + Scope 1–2, circle = hybrid or consumption-based approach + Scope 1–3. See references and details in Tables S1 and S3 in the supplement.

Figure 27. ACV des activités minières liées à l'aluminium : émissions de CO₂ eq pour la production d'aluminium raffiné – tiré de Liu and Müller (2012).

Le Tableau 12 propose quelques valeurs d'empreinte carbone issues de la littérature ACV et relatives à la production de bauxite ou d'aluminium.

Tableau 12. Valeurs d'empreinte carbone de la production d'aluminium (bauxite ou métal) issues de la littérature.

Cas considéré	d'études	Empreinte carbone (t CO ₂ eq/t bauxite ou Al)	Brève description
Norgate and Haque, 2010 (Australie)		0.0049	Bauxite en Australie
Norgate and Haque, 2007 (Australie)		22.4	Aluminium raffiné en Australie
Liu and Müller, 2012 (Islande)		5.92	Valeur minimale de la revue – aluminium raffiné en Islande
Liu and Müller, 2012 (Moyen-Orient)		41.1	Valeur maximale de la revue – aluminium raffiné au Moyen-Orient
Nunez and Jones, 2016 (Monde)		16.5	Aluminium raffiné au niveau mondial
Nunez and Jones, 2016 (RoW)		10.8	Aluminium raffiné au sein de la région reste du monde (mix électrique)
Zhang et al., 2016 (Chine)		15.8	Aluminium raffiné en Chine

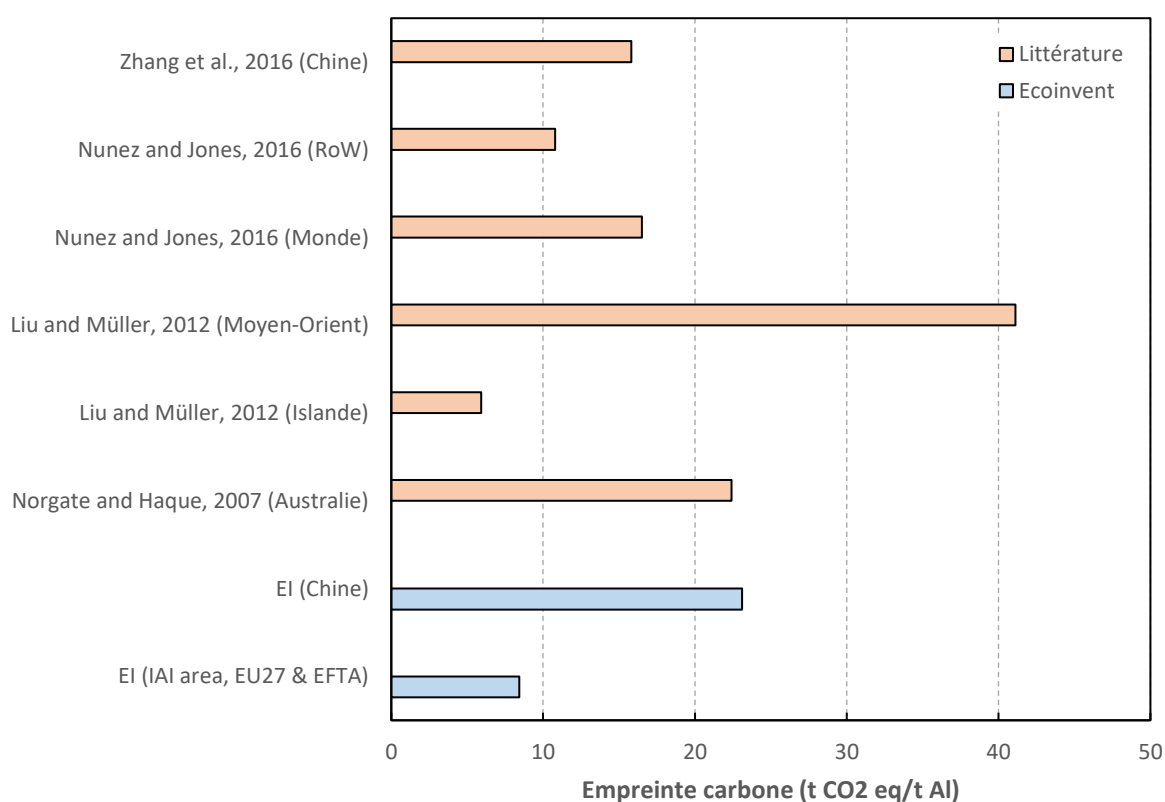


Figure 28. Empreinte carbone de la production d'aluminium raffinée issue de la littérature et d'ecoinvent

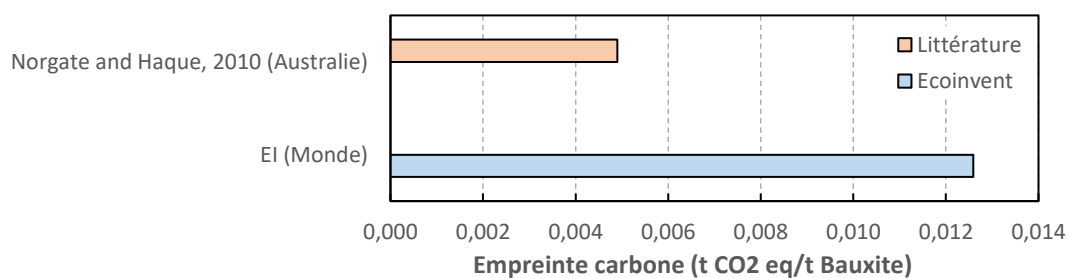


Figure 29. Empreinte carbone de la production de bauxite issue de la littérature et d'ecoinvent

Les Figure 28 et Figure 29 montrent l'empreinte carbone respectivement associée à la production d'aluminium raffinée et de bauxite tirée de la littérature et de la base de données ecoinvent. En termes d'ordre de grandeur, les émissions de CO₂ associées à la production de bauxite apparaissent comme étant relativement marginales en comparaison des émissions de CO₂ associées à la production d'aluminium raffinée, ce qui implique que les étapes de raffinage sont beaucoup plus impactantes que les étapes d'extraction et concentration du minerai.

Tableau 13. Revue de littérature ACV de l'aluminium – description des différentes études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit – Unité fonctionnelle	Couverture géographique	Allocation	ICV ?	Source des données
Norgate and Haque <i>Assessing the environmental impact of metal production processes</i>	2007	Métal raffiné « 1 kg of refined metal »	Australie	Massique	Non	/
Norgate and Haque <i>Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations</i>	2010	Concentré « 1 tonne of ore or concentrate ready for ship loading »	Australie	/	Oui	Données publiques (littérature)
Liu and Müller (revue de littérature) <i>Addressing sustainability in the aluminum industry : a critical review of life cycle assessments</i>	2012	Métal raffiné	Monde Etats-Unis Europe Chine Australie Japon Etc.	/	Non	/
Nunez and Jones <i>Cradle to gate : life cycle impact of primary aluminium production</i>	2016	Métal raffiné « 1 kg of primary aluminium ingot at the factory gate »	Monde	/	Oui	Sondages auprès d'industriels
Zhang et al. <i>Environmental footprint of aluminum production in China</i>	2016	Métal raffiné « 1 tonne aluminum »	Chine	/	Oui	Bases de données et données publiques chinoises (statistiques)

3.2.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Tout en bénéficiant d'une source de données d'inventaire précise et transparente par rapport aux procédés du cuivre, certaines limites des BDD existantes peuvent toutefois être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière de l'aluminium, notamment concernant la représentativité géographique et la variabilité de certaines informations.

La documentation est non standardisée, même à l'intérieur de la même base de données. Les informations fournies peuvent être différentes et plus ou moins complètes. La source de référence des données, le rapport de l'IAI de 2017, est transparente et complète, surtout si intégrée avec le rapport de 2013 publié par la EAA. Les deux rapports font référence aux données issues de sondages de 2015 et 2010, respectivement et le rapport de l'EAA a aussi été sujet à une révision externe.

Comme pour le cuivre, la représentativité géographique par rapport aux producteurs majeurs de bauxite ne semble pas être optimale. L'Australie, la Chine, la Guinée, le Brésil et l'Inde sont les principaux pays producteurs, mais ils ne sont pas représentés spécifiquement dans les BDD ACV présentant seulement une couverture globale (ou un mix pour l'Amérique du Nord et pour l'Europe dans le cas des procédés avec achat additionnel de GaBi). Cependant, il faut aussi considérer que la plupart de l'alumine qui sera utilisée pour la production d'aluminium provient à présent de la Chine, ce qui rend l'utilisation d'un procédé global tout à fait acceptable.

Les BDD disponibles ont une période de validité qui couvre l'année 2015. Il s'agit de données relativement récentes, même si une comparaison faite par l'IAI entre les données de 2010 et les données de 2015 montre une certaine variabilité des inventaires, causée par des différences entre les répondants du sondage, mais aussi par une évolution technologique et de gestion.

3.2.2.4. REMARQUES ADDITIONNELLES

La production d'alumine à partir de la bauxite est un aspect aussi important que la production primaire d'aluminium et des informations intéressantes de l'EAA sont disponibles. Deux sets de données sur les activités minières ont été développés à partir d'enquêtes environnementales de l'EAA couvrant l'année 2010 : des sets de données sur la production primaire d'aluminium, un set de données primaires « produit en Europe » (A) et un set de données primaires « utilisé en Europe » (B) (Figure 30).

Le set de données primaire « produit en Europe » (A) correspond à la production d'une tonne de lingots d'aluminium primaire, c'est-à-dire extrait de la bauxite jusqu'aux lingots d'aluminium prêts à être livrés. Ce set de données comprend tous les aspects environnementaux des différentes étapes de procédé et matières premières utilisées pour livrer 1 tonne de lingots primaires produits par les fonderies européennes. Comme la production d'électricité est la contribution majeure aux aspects environnementaux, un modèle d'électricité spécifique a été développé basé sur l'électricité consommée par les fonderies européennes.

Le set de données « utilisé en Europe » (B) est similaire au set de données précédent mais considère la production d'aluminium primaire importée en Europe et représentant 44 % de l'aluminium primaire utilisé en Europe en 2010. Les données globales de l'IAI ont été utilisées pour modéliser l'aluminium primaire produit en dehors de l'Europe et un modèle énergétique spécifique pour le procédé d'électrolyse a été développé basé sur les origines des importations.

La production d'électricité est particulièrement critique lors de l'étape d'électrolyse (la fonderie) car environ 15 MWh/tonne d'aluminium primaire sont utilisées. Trois modèles spécifiques ont été développés : deux modèles pour l'électricité utilisée par les fonderies européennes dont un pour les fonderies de précuissin, un pour les fonderies Söderberg et un autre pour l'électricité utilisée par les fonderies exportant sur le marché européen.

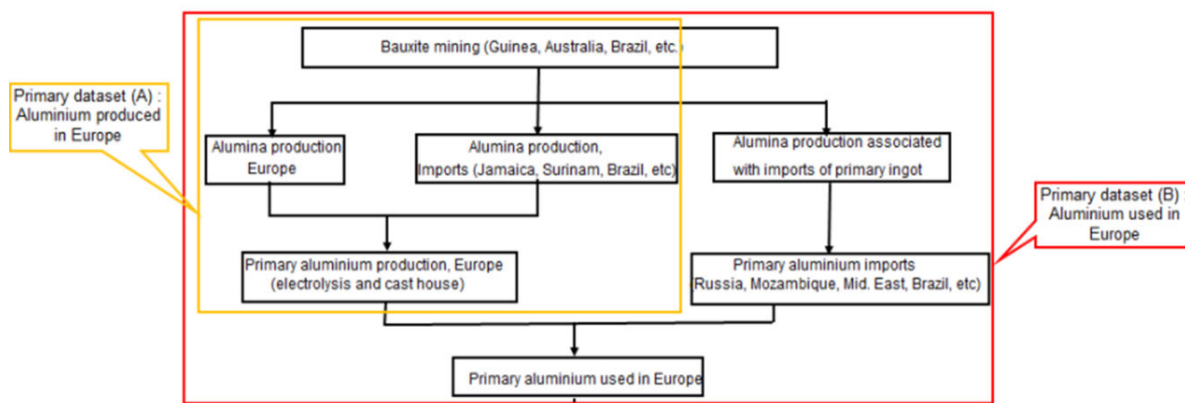


Figure 30. Provenance de l'aluminium raffiné produit en Europe et utilisé en Europe selon les scénarios utilisés par l'EAA (2013).

Concernant les transports, la bauxite, l'alumine et les lingots primaires importés en Europe sont transportés principalement par transport maritime et dans une moindre mesure par transport fluvial (barge), routier et ferroviaire. La bauxite utilisée en Europe est importée principalement de Guinée, d'Australie et du Brésil. L'alumine utilisée en Europe provient principalement de Jamaïque, du Suriname et du Brésil.

Les déchets sont également un aspect important de l'industrie minière. Les déchets solides issus de la production d'alumine sont composés de deux flux principaux :

- Les résidus, inertes et sables séparés du minerai de bauxite avant le procédé de lixiviation.
- Les déchets du procédé de lixiviation ou résidus de la bauxite. Même si les constituants sont principalement non-toxiques et largement insolubles, les résidus de bauxite requièrent une manipulation spéciale due au contenu alcalin résiduel du procédé d'extraction. Ils sont aussi connus en tant que « boues rouges ». Selon la filtration de ces boues rouges et le procédé de rinçage, l'alcalinité de la solution résiduelle peuvent varier significativement. La pratique courante est de déposer les déchets de bauxite sur ou près du site dans des bassins scellés spécialement conçus pour cet usage et desquels l'excès d'eau est reconduit dans le procédé. Avec le temps, les déchets alcalins réagissent avec le dioxyde de carbone de l'air pour former du carbonate de sodium. Les sites de dépôt de ces boues rouges peuvent être recultivés une fois qu'ils sont asséchés.

Finalement, concernant le recyclage, l'industrie de l'aluminium européenne recommande de créditer les bénéfices environnementaux résultants du recyclage grâce à la méthode de « substitution », qui considère que l'aluminium recyclé substitue l'aluminium primaire de telle manière que seules les pertes de métal lors du cycle de vie complet doivent être compensées par de l'aluminium primaire. Cette méthodologie est expliquée par la fiche technique « aluminium recycling in LCA » téléchargeable sur le site de l'EAA.

Le Spent Potliner Treatment (SPL) n'est pas mentionné dans la documentation de la bauxite car fait partie des post-traitements pour la fabrication de l'aluminium. Pour la production des lingots d'aluminium, il est mentionné que les déchets carbonés de l'électrolyse correspondent à la fraction de déchets des anodes ne pouvant être recyclée. Il est inventorié en tant que la fraction carbonée de SPL. Modélisé par le procédé EI : *“Disposal, refractory SPL, Al electrolysis, 0 % water, to residual material landfill”*.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Ce procédé est donc un déchet modélisé pour la fabrication d'aluminium primaire liquide. En analysant les impacts liés à la production d'un kilogramme de ce produit (Figure 31), il est possible d'observer une contribution mineure du traitement de ce déchet à toutes les catégories d'impact.

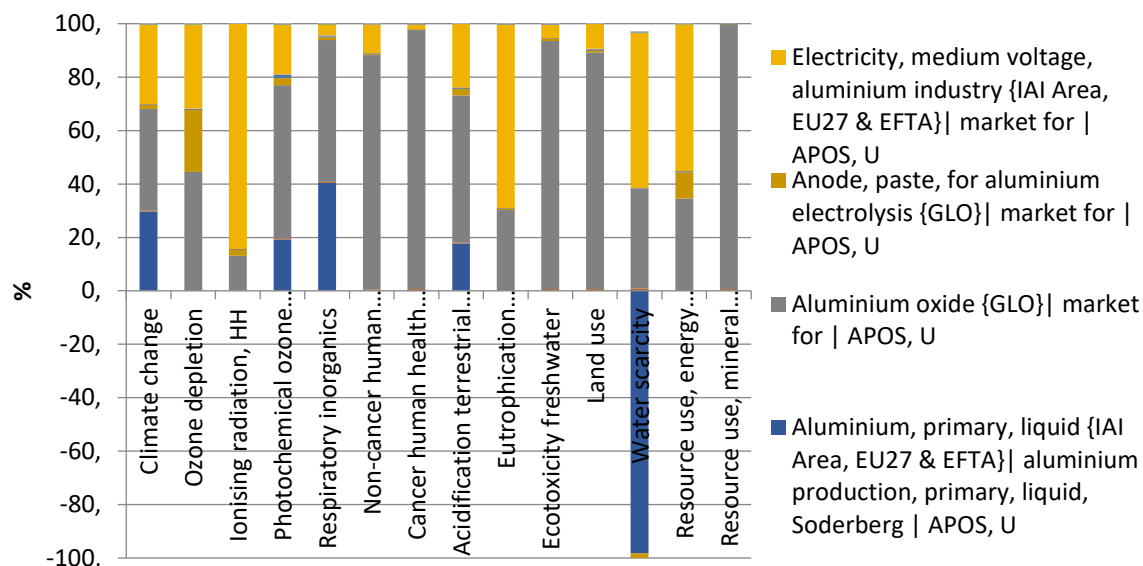


Figure 31. Analyse de 1 kg 'Aluminium, primary, liquid {IAI Area, EU27 & EFTA} aluminium production, primary, liquid, Soderberg | APOS, U', méthode: EF Method (adapted) V1.00.

3.2.3. RECOMMANDATIONS

En considérant la date de publication relativement récente, la fiabilité de l'association fournissant les données et la quasi-indisponibilité de données régionalisées, il est sensé de recommander l'utilisation de l'inventaire fourni par l'IAI. Les seuls sets de données régionalisés disponibles pour consultation dans la BDD GaBi, sont relatifs à l'Europe et à l'Amérique du Nord, mais les productions nord-américaine et européenne de bauxite ne représentent qu'une fraction très limitée de la production globale. De plus, la source des données du procédé européen n'est pas indiquée clairement. L'extraction de bauxite n'a qu'un impact mineur dans le cycle de vie de production de lingot d'aluminium (Figure 32), ce qui ne rend pas nécessaire l'utilisation de procédés spécifiques.

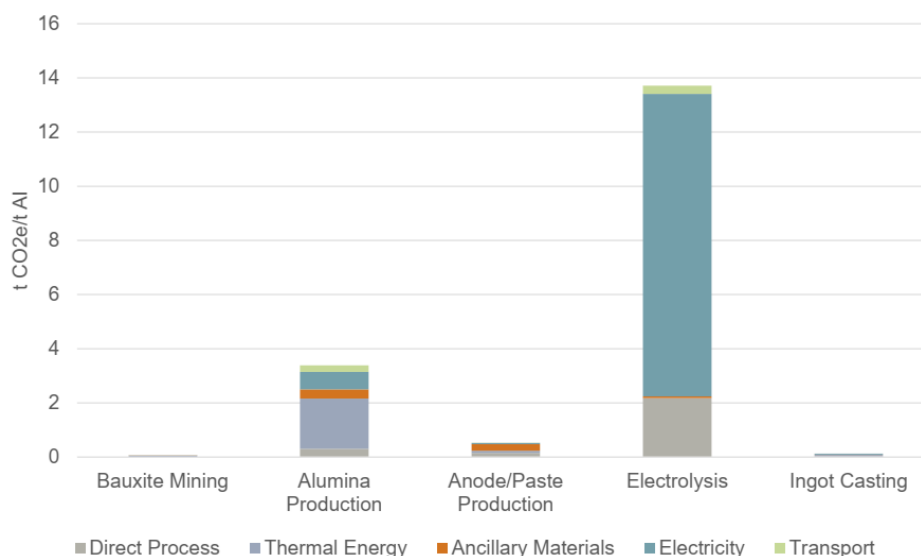


Figure 32. Emissions de CO₂ eq. dans les différentes phases de production d'aluminium. Source : IAI, 2017.

Les deux procédés globaux qui ont comme source le rapport de l'IAI (et donc recommandés) sont :

- *Bauxite, without water {GLO}/ bauxite mine operation*, dans Ecoinvent,
- *Bauxite mining 2015, bauxite extraction and processing; single route, at plant; minerals gibbsite $Al(OH)_3$, boehmite $\gamma-AlO(OH)$ and diaspora $\alpha-AlO(OH)$; GLO*, dans GaBi.

En outre, il est important de noter que l'industrie de l'aluminium européenne recommande la répartition des bénéfices dérivants du recyclage selon la méthode de substitution, qui considère que « l'aluminium recyclé remplace l'aluminium primaire de sorte que seules les pertes de métal pendant le cycle de vie complet nécessitent d'être remplacées par l'aluminium primaire ». Il est donc crucial d'évaluer correctement les pertes de métal pendant la phase de recyclage.

3.3. Lithium

3.3.1. ETAT DE L'ART

3.3.1.1. EXTRACTION DU LITHIUM DANS LE MONDE

Le lithium est utilisé conventionnellement en tant qu'ingrédient industriel pour la production de graisses lubrifiantes, verres, céramiques, etc. Historiquement, ces usages concernaient 40 à 50 % de la consommation globale de lithium (USGS, 2014). Il y a presque une décennie, la consommation de lithium a expérimenté un essor important avec l'expansion du marché des produits électroniques grand public, où la demande pour les batteries ion-lithium est considérable. Ainsi, avec le cobalt, le lithium est devenu indispensable pour la fabrication des batteries pour les automobiles hybrides ou électriques. La part de lithium utilisée dans les batteries rechargeables est passée de 23 % en 2008 à 58 % en 2018 (Lefebvre & Tavignot, 2020). En conséquence, la consommation globale de lithium a augmenté de 21.3 Kt de lithium en 2008 à 50.8 Kt en 2018. En 2018, la part de la consommation de lithium selon l'usage était la suivante :

- Batteries (58 %) ;
- Céramiques et verres (20 %) ;
- Autres (12 %).

La croissance rapide de la consommation de lithium impose actuellement une pression significative du côté de l'offre, ce qui suscite une préoccupation mondiale face à la sécurité de la ressource en lithium et l'efficacité de son utilisation (Sun et al., 2017). Son exploitation connaît donc une forte fièvre et il devient un enjeu géopolitique.

Le marché est dominé par 3 sociétés : Albemarle (USA), SQM (Chili) et des sociétés chinoises dont le leader est Tianqi Lithium. Les principaux acteurs de l'exploitation minière et de la production de lithium sont indiqués dans le Tableau 14. Les différentes sources, ainsi que certains projets supplémentaires sont reportés en Annexe A.

Le lithium n'est pas un métal rare. Sa principale source provient actuellement de l'extraction à partir de pegmatites à spodumène, suivie par l'exploitation des saumures lithinifères intracontinentales (Figure 33).

D'une part, son exploitation minière est possible grâce à la présence de ce métal dans des pegmatites formées à moyenne profondeur (entre 3.5 et 7 km), riches en lithium, césium et tantale, tels que Greenbushes et Wodgina en Australie, Tanco au Canada, Keketuahai en Chine, Bikita et Kamativi au Zimbabwe, ou Kenticha en Éthiopie. La morphologie des corps pegmatitiques dépend de nombreux facteurs : la profondeur de mise en place, le contexte structural, et la compétence de l'encaissant. Elles forment généralement des corps de petites dimensions (moins d'une centaine de mètres) à l'exception de quelques « monstres » comme les pegmatites à terres rares de Tanco (Manitoba ; 1,9 Mt à 0,2 % Ta₂O₅ et 6,5 Mt à 2,75 % Li₂O), à lithium de Bikita (Zimbabwe ; 10,8 Mt à 3 % Li₂O), ou de Greenbushes (Australie ; 42 Mt à 2,93 % Li₂O). Leur morphologie est souvent complexe, en pipes, amas, ou lentilles.

D'autre part, l'exploitation du lithium à partir de saumures est possible grâce à l'existence de lacs salés en relation avec le volcanisme récent, en particulier dans les Andes (Chili, Argentine, Bolivie), mais également en Chine. Dans ce cas, le lithium est obtenu par chimie,

à partir de l'évaporation des saumures. Cette technologie, fortement consommatrice en eau, pourrait évoluer, Eramet venant de mettre au point un procédé d'extraction sélective du lithium dans la saumure sans avoir recours à l'évaporation.

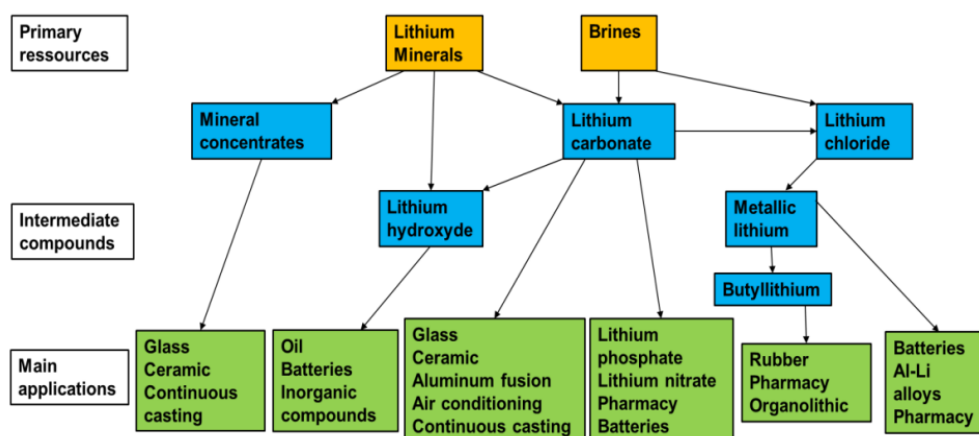


Figure 33. Différentes routes de production du lithium (Dessemond, Lajoie-Leroux, Soucy, Laroche, & Magnan, 2019).

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 14. Exploitation minière et production de lithium en 2018. Sources en Annexe A.

PAYS	RESSOURCES MINERAI (MT)	RESSOURCE LI (T)	TENEUR LI2O (%)	PRODUCTION LI (T/AN)	TYPE	MINERAUX
AUSTRALIE	116.84			18,700		Spodumène
GREENBUSHES	31.40		1.43%	7,000	Pegmatite	Spodumène
MOUNT MARION	77.80		1.37%	9,041	Pegmatite	Spodumène
MOUNT CATTLIN	7.64		1.05%	4,115	Pegmatite	Spodumène
CHILI				14,100		
ATACAMA			0.16%	15,768	Salar	Saumure
ARGENTINE				5,500		
HOMBRE MUERTO				3,157	Salar	Saumure
OLAROS		270,000		2,343	Salar	Saumure
CHINE				3,000		
ZHABUYE (TIBET)					Salar	Saumure
XITAI (QINGHAI)					Salar	Saumure
DONGTAI (QINGHAI)					Salar	Saumure
CHARHAN (QINGHAI)					Salar	Saumure
JIAJIKA (SICHUAN)	19.71		1.30%		Pegmatite	Spodumène
PROV. JIANGXI					Pegmatite	Spodumène
ZIMBABWE				1,000		
BIKITA	10.80		4.45%	1,335	Pegmatite	Lépidolite, Pétalite
USA				700		
SILVER PEAK (NEVADA)				1,127	Salar	Saumure
PORTUGAL				400		
GUARDA						
FRANCE						
ECHASSIERES				0.21	Greisen	Lépidolite

3.3.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction du spodumène et des saumures dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 15. La BDD EI a l'avantage de proposer des sets de données basés uniquement sur l'extraction des matières premières, c.-à-d. le spodumène ou la saumure alors que GaBi ne propose des sets de données que pour les produits intermédiaires. La BDD EI considère d'ailleurs le carbonate de lithium comme unique produit pouvant être obtenu directement à partir des saumures ou minerais. En effet, contrairement aux routes présentées sur la Figure 33, le chlorure de lithium et l'hydroxyde de lithium sont, dans EI, uniquement obtenus grâce au carbonate de lithium et n'ont pas de procédé correspondant à leur obtention directe à partir des saumures ou minerais. Les procédés GaBi sont tous disponibles uniquement sur demande et donc payants. Pour cette raison, uniquement les sets de données EI sont analysés dans cette partie.

Tableau 15. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de spodumène, de saumure et de carbonate de lithium. Les procédés grisés ne sont pas accessibles via une licence standard des logiciels et donc payants.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Spodumène	○ Spodumene {RER}/ production Alloc Def, U ○ Spodumene {RoW}/ production Alloc Def, U	○ Pas de procédé
Saumure	○ Lithium brine, 6.7 % Li {GLO}/ lithium brine inspissation APOS, U	○ Pas de procédé
Carbonate de lithium	○ Lithium carbonate {GLO}/ production, from concentrated brine APOS, U ○ Lithium carbonate {GLO}/ leaching of spodumene with sulfuric acid APOS, U	○ Lithium carbonate (from brine); extraction from brine; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol CL ○ Lithium carbonate (spodumene route); spodumene route; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol CN ○ Lithium Carbonate mix; technology mix; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol GLO ○ Lithium carbonate mix (brine); extraction from brine; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol GLO ○ Lithium carbonate mix (spodumene); spodumene route; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol GLO

Les frontières des systèmes inclus dans les sets de données EI sont résumées sur la Figure 34.

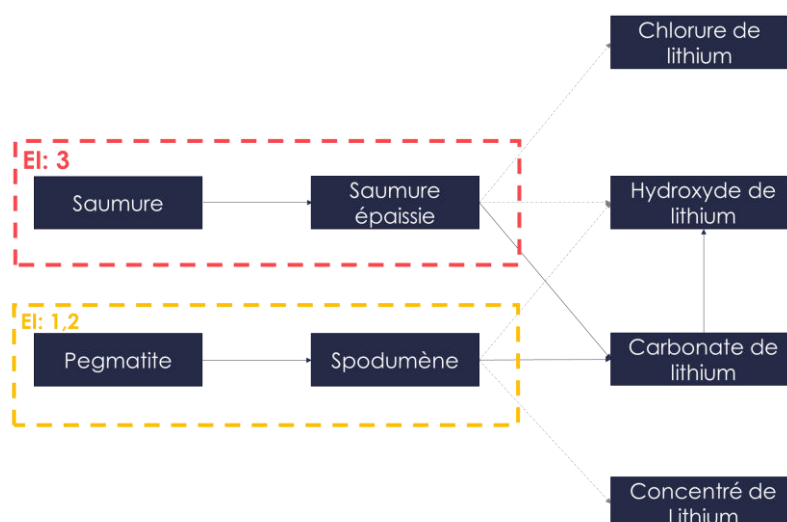


Figure 34. Frontière des systèmes inclus dans les sets de données EI.

Concernant l'extraction du spodumène, le set de données ecoinvent se base essentiellement sur des hypothèses. En effet, aucune information quantitative sur l'extraction de ce minéral n'est disponible dans la littérature examinée lors de l'élaboration du set de données (Hischier, 2007). Le set de données contient donc les approximations suivantes :

- **Extraction** : comme approximation des charges environnementales des activités d'extraction minières, le set de données de l'extraction du fer est utilisé, avec comme input « spodumene, in ground ».
- **Concassage et broyage** : les données sont copiées du set de données « primary crushing of limestone ».

Les données composant l'inventaire EI sont résumées dans le Tableau 16.

Tableau 16. Données ecoinvent d'intrants et d'extrants pour la production d'1 kg de spodumène (Hischier, 2007).

Materials / Energy / Emissions		per kg spodumene	Remarks
Input			
spodumene, in ground	kg	0.00E+00	overall yield of 90% assumed
occupation, mineral extraction site	m2a	1.20E-04	estimation, based on iron ore extraction
transformation, to mineral extraction site	m2	2.13E-06	dito
transformation, from forest	m2	2.13E-06	dito
recultivation, iron mine	m2	2.13E-06	dito
water, well, in ground	m3	2.93E-05	estimation, based on limestone crushing
blasting	kg	2.71E-04	estimation, based on iron ore extraction
diesel, burned in building machine	MJ	2.55E-02	dito
light fuel oil, burned in boiler 100kW, non-modulating	MJ	3.00E-03	estimation, based on crushing & milling of limestone
electricity, medium voltage, UCTE mix	kWh	3.39E-02	estimation, based on extraction, crushing & milling
heat, light fuel oil, at industrial furnace	MJ	8.98E-02	estimation, based on limestone milling
mine, iron	unit	8.33E-13	estimation, based on iron ore extraction
industrial machine, heavy, unspecified, at plant	kg	2.31E-04	estimation, based on crushing & milling of limestone
conveyor belt, at plant	m	2.78E-08	estimation, based on limestone crushing
Output			
waste, heat		1.22E-01	calculated from electricity input
particulates, > 10 um	kg	1.45E-03	estimation, based on extraction, crushing & milling
particulates, > 2.5 um and < 10 um	kg	1.31E-03	dito
particulates, < 2.5 um	kg	1.45E-04	dito

L'inventaire EI de l'extraction du lithium à partir de saumures est quant à lui issu de (Stamp, Lang, & Wäger, 2012). Le set de données prend en compte des conditions favorables comme celles du Salar de Atacama pour lequel le taux d'évaporation et la concentration en lithium sont très élevés, et le ratio Mg-Li faible. Le procédé inclus donc le pompage et la concentration

de la saumure dans des bassin solaires d'évaporation. Il produit du chlorure de potassium brut en tant que sous-produit. L'inventaire est reporté dans le Tableau 17.

Tableau 17. ICV EI de la production de saumure concentrée en lithium, à partir de saumures naturelles (conditions favorables) (Stamp et al., 2012).

Input	Process Name	Output	Remarks	Modul name in Ecoinvent	Mean value	Unit
Lithium, in ground	Concentrated lithium brine, at plant (favorable conditions)		Efficiency 90%	Lithium, 0.15% in brine, in ground	6.67E-02	kg
Occupation, mineral extraction site				Occupation, mineral extraction site	1.71E-02	m2a
Transformation, from unknown			life time plant: 50a	Transformation, from unknown	3.41E-04	m2
Transformation, to mineral extraction site				Transformation, to mineral extraction site	3.41E-04	m2
Diesel (burned in building machine)			operational data 2009	Diesel, burned in building machine/GLO S	1.15E-01	MJ
Electricity			operational data 2009	Electricity, low voltage, at grid/BR U	7.14E-03	kWh
		⇒ Waste heat to air	from electricity consumption, low population density	Heat, waste	2.57E-02	MJ
		⇒ Concentrated Li brine, at plant (favorable conditions)	6% Li content		1.00E+00	kg

▪ ELCD et PEF/OEF

Aucun procédé disponible n'a été identifié pour le lithium directement. Cependant il existe un pilote PEFCE pour les batteries portables rechargeables. Selon ce guide, il est conseillé de modéliser le lithium des cathodes des batteries lithium ion par « lithium carbonate production » de la BDD ecoinvent. L'hydroxyde de lithium de l'électrolyte ainsi que l'hexafluorophosphate de lithium doivent être modélisés par « lithium hydroxide production » de la BDD ecoinvent.

3.3.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Au sein de la littérature ACV, la production de lithium (c'est-à-dire extraction, concentration et raffinage) ne constitue pas un objet d'étude très répandu, la majorité des études préférant se focaliser sur l'analyse des batteries au lithium plutôt que le métal en soi. Ainsi, seules trois études se focalisant sur la production de lithium ont été trouvées dans la littérature scientifique ACV :

- Stamp et al., 2012 - Environmental impacts of a transition toward e-mobility : the present and future role of lithium carbonate production
- Institut EDDEC, 2017 - Analyse du cycle de vie – Métaux et économie circulaire au Québec

- Ambrose and Kendall, 2019 - Understanding the future of lithium – Part 2 : temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling

Comme pour le cuivre, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre, et enfin les résultats d'impacts (EICV).

3.3.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.3.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Des 8 procédés relatifs à l'exploitation du lithium disponibles dans ecoinvent, un décrit l'extraction à partir de saumures, deux l'extraction minière du spodumène et deux la production du produit intermédiaire (carbonate de lithium).

Le système de production de la saumure sur EI est un système multifonctionnel. En effet, la saumure est un sous-produit de l'extraction de potasse. Le système étudié dans l'inventaire correspond donc à une production de 2 720 000 t de chlorure de potassium (potasse) et de 48 000 t de Li_2CO_3 . Les intrants et extrants sont principalement alloués selon l'aire d'occupation, à l'exception de la consommation d'énergie suivant les paramètres suivants :

- La consommation d'électricité est allouée à 0.53 % à la saumure.
- La consommation de diesel est allouée à 1.79 % à la saumure.

Ainsi les paramètres utilisés pour cette allocation sont résumés dans le Tableau 18.

Tableau 18. Paramètres de l'inventaire EI pour l'allocation entre la potasse et le carbonate de lithium.

	Production		Share (Production)	Area		Share (Area)
Potassium chloride	2720000	t/a	0.905	61.41	km ²	0.984
Potassium sulphate	255102	t/a	0.085			
Boric acid	16500	t/a	0.005			
Li CO ₂ ₃ (operational data 2009)	14010	t/a	0.005	1	km ²	0.016
Total	3005612	t/a		62.41	km ²	

La liste des intrants des inventaires d'ecoinvent décrivant l'exploitation des gisements de lithium ainsi que la comparaison des quantités utilisées dans chaque inventaire est visible en Figure 35. L'inventaire du reste du monde et l'inventaire européen utilisent les mêmes sources de données (une approximation à partir de données de littérature), exception faite pour le mix énergétique utilisé, ils ne sont donc pas différenciés sur ce graphique. Il est possible de remarquer de manière générale que l'exploitation des saumures requiert une occupation des sols plus importante que l'exploitation à partir des mines ainsi qu'une plus grande consommation de diesel. A l'inverse l'extraction minière du spodumène requiert plus d'électricité, de grandes quantités d'eau, de chaleur et des infrastructures plus importantes. De même, l'inventaire lié à l'extraction de saumures ne prend pas en compte les infrastructures, contrairement à celui de l'extraction du spodumène.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

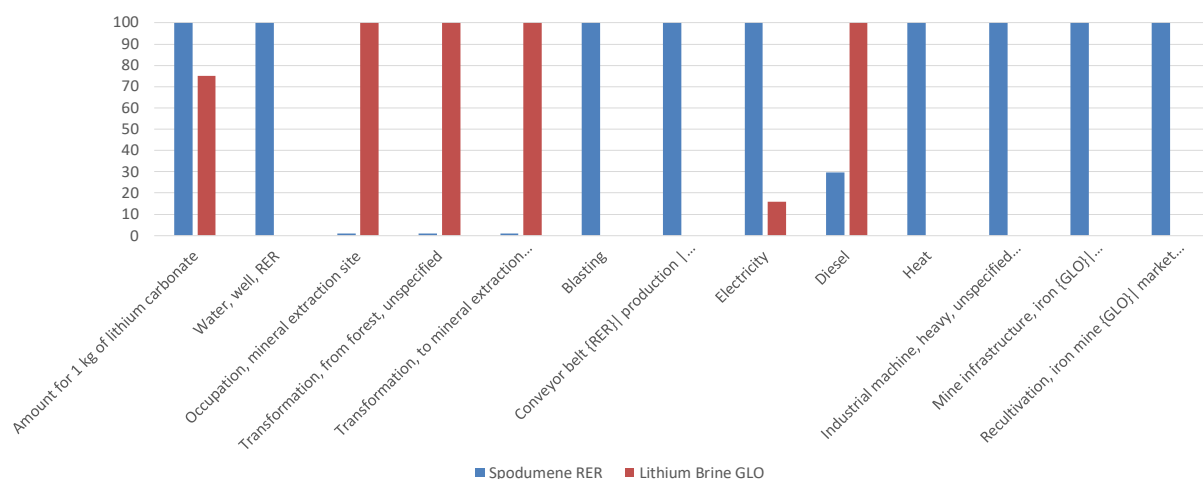


Figure 35. Comparaison des inventaires de la BDD EI pour l'exploitation des gisements de lithium nécessaire à la production d'une quantité équivalente de carbonate de lithium.

Afin de comparer ces deux moyens d'extraire le lithium, il est nécessaire de rapporter les quantités de spodumène et de saumure à la même quantité de lithium ou de produit intermédiaire. Pour ce faire, le carbonate de lithium est examiné afin d'évaluer la quantité de matière première nécessaire à la production d'1 kg. Ainsi la consommation énergétique de chaque procédé est présentée dans le Tableau 19. Il faut ainsi plus de spodumène que de saumure pour produire la même quantité de carbonate de lithium. Pour la même production, l'extraction de spodumène requiert plus d'électricité alors que l'exploitation des saumures est plus demandeuse en diesel.

Tableau 19. Consommation énergétique pour l'exploitation des gisements de lithium dans Ecoinvent selon la quantité finale de carbonate de lithium produite.

Unité	Input pour la production de carbonate de lithium	Diesel	Electricité
	kg/kg LiCO ₃	MJ/kg LiCO ₃	kWh/kg LiCO ₃
Spodumene {RER} production APOS, U	5.59	0.143	0.190
Lithium brine, 6.7 % Li {GLO} lithium brine inspissation APOS, U	4.19	0.482	0.0299

Il peut être intéressant et utile d'analyser également le procédé global d'Ecoinvent « market for » pour la production de carbonate de lithium. Le procédé date de 2011 et il inclut différents sous-procédés qui décrivent la production de carbonate de lithium globale avec différentes méthodes, alloués selon une photographie du marché. Différents transports sont inclus également. Les parts de marché des procédés de production de carbonate de lithium au sein du procédé global « market for » sont reportées sur la Figure 36. Ces valeurs représentent la part (en masse) des différentes sources de carbonate de lithium. La production à partir de saumure est majoritairement représentée à 98.5% alors que le spodumène ne représente que 1.4%, suivi par le carbonate de lithium recyclé à partir de batteries Li-ion usagées (0.1%).

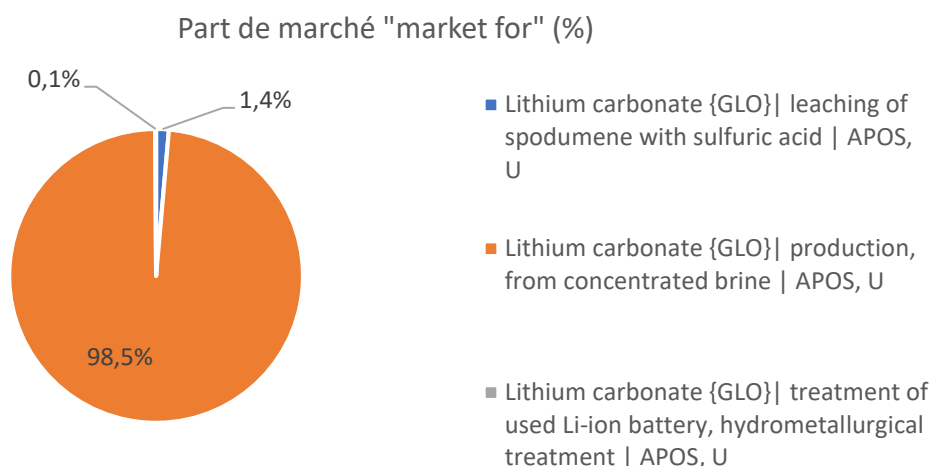


Figure 36. Part de marché au sein du set de données « market » du carbonate de lithium surecoinvent.

Enfin, certaines catégories d'impacts de la méthode EF adaptée sont évaluées et comparées pour les différents sets de données. Les catégories d'impact concernées sont le réchauffement climatique, l'occupation des sols, l'épuisement de la ressource en eau et l'épuisement des ressources fossiles. Pour être cohérent en termes d'unité fonctionnelle, les impacts des différents procédés globaux {GLO} décrivant la production de carbonate de lithium, et non de spodumène ou de saumure, peuvent être visualisés en Figure 37. L'impact sur le réchauffement climatique de l'extraction du minerai est similaire à celui de l'exploitation des saumures. Concernant l'occupation des sols et comme vu précédemment, les saumures sont beaucoup plus problématiques alors qu'en termes de consommation d'eau l'extraction minière est plus impactante. Enfin, l'extraction du spodumène entraîne davantage d'appauvrissement des ressources.

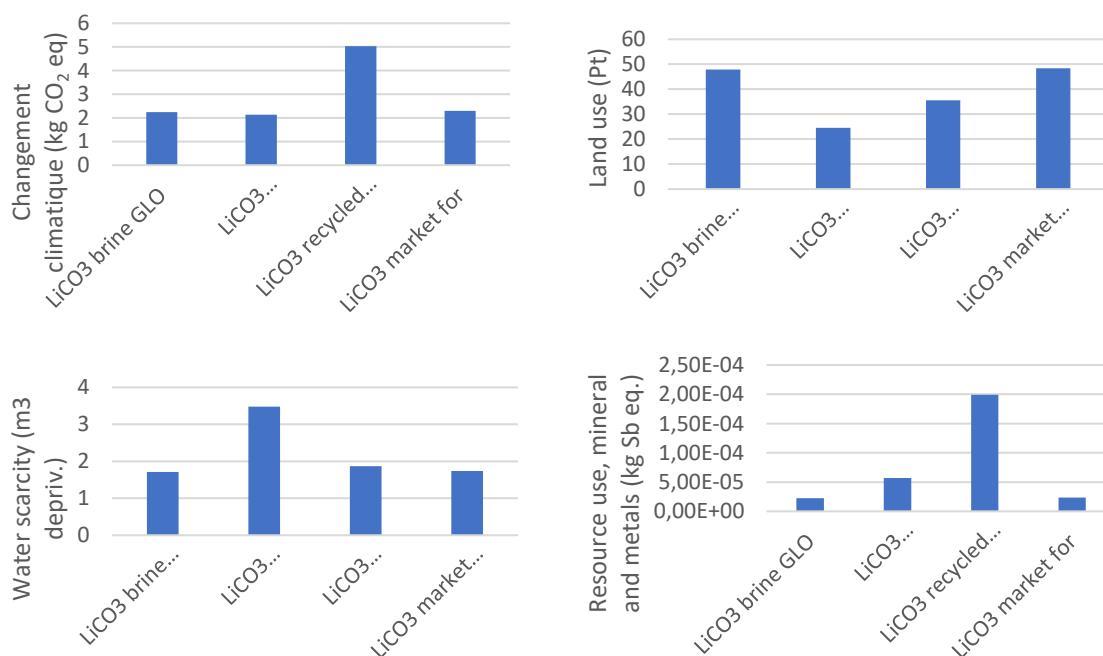


Figure 37. Comparaison des impacts des procédés EI de l'extraction du lithium et de la transformation en carbonate de lithium. UF = production d'1 kg de carbonate de lithium.

Finalement, la contribution des procédés d'extraction EI à la catégorie d'impact d'appauvrissement des ressources est analysée (Figure 38). Il est possible de remarquer que dans le cas du spodumène, le lithium ne contribue pas aux résultats obtenus. A l'inverse l'extraction de la saumure implique un appauvrissement des ressources dû uniquement à

l'extraction du lithium. En effet, l'entrée connue de la nature dans le procédé de production du spodumène sur Simapro est en fait le minerai lui-même intitulé « spodumène » et non le lithium. Comme démontré avec la bauxite précédemment, la méthode d'impact ne prend en compte que les matières premières individuelles (métaux purs) et le lithium contenu dans le minerai n'est ainsi pas pris en compte dans le calcul.

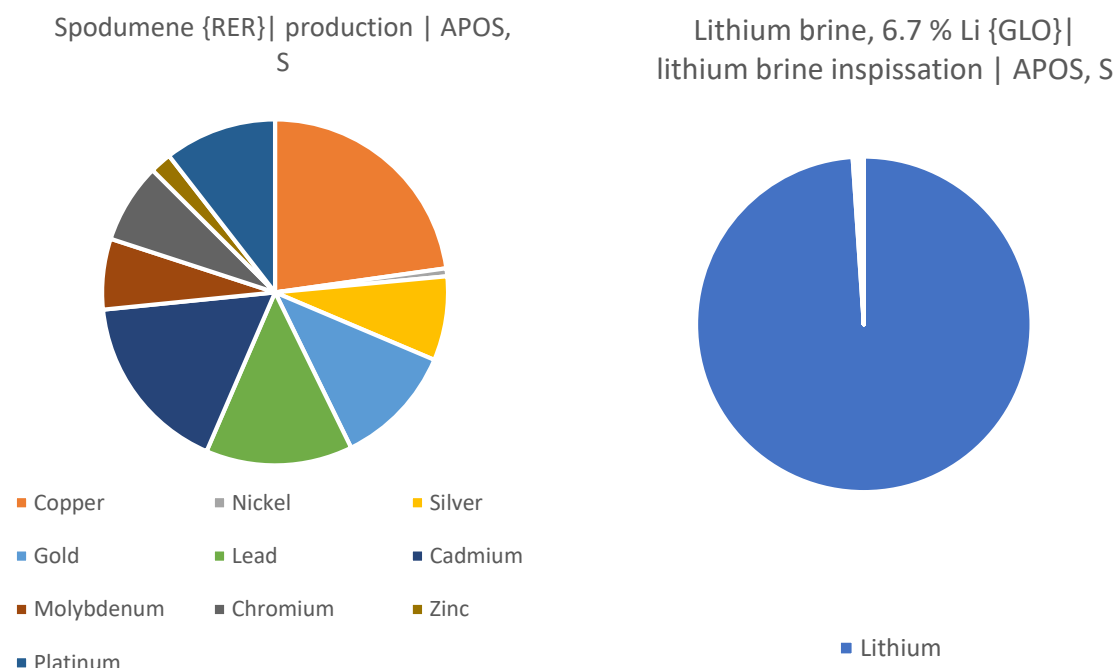


Figure 38. Contribution des inventaires ecoinvent de production de spodumène et de saumure à la catégorie d'impact "Resource Use, minerals and metals" de la méthode EF.

3.3.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 21 propose une rapide description des différentes études analysées dans le cadre de cette étude. L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B. Ainsi, parmi les trois études analysées, une se focalise sur la production d'un concentré de lithium en prenant uniquement en compte les étapes d'extraction et de concentration (Institut EDDEC, 2017), tandis que les deux autres se concentrent sur la production de lithium sous forme de carbonate Li_2CO_3 . L'étude réalisée par Ambrose and Kendall (2019) fournit des données d'ICV en fonction du type de ressources à partir desquelles le lithium est extrait (données issues de sources publiques telles que la littérature scientifique ou encore des rapports publics). En termes de couverture géographique, la région « monde » est la plus représentée parmi le faible échantillon d'études analysées, tandis que l'étude de l'institut EDDEC tente d'adapter son étude au contexte québécois. Enfin, l'étude d'Ambrose and Kendall (2019) mentionne une couverture géographique incluant de multiples régions, sans toutefois détailler toutes ces régions.

Le Tableau 20 présente quelques valeurs d'empreinte carbone issues des différents cas d'études de la littérature ACV, et qui sont associées à la production de carbonate de lithium ou à la production de concentré de lithium.

Tableau 20. Valeurs d'empreinte carbone de la production de lithium (concentré ou carbonate) issues de la littérature (H.G. = High grade ; L.G. = Low grade ; Conc. = Concentrate ; Unfav. = Unfavorable conditions).

Cas d'études considéré	Empreinte carbone (t CO ₂ eq/t Li)	Brève description
Stamp et al., 2012 (Li ₂ CO ₃ from ore)	2.27	Carbonate de lithium produit à partir de minerai
Stamp et al., 2012 (Li ₂ CO ₃ from brine)	2.02	Carbonate de lithium produit à partir de saumure
Ambrose and Kendall, 2019 (Li ₂ CO ₃ from H.G. pegm.)	2.28	Carbonate de lithium produit à partir de pegmatite à haute teneur
Ambrose and Kendall, 2019 (Li ₂ CO ₃ from L.G. pegm.)	2.67	Carbonate de lithium produit à partir de pegmatite à basse teneur
Ambrose and Kendall, 2019 (Li ₂ CO ₃ from L.G. minerals)	3.32	Carbonate de lithium produit à partir de minerai à basse teneur
Ambrose and Kendall, 2019 (Li ₂ CO ₃ from H.G. brine)	3.06	Carbonate de lithium produit à partir de saumure à haute teneur
Ambrose and Kendall, 2019 (Li ₂ CO ₃ from L.G. brine)	3.97	Carbonate de lithium produit à partir de saumure à basse teneur
Ambrose and Kendall, 2019 (Li ₂ CO ₃ from L.G. brine - unfav.)	5.28	Carbonate de lithium produit à partir de saumure à basse teneur dans des conditions « défavorables » ³
Institut EDDEC, 2017 (Li conc. from ore 0.58% Li - Quebec)	3.27	Concentré de lithium produit à partir d'un minerai à 0,58% Li – données adaptée pour le Québec
Institut EDDEC, 2017 (Li conc. from ore 0.58% Li - Monde)	1.09	Concentré de lithium produit à partir d'un minerai à 0.58% Li au niveau mondial
Institut EDDEC, 2017 (Li conc. from ore 1.86% Li - Monde)	4	Concentré de lithium produit à partir d'un minerai à 1,86% Li au niveau mondial
Institut EDDEC, 2017 (Li conc. from brine - Monde)	0.26	Concentré de lithium produit à partir d'une saumure au niveau mondial

La Figure 39 représente l'empreinte carbone associée à la production de lithium sous forme de concentré (Institut EDDEC, 2017) ou de carbonate Li₂CO₃ (Stamp et al., 2012 ; Ambrose and Kendall, 2019 ; ecoinvent) en mettant en perspective les résultats issus de la littérature avec ceux issus d'ecoinvent. Les résultats fournis par l'Institut EDDEC (2017) sont calculés en fonction des ressources (minerai, saumure, teneurs différentes etc.) et de la couverture géographique considérées. Les résultats fournis par Stamp et al. (2012) et Ambrose and Kendall (2019) ne distinguent quant à eux que le type de ressources sans tenir compte de la couverture géographique (différents types de minerais ou saumures). Globalement, les valeurs d'empreinte carbone obtenues via ecoinvent semblent très légèrement inférieures à celles données par la littérature.

³ Selon les auteurs, les conditions défavorables se différencient par une étape de séchage plus intense en termes de consommation de carburant.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

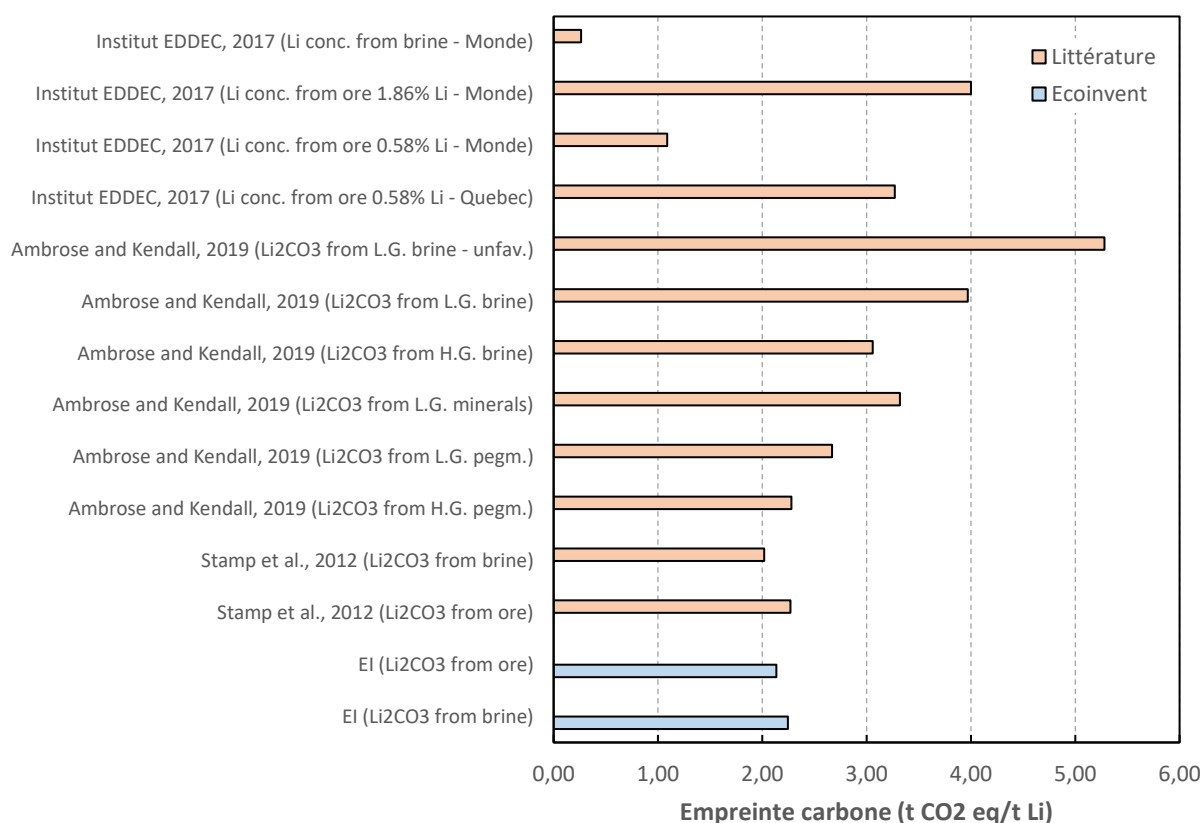


Figure 39. Empreinte carbone de la production de lithium issue de la littérature et d'ecoinvent (L.G. = Low grade ; H.G. = High grade ; unf. Cond. = unfavorable conditions ; fav. Cond. = favorable conditions).

Tableau 21. Revue de littérature ACV du lithium – description des études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit fonctionnelle –	Unité	Couverture géographique	Allocation	ICV ?	Source des données
Stamp et al. <i>Environmental impacts of a transition toward e-mobility : the present and future role of lithium carbonate production</i>	2012	Métal raffiné « Production of 1 kg of Li_2CO_3 »		Monde	/	Non	/
Institut EDDEC <i>Analyse du cycle de vie – Métaux et économie circulaire au Québec</i>	2017	Concentré « 1 kg de lithium dans un concentré (de minerai ou de saumure) »		Québec Monde	/	Non	/
Ambrose and Kendall <i>Understanding the future of lithium – Part 2 : temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling</i>	2019	Métal raffiné « 1 kg of battery grade LCE (> 99% Li_2CO_3 by content) »		Plusieurs régions considérées	/	Oui	Données publiques (littérature, rapports, etc.)

3.3.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Malgré une source de données d'inventaire précise et transparente par rapport aux procédés du lithium, certaines limites des BDD existantes peuvent toutefois être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière du lithium, notamment concernant la représentativité géographique et la variabilité de certaines informations.

Concernant la représentativité géographique des sets de données, il est possible de conclure qu'uniquement la production de lithium au Chili est convenablement représentée dans les sets de données (Tableau 22). La représentativité géographique est incomplète, avec des données souvent moyennes et/ou des zones géographiques différentes utilisées comme proxy et surtout un manque de données représentatives des producteurs majeurs de lithium (notamment l'Australie actuellement).

Tableau 22. Représentativité géographique de l'exploitation des gisements de lithium dans les BDD ACV.

Pays/Zone géographique	Part de la production (2018)	Représentativité dans les sets de données EI	Commentaires
Australie	43%	✗	Non représenté dans les bases de données (approximation de l'extraction du spodumène par l'extraction du fer).
Chili	32%	✓	L'extraction de lithium à partir de saumures est modélisée dans Ecoinvent pour le désert d'Atacama. Les données sont extrapolées pour une représentation au niveau monde (GLO).
Argentine	13%	✗	Les salars de l'Hombre Muerto et Olaroz ne sont pas modélisés dans ecoinvent.
Chine	7%	✗	Ni les saumures ni le minerai extrais en Chine ne sont modélisés.
Zimbabwe	2%	✗	Non représenté.
USA	2%	✗	Non représenté.
Portugal	1%	✗	Non représenté.

D'autre part, la représentativité géographique du procédé « market for » par rapport aux producteurs majeurs de carbonate de lithium n'est pas du tout actualisée et cela représente donc une problématique d'obsolescence des données sur le lithium pour n'importe quelle utilisation de ce set de données. En effet, en 2-3 ans la situation a beaucoup évolué. En particulier, le 1er producteur est désormais l'Australie qui participe à 43 % à la production annuelle de lithium grâce à l'extraction de spodumène. C'est en opposition avec le set de données mentionné dans lequel 98 % de la matière première provient des saumures (Figure 36).

Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée qui arrive jusqu'en 2010 pour les procédés d'Ecoinvent et jusqu'à 2021 pour les procédés de GaBi. En général, cette obsolescence ne préoccupe pas trop car l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible. En fait, l'exploitation croissante influe assez peu sur l'accessibilité qui est de

plus en plus dépendante des contextes socio-politiques. Au niveau technique, les ressources évoluent en fonction de l'intensité de l'exploration réalisée en amont. Une pénurie serait en fait la conséquence d'une mauvaise anticipation de l'effort d'exploration : il se passe au minimum 10 ans entre la découverte d'un gisement et sa mise en exploitation. Pour les saumures, la technologie pourrait évoluer, Eramet venant de mettre au point un procédé d'extraction sélective du lithium dans la saumure sans avoir recours à l'évaporation. Finalement, il est possible de relever une obsolescence relative et un défaut d'inclusion de nouvelles technologies (avec des données qui arrivent maximum à l'année 2010).

Les différentes limites identifiées et les considérations relatives pour le lithium sont résumées dans le Tableau 8.

Tableau 23. Exploitation du lithium dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques
Accès aux données et transparence	▪ Dans les BDD gratuites les informations disponibles ne sont pas substantielles. ▪ Consultation publique des BDD payantes (EI, GaBi) permet d'accéder aux données spécifiques de l'inventaire agrégé ou simplement aux informations supplémentaires. ▪ Documentation non standardisée. ▪ Littérature avec données d'inventaire qui pourrait être utilisés comme complémentaires. ▪ Autres sources : en général, pas d'informations profitables pour améliorer la robustesse des BDD ACV.
Représentativité	▪ Couverture géographique très limitée par rapport aux principaux pays qui exploitent le lithium (voir Tableau 22). ▪ Pas de représentation de la production d'hydroxyde de lithium, de chlorure de lithium et de concentré de lithium sans passer par le carbonate de lithium. ▪ Il est ainsi indiqué que le module de production du spodumène représente une estimation approximative des exigences du procédé et qu'il doit être utilisé uniquement lorsque les impacts du spodumène ne sont pas considérés comme élevés. ▪ Les parts de marché du lithium pour la production de carbonate de lithium ne sont pas du tout représentatives du marché actuel.
Allocation	▪ Pas de coproduits indiqués pour le spodumène mais chlorure de potassium brut comme sous-produit de l'exploitation des saumures (allocation cohérente faite par le producteur). ▪ La méthode d'allocation utilisée pour prendre en compte l'impact des différents sous procédés de production de la saumure n'est pas transparente.
Obsolescence	▪ Ecoinvent présente une période de validité annoncée qui arrive jusqu'aux années 2009-2010 pour les saumures et 2000 pour le spodumène. En général, l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible. ▪ Certaines technologies en plein essor pour l'exploitation des saumures risquent de jouer à termes un rôle

		important, car elles offrent l'avantage de ne pas avoir recours à l'évaporation.
Complétude étendue	et	▪ Certaines technologies en plein essor pour l'exploitation des saumures risquent de jouer à termes un rôle important, car elles offrent l'avantage de ne pas avoir recours à l'évaporation. ▪ Le set de données EI sur l'extraction des saumures ne prend pas en compte l'impact sur le cycle de l'eau ni les impacts sur l'occupation particulière des sols.
Vraisemblance		▪ Le set de données EI sur l'exploitation des saumures est basé sur des données industrielles agrégées. ▪ A l'inverse, l'inventaire EI de l'extraction du spodumène est basé uniquement sur des approximations.

3.3.3. RECOMMANDATIONS

Les scénarios d'exploitation du lithium à partir de minerais et de saumure représentés dans EI sont les suivants :

- Extraction de lithium à partir de saumure au Chili (désert d'Atacama) extrapolée à l'échelle mondiale pour une utilisation globale du procédé,
- Production globale et européenne de lithium à partir de spodumène.

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations. De manière générale, il est possible d'affirmer que, si la chaîne des fournisseurs du carbonate de lithium utilisée dans la chaîne de production n'est pas bien connue, il est préférable de créer un nouveau procédé correspondant à la part de marché actuelle de lithium provenant de spodumène et de saumure plutôt que d'utiliser le procédé « market for » disponible, dans lequel 98 % du lithium provient de saumures. Lorsque la provenance du lithium est connue avec plus ou moins de précision, il faudra prêter attention au choix d'un procédé dont les limites du système sont adaptées au produit d'intérêt (saumure, spodumène, carbonate de lithium, hydroxyde de lithium, chlorure de lithium etc...) en se rappelant que tous les dérivés du lithium sont modélisés dansecoinvent à partir du carbonate de lithium.

Comme montré lors de l'analyse de l'état de l'art, le procédé d'extraction du spodumène n'est pas totalement fiable et représentatif du scénario qu'il décrit car il correspond en fait à une extrapolation de la production de fer. A l'inverse, le procédé d'exploitation des saumures est basé sur des données industrielles d'installations situées dans le désert d'Atacama. La littérature fournit aussi des données d'inventaire qui pourraient être utilisées en alternative ou en complément aux BDD ACV ainsi que des résultats du calcul des impacts potentiels pour certains cas d'étude spécifiques. En particulier pour la modélisation de l'extraction spécifique du spodumène, il est conseillé de privilégier plutôt la littérature que les bases de données. De manière générale, les informations extraites de la littérature permettent surtout une validation partielle des BDD existantes, car les impacts potentiels des activités d'exploitation analysées sont généralement plus élevés que les impacts calculés en utilisant les BDD ACV existantes.

Enfin, il est important de rappeler de considérer un pourcentage de matière première secondaire dans le cadre de la modélisation et de l'analyse d'un produit fini ou semi-fini. Si

le pourcentage réel n'est pas connu, une recherche du taux de recyclage moyen devra être effectuée pour le carbonate de lithium selon l'application.

Les recommandations issues de l'analyse des bases de données et de la littérature sont reportées dans le Tableau 24.

Tableau 24. Recommandations pour la modélisation de spodumène, de saumure et de carbonate de lithium en ACV.

Origine :	Chili	Reste du monde	Inconnue
Spodumène	-	Préférer des données spécifiques ou issues de la littérature (ex : Ambrose and Kendall, 2018) .	Préférer des données spécifiques ou issues de la littérature.
Saumure	Utiliser le procédé d'extraction de la saumure « GLO ».	Utiliser le procédé d'extraction de la saumure « GLO » en adaptant les mix énergétiques.	Utiliser le procédé d'extraction de la saumure « GLO »
Voie de production :	A partir de spodumène	A partir de saumure	Inconnue
Carbonate de lithium	Préférer des données spécifiques ou issues de la littérature.	Utiliser le procédé de production de carbonate de lithium à partir de saumure « GLO ».	Utiliser le procédé « market for » en modifiant les parts de marché suivant la situation actuelle (saumure/spodumène). Utiliser des données issues de la littérature pour la part de production du spodumène.

3.4. Terres rares

3.4.1. ETAT DE L'ART

3.4.1.1. EXTRACTION DES TERRES RARES DANS LE MONDE

Les terres rares représentent le groupe des lanthanides (éléments de numéros atomiques compris entre 57 et 71, du lanthane au lutécium). Du fait de propriétés chimiques voisines, on y associe l'yttrium (Y) et le scandium (Sc). On distingue les terres cériques, légères (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium, europium et gadolinium) des terres yttriques, plus lourdes (les autres terres rares), l'europium et le gadolinium étant parfois classés comme terres rares lourdes. Les terres rares sont présentes en quantités significatives dans les minerais de monazite et de bastnaésite. Grâce à leur propriétés chimiques et physiques uniques, les terres rares gagnent de l'importance dans plusieurs nouvelles technologies et systèmes d'énergie contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et l'appauvrissement des ressources fossiles (ex : éolienne, véhicules électriques, éclairage à haute efficacité, batteries, et stockage d'hydrogène) (Navarro and Zhao, 2014).

Malgré leur nom, les éléments constituant les terres rares ne sont pas rares. Les terres rares sont principalement contenues dans les roches associées au magmatisme alcalin, telles que les carbonatites, hydrothermalisées ou pas, les syénites néphéliniques ou les granites hyperalcalins.

En Chine, le gisement de terres rares de Bayan Obo, le plus important au monde, est une carbonatite exploitée à ciel ouvert, par le groupe China Northern Rare Earth. Il renferme de la bastnaésite et de la monazite, associées à des oxydes de fer, ainsi qu'à des oxydes de niobium et de thorium. Les réserves sont de 600 millions de t de minerai contenant 34 % de fer, 5 % d'oxydes de terres rares et 0,032 % d'oxyde de thorium.

En surface, principalement dans les climats tropicaux humides, les gisements de carbonatite sont facilement altérés et ils développent alors des formations argileuses qui peuvent piéger par adsorption les terres rares. Ces argiles, appelées argiles ioniques, constituent une importante source de Terres rares en Chine, dans les provinces du Sud où le climat favorise cette altération météorique. La facilité de leur extraction en fait la cible principale d'exploitations artisanales et souvent clandestines (voir onglet Terres Rares de l'Annexe A).

Les terres rares ayant des propriétés chimiques extrêmement voisines, il n'est souvent pas nécessaire de les séparer et 75 à 80 % du tonnage des terres rares est consommé sans séparation des terres rares contenues dans les concentrés marchands. Ces utilisations mettent, en général, en jeu les seules propriétés chimiques des terres rares.

Pour des usages plus spécifiques, leur séparation est alors nécessaire. La Chine détient pratiquement le monopôle de cette opération.

Le Tableau 25 reporte une liste des gisements et des producteurs pour l'année 2018. Les différentes sources, ainsi que certains projets en développements et informations plus détaillées sont reportées en Annexe A.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 25. Production d'oxydes de terres rares par pays en 2018. Sources en Annexe A.

PAYS 2018	RESSOURCES MINERAI (MT)	RESSOURCE OTR (T)	PRODUCTION (T/A)	PRODUCTION MINES OTR %	AUTRES	TYPE	MINERAUX
CHINE		44,000,000	120,000	70.6%			
BAYAN OBO	600.00	30,000,000	59,500		Fe, Th	Carbonatite	bastnaésite; monazite
WEISHAN (SHANDONG)			6,500				bastnaésite
MAONIUPING (SICHUAN)			42,000				bastnaésite
DALUCAO (SICHUAN)							bastnaésite
GANZHOU (JIANGXI)						Argiles ioniques	
XUNWU (JIANGXI)						Argiles ioniques	
LONGNAN (JIANGXI)		15,600,000	12,000			Argiles ioniques	
CAOWU (GUANGDONG)						Argiles ioniques	
HEZHOU (GUANGXI)						Argiles ioniques	
JIANGUA (HUNAN)						Argiles ioniques	
AUSTRALIE		3,400,000	25,903	15.2%			
DUBBO	75.18	661,584	4,900		Zr, Nb, Ta; Hf, Y	Igné alcalin	bastnaésite
BROWNS RANGE	8.98	56,663	3,250			Hydrothermal	Xénodyme
MOUNT WELD *	19.70	1,694,200	17,753			Carbonatite	Monazite
INDE		6,900,000	1,800	1.1%			
CHATRAPUR (ODISHA)			1,100		Ti, Zr	Sables côtiers	monazite
BIRMANIE			5,000	2.9%			
THAÏLANDE			1,000	0.6%			
VIETNAM		22,000,000	400	0.2%			
MALAISIE			200	0.1%			
BRESIL		22,000,000	800	0.5%			

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

ARAXA (MINAS GERAIS)		22,000,000	800	Nb	Carbonatite	sous produit du Nb
ETATS UNIS			4,000	2.4%		
MOUNTAIN PASS		16,690,000	4,000			bastnaésite
RUSSIE		12,000,000	3,687	2.2%		
REVDA (PREQU'ILE DE KOLA)	16.69		3,600	Nb, Ta, Ti		Loparite
VELIKY NOVGOROD			87		sous produit des phosphates	Apatite
BURUNDI			3,600	2.1%		
GAKARA	1.2 ?		3,600		Filonien	bastnaésite; monazite
RESTE DU MONDE			3,610	2.1%		
MONDE			170,000			

3.4.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction des terres rares dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 26, selon les frontières des systèmes décrites sur la Figure 40. La BDD ecoinvent propose de nouveau l'accès à des sets de données représentant la production du concentré de terres rares ou d'oxydes de terres rares alors que GaBi donne accès directement à la production de terres rares et d'oxydes de terres rares et l'intermédiaire n'est pas disponible. Les procédés GaBi étant payants, l'analyse d'impact de cette étude concerne uniquement les procédés EI.

Tableau 26. Sets de données disponibles dans les BDD ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de concentré de terres rares, OTR et terres rares. Les procédés grisés ne sont pas inclus dans la licence standard du logiciel et sont à acheter sur demande.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Concentré de terres rares	○ <i>Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {CN} production APOS, U</i> ○ <i>Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {RoW} production APOS, U</i>	○ <i>Pas de procédé</i>
Oxydes de terres rares	○ <i>Cerium concentrate, 60% cerium oxide {CN} rare earth oxides production from bastnasite concentrate APOS, U</i> ○ <i>Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {RoW} production APOS, U</i> ○ <i>Neodymium oxide {CN} rare earth oxides production from bastnasite concentrate APOS, U</i> ○ <i>Praseodymium oxide {CN} rare earth oxides production from bastnasite concentrate APOS, U</i> ○ <i>Lanthanum oxide {CN} rare earth oxides production from bastnasite concentrate APOS, U</i> ○ <i>Samarium europium gadolinium concentrate, 94% rare earth oxide {CN} rare earth oxides production from bastnasite concentrate APOS, U</i>	○ <i>Tous les OTR sont disponibles individuellement</i>
Terres rares	○ <i>Pas de procédé.</i>	○ <i>Toutes les TR sont disponibles individuellement.</i>

En premier lieu il est à noter que les frontières des systèmes sont différentes selon les procédés utilisés recensés (Figure 40). En effet, certains modélisent la production de concentré de terres rares, d'autres la production d'oxydes de terres rares et enfin la production de terres rares selon des méthodes différentes (pyrométallurgie ou hydrométallurgie).

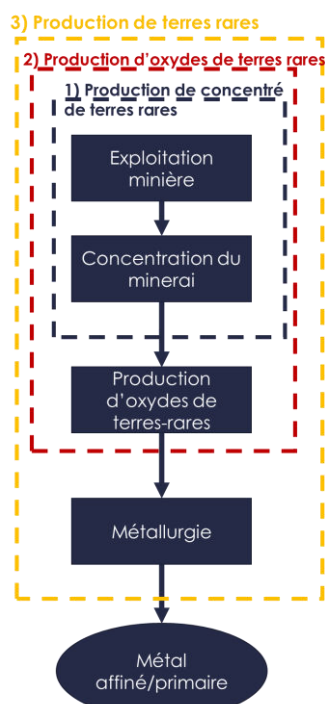


Figure 40. Frontières des systèmes des sets de données ecoinvent et GaBi de production de terres rares.

Les sets de données EI concernant la production de terres rares s'intéressent tous à l'extraction d'oxydes à partir de bastnaésite (Althaus, Hirsch, & Osses, 2007). La raison pour la sélection de ce minerai est qu'il est la plus importante source d'oxydes de terres rares légères. Les oxydes pour lesquels l'inventaire est établi sont présentés dans le Tableau 27.

Tableau 27. Propriétés des oxydes de terres rares et des éléments terres rares disponibles dans EI (Althaus et al., 2007).

Rare earth oxide	Formula	Molecular weight g/mol	Specific gravity g/cm ³	Melting point °C	Value *) US\$/kg	Rare earth element	Sym bol	Molecular weight g/mol
Cerium oxide	CeO ₂	172.12	7.3	2600	1.5	Cerium	Ce	140.12
Lanthanum oxide	La ₂ O ₃	325.81	6.6	2305	1.75	Lanthanum	La	138.91
Neodymium oxide	Nd ₂ O ₃	336.48	7.3	2320	8.9	Neodymium	Nd	144.24
Praseodymium oxide	Pr ₆ O ₁₁	1021.44	6.9	2200	9.6	Praseodymium	Pr	140.91
Europium oxide	Eu ₂ O ₃	351.92	7.3	2350	270	Europium	Eu	151.96
Gadolinium oxide	Gd ₂ O ₃	362.50	7.6	2420	49 **)	Gadolinium	Gd	157.25
Samarium oxide	Sm ₂ O ₃	348.72	7.1	2335	2.5	Samarium	Sm	150.36

*) Average rare earth oxide bulk prices FOB China, 9.2004 - 9.2006, min. 99% purity (Lynas, 2006b)
 **) Not available; price for dysprosium oxide; according to Hedrick (2004) similar prices for Gd₂O₃ and Dy₂O₃

Les compositions spécifiques de ces oxydes de terres rares considérées dans EI sont indiquées dans le Tableau 28. Le premier produit du tableau « rare earth concentrate from bastnaesite » est le procédé contenant l'inventaire d'extraction du minerai. Tous les procédés suivants sont élaborés à partir de ce premier procédé en ajoutant les étapes de séparation des oxydes.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 28. Composition des oxydes de terres rares disponibles dans EI (Althaus et al., 2007).

Product	TREO *) %	Purity % of TREO	REO Composition % of TREO
Rare earth concentrate from bastnasite	70% REO (**)	70% REO	49% CeO ₂ , 28% La ₂ O ₃ , 15.4% Nd ₂ O ₃ , 5.1% Pr ₆ O ₁₁ , 1.2% Sm ₂ O ₃ , 0.23% Eu ₂ O ₃ , 0.58% Gd ₂ O ₃
Cerium concentrate	98% REO	60% CeO ₂	Min. 60% CeO ₂ , max. 20% La ₂ O ₃ , max. 1% Nd ₂ O ₃
Lanthanum oxide	99% REO	99.95% La ₂ O ₃	Max. 0.03% CeO ₂ , 0.005% Nd ₂ O ₃ , 0.005% Pr ₆ O ₁₁
Neodymium oxide	99% REO	99.5% Nd ₂ O ₃	Max. 0.03% CeO ₂ , 0.03% La ₂ O ₃ , 0.4% Pr ₆ O ₁₁
Praseodymium oxide	99% REO	99% Pr ₆ O ₁₁	Max. 0.03% CeO ₂ , 0.03% La ₂ O ₃ , 0.5% Nd ₂ O ₃
Samarium europium gadolinium concentrate	94% REO	94% REO	Min. 50% Sm ₂ O ₃ , 8.5% Eu ₂ O ₃ , 14% Gd ₂ O ₃ Max. 1% CeO ₂

*) Total Rare Earth Oxide (TREO); Difference to 100% are impurities such as CaO, SiO₂, Fe₂O₃, etc.
 **) For detailed composition, see Tab. 70.3
 Source: HeFa (2006) or calculated from ore composition; Values as wt.-%

Le système du set de données EI contient les étapes d'extraction et d'enrichissement des oxydes de terres rares selon les étapes suivantes (Figure 41) :

- Extraction de la bastnaésite,
- Concentration du minerai par flottation et obtention de concentrés de terres rares,
- « Craquage » des minéraux et extraction des terres rares en sous-groupes concentré. Séparation des terres rares individuelles par extraction par solvant.

La concentration moyenne en oxydes de terres rares dans le minerai est fixée à 6% et la concentration en bastnaésite dans le minerai est fixée à 10 %.

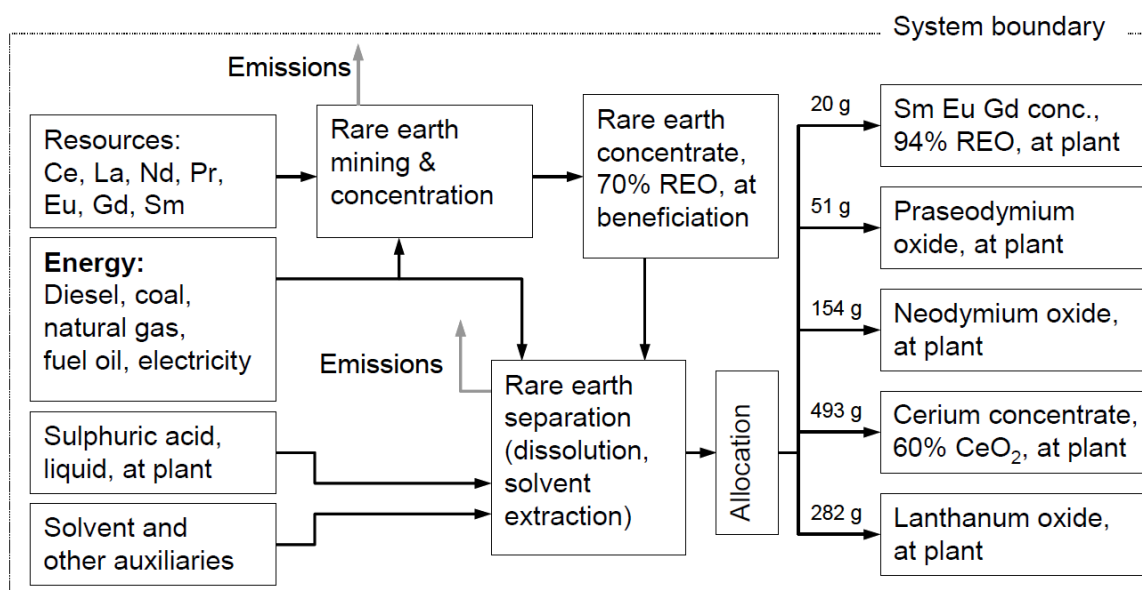


Figure 41. Frontière du système global de production d'oxydes de terres rares à partir de bastnaésite dans ecoinvent (Althaus, Blaser, Classen, & Jungbluth, 2004).

Si uniquement le procédé d'extraction est considéré dans l'étude ACV, le produit à prendre en compte est le concentré de terres rares (Figure 42). Le procédé EI considère une extraction de la bastnaésite à partir de mines à ciel ouvert grâce à un dynamitage et utilisation de pelles mécaniques. Le minerai est ensuite broyé, criblé et acheminé au procédé de flottation pour ensuite subir une étape de lixiviation à l'acide chlorhydrique afin d'enlever la calcite. Le produit final est un concentré composé d'au moins 70 % d'OTR.

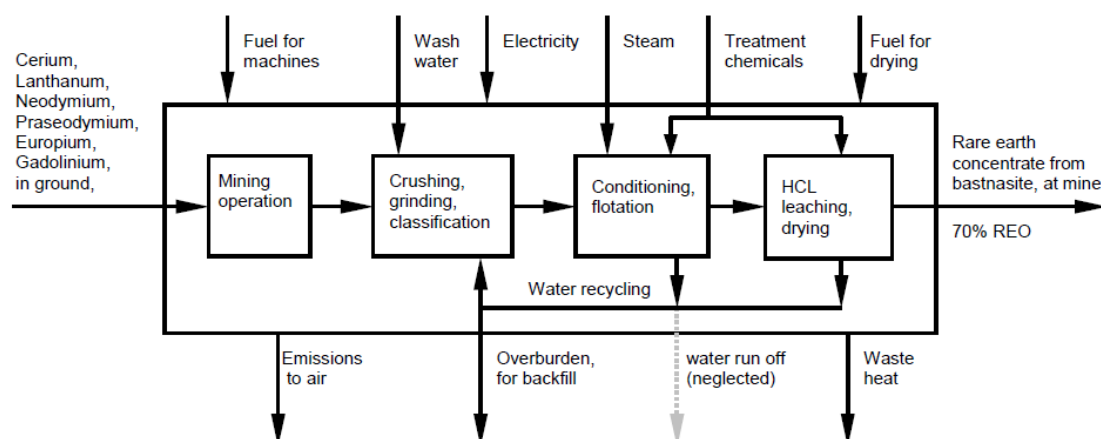


Figure 42. Schéma simplifié de la production de concentré de terres rares à partir de bastnaésite dans EI (Althaus et al., 2004).

Dans la BDD GaBi, des procédés unitaires modélisant l'extraction minière sont disponibles pour toutes les terres rares. Tous les oxydes de terres rares sont disponibles individuellement sauf le praséodyme et le néodyme dont l'accès est payant (data on demand). Dans GaBi, le procédé de la production d'un concentré de terres rares n'est pas disponible comme dans EI. La principale source de données des procédés GaBi est le « Chinese Rare Earth Industry Report 2009 » auquel s'ajoute une communication orale additionnelle avec des experts. Cependant ce rapport de référence n'est pas accessible gratuitement.

Dans la BDD GaBi, l'extraction des éléments terres rares est effectuée à partir de monazite et de bastnaésite. Ces minerais sont extraits principalement en Chine à 97 % où la monazite est prédominante. Les sets de données représentent donc les conditions d'extraction basiques en Chine. De manière générale, les terres rares sont concentrées par des méthodes conventionnelles comme la concentration gravitaire, la flottation et la séparation magnétique. Après la concentration, les terres rares dans le concentré sont dissoutes grâce à de l'acide chlorhydrique ou sulfurique, suivant parfois un procédé de calcination. Ce procédé produit de grandes quantités de déchets, dont de la gangue et des fluorures de terres rares inclus dans le set de données. Ces déchets peuvent être prélevés grâce à une solution aqueuse de soude et cela produit du fluorure de soude et de faibles quantités de soude.

La plupart des sets de données GaBi sont issus de données provenant de la mine de Bayan Obo (exception géologique) au nord de Baotou qui est avant tout une mine de fer. En effet, le minerai est ainsi concassé dans la mine et ensuite transporté en train au concentrateur où la concentration en oxydes de fer passe de 33 % à 55 %. Le minerai d'oxyde de fer primaire concentré à 62-65 % est produit grâce à des bandes laminées à base d'alliages de cuivre et des équipements de séparation magnétique. Le reste du minerai est ensuite traité par séparation magnétique et flottation pour produire du minerai de fer secondaire concentré à 45 %. Les OTR sont ainsi collectés dans la mousse de flottation avec une concentration de 10 à 15 %. Le concentré est ensuite filtré pour atteindre 30 % d'OTR. Finalement une concentration de 60 % d'OTR est atteinte.

Pour la séparation des oxydes, le concentré de terres rares est grillé et converti en oxyfluorures, fluorures ou oxydes de terres rares. Ensuite, de l'acide chlorhydrique permet de dissoudre les OTR. Cela produit une solution acide et des déchets acides. Le set de données inclut la conversion de ces déchets acides (constitués principalement de fluorures de terres rares) en un hydrate de terres rares alcalin grâce à de hautes températures et la dissolution avec de l'acide chlorhydrique. La solution acide est concentrée en chlorures acides de terres rares après avoir enlevé le fer, le plomb et les sulfates. Une électrolyse en

sels fondus de La, Ce, Pr, Nd, et un mélange de Nd et Pr (didymium) peut être produite, de la même manière que le mischmétal par une électrolyse des chlorures et fluorures de terres rares anhydres avec des chlorures et fluorures de terres rares alcalins.

▪ **ELCD et PEF/OEF**

Aucun procédé disponible n'a été identifié.

3.4.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

La production des terres rares est un objet d'étude relativement récent dans la littérature scientifique ACV, dans la mesure où la plupart des études disponibles ont été publiées au cours de ces 5 dernières années (depuis 2014). Il convient de noter que ces études se focalisent sur la production de « terres rares », étant donné que les terres rares forment un ensemble de métaux qui sont généralement produits conjointement. Dans le cadre de cette étude, 3 études ACV tirées de la littérature scientifique ont été analysées :

- Weng et al., 2016 - Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements
- Lee and Wen, 2016 - Rare Earths from Mines to Metals – Comparing environmental impacts from China's main production pathways
- Vahidi and Zhao, 2018 - Assessing the environmental footprint of the production of rare earth metals and alloys via molten salt electrolysis.

Ces différents articles ont été sélectionnés sur la base de critères tels que la qualité scientifique (en privilégiant les publications de rang A), le cas d'étude considéré (en privilégiant les cas d'étude industriels), la présence de données d'ICV ou non et la date de publication.

Comme réalisé pour le cuivre, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre, et enfin les résultats d'impacts (LCIA).

3.4.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.4.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les BDD ACV analysées permettent de modéliser soit un concentré de terres rares (en particulier EI) soit des oxydes de terres rares ayant été séparés du concentré. Dans le cas d'EI, il est possible d'accéder directement au set de données du concentré contrairement à GaBi. D'autre part, le panel de terres rares considérées dans EI est beaucoup moins complet que dans GaBi. En effet, la BDD GaBi permet de modéliser toutes les terres rares individuellement (Tableau 29) alors que EI ne permet de modéliser que le cérium, le néodyme, le lanthane, le samarium, l'euprimum et le gadolinium.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 29. Représentativité des terres rares dans les BDD analysées.

Terre rare	Numéro atomique	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7	
			Données incluses dans « extension database VI : precious metals » (payante)	Données sur demande (payantes)
Scandium	21	x	x	
Yttrium	39	x	✓	
Lanthane	57	✓	✓	
Cérium	58	✓	✓	
Praséodyme	59	✓	✓	
Néodyme	60	✓	x	✓
Prométhium	61	x	x	
Samarium	62	✓	✓	
Europium	63	✓	✓	
Gadolinium	64	✓	✓	
Terbium	65	x	✓	
Dysprosium	66	x	x	✓
Holmium	67	x	✓	
Erbium	68	x	✓	
Thulium	69	x	✓	
Ytterbium	70	x	✓	
Lutécium	71	x	✓	

Terres
rares
« légères »

Terres
rares
« lourdes »

Concernant GaBi, la représentativité géographique des sets de données est exclusivement chinoise avec certains sets de données représentatifs de la production de la mine de Baiyun Obo en Mongolie Intérieure et d'autres représentatifs de la production dans la région du Sichuan (Tableau 30). Il est à noter que pour le samarium et le praséodyme, le set de données annonce une extraction en Chine (CN) mais également aux Etats-Unis et donc la représentativité n'est pas clairement définie.

Tableau 30. Représentativité géographique des sets de données de production de terres rares dans GaBi.

	Non spécifié (CN)	Baiyun Obo (CN)	Sichuan (CN)
Cérium		x	
Dysprosium			x
Erbium			x
Europium		x	
Gadolinium		x	
Holmium			x
Lanthane		x	
Lutécium			x
Néodyme			x
Praséodyme*	x		
Samarium*	x		
Terbium		x	
Thulium			x
Ytterbium			x
Yttrium			x

*Set de données (CN) mais mention des USA dans la documentation.

Les inventaires accessibles sur EI se différencient par l'origine de production du minerai de terres rares (Chine ou RoW). Néanmoins, les quantités d'intrants et d'extrants sont exactement les mêmes et seule diffère l'origine de certains sets de données. Le procédé RoW est en fait une copie du procédé original CN dont l'incertitude a été ajustée.

Comme mentionné précédemment, il est à noter que certaines terres rares n'ont pas de set de données existant pour leur modélisation dans EI. Cela est justifié par les très faibles

pourcentages de certaines terres rares dans la bastnaésite et la monazite (Tableau 31). Il est ainsi précisé que 0.28 % des oxydes de terres rares du minerai modélisé ne sont pas pris en compte. Les pourcentages utilisés dans le set de données EI correspondent donc à une moyenne entre les concentrations d'OTR dans les minerais de Mountain Pass aux Etats-Unis, Baotou (Baiyun Obo) en Chine et Mt. Weld en Australie.

Tableau 31. Composition en oxydes de terres rares de certains minerais et représentativité des éléments terres rares dans EI (Althaus et al., 2004).

Mine		Mountain Pass CA, bastnasite	Baotou, China, bastnasite	Mt. Weld, Australia, monazite	Used in this Study	composition as rare earth metal	
Rare earth oxide	Formula						
Cerium	CeO ₂	49.10%	50.80%	46.74%	49.13%	Ce	40.00%
Dysprosium	Dy ₂ O ₃	trace	0.10%	0.12%	0.00%	Dy	0.00%
Erbium	Er ₂ O ₃	trace	trace	trace	0.00%	Er	0.00%
Europium	Eu ₂ O ₃	0.10%	0.21%	0.44%	0.23%	Eu	0.10%
Gadolinium	Gd ₂ O ₃	0.20%	0.60%	0.75%	0.58%	Gd	0.25%
Holmium	Ho ₂ O ₃	trace	trace	trace	0.00%	Ho	0.00%
Lanthanum	La ₂ O ₃	33.20%	26.50%	25.50%	28.15%	La	12.00%
Lutetium	Lu ₂ O ₃	trace	trace	trace	0.00%	Lu	0.00%
Neodymium	Nd ₂ O ₃	12.00%	15.40%	18.50%	15.40%	Nd	6.60%
Praseodymium	Pr ₆ O ₁₁	4.34%	4.96%	5.32%	5.07%	Pr	0.70%
Samarium	Sm ₂ O ₃	0.80%	1.10%	2.27%	1.16%	Sm	0.50%
Terbium	Tb ₄ O ₇	trace	0.03%	0.05%	0.00%	Tb	0.00%
Thulium	Tm ₂ O ₃	trace	trace	trace	0.00%	Tm	0.00%
Ytterbium	Yb ₂ O ₃	trace	trace	trace	0.00%	Yb	0.00%
Yttrium	Y ₂ O ₃	0.10%	0.20%	0.25%	0.00%	Y	0.00%
Not accounted (Difference to 100% REO)		0.16%	0.10%	0.06%	0.28%		
REO content in ore		8.5%	5.0%	15.0%	6.00%	in ore	3.61%

Le set de données est issu de données primaires et les hypothèses suivantes sont effectuées :

- Infrastructures et occupation des sols modélisées par l'industrie du fer,
- Certains matériaux auxiliaires sont calculés par stœchiométrie,
- Une estimation approximative est faite concernant la consommation d'énergie, l'utilisation de solvant et la génération de déchets.

Une allocation économique est utilisée entre les OTR. Les facteurs d'allocations sont déterminés grâce aux prix moyen des OTR entre 2004 et 2006 (Lynas, 2006) et au prix du concentré de samarium-gadolinium-europium en 2002 (CREIW, 2002). Afin de maintenir le bilan massique des matériaux entrants, le concentré de terres rares entrant est alloué selon la masse du produit final (Tableau 32).

Tableau 32. Facteurs d'allocation des oxydes de terres rares utilisés dans les sets de données EI.

	Quantité (kg)	Valeur (\$/kg)	Facteur d'allocation
Oxyde de cérium	0.493	1.5	22.1 %
Oxyde de lanthane	0.282	1.75	14.7 %
Oxyde de néodyme	0.154	8.9	40.9 %
Oxyde de praséodyme	0.051	9.6	14.6 %
Concentré de samarium, gadolinium et europium	0.020	13	7.8 %

Si le procédé « market for » de la production de concentré de terres rares est examiné, il est possible d'identifier les parts de marché des procédés CN et RoW (Tableau 33). Il est à noter que ce procédé ne prend pas en compte les transports du produit sur le marché.

Tableau 33. Part de marché au sein du set de données « market » du concentré de terres rares surecoinvent.

Procédé	Part de marché "market for" (%)
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {CN} production APOS, U	97.5
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {RoW} production APOS, U	2.5

Concernant les impacts des sets de données de la production de concentré de terres rares EI, il est possible d'observer des différences importantes suivant la localisation géographique (CN ou RoW). En effet, l'occupation des sols ainsi que la consommation d'eau de la production mondiale est deux fois plus importante que celle de la Chine. A l'inverse la production chinoise implique des émissions de GES et une utilisation des ressources inférieures (Figure 43). Dû aux parts de marché du procédé « market for », les impacts sont similaires à ceux du procédé chinois. L'impact lié aux transports est négligeable. Comme GaBi ne permet pas d'analyser le concentré de terres rares (60%) dont la provenance de tous les oxydes est pourtant indiquée, la comparaison avec les procédé EI est impossible.

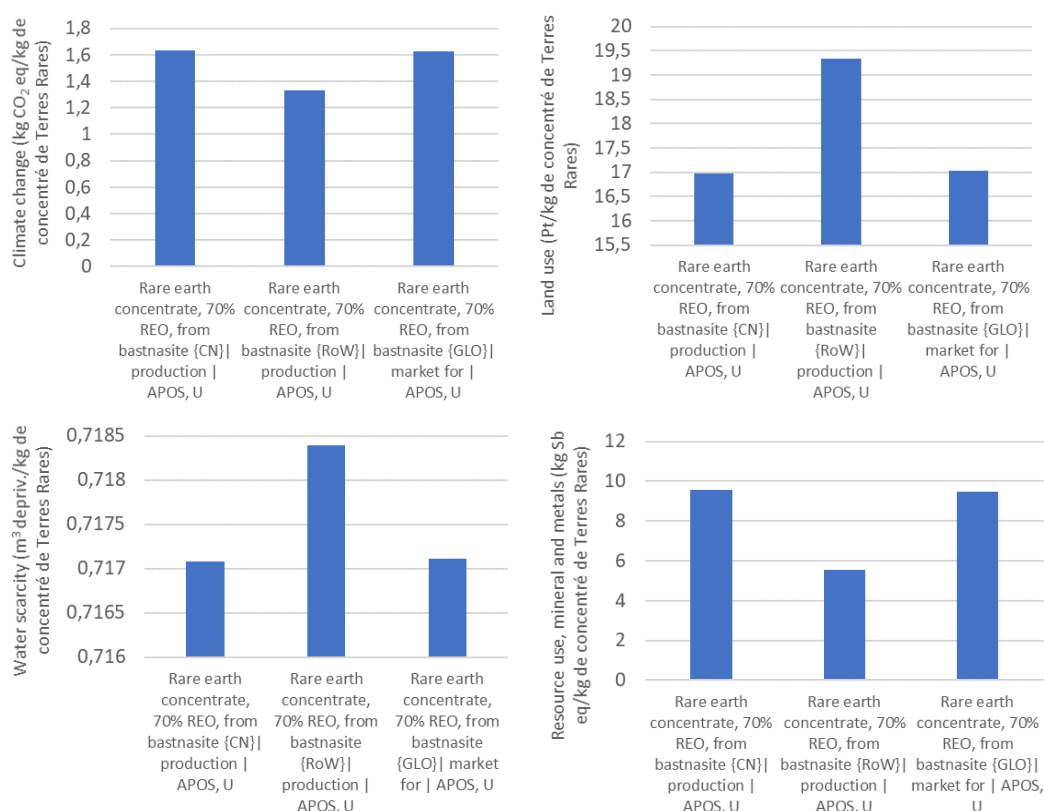


Figure 43. Comparaison des impacts de la production d'1 kg de concentré de terres rares (set de données EI) sur le réchauffement global, l'utilisation des sols, la consommation d'eau et l'utilisation des ressources.

Les impacts des OTR des procédés disponibles sur EI sont analysés sur la Figure 44. Comme un facteur d'allocation est appliqué entre les oxydes, la tendance des résultats est la même pour toutes les catégories d'impact et les résultats ne sont présentés ici que pour le changement climatique. Le néodyme et le praséodyme présentent donc les impacts les plus importants, suivis par le lanthane et le concentré de samarium, gadolinium et europium.

Enfin l'oxyde de cérium présente les impacts les plus faibles dû à sa concentration élevée dans le minerai.

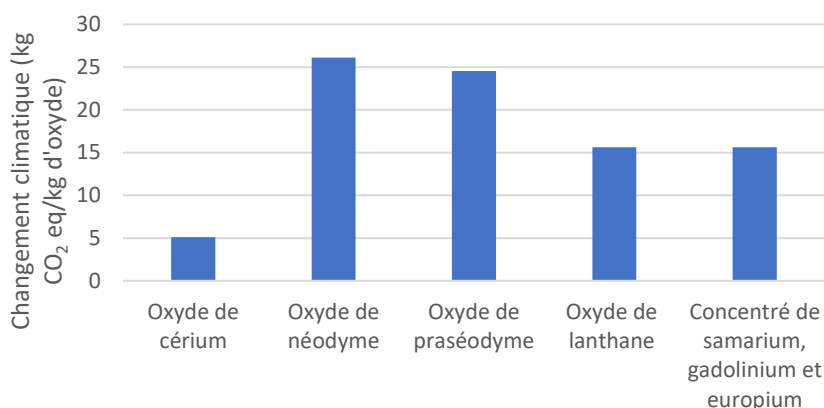


Figure 44. Impact de la production d'oxydes de terres rares (EI) sur le changement climatique.

Enfin, une analyse de la contribution des matières premières à la catégorie d'impact concernant l'appauvrissement des ressources est effectuée en Figure 45. Les terres rares ne contribuent pas du tout à la catégorie. En effet, le cuivre, l'or, l'argent, le plomb et le cadmium sont les majeurs contributeurs.

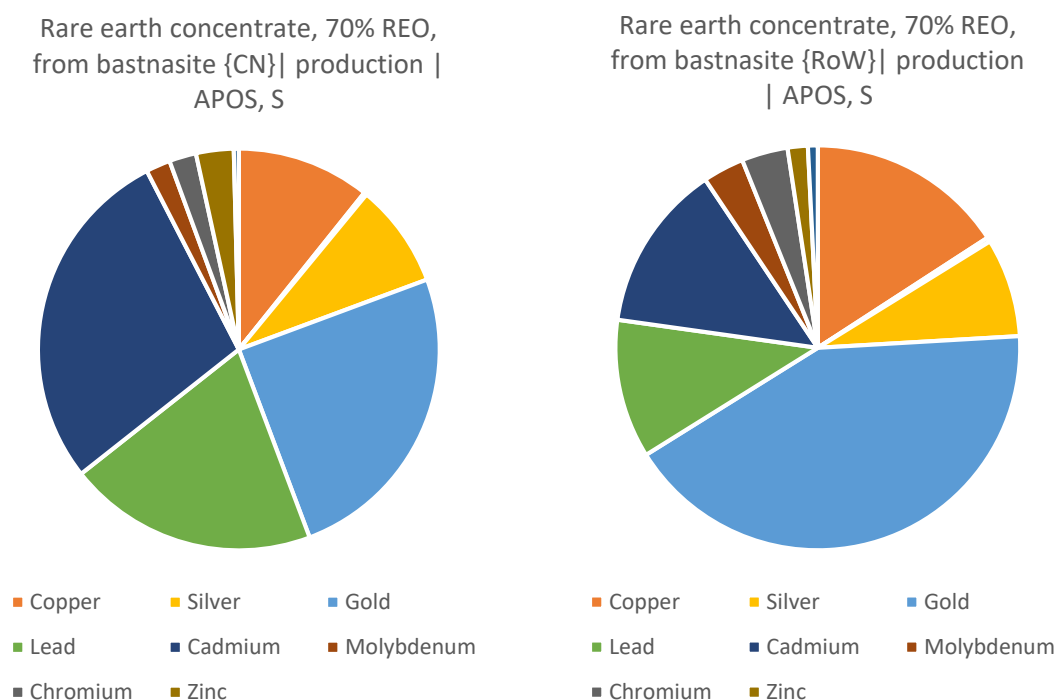


Figure 45. Contribution des matières premières de la production de concentré de terres rares (EI) à l'appauvrissement des ressources.

Finalement, le rapport EI apporte quelques informations complémentaires intéressantes pour l'utilisation des sets de données :

- L'énergie et le carburant utilisés pour l'extraction et la transformation du minerai provoquent :
 - 50 % des émissions de CO₂,
 - 32 % des émissions de NMVOC,
 - 34 % des émissions d'oxyde d'azote,
 - 53 % de la demande cumulée en énergie.
- L'acide chlorhydrique est également un hotspot (25 – 40 % des émissions et 38 - 87 % de la demande cumulée en énergie).

- L'incertitude principale de l'inventaire est liée à la demande en solvant.
- Les différences potentielles suivant le site de production et la concentration du minerai ne sont pas considérées.
- Le procédé décrit couvre uniquement la situation à Bayan Obo séparant la bastnaésite.
- Il existe une grande dépendance des résultats à la méthode d'allocation choisie.

3.4.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 35 propose une rapide description des trois publications analysées. L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B.

Ainsi, globalement toutes les études considérées se focalisent sur la production de métal raffiné ou d'oxydes de terres rares dans le cas de Weng et al. (2016) et non pas la production de concentrés. Les deux dernières études, à savoir Lee and Wen (2016) et Vahidi and Zhao (2018) fournissent plusieurs ICV pour les différents cas d'études qu'ils ont considérés (données issues de sources publiques telles que la littérature ou encore des rapports publics).

En termes de couverture géographique considérée dans chacune des trois études analysées, la Chine est le pays le plus représenté, ce qui reflète bien la conjoncture actuelle où la Chine domine la production de terres rares au niveau mondial.

Le Tableau 34 présente quelques valeurs d'empreinte carbone relatives à la production de terres rares via les différents cas d'études considérés dans la littérature ACV.

Tableau 34. Valeurs d'empreinte carbone de la production de terres rares issues de la littérature.

Cas d'études considéré	Empreinte carbone (t CO ₂ eq/t TR)	Brève description
Lee and Wen, 2016 (Nd - Bayan Obo)	74.3	Néodyme produit sur le site de Bayan Obo
Lee and Wen, 2016 (Nd - Sichuan)	40.12	Néodyme produit sur un site du Sichuan
Lee and Wen, 2016 (Nd - South)	80.01	Néodyme produit sur un site du sud de la Chine
Vahidi and Zhao, 2018 (Nd - Sanyou)	15.6	Néodyme produit sur le site de Ganzhou Sanyou
Vahidi and Zhao, 2018 (Nd - Fujian)	18.7	Néodyme produit sur le site de Fujian Changding
Vahidi and Zhao, 2018 (Nd - Chenguang)	10.7	Néodyme produit sur le site de Ganzhou Chenguang
Weng et al., 2016 (TREO + Y - Alkaline dep.)	22	Terres rares produites à partir d'un gisement « alkaline »
Weng et al., 2016 (TREO + Y - Alluvial dep.)	159	Terres rares produites à partir d'un gisement « alluvial »
Weng et al., 2016 (TREO + Y - Carbonatite dep.)	17	Terres rares produites à partir d'un gisement de « carbonatite »
Weng et al., 2016 (TREO + Y - Felsic dep.)	89	Terres rares produites à partir d'un gisement de « felsic »
Weng et al., 2016 (TREO + Y - Granite dep.)	34	Terres rares produites à partir d'un gisement de « granite »
Weng et al., 2016 (TREO + Y - IOCG dep.)	125	Terres rares produites à partir d'un gisement de « IOCG »

Weng et al., 2016 (TREO + Y - Laterite dep.)	129	Terres rares produites à partir d'un gisement de « laterite »
Weng et al., 2016 (TREO + Y - Shale dep.)	229	Terres rares produites à partir d'un gisement de « shale »
Weng et al., 2016 (TREO + Y)	83	TREO ⁴ + Y = Total Rare Earth Oxides + Yttrium
Weng et al., 2016 (HREO + Y)	14	HREO ⁵ + Y = Heavy Rare Earth Oxides + Yttrium

La Figure 46 représente l'empreinte carbone associée à la production de terres rares mettant en perspective les valeurs issues de la littérature aux valeurs issues d'ecoinvent, en distinguant pour chaque étude les différents cas d'études considérés. Pour l'étude de Weng et al. (2016), les émissions de CO₂ sont calculées pour une tonne d'oxydes de terres rares en fonction du type de gisement d'origine. Pour les études de Lee and Wen (2016) et Vahidi and Zhao (2018), les émissions de CO₂ ici représentées se focalisent sur la production d'une tonne de néodyme (Nd) raffiné dans différentes régions et usines de raffinage (mais à travers le même procédé, à savoir le procédé de « molten salt electrolysis »).

On observe une variabilité relativement importante d'un cas d'étude à l'autre, les résultats obtenus par Vahidi and Zhao (2018) étant plus faibles que les autres, ce qui peut potentiellement s'expliquer par l'exclusion des étapes d'extraction minière et de concentration des frontières du système.

Concernant la production d'une tonne de néodyme, ecoinvent fournit une valeur d'empreinte carbone légèrement supérieure à celles obtenues par Vahidi and Zhao (2018), qui cependant n'inclut pas l'extraction minière dans les frontières de son système, mais bien inférieure à celles obtenues par Lee and Wen (2016).

⁴ Ensemble des terres rares

⁵ Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

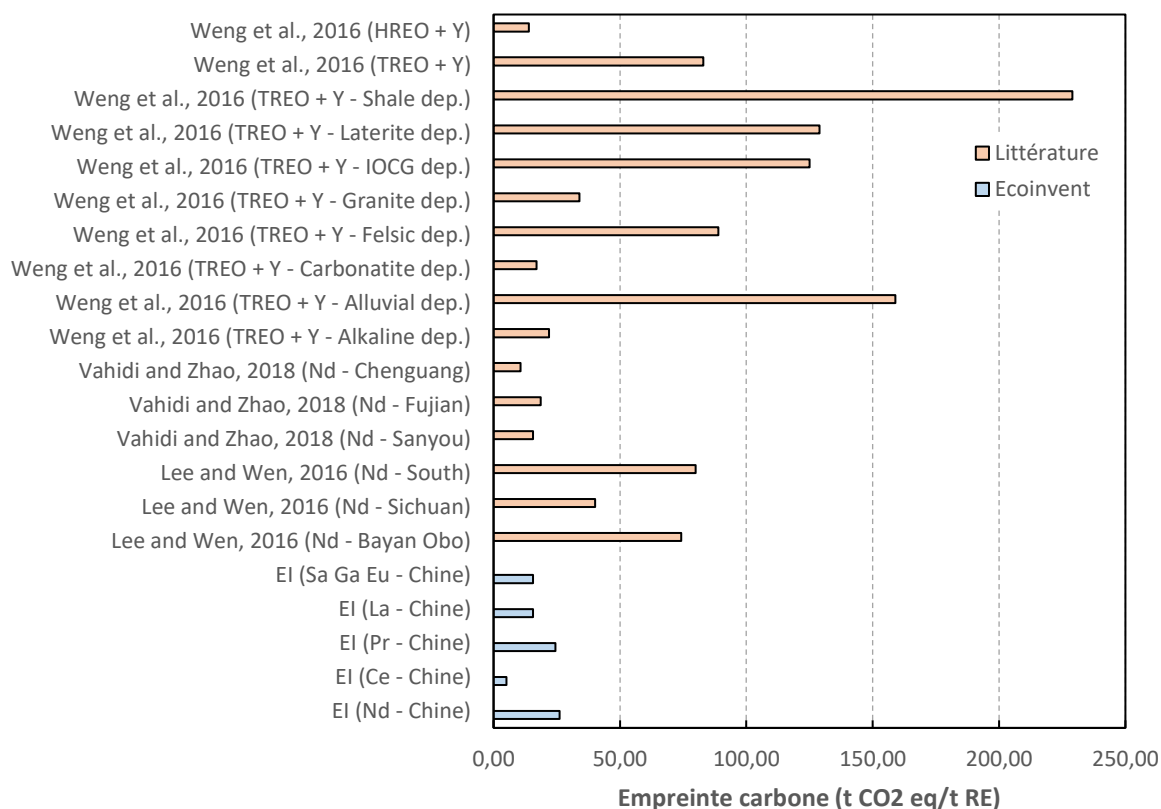


Figure 46. Empreinte carbone de la production de terres rares issue de la littérature et d'ecoinvent (HREO = Heavy rare earth oxides ; Y = Yttrium ; TREO = Total rare earth oxides).

Tableau 35. Revue de littérature ACV des terres rares – description des études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit – fonctionnelle	Unité	Couverture géographique	Allocation	ICV ?	Source des données
Weng et al. <i>Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements</i>	2016	Métal raffiné « 1 t of ROM materials from the mining site of selected REE projects »		Brésil Canada Chine Etats-Unis Australie Groenland Tanzanie Suède Malawi Afrique du Sud Madagascar	Economique	Non	/
Lee and Wen <i>Rare Earths from Mines to Metals – Comparing environmental impacts from China's main production pathways</i>	2016	Métal raffiné « 1 kilogram of each of the 15 rare earth metals in China »		Chine	Massique	Oui	Données publiques (littérature, rapports, etc.)
Vahidi and Zhao <i>Assessing the environmental footprint of the production of rare earth metals and alloys via molten salt electrolysis</i>	2018	Métal raffiné « One kilogram of rare earth metals/alloys at refining facility in China »		Chine	Economique	Oui	Données publiques (littérature, rapports, etc.)

3.4.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Malgré une source de données d'inventaire précise et transparente par rapport aux procédés d'extraction et de raffinage des terres rares, certaines limites des BDD existantes peuvent toutefois être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière du lithium, notamment concernant la représentativité géographique et la variabilité de certaines informations. Concernant la représentativité géographique des sets de données, il est possible de conclure d'une excellente représentativité (et quasiment exclusive) de la production de terres rares en Chine par les producteurs Northern Rare Earth et Shenghe Resources (Tableau 36). En effet ces producteurs possèdent également la mine de Mountain Pass aux Etats-Unis, d'après laquelle la concentration en terres rares a été calculée pour les procédés EI. L'Australie n'est quant à elle pas vraiment représentée malgré sa part de la production mondiale s'élevant à 18%.

Tableau 36. Représentativité géographique de l'exploitation des gisements de terres rares dans les BDD ACV.

Pays/Zone géographique	Part de la production (2018)	Représentativité dans les sets de données		Commentaires
		EI	GaBi	
Chine	76%	✓	✓	Les mines chinoises de Bayan Obo et du Sichuan sont modélisées dans EI et GaBi.
Australie	18%	~	✗	La concentration en terres rares du procédé EI est une moyenne entre le minerai chinois, australien et américain.
USA	2%	~	✗	La concentration en terres rares du procédé EI est une moyenne entre le minerai chinois, australien et américain.
Russie	2%	✗	✗	Non représenté.
Inde	1%	✗	✗	Non représenté.
Brésil	<1%	✗	✗	Non représenté.

La représentativité géographique du procédé « market for » sur EI par rapport aux producteurs majeurs de terres rares représente une moyenne mondiale basée essentiellement sur la production de terres rares chinoise. Cela éclipse totalement la production australienne malgré une représentativité du reste du monde d'environ 2% dans le set de données.

Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée qui arrive jusqu'en 2010 pour les procédés d'Ecoinvent et jusqu'à 2021 pour les procédés de GaBi. En général, cette obsolescence ne préoccupe pas trop car l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible. Néanmoins, l'exploitation croissante rend les matières premières de moins en moins accessibles, ce qui demandera plus d'effort pour l'extraction.

Les différentes limites identifiées et les considérations relatives pour les terres rares sont résumées dans le Tableau 37.

Tableau 37. Exploitation des terres rares dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques	GaBi
Ecoinvent		
Accès aux données et transparence	Rapport très détaillé et exhaustif.	- Pas d'accès aux sets de données avec la licence standard du logiciel. - Rapport de description des données payant. - Description des données assez floue dans la documentation gratuite.
Représentativité	- Ne permet pas une modélisation des impacts de certaines terres rares. En effet, le dysprosium, l'erbium, l'holmium, le lutétium, le terbium, le thulium, l'ytterbium et l'yttrium ne sont pas représentés dans la BDD dû à leur trop faible concentration dans le minerai. - Les terres rares Samarium, Gadolinium et Europium ne sont pas modélisées séparément mais uniquement selon un concentré de ces trois terres rares contenant 94 % d'oxydes. - Le procédé d'extraction modélisé s'intéresse uniquement à l'extraction d'oxydes de terres rares à partir de la bastnaésite, représentant plus de 80 % de toute la production d'oxydes de terres rares. De cette façon, il n'est pas possible grâce à EI de modéliser la production d'OTR obtenus à partir de monasite ou d'échange d'ions sur résine. - Assez bonne couverture des types de minerais de terres rares et géographique (Bayan Obo, Chine) mais faible représentativité des mines australiennes. - Mauvaise représentativité du procédé « market for ».	- Impossibilité de modéliser uniquement l'extraction du minerai de concentré de terre rare. - Modélisation de la production de bastnaésite et de monazite. - Possibilité de modéliser toutes les terres rares. - Représentativité géographique exclusivement chinoise.
Allocation	- Procédure d'allocation économique des oxydes de terres rares clairement décrite dans le rapport. - Allocation économique basée sur des prix des années 2000. - Il existe une grande dépendance des résultats à la méthode d'allocation choisie.	- Pas de détails sur la procédure d'allocation. - Procédure potentiellement obsolète s'après la date de la source des données (2009).
Obsolescence	Période de validité annoncée arrivant jusqu'aux années 2000-2005 pour le concentré de terres rares et les OTR.	Sets de données dont la validité annoncée est large (2022) malgré une source des données assez ancienne (Chinese Rare Earth Industry Report 2009).

Complétude et étendue	▪ Set de données assez complet.	▪ N/A
Vraisemblance	▪ Le set de données EI provient de données d'industrie plutôt anciennes mais vraisemblables.	▪ Les procédés GaBi sont issus de données réelles de production datant de 2009. Ils sont estimés vraisemblables.

3.4.3. RECOMMANDATIONS

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations. En général, il est possible d'affirmer que, si la chaîne des fournisseurs de terres rares utilisées dans la chaîne de production n'est pas bien connue, l'utilisation des procédés ACV de la BDD ecoinvent avec couverture géographique globale représente un choix suffisamment fiable, qui modélise la réalité en prenant en compte les différents sets de données actuellement disponibles. Pour le moment, les scénarios représentés dans les BDD sont les suivants :

- Production de concentré de terres rares (70%) en Chine et dans le monde,
- Production d'oxydes de dysprosium en Chine et dans le monde,
- Production d'oxydes de lanthane en Chine et dans le monde,
- Production d'oxydes de cérium en Chine et dans le monde,
- Production d'oxydes de néodyme en Chine et dans le monde,
- Production de concentré de samarium-europium-gadolinium en Chine et dans le monde.

Comme montré lors de l'analyse de l'état de l'art, les procédés ne sont pas tous totalement fiables et représentatifs du scénario qu'ils décrivent. Les considérations suivantes peuvent s'appliquer pour la modélisation des terres rares en ACV selon le type de produit envisagé (concentré, oxyde ou métal raffiné) ainsi que son origine (Tableau 38).

Tableau 38. Conseils de modélisation des terres rares en ACV selon la provenance du matériau.

Origine de la matière première		Chine	Reste du monde	Inconnue
Concentré de terres rares		Utiliser le procédé EI « CN » tel quel.	Utiliser le procédé « RoW » en modifiant le mix énergétique suivant l'origine.	Modifier le procédé « market for » ecoinvent avec les parts de marchés actuelles entre la Chine et le reste du monde.
Oxyde de terres rares	Cérium Dysprosium Néodyme Samarium Europium Gadolinium	Utiliser les procédés EI « CN » en modifiant l'allocation économique d'après les valeurs de marché actuelles.	Utiliser les procédés EI « RoW » en modifiant l'allocation économique d'après les valeurs de marché actuelles et en adaptant le mix énergétique.	Modifier le procédé « market for » ecoinvent et l'allocation économique des procédés « CN » et « RoW » avec les parts de marchés et valeurs de marché actuelles.
	Autres terres rares lourdes	Utiliser des données spécifiques ou acheter l'extension GaBi (à priori pas de données disponibles dans la littérature).		
Terres rares		Utiliser des données issues de la littérature (ex : Vahidi et Zhao, 2018) ou acheter l'extension GaBi.		

3.5. Platinoïdes

3.5.1. ETAT DE L'ART

3.5.1.1. EXTRACTION DES PLATINOÏDES DANS LE MONDE

Le platine est obtenu à partir de minerais en même temps que les autres Métaux du Groupe du Platine (MGP). Les MGP sont un groupe de six éléments : l'iridium (Ir), l'osmium (Os), le platine (Pt), le palladium (Pd), le rhodium (Rh) et le ruthenium (Ru). Les MGP ainsi que l'or et l'argent sont classés en tant que métaux nobles ou précieux du fait de leur résistance élevée à la corrosion et à l'oxydation (Safarzadeh et al., 2018 ; Glaister et al., 2010 ; Xiao et al., 2004). Les réserves mondiales de MGP sont estimées à 100 millions de kilogrammes, desquels plus de 80 % sont contenus dans le complexe sudafricain Bushveld Igneous (Junge et al., 2015). Les MGP sont utilisés dans plusieurs procédés industriels ainsi que dans des applications commerciales incluant, entre autres, l'automobile, la joaillerie, l'électronique, la dentisterie, les catalyseurs, les aiguilles, pivots, mesures de température ou creuset spéciaux (Jewell et al., 2015 ; Jones et al., 2005 ; Hayes et al., 2003).

Les gisements de platinoïdes se trouvent généralement dans des roches magmatiques qui sont remontées en surface au travers de la croûte terrestre. C'est le cas du principal gisement mondial, celui du complexe du Bushveld, en Afrique du Sud, mais aussi de ceux de Great Dyke, au Zimbabwe, de Stillwater, aux États-Unis, de Norilsk en Russie. Dans ces gisements, les platinoïdes sont associés à des sulfures de nickel et de cuivre. La teneur en platinoïdes des minerais d'Afrique du Sud est comprise entre 3 et 10 g/t. Aux États-Unis, cette teneur est, en moyenne, de 15 g/t. En Russie, dans le gisement de Norilsk-Talnakh, les teneurs varient entre 8 et 11 g/t pour les platinoïdes présents avec les sulfures massifs de nickel ou de cuivre et 3 et 9 g/t pour les platinoïdes présents dans les sulfures disséminés. Pour récupérer une once (31,1035 g) de platinoïdes, il faut extraire de 8 à 16 t de minerai. En Afrique du Sud et aux États-Unis, les gisements sont exploités pour les platinoïdes contenus, le nickel et le cuivre étant coproduits. A Norilsk, en Russie, et à Sudbury, au Canada, les platinoïdes sont coproduits de mines de cuivre - nickel. Il existe une faible production alluviale, sous forme de platine natif, en Colombie et en Russie. Les exploitations minières sont le plus souvent souterraines.

Les producteurs de platinoïdes et les gisements qu'ils exploitent sont listés dans l'Annexe A. Il est important de noter que la production minière est très localisée, principalement en Afrique du Sud, en Russie et dans une moindre mesure en Amérique du Nord. Les sociétés Sud-Africaines dominent largement le marché. L'Europe, totalement dépendante dispose d'un potentiel d'indices qui pourraient un jour évoluer vers des découvertes, a priori de taille limitée.

La transformation des MGP implique des étapes de broyage, flottaison, fusion, conversion, raffinage des métaux de base et des métaux précieux. Dû à l'augmentation du contenu de chrome dans le flux entrant et aux challenges liés à la manipulation de ce flux, des routes de fusion des MGP alternatives ont été développées. Des routes hydrométallurgiques ont été proposées. Cependant, aucune des potentielles routes reportées n'a été commercialisée jusqu'à maintenant.

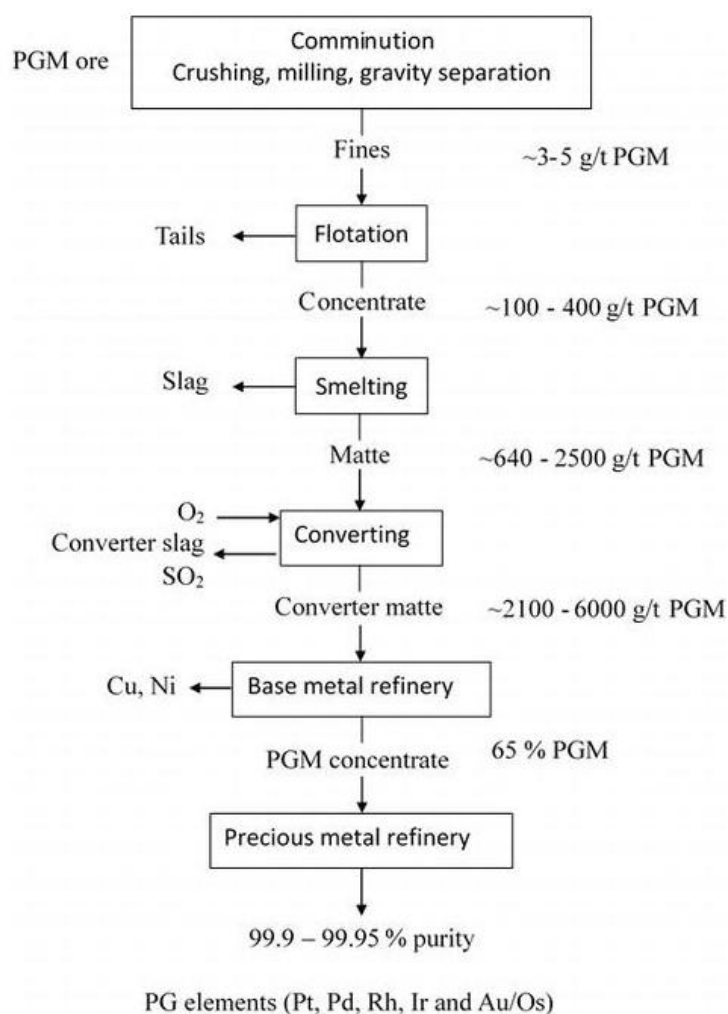


Figure 47. Transformation typique du minerai de MGP. Source : Thethwayo, 2018.

Les principaux pays producteurs de platinoïdes sont reportés dans le Tableau 39, ainsi que leur production annuelle en 2018. Dans la plupart des cas les mines sont situées dans le pays du producteur. Anglo American Platinum possède également une mine au Zimbabwe et une mine en Finlande. Le producteur canadien Royal Bafokeng Platinum possède quant à lui toutes ses mines en Afrique du Sud. Les mines de Glencore sont au Canada.

Tableau 39. Statistiques de production de platinoïdes en 2018. Sources en Annexe A.

Sociétés 2018	Réserves Minerai (Mt)	Teneur PGE (g/t)	Réserves PGE (t)	Production PGE (t)	Production Pt (t)	Production Pd (t)	Production Rh (t)	Production Ru (t)	Production Ir (t)
Anglo American Platinum	1,463.00	3.25	4,714.00	86.044	41.169	31.523	4.820	6.843	1.689
Impala Platinum	371.00	3.38	1,254.00	73.484	42.798	25.579	5.107		
Sibanye Stillwater	199.10	7.23		54.453	24.267	20.632	3.110		
Lonmin (<i>acquis par Sibanye Stillwater en 2019</i>)	252.00	3.85							
Nornickel	868.90			107.214	20.311	84.881	2.022		
Northam Platinum	255.70	3.69	945.53	18.88	9.831	4.667	1.457	2.397	0.528
ARM (2019)				11.217	4.834	4.249	0.824	1.211	0.288
Vale					4.199	6.781			
Royal Bafokeng Platinum	125.22	4.25	545.55	7.669	4.981	2.688			
Glencore					4.199	6.781			
North American Palladium				7.895	0.509	7.386			
Boliden									
Russian Platinum									

3.5.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction des platinoïdes dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 40. Trois types de MGP sont représentés par la BDD EI alors que GaBi permet de modéliser 4 types de MGP. Néanmoins, les sets de données GaBi ne sont pas disponibles avec la licence standard du logiciel et nécessitent un paiement additionnel. Pour cette raison, uniquement les sets de données EI sont analysés pour cette étude.

Tableau 40. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de platinoïdes.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Platinoïdes	○ <i>Platinum {ZA} group metal mine operation, ore with high rhodium content APOS, URare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {RoW} production APOS, U</i> ○ <i>Platinum {RU} group metal mine operation, ore with high palladium content APOS, U</i> ○ <i>Palladium {ZA} platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content APOS, U</i> ○ <i>Palladium {RU} platinum group metal mine operation, ore with high content APOS, U</i> ○ <i>Rhodium {ZA} platinum group metal mine operation, ore with high content APOS, U</i> ○ <i>Rhodium {RU} platinum group metal mine operation, ore with high palladium content APOS, U</i>	○ <i>Platinum mix; primary production; production mix, at plant</i> ○ <i>Palladium mix; primary production; production mix, at plant</i> ○ <i>Rhodium mix; primary production; production mix, at plant</i> ○ <i>Ruthenium; mining, transport, separation: mechanical separation, smelting, magnetic separation, chemical refining; production mix, at plant</i>

Les sets de données EI se basent tous sur le même procédé de production décrivant de manière égale les opérations en Afrique du Sud et en Russie (Figure 48).

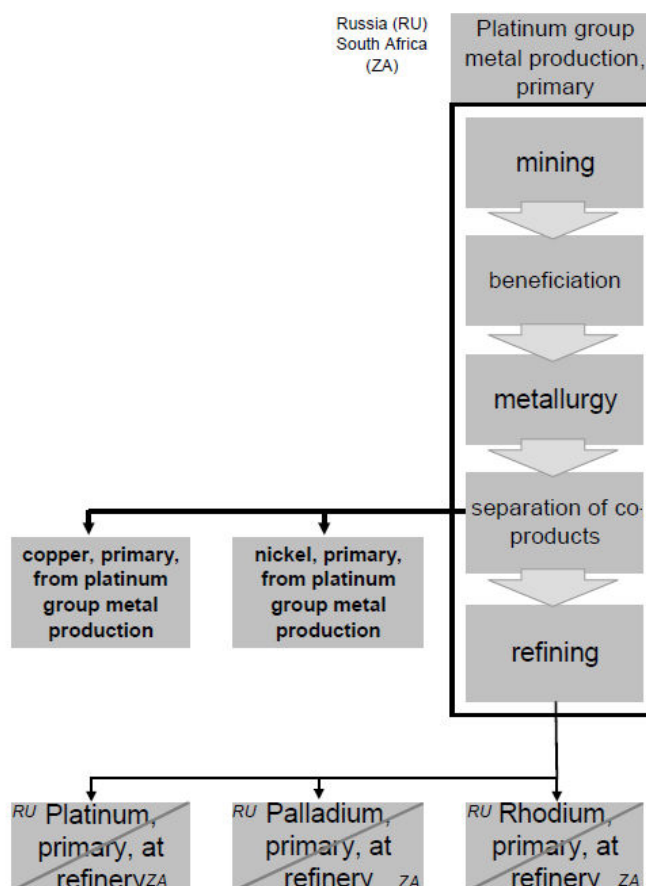


Figure 48. Schéma du procédé multifonctionnel de production de MGP dans EI.

L'inventaire EI est issu principalement de Hochfeld (1997) dont les données d'arrière-plan proviennent de IPPC (2002) et IPPC (2001). Les données de marché sur les métaux ferreux proviennent de Johnson Matthey et de la London Metal Exchange. Le set de données EI représente les données des 4 plus gros producteurs de platine en Afrique du Sud : Northam Platinum, Anglo American Platinum, Lonmin Platinum et Impala Platinum. Parmi ces 4 producteurs, seulement les 3 derniers incluent une raffinerie. Les MGP sont donc extraits soit dans des MCO soit par des TMS. L'exploitation du minerai comprend la concentration, la fonte et le raffinage.

L'extraction des MGP considérée dans l'inventaire est liée à l'extraction du nickel et du cuivre. Cela implique la considération d'un procédé multifonctionnel dont les 5 coproduits sont le platine, le palladium, le rhodium, le cuivre et le nickel. Une allocation est donc appliquée à l'inventaire : la demande en minerai de MGP est allouée par masse alors que le reste de l'inventaire est alloué selon les revenus liés à chaque métal.

▪ ELCD et PEF/OEF

Aucun set de données n'a été identifié.

3.5.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTÉRATURE

Au sein de la littérature ACV, peu d'études semblent s'intéresser à la production de platinoïdes en tant que tels. Dans le cadre de cette étude ScoreLCA, trois études se focalisant sur la production de platinoïdes ont été trouvées dans la littérature scientifique ACV :

- Saurat and Bringezu, 2008 - Platinum Group Metal Flows of Europe, Part I – Global supply, use in industry, and shifting of environmental impacts
- Mabiza and Mbohwa, 2016 - Ore processing by PGM concentration process and assessment of CO2 equivalent emissions and environmental damage directly involved
- Bossi and Gediga, 2017 - The environmental profile of platinum group metals

Comme pour le cuivre, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre, et enfin les résultats d'impacts (EICV).

3.5.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.5.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les BDD ACV analysées permettent de modéliser uniquement la production de platinoïdes raffinés et ne donnent pas accès à l'inventaire spécifique de l'étape d'extraction. D'autre part, uniquement une partie des platinoïdes est représentée dans les BDD. En effet, Le rhénium, l'osmium et l'iridium ne sont représentés dans aucune BDD. A l'inverse, le platine, le rhodium et le palladium sont majoritairement représentés (Tableau 41).

Tableau 41. Représentativité des platinoïdes dans les BDD.

Représentativité dans les BDD	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7	
		Données incluses dans « extension database VI : precious metals 2020 » (payante)	Données sur demande (payante)
Ruthénium	x	x	✓
Rhodium	✓	✓	
Palladium	✓	✓	
Rhénium	x	x	
Osmium	x	x	
Iridium	x	x	
Platine	✓	✓	

La Figure 49 présente une comparaison des données d'inventaires entre 1 kg de platine extrait en Russie contre 1 kg de platine extrait en Afrique du Sud. Il est possible de remarquer que l'occupation et la transformation des sols est beaucoup plus importante pour l'Afrique du Sud. Cela peut s'expliquer par la nécessité d'excaver beaucoup plus de terres afin de créer des mines plus profondes en comparaison avec la Russie. Pour la production d'un kg de platine, le minerai russe comprend plus de Cu et Ni et le minerai ZA plus de MGP. L'extraction en ZA est plus demandeuse en électricité et diesel alors que l'extraction en RU est plus demandeuse en chaleur.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

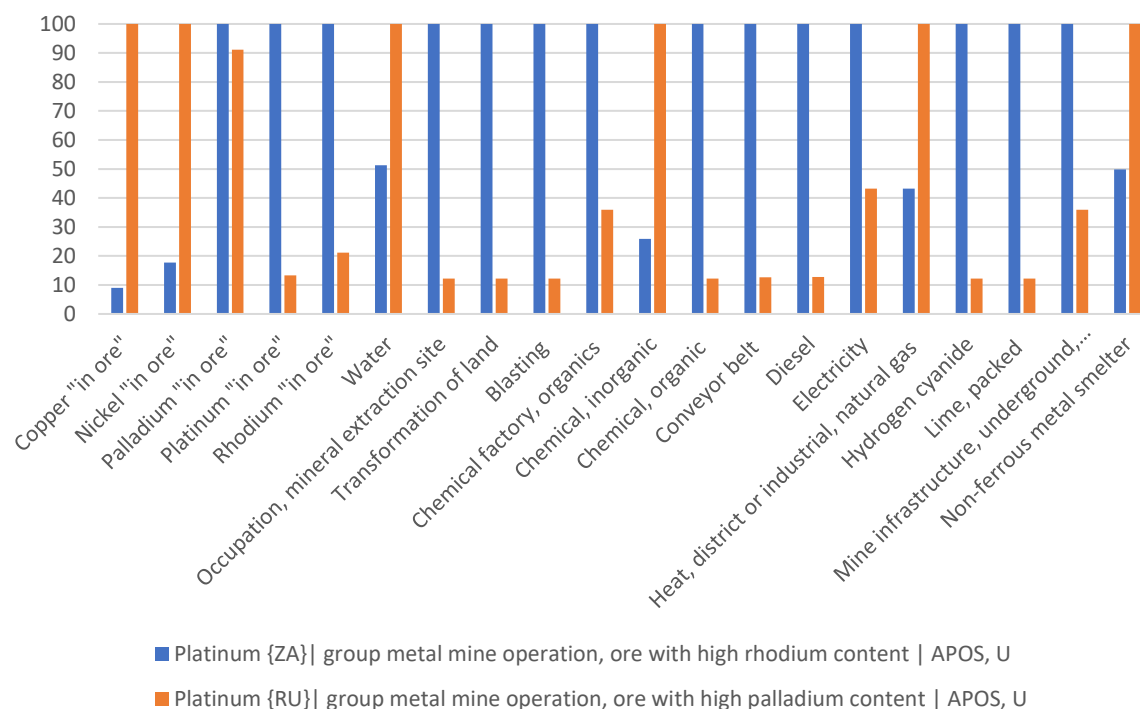


Figure 49. Comparaison des données d'inventaire entre les sets de données EI de production de platine.

Les sets de données EI sont principalement issus de Hochfeld (1997) et les données d'arrière-plan de IPPC (2002) et IPPC (2001). La concentration du minerai « RU » est basée sur les données de Johnson Noril'sk Nikkel et la concentration du minerai « ZA » est basée sur les données de Bushveld Complex. Le procédé d'extraction est valide pour les deux pays excepté les différences suivantes (Tableau 42).

Tableau 42. Différences considérées entre les procédés EI de production de MGP en Afrique du Sud et Russie.

Russie (RU)	Afrique du Sud (ZA)
- Utilisation d'un four flash Outokumpu et d'un convertisseur Peirce-Smith. - Le matte de nickel est traité par électroraffinage. - Le dioxyde de soufre n'est pas récupéré. - Le raffinage est effectué par précipitation sélective (à partir des données ZA). - Représentativité = 23 %	- Utilisation d'un four à arc électrique avec un système électrode Söderberg et un convertisseur Peirce-Smith. - Le dioxyde de soufre est récupéré et converti en acide sulfurique. - La séparation des métaux non-ferreux est faite par hydrométallurgie - Le raffinage est effectué par précipitation sélective - La production d'électricité est principalement carbonée. - Représentativité annoncée = 63 %

Il est à noter que le marché des MGP est d'une grande importance pour l'utilisation de données de production : d'une part, les prix du marché déterminent la rentabilité de l'exploitation primaire et secondaire et d'autre part, l'inventaire est alloué selon les revenus de chaque métal. Une analyse environnementale des MGP est donc toujours dépendante de la situation actuelle du marché. De plus, les pays producteurs stockent des MGP dans le but d'influencer les prix du marché et afin de protéger leurs propres industries

consommatrices de MGP. Les MGP et le platine en particulier sont ainsi souvent commercialisés en tant qu'investissement.

Concernant la procédure d'allocation des MGP dans le set de données EI, le ratio exact des différents MGP n'est pas reporté dans la littérature utilisée. Il est donc supposé que le ratio de MGP produits correspond au ratio de métaux dans le minerai brut.

Le minerai considéré dans EI contient les proportions suivantes de MGP :

- Platine : 4.7E-4 %
- Palladium : 3.1E-4 %
- Rhodium : 0.2E-4 %

Ensuite, la concentration en cuivre et en nickel dépend du gisement. Dans le cas de la Russie, elle est de 3.2 % et 2.3 % respectivement et pour l'Afrique du Sud de 0.052 % et 0.037 %. Comme le cuivre et le nickel sont isolés avant l'étape de raffinage finale, les charges du raffinage sont allouées uniquement aux MGP alors que les charges des autres étapes sont allouées entre les MGP, le cuivre et le nickel. Par conséquent différents facteurs d'allocation sont appliqués aux différents flux d'inventaire selon l'occurrence et la magnitude des étapes de production. Pour tout l'inventaire autre que le minerai en lui-même, une allocation par revenu est effectuée afin de refléter la réalité économique de l'extraction de ces métaux. Comme les entreprises d'extraction des MGP ont des horizons de décision à long termes, un prix moyen sur 10 ans a été choisi (Tableau 43). Ainsi, une allocation économique est utilisée entre les platinoïdes, le cuivre et le nickel et les facteurs d'allocation sont déterminés grâce aux prix moyen des platinoïdes entre 1989 et 2003 (Johnson Matthey et London Metal Exchange). Afin de maintenir le bilan massique des matériaux entrants, le produit final est alloué selon la masse de platinoïdes dans le minerai. Un récapitulatif des facteurs d'allocation est reporté dans le Tableau 44.

Tableau 43. Hypothèses faites pour l'allocation de la production primaire de MGP (Classen et al., 2009).

	Unit	Primary PGM-production (ZA)	Primary PGM-production (RU)	global
functional unit, 1 t PGM	t / t PGM	1	1	
Platinum in PGM-mix	% share in PGM	68%	25%	
Palladium in PGM-mix	% share in PGM	29%	73%	
Rhodium in PGM-mix	% share in PGM	3%	2%	
Nickel as co-product	t / t PGM	147	2'310	
Copper as co-product	t / t PGM	104	3'200	
Platinum, price on 10 year average	US\$ / tonne			14'017'726
Palladium, price on 10 year average	US\$ / tonne			9'420'169
Rhodium, price on 10 year average	US\$ / tonne			30'703'965
Nickel, price on 10 year average	US\$ / tonne			6'647
Copper, price on 10 year average	US\$ / tonne			1'986

Tableau 44. Facteurs d'allocation résultants basés sur les volumes du Tableau 43.

Primary Production				
Products	Allocation by mass (ZA)	Allocation by mass (RU)	Allocation by revenue (ZA)	Allocation by revenue (RU)
Pt	0.27%	0.005%	66%	11%
Pd	0.11%	0.013%	19%	21%
Rh	0.01%	0.0004%	7%	2%
Ni	41.27%	41.88%	7%	47%
Cu	58.33%	58.10%	1%	19%

De la même manière, le procédé EI « market for » est basé sur une moyenne sur 10 ans issue de l'année 2003 (Figure 50). L'utilisation du procédé « market for » implique donc une consommation majoritaire de platine provenant d'Afrique du Sud (82%) contre seulement 15% de platine provenant de Russie. Une proportion presque négligeable de platine recyclé est également considérée dans l'inventaire.

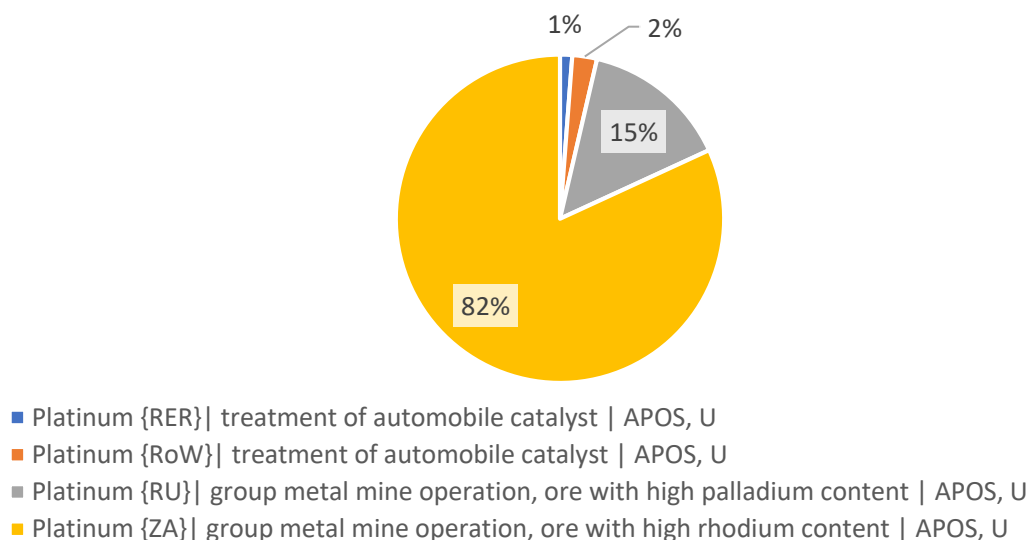


Figure 50. Parts de marché du procédé "market for" de production de platine sur EI.

Une analyse des impacts liés à l'utilisation des procédés EI est présentée en Figure 51 pour l'extraction du platine en Afrique du Sud, en Russie et pour le procédé « market for ». L'extraction du platine en Afrique du Sud provoque des émissions de gaz à effets de serre presque deux fois plus importantes que l'extraction en Russie. La même conclusion peut être tirée pour l'occupation et la transformation des sols. A l'inverse, les impacts sur la consommation d'eau et l'utilisation des ressources sont presque similaires.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

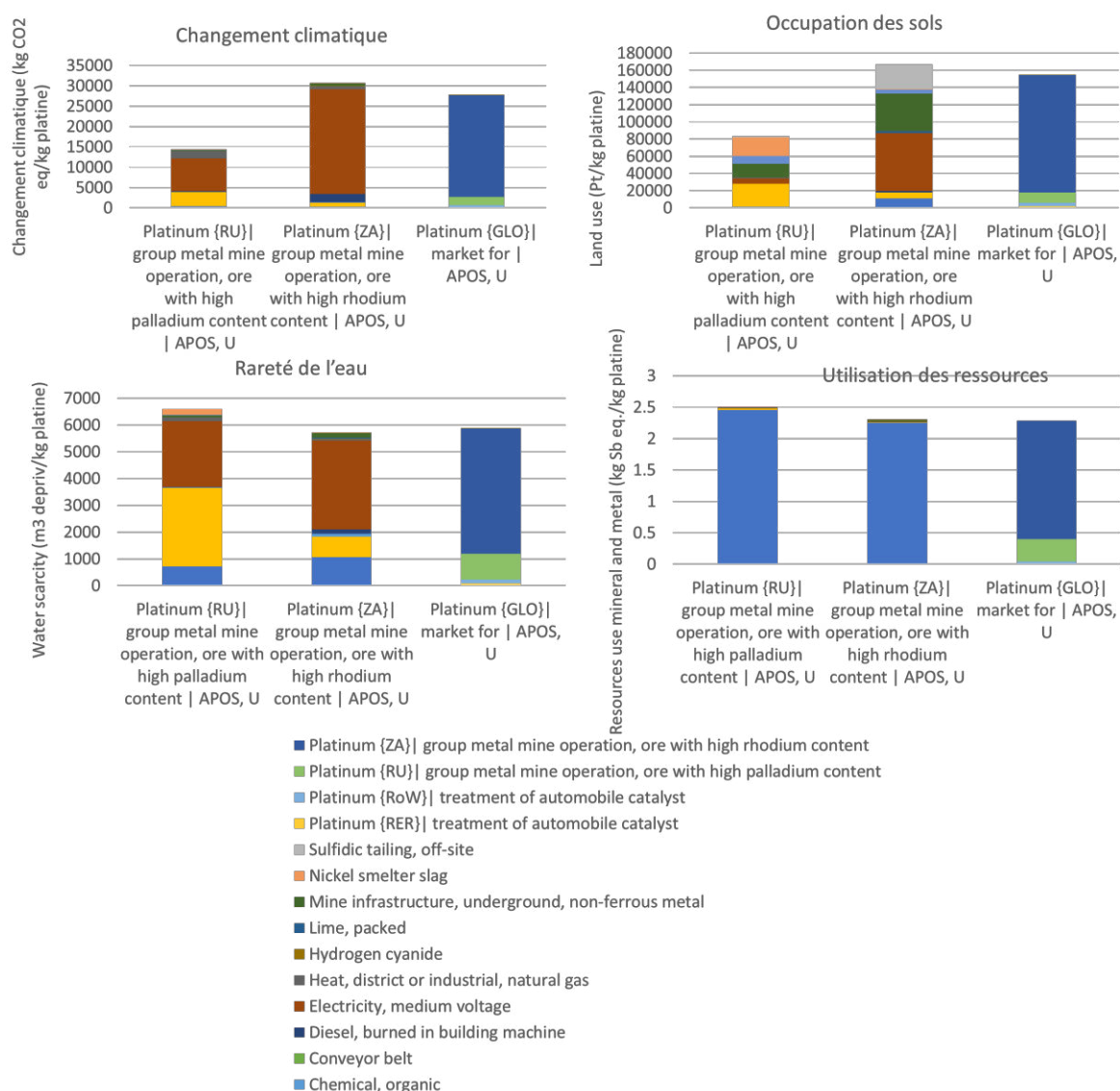


Figure 51. Analyse d'impact des sets de données EI de production de platine. UF = Production d'1 kg de platine.

Enfin, il est possible d'analyser la contribution des matières premières à l'impact de la production de MGP sur l'appauvrissement des ressources (Figure 52). Il est possible de constater la forte influence des facteurs d'allocation sur les résultats issus de l'utilisation de ces sets de données. En effet, lorsque le platine est extrait à partir de mines en Russie, c'est le cuivre qui contribue majoritairement à l'appauvrissement des ressources. En effet, les mines russes extraient des quantités beaucoup plus importantes de cuivres que les mines sud-africaines, principalement centrées sur l'extraction des MGP et pour lesquelles la concentration en cuivre et en nickel est beaucoup plus faible.

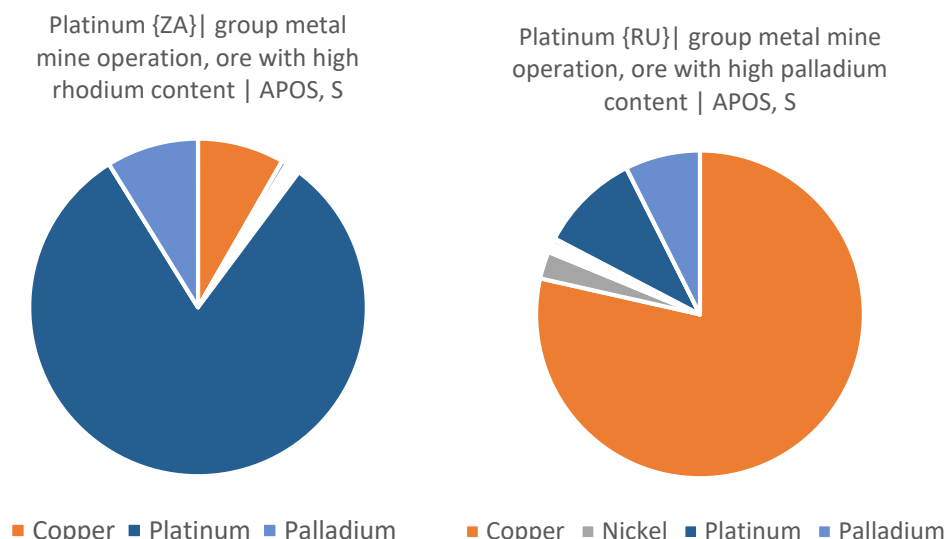


Figure 52. Contribution des matières premières des procédés EI de production de platine à l'appauvrissement des ressources.

Finalement, la qualité des données est analysée dans (Classen et al., 2009) :

- Extraction : Les données pour les principaux flux de masse sont satisfaisants. Les émissions vers l'eau peuvent être surestimées.
- Enrichissement : comme pour l'extraction, les émissions vers l'eau peuvent être surestimées. Les émissions issues des tailings sont analysées dans un module externe qui lui contient des hypothèses générales d'une composition globale des résidus miniers. Et les émissions peuvent varier considérablement selon les cas.
- Métallurgie : Les données de procédé sont satisfaisantes et valides pour plus de 90 % des MGP.

3.5.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 46 propose une rapide description des trois publications analysées dans le cadre de cette étude. L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B. Globalement, les trois études ici analysées se focalisent toutes sur la production du métal raffiné (il faut tout de même noter que Mabiza and Mbohwa (2016) expriment leur unité fonctionnelle en termes de minerais extraits et non pas en termes de métal raffiné produit). Mabiza and Mbohwa (2016) font l'étude des PGMs au sens large c'est-à-dire sans distinguer les différents platinoïdes tandis que Saurat and Bringezeu (2008) et Bossi and Gediga (2017) font une répartition des impacts respectivement par allocation économique dans le 1^{er} cas et par un mix entre allocation économique et massique dans le 2nd cas, en considérant principalement le platine, le rhodium et le palladium. Il convient de noter qu'aucune de ces trois études ne met à disposition ses ICVs.

En termes de couverture géographique, l'Afrique du Sud, la Russie et le Canada sont les principaux pays couverts dans ces trois études, ce qui semble plutôt conforme à la réalité industrielle concernant l'extraction et la production des platinoïdes.

Tableau 45. Valeurs d'empreinte carbone de la production de platinoïdes issues de la littérature.

Cas d'études considéré	Empreinte carbone (t CO2 eq/kg Pt ou PGM)	Brève description
Bossi and Gediga, 2017 (Pt - Monde)	33	Platine au niveau mondial

Bossi and Gediga, 2017 (Pd - Monde)	25	Palladium au niveau mondial
Bossi and Gediga, 2017 (Rh - Monde)	30	Rhodium au niveau mondial
Saurat and Bringezu, 2008 (PGM - Canada)	10	Platinoïdes au Canada (Inco, Sudbury)
Saurat and Bringezu, 2008 (PGM - Russia)	6	Platinoïdes en Russie (Norilsk Nickel)
Saurat and Bringezu, 2008 (PGM - South Africa)	35	Platinoïdes en Afrique du Sud (Anglo Platinum)
Mabiza and Mbohwa, 2016 (Ore - South Africa)	6.3	Platinoïdes en Afrique du Sud (Anglo Platinum) – considère le traitement d'une tonne de minerai

Le Tableau 45 présente les valeurs d'empreinte carbone associée à la production des platinoïdes issues des différents cas d'études considérés dans la littérature ACV, tandis que la Figure 53 met en perspective ces valeurs avec les valeurs issues de la BDD ecoinvent. Globalement, la production de platinoïdes semble générer une empreinte carbone plus importante en Afrique du Sud qu'en Russie ou encore au Canada si l'on se fie aux résultats issus de l'étude de Saurat and Bringezu (2008) et d'ecoinvent.

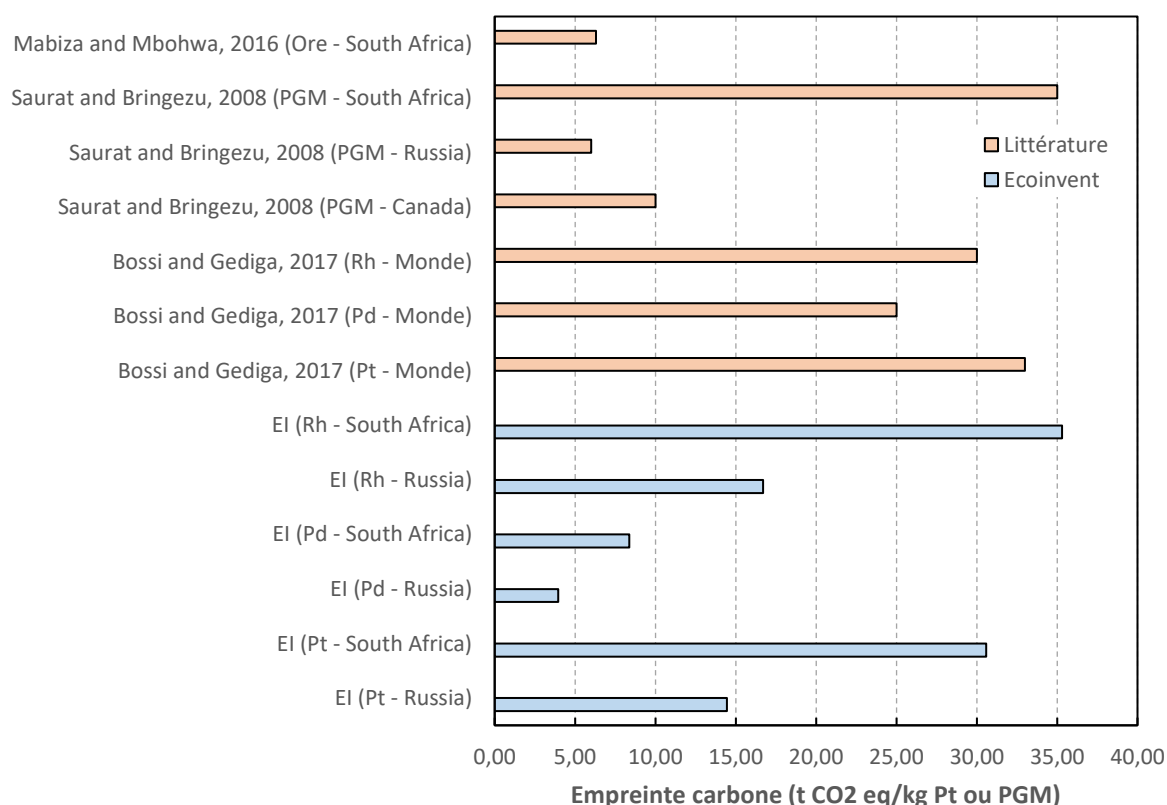


Figure 53. Empreinte carbone de la production de platinoïdes issue de la littérature et d'ecoinvent.

Tableau 46. Revue de littérature ACV des platinoïdes – description des études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit – fonctionnelle	Unité	Couverture géographique	Allocation	ICV ?
Saurat and Bringezu <i>Platinum Group Metal Flows of Europe, Part I – Global supply, use in industry, and shifting of environmental impacts</i>	2008	Métal raffiné 1 tonne primary produced	PGMs	South Africa Russia Canada	Economique	Non
Mabiza and Mbohwa <i>Ore processing by PGM concentration process and assessment of CO₂ equivalent emissions and environmental damage directly involved</i>	2016	Métal raffiné One metric ton of ore		South Africa	/	Non
Bossi and Gediga <i>The environmental profile of platinum group metals</i>	2017	Métal raffiné « 1 kg of platinum, 1 kg of palladium and 1 kg of rhodium (production phase) »		Monde	Massique et économique	Non

3.5.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Malgré une source de données d'inventaire précise et transparente par rapport aux procédés d'exploitation des platinoïdes, certaines limites des BDD existantes peuvent toutefois être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière de ces métaux, notamment concernant la représentativité géographique, l'obsolescence et la complétude de certaines informations. En effet, Il est possible de constater que les BDD analysées permettent de modéliser uniquement le platine, le rhodium et le palladium sans acheter d'extension spécifique. Concernant la représentativité géographique des sets de données, il est possible de conclure d'une excellente représentativité de la production de platinoïdes en Afrique du Sud et Russie (Tableau 47). A l'inverse, le reste du monde n'est pas vraiment représenté malgré sa part élevée de la production mondiale s'élevant à 26.5%.

Tableau 47. Représentativité géographique de la production de platinoïdes dans les BDD.

Pays/Zone géographique	Part de la production (2018)	Représentativité dans EI	Commentaires
Afrique du Sud	49 %	✓	Procédé d'extraction spécifique + concentrations {ZA}.
Russie	24 %	✓	Procédé d'extraction spécifique + concentrations {RU}.
Reste du monde	26.5 %	✗	Les autres procédés d'extraction ne sont pas représentés.

La représentativité géographique du procédé « market for » sur EI par rapport aux producteurs majeurs de platinoïdes représente une moyenne mondiale obsolète où la production sudafricaine est largement majoritaire. Cela éclipse partiellement la production russe censée être représentée à 24 % selon les statistiques de production actuelles.

Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée qui arrive jusqu'en 2010 pour les procédés d'Ecoinvent et jusqu'à 2021 pour les procédés de GaBi. En général, cette obsolescence ne préoccupe pas trop car l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible. Néanmoins, l'exploitation croissante rend les matières premières de moins en moins accessibles, ce qui demandera plus d'effort pour l'extraction.

Les différentes limites identifiées et les considérations relatives pour les platinoïdes sont résumées dans le Tableau 48.

Tableau 48. Exploitation des MGP dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques
Accès aux données et transparence	Rapport ecoinvent très détaillé et exhaustif.
Représentativité	Assez bonne couverture des types de minerais de platinoïdes et géographique (Afrique du Sud et Russie). - Bonne couverture des procédés d'extraction. - Certains platinoïdes ne sont pas représentés (osmium, ruthénium, iridium et rhénium). - Mauvaise représentativité des parts de marché du procédé « market for ».
Allocation	Allocation économique basée sur des prix obsolètes des années 1990 - 2000.

		Grande dépendance des résultats à la méthode d'allocation utilisée.
Obsolescence		Ecoinvent présente une période de validité annoncée qui arrive jusqu'aux années 1995-2002.
Complétude étendue	et	Set de données assez complet.
Vraisemblance		Le set de données EI provient de données d'industrie plutôt anciennes mais vraisemblables.

3.5.3. RECOMMANDATIONS

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations. Pour rappel, les scénarios représentés dans les BDD sont les suivants :

- Production de platine en Afrique du Sud et en Russie,
- Production de palladium en Afrique du Sud et en Russie,
- Production de rhodium en Afrique du Sud et en Russie.

Les considérations suivantes peuvent s'appliquer pour la modélisation des platinoïdes en ACV selon son origine et si des données spécifiques ne sont pas disponibles (Tableau 38). En termes de qualité des données, il est donc à noter que les allocations sont à modifier en fonction des changements de la situation du marché. De nombreux sites internet, comme par exemple celui du London Metal Exchange (LME), référencent les cours des métaux précieux comme le platine, le palladium et le rhodium (LME, 2020). Il est conseillé de prendre une moyenne du prix de vente sur les dernières années afin de limiter l'influence des fortes fluctuations de prix sur les résultats de l'ACV.

Tableau 49. Conseils de modélisation des platinoïdes en ACV selon la provenance du matériau.

Origine	Afrique du Sud ou Russie	Reste du monde	Inconnue
Platine Palladium Rhodium	Utiliser le procédé EI « ZA » ou « RU » en modifiant l'allocation économique appliquée aux coproduits.	Utiliser les procédés « ZA » ou « RU » se rapprochant le plus de la technologie d'extraction (voir section 3.5.2.1).	Modifier le procédé « market for » EI avec les parts de marchés actuelles entre l'Afrique du Sud et la Russie et appliquer une allocation économique selon les valeurs de marché actuelles.

Autres platinoïdes	Utiliser les procédés EI « ZA » ou « RU » en ajoutant des coproduits selon la concentration des autres platinoïdes dans le minerai et modifier l'allocation selon la valeur actuelle des métaux.	Utiliser les procédés « ZA » ou « RU » se rapprochant le plus de la technologie d'extraction (voir section 3.5.2.1) en ajoutant des coproduits selon la concentration des autres platinoïdes dans le minerai et modifier l'allocation selon la valeur actuelle des métaux.	Modifier le procédé EI « market for » et l'allocation économique des procédés « ZA » et « RU » avec les parts de marchés et valeurs de marché actuelles.

Les platinoïdes sont toujours tous présents en quantités plus ou moins importantes dans les minerais de MGP. Ainsi, pour modéliser l'osmium, le ruthénium, l'iridium et le rhénium avec EI, il est possible d'adapter le procédé existant en ajoutant des coproduits et en ajustant les facteurs d'allocation en fonction de la concentration et du prix de marché de ces matériaux (Tableau 50).

Tableau 50. Concentrations de platinoïdes dans différents minerais pour une modélisation issue des sets de données existants (Classen et al., 2009).

Element		Merensky	UG2	Stillwater	Sudbury	Noril'sk
		RSA	RSA	USA	CAN	RUS
Ni	%	0.28	0.16	<0.1	1.4 – 1.5	up to 3
Cu	%	0.17	0.03	<0.1	1.1 – 1.3	up to 4
Pt	ppm	4.82	3.22	6.0	0.38	2.5
Pd	ppm	2.04	3.24	20.0	0.39	7.3
Rh	ppm	0.24	0.54	0.21	0.03	0.2
Ru	ppm	0.44 ²	0.72 ²	0.36 ²	0.04 ²	n. a. ²
Ir	ppm	0.06 ²	0.11 ²	0.21 ²	0.01 ²	n. a. ²
Os	ppm	0.04 ²	0.07 ²	- ²	0.01 ²	n. a. ²
Au	ppm	0.26	0.07	0.21	-	0.25 ²

² Values for Ru, Ir and Os are taken from Hagelücken (2001b).

3.6. Nickel et cobalt

3.6.1. EXTRACTION DU NICKEL ET DU COBALT DANS LE MONDE

Dans l'écorce terrestre, le nickel, le cobalt et le chrome sont toujours étroitement associés aux roches basiques et ultrabasiques. Cette association au sein des roches qui constituent l'environnement des gisements (et généralement la source de ces métaux) s'exprime également au sein des gisements métallifères.

Les roches basiques et ultrabasiques renfermant systématiquement des teneurs élevées en cuivre, les gisements exploités pourront associer le cuivre, le nickel et le cobalt. Ainsi, les gisements de cuivre, issus de concentrations gravitaires au sein des réservoirs magmatiques ou formés par des circulations hydrothermales, sont de très loin la principale source primaire de cobalt et représentent la moitié de la source primaire de nickel.

Suivant la typologie des gisements, on aura des concentrations relatives qui pourront varier d'un gisement à un autre, mais le cuivre sera systématiquement présent et il contribuera à l'économie de l'exploitation, souvent de manière majoritaire. Pour simplifier, on peut considérer que le nickel et le cobalt est avant tout un sous-produit de la mine de cuivre si celle-ci se développe dans un environnement de roches basiques ou ultrabasiques.

En 2018, 72 % du cobalt extrait provient de mines de cuivre, 26 % de mines de nickel et 1 % de la mine de cobalt de Bou Azzer. Sur la même période, 6,7 % des revenus des exploitations minières de nickel proviennent du cobalt, 1,3 % pour celles de cuivre.⁶

Par ailleurs, l'altération météorique des roches ultrabasiques peut également provoquer des concentrations résiduelles de cobalt et de nickel dans les latérites qui se développent à leurs dépens dans les climats tropicaux humides et équatoriaux.

Le cuivre, très mobile dans les processus d'altération météorique, est alors absent de ces gisements oxydés. Dans le cadre de cette étude, il est donc extrêmement complexe, d'estimer les consommations et l'impact spécifique d'une production de nickel ou de cobalt dans un gisement de cuivre sulfuré car elles seront étroitement liées à celle des autres métaux également présents et valorisés.

Les minerais latérites peuvent difficilement être enrichis, car le contenu en eau est de 30%. Par conséquent, ils sont séchés pour une future préparation. Enfin, les minerais latérites sont transformés en ferronickel et oxydes de nickel, tous deux utilisés dans des applications de traitement de surface. Le nickel métallique est exclusivement produit (fabriqué) à partir de minerais sulfurés.

Les données de production mondiale de nickel et de cobalt sont résumées dans le Tableau 51.

⁶ Données l'Elémentarium : <https://www.lelementarium.fr/element-fiche/cobalt/>

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 51. Production mondiale de nickel et de cobalt en 2018. Sources en Annexe A.

Pays	Cobalt (t)			Nickel (t)			Type de minerai
	Réserves	Prod. minière	Prod. métal	Réserves	Prod. minière	Prod. métal	
Afrique du Sud				3 700 000	13 794		Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co)
Australie	1 200 000	2 018	3 200	19 000 000	170 000	112 000	Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co) Minerais Latéritiques
Brésil		436	300	11 000 000	90 000	69 000	Minerais Latéritiques
Belgique			6 360				
Canada	250 000	3 800	6 152	2 700 000	160 000	158 000	Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co)
Chine	80 000	3 100	78 360	2 800 000	110 000	624 000	Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co)
Cuba	500 000	4 900		5 500 000	53 000		Minerais Latéritiques
Finlande		400	12 874			60 000	Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co)
Guatemala					49 000		
Indonésie				21 000 000	560 000	205 000	Minerais Latéritiques
Japon			3 669			188 000	
Madagascar	140 000	2 850	2850				Minerais Latéritiques
Maroc		1 619	1619				Smaltite (minerai arsénié de cobalt)
Nouvelle Calédonie		2 104		6 700 000	210 000	104 000	Minerais Latéritiques
Norvège			4 200			87 000	Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co)
Russie	250 000	5 900	1 800	7 600 000	210 000	159 000	Ni sulfuré (gisements Cu – Ni – Co)
Papouasie Nv. Guinée	56 000	3 275					Minerais Latéritiques
Philippines	280 000	4 600		4 800 000	340 000		Minerais Latéritiques
R. D. Congo	3 400 000	80 790	400				Gisements de Cuivre de type Red Bed
Zambie	270 000	1 400	1 613				Gisements de Cuivre de type Red Bed
Monde	6 900 000	135 850	124 344	89 000 000	2 300 000	2 182 000	

3.6.2. NICKEL

3.6.2.1. ETAT DE L'ART

3.6.2.1.1. EXTRACTION DU NICKEL DANS LE MONDE

Le nickel est produit à parts égales à partir de deux types de minerais : les minerais sulfurés, presque exclusivement de cuivre, et les minerais oxydés.

Les minerais sulfurés

Ils se présentent principalement sous forme de pentlandite, $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$, associée, en général, à de la pyrrhotite (Fe_7S_8), de la pyrite (FeS_2) et de la chalcopryite (CuFeS_2). Ce sont donc généralement des gisements de Cu-Ni, toujours associés à des roches ultramafiques dont l'économie se fonde principalement sur la coproduction de cuivre et de nickel. Ces gisements présentent des teneurs de 0,7 à 3 % de nickel et contiennent environ 1 % de cuivre ; des platinoïdes, du cobalt, de l'argent et de l'or sont également récupérés.

Les minerais oxydés (latéritiques)

Ces minerais, qui ne contiennent pas de cuivre ni de métaux précieux, résultent d'une concentration du Ni – Co par lessivage superficiel de roches ultrabasiques dans le processus de latéritisation. Leur genèse exclue donc des mines profondes et ils sont exploités à ciel ouvert. La nature du minerai ne permet pas une concentration par voie physique, et ils seront traités principalement par hydrométallurgie.

Suivant leur composition, on distinguera deux types de minerais oxydés, qui résultent de leur position au sein du profil latéritique :

- **Les minerais silicatés** (sapolites) dans lesquels le nickel se substitue au magnésium de la serpentine ($3\text{MgO}, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$). Appelés garniérite en Nouvelle-Calédonie (le plus important gisement mondial de minerais oxydés), leur teneur en Ni est de 2,3 à 3 % ; le minerai contient également du cobalt. Ce faciès se situe à la base du profil latéritique. Ces minerais sont également exploités en Colombie et, à des teneurs plus faibles, en Indonésie, en République Dominicaine, aux Philippines, au Brésil... La richesse de ces minerais autorise un traitement par pyrométallurgie, mais la tendance actuelle est de s'orienter vers l'hydrométallurgie également adaptée au traitement des minerais de type limonite, toujours présents (par définition) dans les gisements latéritiques.
- **Les minerais de type limonite**, localisés dans la partie haute du profil latéritique et dans laquelle le Ni se substitue au fer dans la goethite (FeOOH). En Nouvelle-Calédonie, ce sont des minerais pauvres qui contiennent de 1 à 1,5 % de Ni, 0,1 à 0,2 % de Co et 2 à 5 % de Cr. Ils sont également exploités à Cuba et à Madagascar et sont présents en couverture de tous les gisements de minerais silicatés. La Chine importe de tels minerais pour produire, dans des anciens hauts fourneaux ou plus récemment dans des fours électriques, du ferronickel de basse teneur, à environ 10 %, appelé « nickel pig iron (NPI) » ou « nickel basic feed ». En 2018, la production chinoise de « nickel pig iron » a été de 474 000 t en Ni contenu, celle de l'Indonésie de 259 000 t. La composition de ces minerais impose un traitement hydrométallurgique.

Le processus de latéritisation des roches ne permet pas de concentration résiduelle du cuivre. Au contraire, ce métal est extrêmement soluble dans les eaux de surface et il sera donc absent dans les profils latéritiques (bien que les roches ultramafiques renferment généralement des teneurs élevées en cuivre).

Les minerais oxydés de Ni, sont donc à dissocier totalement des minerais sulfurés de type Ni-Cu, tant au niveau des modèles de gisement que de celui des types d'exploitation et de traitement métallurgique.

3.6.2.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction du nickel et du ferronickel disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 52. La base de données EI permet d'accéder à un set de données représentatif uniquement du procédé d'extraction du nickel issu du Québec. Ensuite plusieurs procédés de production de nickel sont disponibles suivant le type de minerai initial : minerais de platinoïdes en Afrique du Sud et Russie, ou minerais sulfurés cuivre-nickel. Les BDD EI et GaBi proposent également plusieurs procédés de production de ferronickel. Les procédés GaBi disponibles avec la licence standard du logiciel ont tous les deux pour source le rapport du Nickel Institute de 2017.

Tableau 52. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de minerai de nickel. Les procédés grisés ne sont pas disponibles avec la licence standard du logiciel.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Minerai sulfuré de nickel	Nickel ore, beneficiated, 16% {CA-QC} mining and beneficiation of nickel ore APOS, U	Pas de procédé
Nickel > 99.5% (minerais sulfurés)	- Nickel, 99.5% {GLO} nickel mine operation, sulfidic ore APOS, U - Nickel, 99.5% {GLO} smelting and refining of nickel ore APOS, U - Nickel, 99.5% {RU} platinum group metal mine operation, ore with high palladium content APOS, U - Nickel, 99.5% {ZA} platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content APOS, U	- Nickel mix; ore mining and processing, roasting, reduction, magnetic separation; production mix, at plant; 99.9% Nickel⁷ - Nickel (Class 1, 99.95%) ILCD 2017; technology mix; production mix, at plant; 99.9% Ni
Ferronickel (minerais latéritiques)	Ferronickel, 25% Ni {GLO} production APOS, U	- Ferro nickel (29%); mining, separation, electric arc furnace; production mix, at plant; 29 % nickel⁸ - Ferro Nickel (29% Ni) ILCD 2017; technology mix; production mix, at plant; 29% Nickel

Des 7 procédés relatifs à l'exploitation du nickel disponibles dans les BDD ACV, 1 décrit du minerai, 5 la production de nickel raffiné et 2 la production de ferronickel. La construction des inventaires EI est basée sur les considérations suivantes : L'exploitation du nickel est

⁷ Extension database V : nonferrous metals 2020

⁸ Extension database XVII : full US 2020

classée selon deux chaînes de valeur (Figure 54). La première chaîne de valeur représente l'extraction du nickel à partir de minerais sulfurés menant à du nickel de Classe I. Cette classe de nickel est utilisée dans un large panel d'applications. L'autre chaîne de valeur représente l'extraction du ferronickel à partir de latérite. Ces deux produits intermédiaires représentent les applications les plus importantes du nickel. Les deux procédés de production de nickel de classe I avec pour origine « GLO » comprennent uniquement le cuivre en tant que coproduit métallique alors que les procédés « ZA » et « RU » comprennent, en plus du cuivre, trois platinoïdes : le platine, le palladium et le rhodium.

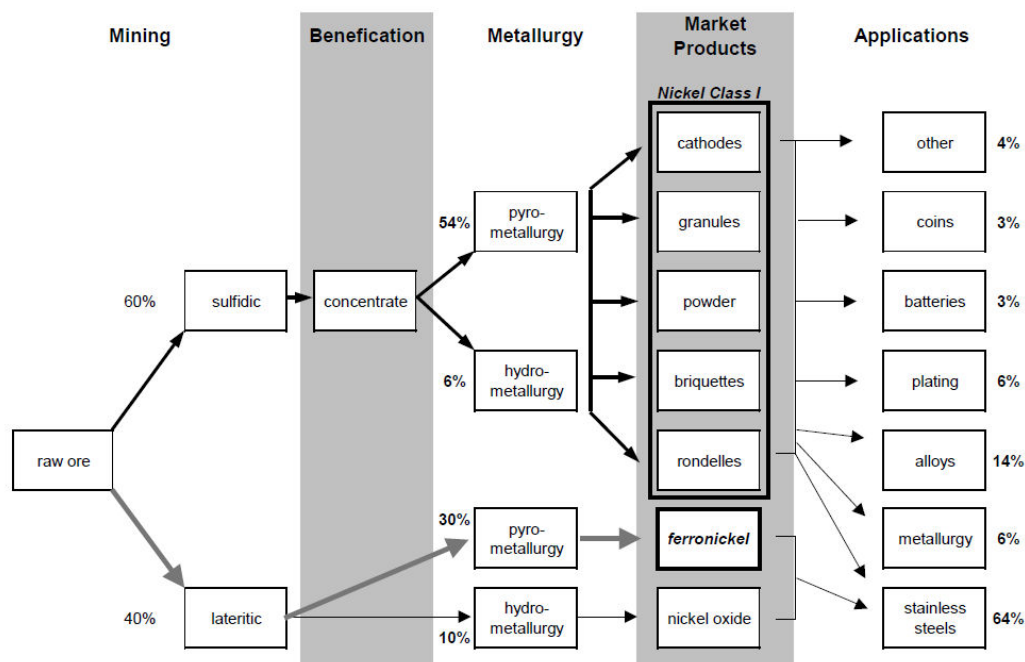


Figure 54. Meta-information des modules des produits de nickel dans EI. De l'extraction du minerai à l'application (Althaus et al., 2004).

Le premier set de données EI « *Nickel, 99.5% {GLO} / nickel mine operation, sulfidic ore / APOS, U* » représente le mix de production globale de nickel de classe I en 1994 avec une production couplée d'une certaine quantité de cuivre. Il est principalement issu des données et hypothèses de (Hilbrans & Hinrichs, 1999), source disponible uniquement en allemand. Le procédé multifonctionnel « nickel production, sulphidic ore, primary » livre les coproduits « nickel, 99.5%, at plant » et « copper, primary, couple production nickel ». Le procédé modélise plusieurs alternatives d'extraction et de raffinage utilisées à l'échelle mondiale. Plus précisément, une moyenne entre 5 alternatives allouées selon leur utilisation à l'échelle mondiale est effectuée. Le module résultant représente donc la valeur agrégée de la production mondiale de nickel de classe I. Les routes de production décrites par le set de données sont résumées dans le Tableau 53. Néanmoins, les pays de production ne sont pas spécifiés dans la documentation. Les considérations suivantes sont mentionnées :

- Le procédé considère un minerai extrait en mines souterraines.
- Les résidus miniers sont stockés en piles près de la mine et le module standard de dépôt des résidus non sulfurés a été choisi, incluant l'occupation des sols et la transformation liée au dépôt.
- Les résidus de remplissage sont estimés libres de charges. A l'inverse, le ciment et le matériau de remplissage sont considérés. Le degré de remplissage est documenté pour chaque alternative de même que la consommation en eau et les effluents provenant de la mine.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

- L'utilisation d'eau et la production d'effluents est documentée. L'utilisation d'eau douce est inventoriée en tant qu'eau de rivière, alors que l'eau de la mine est considérée en tant qu'eau souterraine, étant aussi pompée. La composition de l'effluent est modélisée par les valeurs du GIEC de 2002.
- La consommation d'électricité est basée sur 60% de puissance hydraulique à cause de la demande constante et élevée des opérations.
- Le ciment, les explosifs et le sable sont transportés par des camions sur 50 km.

Tableau 53. Aperçu des principales routes de production du nickel à partir de minerais sulfurés utilisées dans EI.

Process	Ore	Roasting	Primary Smelting	Matte converting	Separation co-product	Primary Refining	Nickel Refining
alternative 1	Nickel-concentrate	fluidized bed furnace	Electric Furnace Smelting:	Converter			Matte refining (Electrorefining)
alternative 2			Flash-Smelting	Converter			Precipitation with hydrogen
alternative 3	Nickel-Copper-Concentrate	fluidized bed furnace	Electric Furnace Smelting:	Converter	Wet		Reductive electrolysis
alternative 4			Flash-Smelting	Converter	Dry		Electrolytic Refining (Electrowinning)
alternative 5		Multiple hearth	Reverberatory Furnace smelting	Converter	Dry		Carbonyl Process

Le module “*Nickel, 99.5% {GLO} | smelting and refining of nickel ore | APOS, U*” décrit l'étape de raffinage du minerai de nickel extrait au Canada dont l'inventaire est décrit dans le module « *Nickel ore, beneficiated, 16% {CA-QC} | mining and beneficiation of nickel ore | APOS, U* ». Ces sets de données sont représentatifs de la production de nickel au Québec en 2010 et sont une désagrégation du set de données décrit dans le paragraphe précédent.

Les deux autres modules “*Nickel, 99.5% {RU} | platinum group metal mine operation, ore with high palladium content | APOS, U*” et “*Nickel, 99.5% {ZA} | platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content | APOS, U*” décrivent la production de nickel à partir de la production de MGP en Afrique du Sud et en Russie (voir section 3.5).

Le dernier module EI « *Ferronickel, 25% Ni {GLO} | production | APOS, U* » décrit la production globale de ferronickel en 1994. Il est conçu pour l'utilisation de l'alliage en tant que matière première dans la fabrication d'aciers inoxydables et alliages. L'extraction est modélisée selon les paramètres suivants :

- Le minerai est extrait en mines à ciel ouvert.
- Les résidus miniers sont déposés en piles dans l'enceinte minière, et donc non considérés dans l'inventaire.
- L'utilisation d'eau et la production d'effluents est documentée. L'utilisation d'eau douce est inventoriée en tant qu'eau de rivière, alors que l'eau de la mine est considérée en tant qu'eau souterraine, étant aussi pompée. La composition de l'effluent est modélisée par les valeurs du GIEC de 2002.
- La consommation d'électricité est basée sur 60% de puissance hydraulique à cause de la demande constante et élevée des opérations.
- Comme les latérites ne nécessitent pas d'enrichissement, aucun résidu n'est modélisé.

Le procédé GaBi « *Nickel (Class 1, 99.95%) ILCD 2017* » représente la situation spécifique de chaque pays/région, à partir des technologies principales, des caractéristiques de chaque région et ou des statistiques. Le set de données est un mix de la production d'Australie, Canada, Finlande, France, Japon, Norvège, Royaume Uni et Russie. L'année de référence est 2013. Une allocation économique est appliquée au système concernant les coproduits du nickel. Les données de production ont été collectées en 2010 et 2011. Le set de données couvre toutes les étapes importantes de production et technologies de la chaîne de valeur avec une bonne qualité des données. L'inventaire est principalement basé sur des données d'industrie et complété par des données secondaires si nécessaire. Le set de données inclut l'extraction, le traitement et l'affinage. Le système est modélisé selon une « black box ». Pas d'allocation des impacts. La source de ce set de données est le Nickel Institute.

Le module GaBi suivant « *Ferro nickel (29%); mining, separation, electric arc furnace; production mix, at plant; 29 % nickel* » couvre toutes les étapes importantes de production et technologies de la chaîne de valeur avec une bonne qualité des données. Ce set de données est basé principalement sur des procédés de production adoptés internationalement, et connectés avec des chaînes de production régionales.

Le dernier procédé GaBi « *Ferro Nickel (29% Ni) ILCD 2017* » est un mix de la production provenant du Brésil, Colombie, Venezuela, Nouvelle Calédonie et République Dominicaine.

Dans les deux cas, les sets de données couvrent toutes les étapes importantes de production et technologies de la chaîne de valeur avec une bonne qualité des données. Ils sont principalement basés sur des données d'industrie et complétés par des données secondaires si nécessaire. Ils décrivent l'inventaire de la production globale de ferronickel. L'extraction se fait à partir de mines souterraines et à ciel ouvert, alors que les sulfures de minerais de nickel sont mécaniquement enrichis puisqu'ils proviennent de grains différents. Le minerai de nickel est normalement combiné au cuivre, qui doit être premièrement traité par broyage, flottation ou séparation magnétique pour produire un concentré de cuivre-nickel. La séparation du cuivre et du nickel dans le concentré est effectuée pendant le procédé d'affinage de la matte après la fonte et le concentré est transporté jusqu'au haut fourneau. Le four considéré dans le set de données est un four ouvert à arc électrique, produisant des arcs électriques en passant un courant électrique alternatif entre une série d'électrodes en carbone. Le mix énergétique spécifique des principaux pays producteurs (selon l'information de l'IEA) a été considéré pour l'inventaire.

▪ ELCD et PEF/OEF

Aucun procédé disponible n'a été identifié pour le nickel.

3.6.2.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

La production de nickel est un objet d'études relativement répandu dans la littérature ACV, avec un grand nombre d'études disponibles. Dans le cadre de cette étude SCORE LCA, cinq études ont été analysées, incluant :

- Norgate et al., 2007 - Assessing the environmental impact of metal production processes
- Norgate and Jahanshahi, 2011 - Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing
- Bartzas and Komnitsas, 2015 - Life cycle assessment of ferronickel production in Greece
- Mistry et al., 2016 - Life cycle assessment of nickel products
- Khoo et al., 2017 - A life cycle assessment of a new laterite processing technology

Ces différents articles ont été sélectionnés sur la base de critères tels que la qualité scientifique (en privilégiant les publications de rang A), le cas d'étude considéré (en privilégiant les cas d'étude industriels), la présence de données d'ICV ou non et la date de publication.

Similairement aux autres métaux étudiés, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre, et enfin les résultats d'impacts (EICV).

3.6.2.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.6.2.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les BDD ACV analysées permettent de modéliser plusieurs produits issus de l'extraction du nickel : un minerai sulfuré de nickel (en particulier EI), la production de nickel de classe I (raffiné), ou la production de ferronickel à partir de minerais oxydés. Dans le cas d'EI, il est possible d'accéder directement à un set de données spécifique à l'extraction du minerai sulfuré, contrairement à GaBi. Il est en revanche impossible de modéliser directement l'extraction des minerais oxydés (latéritiques).

Dans EI, la production de nickel de classe I est toujours liée à des systèmes multifonctionnels. En effet, le concentré de cuivre ainsi que l'acide sulfurique et le sulfate d'ammonium sont toujours des coproduits du nickel de classe I produit globalement. Dans le cas des procédés régionaux « ZA » et « RU », le platine, le palladium et le rhodium viennent s'ajouter au cuivre comme coproduits du nickel (voir section 3.5). Pour les procédés « GLO », une allocation économique est appliquée entre le nickel et les coproduits selon des valeurs de marché calculées selon 90 % du prix d'achat des coproduits en 2004 (Tableau 54). L'allocation économique appliquée à chaque coproduit est différente selon l'étape de production (extraction, enrichissement etc...).

Tableau 54. Paramètres utilisés pour l'allocation des coproduits de la production de nickel "GLO" sur EI.

Coproduits du produit Nickel, 99.5% {GLO} / nickel mine operation, sulfidic ore / APOS, U	Quantité (kg)	Prix de marché considéré (€/kg)
Nickel, 99.5 %	1	10.4
Concentré de cuivre	0.844	0.534
Acide sulfurique	11.05	0.031
Sulfate d'ammonium	0.299	0.38

Coproduits du produit Nickel, 99.5% {GLO} / smelting and refining of nickel ore / APOS, U	Quantité (kg)	Prix de marché considéré (€/kg)
Nickel, 99.5 %	1	10.4
Concentré de cuivre	0.398	0.534
Acide sulfurique	11.05	0.031
Sulfate d'ammonium	0.299	0.38
Vapeur	5.19	0.04

Concernant le procédé GaBi, une allocation économique entre les coproduits est appliquée sans plus de précisions.

La liste des intrants des inventaires EI décrivant la production de nickel de classe I ainsi que la comparaison des quantités utilisées dans chaque inventaire est visible en Figure 55. A

cause de la désagrégation des données d'inventaire sur GaBi, le procédé correspondant n'est pas comparé. En termes de quantité de matière première, il est possible de remarquer que la production issue d'Afrique du Sud nécessite des quantités bien inférieures de minerai, ce qui implique également une production moindre de laitier à traiter. L'utilisation de chaux est plus importante pour les procédés « GLO » que pour les procédés régionaux.

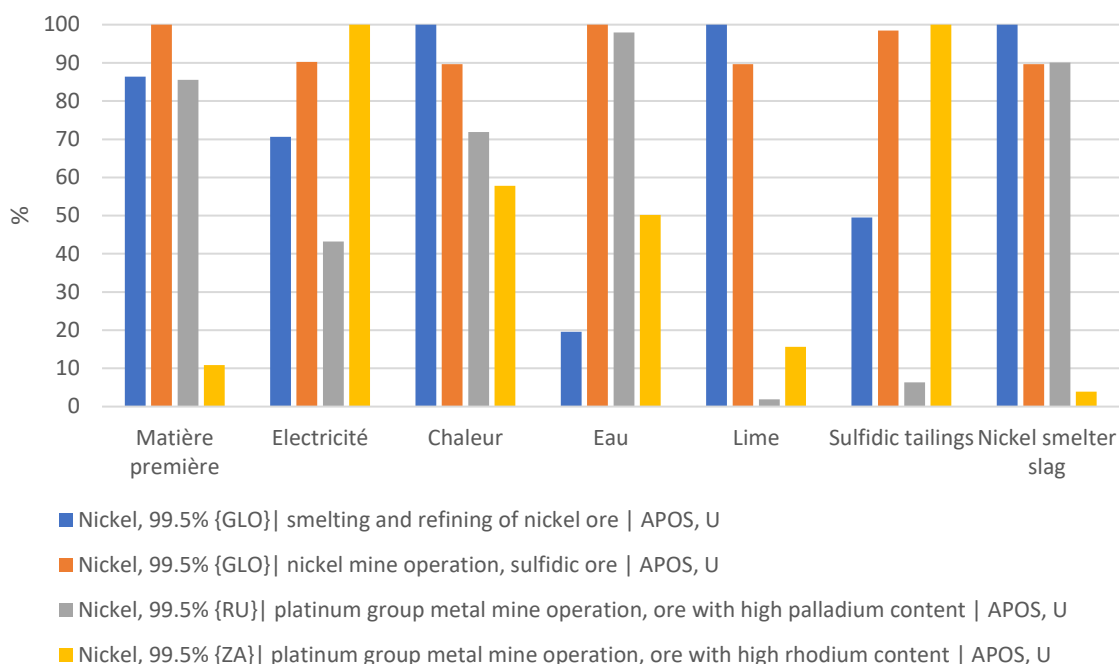


Figure 55. Comparaison des inventaires de la BDD EI pour la production de nickel de classe I.

Il peut être intéressant et utile d'analyser également le procédé global EI « market for » pour la production de nickel. Le procédé inclut différents sous-procédés décrivant la production de nickel globale avec différentes méthodes, alloués selon une photographie du marché. Différents transports sont inclus également. Les parts de marché des procédés de production de nickel au sein du procédé global « market for » sont reportées sur la Figure 56. Ces valeurs représentent la part (en masse) des différentes sources de nickel. La production mondiale considérée est représentée à 65% par la production de nickel à partir de minerais sulfurés Cu-Ni, suivie par la production issue des mines russes de MGP et par la production sud-africaine et canadienne avec 4% et 3% respectivement. Des quantités très négligeables de nickel sont issues du recyclage.

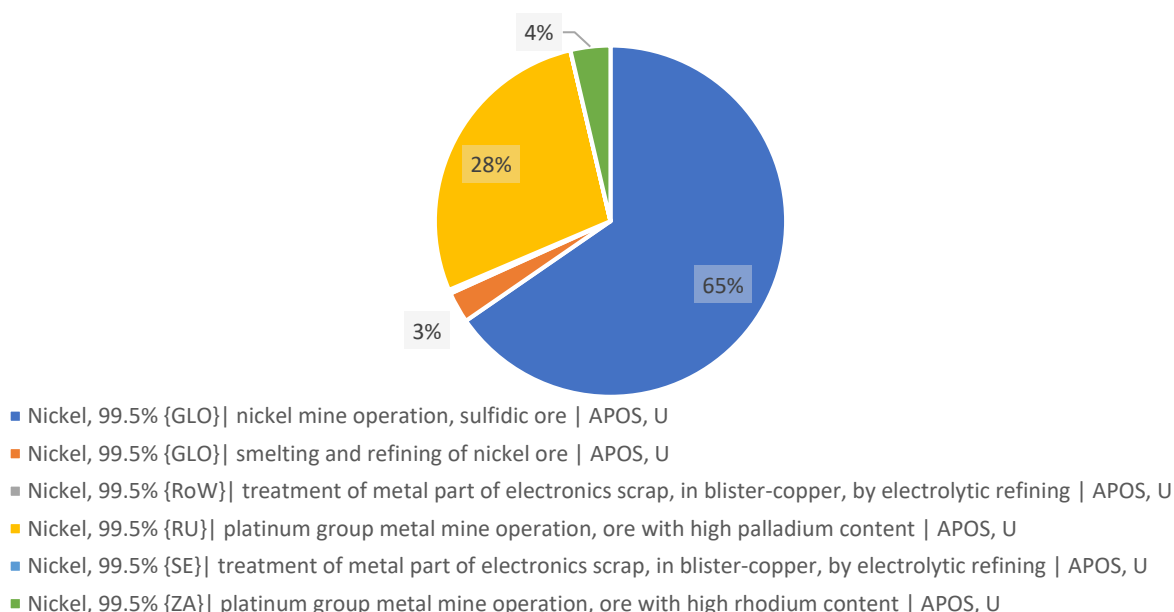


Figure 56. Part de marché au sein du set de données "market for" de la production de nickel sur EI.

Le set de données GaBi de production de nickel de classe I disponible est représentatif de la production en Australie, Canada, Finlande, France, Japon, Norvège, Royaume Uni et Russie. Cependant, aucune indication des parts de marché utilisées n'est présente dans la documentation si ce n'est que 52 % de la production mondiale est couverte par le set de données. L'année de référence est 2013 et la validité annoncée va jusqu'en 2019.

Enfin, certaines catégories d'impacts de la méthode EF adaptée sont évaluées et comparées pour les différents sets de données. Les impacts de tous les procédés identifiés décrivant la production de minerai de nickel, de nickel raffiné et de ferronickel sont présentés sur la Figure 57. L'impact faible de l'extraction du minerai sur le réchauffement climatique ($< 2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./kg}$ de minerai) montre que l'étape de transformation en métal raffiné est une étape sensible du procédé en termes d'émissions de GES. Concernant l'occupation des sols, les procédés GaBi présentent des impacts inexistantes ou faibles mettant en évidence le fait que la méthode utilisée ne prend pas en compte toutes les données d'inventaires et notamment l'occupation des sols inventoriée depuis GaBi. L'extraction de nickel à partir de mines de MGP implique un impact sur l'utilisation des ressources plus important qu'à partir de mines de cuivre dû à la présence de métaux précieux. A l'inverse l'occupation des sols liées aux mines de cuivre est plus importante que celle liée aux mines de MGP. La consommation en eau est assez homogène entre les procédés de production de nickel à l'exception du procédé GaBi de production de ferronickel, présentant une consommation anormalement élevée.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES



Figure 57. Comparaison des impacts des procédés EI (bleu foncé) et GaBi (bleu ciel) de l'extraction du nickel, de la production de nickel raffiné et de la production de ferronickel. UF = production d'1 kg de minerai, 1kg de nickel raffiné ou 1 kg de ferronickel.

Enfin, la contribution des matières premières à l'appauvrissement des ressources est analysée sur la Figure 58. Il est possible de remarquer que le nickel n'est pas toujours le contributeur majeur à cette catégorie d'impacts. En effet, il l'est particulièrement pour les procédés de production de ferronickel mais pas pour les procédés de production de nickel de classe I dans lesquels des coproduits sont impliqués. La plupart des mines impliquant plusieurs coproduits telles que les mines Cu-Ni ou les mines de platinoïdes présentent une plus grande contribution du cuivre que du nickel à l'appauvrissement des ressources. Cela est dû au facteur d'allocation appliqué à la production du cuivre et à l'impact de l'appauvrissement de cette matière première comparé au nickel. Dans le cas de la production en Afrique du Sud, la contribution majoritaire est issue de la consommation en platine (80%).

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

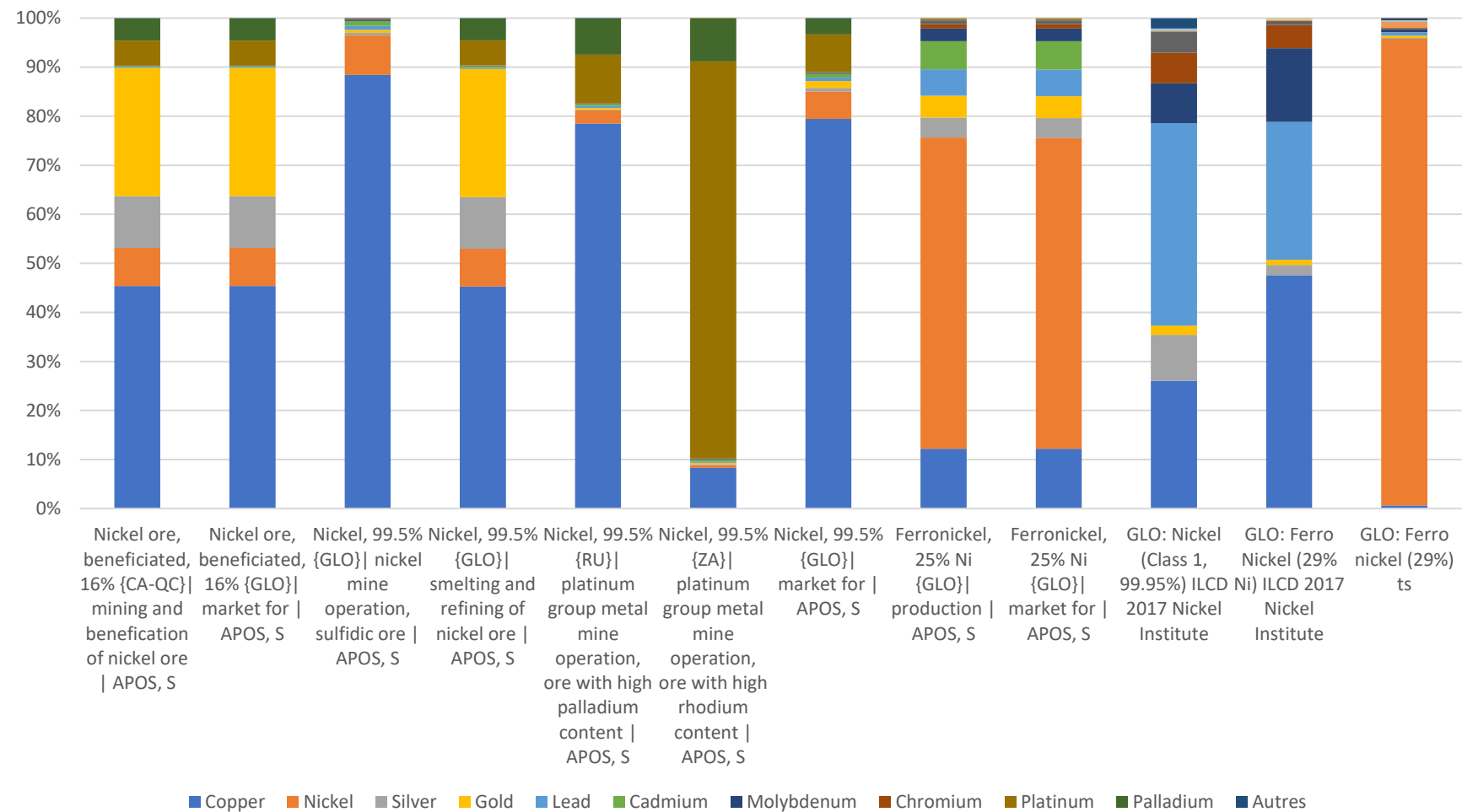


Figure 58. Contribution des métaux des sets de données ecoinvent et GaBi de la production de nickel à l'appauvrissement des ressources. Les neuf premières barres correspondent aux procédés ecoinvent. Les trois dernières barres correspondent aux procédés GaBi.

3.6.2.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 56 propose une rapide description des différentes publications ACV analysées dans le cadre de cette étude. L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B. Les cinq études ici considérées ont toutes comme objet d'étude la production de métal raffiné, certaines se focalisant sur la production de nickel pur (Norgate et al., 2007 ; Norgate and Jahanshahi, 2011 ; Mistry et al., 2016), tandis que d'autres analysent la production de produits dérivés du nickel (ferronickel dans le cas de Bartzas and Komnitsas, 2015 ; acier inoxydable dans le cas de Khoo et al., 2017).

Des données d'inventaires sont mis à disposition dans les publications de Bartzas and Komnitsas (2015), Mistry et al. (2016) et Khoo et al. (2017), les deux premières études ACV s'appuyant sur des données issues de sources primaires spécifiques aux cas d'études considérés (données fournies par les industriels) complétées par des données de sources publiques (littérature, BDD, etc.).

En termes de couverture géographique, l'Australie et l'Indonésie, qui figurent parmi les principaux producteurs de nickel au niveau mondial, sont représentées dans deux des cinq études analysées, tandis que les autres considèrent un focus mondial, Bartzas and Komnitsas (2015) se focalisant quant à eux sur un cas d'études grec (selon les auteurs, la Grèce apparaît comme étant un des principaux producteurs de ferronickel à l'échelle européenne).

Le Tableau 55 présente quelques valeurs d'empreinte carbone issues des différents cas d'études de la littérature ACV, avec notamment des distinctions en termes de voies de production (pyro ou hydrométallurgie) et en termes de procédés mis en œuvre (e.g. high pressure acid leaching, heap leaching, etc.).

Tableau 55. Valeurs d'empreinte carbone de la production de nickel issues de la littérature (HPAL = High pressure acid leaching ; AL = Acid leaching ; EPAL = Enhanced pressure acid leaching ; HL = Heap leaching ; DNi = Direct Nickel).

Cas d'études considéré	Empreinte carbone (t CO₂ eq/t Ni)	Brève description
Norgate et al., 2007 (Pyro - Australie)	11.4	Nickel raffiné en Australie par voie pyrométallurgique à partir de minerais sulfurés
Norgate et al., 2007 (Hydro/HPAL - Australie)	16.1	Nickel raffiné en Australie par voie hydrométallurgique (procédé HPAL) à partir de latérites
Mistry et al., 2016 (Mix prod. - Monde_Chine exclus)	7.64	Mix de production de nickel raffiné au niveau mondial (Chine exclus)
Norgate and Jahanshahi, 2011 (Hydro/HPAL - Monde)	27.3	Nickel raffiné au niveau mondial par voie hydrométallurgique (procédé HPAL) sans usine de traitement de l'acide
Norgate and Jahanshahi, 2011 (Hydro/AL - Monde)	25.1	Nickel raffiné au niveau mondial par voie hydrométallurgique (procédé AL) sans usine de traitement de l'acide
Norgate and Jahanshahi, 2011 (Hydro/EPAL - Monde)	23.2	Nickel raffiné au niveau mondial par voie hydrométallurgique (procédé EPAL) sans usine de traitement de l'acide

Norgate and Jahanshahi, 2011 (Hydro/HL - Monde)	28	Nickel raffiné au niveau mondial par voie hydrométallurgique (procédé HL) sans usine de traitement de l'acide
Norgate and Jahanshahi, 2011 (Pyro - Monde)	22.4	Nickel raffiné au niveau mondial par voie pyrométallurgique
Norgate and Jahanshahi, 2011 (Pyro/Hydro - Monde)	44.8	Nickel raffiné au niveau mondial par voie hydro/pyrométallurgique (procédé Caron)
Bartzas and Komnitsas, 2015 (Pyro - FeNi - Grèce)	12.6	Ferronickel raffiné en Grèce par voie pyrométallurgique
Khoo et al., 2017 (Pyro - Inox - Monde)	13.3	Acier inoxydable produit au niveau mondial par voie pyrométallurgique
Khoo et al., 2017 (Hydro/HPAL - Inox - Monde)	6.7	Acier inoxydable produit au niveau mondial par voie hydrométallurgique (procédé HPAL)
Khoo et al., 2017 (DNi - Inox - Australie)	7.22	Acier inoxydable produit en Australie par le procédé DNi
Khoo et al., 2017 (DNi - Inox - Indonésie)	6.94	Acier inoxydable produit en Indonésie par le procédé DNi

La Figure 59 met en perspective les valeurs d'empreinte carbone issues des cas d'études de la littérature ACV avec les valeurs issues des BDD ACV ecoinvent et GaBi. Il est possible d'observer que l'empreinte carbone associée à la production de concentré de nickel issue d'ecoinvent apparaît comme étant marginale comparée à la production du métal raffiné, ce qui implique que les étapes de raffinage du métal sont plus impactant que les étapes d'extraction et d'enrichissement du minerai de nickel en termes d'émissions de CO₂. Globalement, il est également possible de constater que les valeurs d'ecoinvent et GaBi sont à peu près du même ordre de grandeur que les valeurs données par Khoo et al. (2017), Bartzas and Komnitsas (2015), Mistry et al. (2016) et Norgate et al. (2007). En revanche, elles sont inférieures aux valeurs données par Norgate and Jahanshahi (2011), qui considèrent différentes voies de production (hydro et pyrométallurgiques) et différents procédés, tandis que les BDD ACV considèrent quant à eux essentiellement des mix de production par voie pyrométallurgique.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

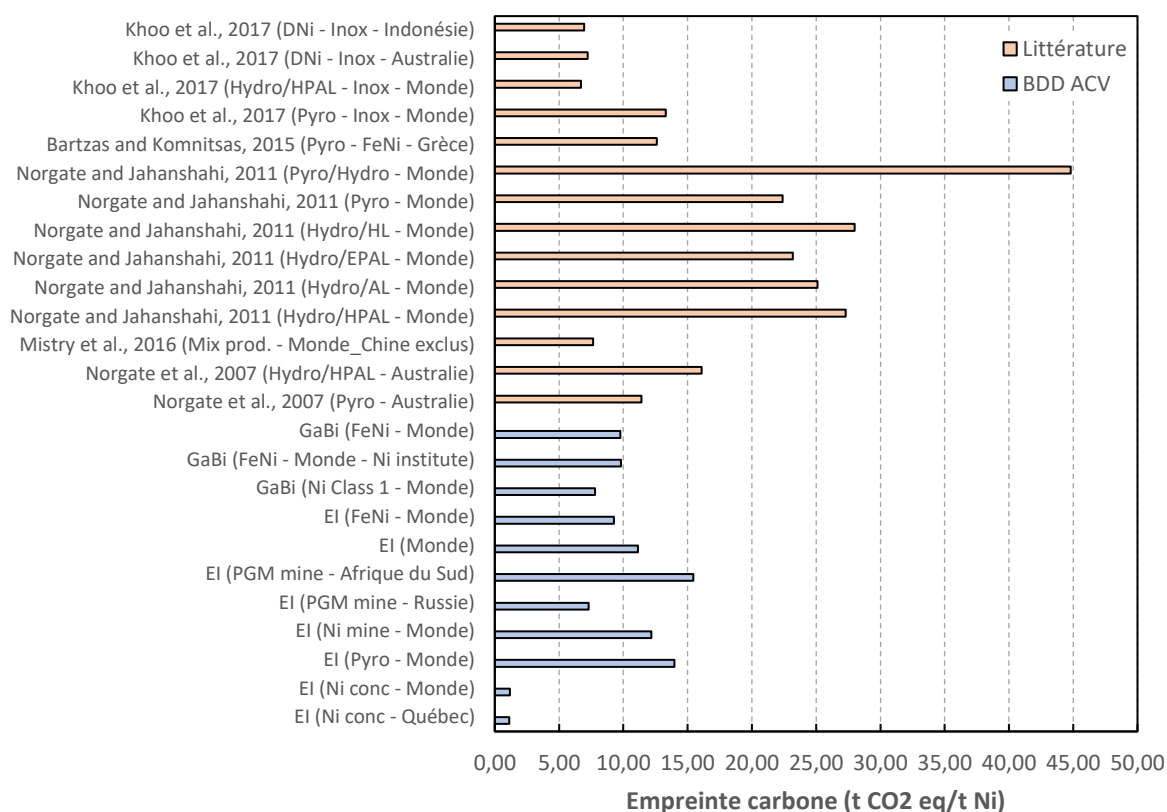


Figure 59. Comparaison de l'empreinte carbone de la production de nickel issue de la littérature et des BDD ACV.

Tableau 56. Revue de littérature ACV de la production de nickel – description des différentes études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit – fonctionnelle	Unité	Couverture géographique	Allocation	ICV ?	Source des données
Norgate et al. <i>Assessing the environmental impact of metal production processes</i>	2007	Métal raffiné « 1 kg of refined metal was used »		Australie	Massique	Non	/
Norgate and Jahanshahi <i>Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing</i>	2011	Métal raffiné « One tonne of nickel metal »		Monde	Massique	Non	/
Bartzas and Komnitsas <i>Life cycle assessment of ferronickel production in Greece</i>	2015	Métal raffiné « One tonne of produced FeNi with 20% Ni content »		Grèce	Massique	Oui	Données primaires issues de l'usine de production et données publiques (littérature, etc.)
Mistry et al. <i>Life cycle assessment of nickel products</i>	2016	Métal raffiné « 1 kg of nickel contained in the nickel product at the factory gate »		Monde (à l'exception de la Chine)	Economique Substitution	Oui	Données primaires collectées auprès des entreprises, complétées de données publiques (littérature, BDD, etc.)
Khoo et al. <i>A life cycle assessment of a new laterite processing technology</i>	2017	Métal raffiné « One tonne of stainless steel produced »		Australie Indonésie	Massique Economique	Oui	Données publiques (littérature, etc.)

3.6.2.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Malgré une quantité importante de sets de données pour la modélisation de la production de nickel de classe I et de ferronickel, certaines limites des BDD existantes peuvent être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière du nickel, notamment concernant la représentativité géographique et la variabilité de certaines informations.

Concernant la représentativité géographique des sets de données, il est possible de conclure d'une représentativité partielle de la production mondiale par les bases de données (Tableau 57). En effet, tous les pays sont potentiellement représentés par ecoinvent dans leurs procédés « GLO » mais un manque de documentation empêche leur identification précise. A l'inverse, les procédés GaBi de production de nickel de classe I et de ferronickel issus du Nickel Institute indiquent des pays d'origine bien définis. L'autre set de données de production du ferronickel n'indique pas la source des données moyennées à l'échelle globale.

Tableau 57. Représentativité géographique de la production de nickel de classe I et de ferronickel dans les BDD ACV.

Pays/Zone géographique	Type de minéral	Part de la production minière (2018)	Représentativité dans les sets de données		Commentaires
			EI	GaBi	
Indonésie	Minerais latéritiques	24.3%	~	~	Non représenté (GaBi) ou non spécifié (Gabi & EI).
Philippines	Minerais latéritiques	14.8%	~	~	Non représenté (GaBi) ou non spécifié (EI).
Nouvelle Calédonie	Minerais latéritiques	9%	~	~	Non représenté (GaBi) ou non spécifié (EI).
Russie	Ni sulfuré	9%	✓	✓	Procédé spécifique EI. Procédé GaBi couvrant 52 % de la production mondiale dont la Russie.
Australie	Ni sulfuré +minerais latéritiques	7.4%	~	✓	Le procédé GaBi couvre 52 % de la production mondiale dont l'Australie.
Chine	Ni sulfuré	4.8%	~	✗	Non représenté (GaBi) ou non spécifié (EI).
Cuba	Minerais latéritiques	2.3%	~	~	Non représenté (GaBi) ou non spécifié (Gabi & EI).
Guatemala	Minerais latéritiques	2.1%	~	~	Non représenté (GaBi) ou non spécifié (Gabi & EI).
Afrique du Sud	Ni sulfuré	0.6%	✓	✗	Procédé spécifique EI. Le procédé GaBi couvre 52 % de la production mondiale (ZA non incluse).
Reste du monde	Minerais latéritiques +Ni sulfuré	14.5%	~	✓	GaBi considère la production française, japonaise, canadienne et norvégienne. EI ne spécifie pas tous les pays d'origine (sauf Canada)

La représentativité géographique du procédé « market for » sur El par rapport aux producteurs majeurs de nickel représente une moyenne mondiale basée essentiellement sur la production moyenne à partir de minerais sulfurés. La production russe y est importante (28% de parts de marché) et la consommation de nickel recyclé est négligeable.

Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée qui arrive jusqu'en 2003 pour les procédés d'Ecoinvent et jusqu'à 2022 pour les procédés GaBi. En général, cette obsolescence ne préoccupe pas trop car l'évolution technologique de l'activité minière reste assez faible même si de forts progrès sont envisageables en hydrométallurgie. Néanmoins, les conditions d'accès socio-politiques auront probablement plus d'incidence sur l'obsolescence des procédés que l'extraction elle-même.

Les différentes limites identifiées et les considérations relatives à l'utilisation des BDD pour la modélisation du nickel sont résumées dans le Tableau 58.

Tableau 58. Extraction des minerais sulfurés et oxydés de nickel et de ferronickel dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques	
	Ecoinvent	GaBi
Accès aux données et transparence	▪ Rapport EI détaillé et exhaustif. ▪ Certaines sources de la littérature en allemand. ▪ Facteurs d'allocation entre les différentes techniques non disponibles (black box).	▪ Description des données assez floue dans la documentation gratuite. ▪ Accès uniquement aux données d'inventaire désagrégées.
Représentativité	▪ Assez bonne couverture des types de minerais sulfurés mais impossibilité de modéliser l'extraction seule de minerai oxydé. ▪ Assez bonne couverture géographique mais manque de détail sur l'origine géographique des données des procédés globaux. ▪ Bonne représentativité du procédé « market for » basée sur des parts de marché issues de l'année 1994 qui ont peu évolué.	▪ Assez bonne couverture des types de minerais sulfurés et oxydés. ▪ Impossibilité de modéliser uniquement l'extraction des minerais de nickel sulfurés et oxydés à cause de l'agrégation des inventaires. ▪ Représentativité géographique faible/moyenne du ferronickel selon le procédé utilisé. ▪ Représentativité géographique du nickel de classe I assez bonne (manque Chine et Afrique du Sud).
Allocation	▪ Procédure d'allocation économique des coproduits du nickel clairement décrite dans le rapport. ▪ Allocation économique basée sur des prix des années 2005.	▪ Pas de détails sur la procédure d'allocation pour les coproduits du nickel de classe I. ▪ Procédure potentiellement obsolète d'après la date de la source des données (1999-2010).
Obsolescence	▪ Période de validité annoncée : 1994-2003 pour le ferronickel et le nickel de classe I.	▪ Sets de données dont la validité annoncée est large (2022) malgré une source des données assez ancienne (1999-2010).
Complétude et étendue	▪ Les données pour les flux de masse principaux sont satisfaisantes, alors que les émissions dans l'eau peuvent être surestimées à cause des différentes frontières du systèmes des volumes d'effluents.	▪ N/A
Vraisemblance	▪ Le set de données EI provient de données d'industrie collectées par le GIEC et issues de la littérature scientifique donc estimées vraisemblables.	▪ Les procédés GaBi sont issus principalement de données primaires de production collectées par le Nickel Institute. Ils sont estimés vraisemblables.

3.6.2.3. RECOMMANDATIONS

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations pour la modélisation du nickel et du ferronickel via les BDD. Pour rappel, les scénarios représentés dans les BDD sont les suivants :

- Production de minerai sulfuré de nickel au Québec,
- Production de nickel de classe I :
 - A partir de minerais sulfurés Ni-Cu extraits à l'échelle mondiale, agrégé ou désagrégé par rapport à la phase d'extraction,
 - A partir de minerais sulfurés extraits en Australie, au Canada, en Finlande, en France, au Japon, en Norvège, au Royaume Unie et en Russie,
 - A partir de minerais sulfurés Pt-Pd-Rh-Ni-Cu extraits en Russie,
 - A partir de minerais sulfurés Pt-Pd-Rh-Ni-Cu extraits en Afrique du Sud,
- Production de ferronickel :
 - À partir de minerais latérites à l'échelle mondiale,
 - À partir de minerais latérites au Brésil, en Colombie, au Venezuela, en Nouvelle Calédonie et en République Dominicaine.

Les considérations suivantes peuvent s'appliquer pour la modélisation de minerai sulfuré Cu-Ni, de nickel et de ferronickel en ACV selon leur origine (Tableau 59).

Tableau 59. Conseils de modélisation des produits du nickel selon l'origine de la matière première.

Origine de la matière première	Brésil, Colombie, Venezuela, Nouvelle Calédonie, République Dominicaine		Reste du monde	Inconnue
Ferronickel	Utiliser le procédé GaBi « <i>Ferro Nickel (29% Ni) ILCD 2017</i> ».		Utiliser le procédé GaBi « <i>Ferro nickel (29%)</i> » ou EI « <i>Ferronickel, 25% Ni {GLO} production APOS, U</i> » en modifiant les mix énergétiques selon le pays envisagé.	Utiliser le procédé EI « market for » ou le procédé GaBi « <i>Ferro nickel (29%)</i> ».
Origine de la matière première	Chine	Russie, Afrique du Sud	Reste du monde	Inconnue
Minerai sulfuré Cu-Ni	Utiliser le procédé EI “ <i>Nickel ore, beneficiated, 16% {CA-QC} mining and beneficiation of nickel ore APOS, U</i> ” en modifiant le mix énergétique selon le pays envisagé.			Utiliser le procédé EI « market for » en actualisant les parts de marché.
Nickel de classe I	Utiliser le procédé EI « <i>Nickel, 99.5% {GLO} nickel mine operation, sulfidic ore APOS, U</i> ” ou “ <i>Nickel, 99.5% {GLO} smelting and refining of nickel ore APOS, U</i> ”	Utiliser les procédés EI « ZA » ou « RU » en ajoutant des coproduits selon la concentration des autres platinoïdes dans le minerai et modifier l'allocation selon la valeur actuelle des métaux.	Utiliser le procédé GaBi « <i>Nickel (Class 1, 99.95%) ILCD 2017</i> » ou les procédés EI « GLO » en modifiant les mix énergétiques selon le pays modélisé.	Utiliser le procédé EI « market for ».

3.6.3. COBALT

3.6.3.1. ETAT DE L'ART

3.6.3.1.1. EXTRACTION DU COBALT DANS LE MONDE

Le cobalt est avant tout le coproduit de l'extraction de minerais de cuivre en République Démocratique du Congo et en Zambie. Il provient également de l'extraction de minerais sulfurés de nickel-cuivre en Russie, au Canada, en Australie, mais aussi de minerais latéritiques de nickel en Nouvelle Calédonie, à Cuba, en Indonésie, en Australie, aux Philippines et à Madagascar. En Afrique du Sud, le cobalt est parfois un coproduit de l'exploitation de métaux précieux.

La République Démocratique du Congo est de très loin le principal producteur mondial de cobalt. Sa production est exportée vers la Chine, qui bien que ne disposant pas de ressources minières importantes, devient ainsi le principal producteur mondial du métal. Cette situation quasi monopolistique de la production minière est liée à la nature des gisements de cuivre de la Copper Belt, de type « Red Bed » (voir section 3.1.1.1), qui concentrent fortement le cobalt. La seule mine exploitant exclusivement un minerai arsénié de cobalt, de la smaltite (CoAs_2) est celle de Bou Azzer au Maroc.

Lorsque le minerai de nickel est destiné à la fabrication de ferronickel, le cobalt contenu n'est alors pas récupéré.

Rechercher un nouveau gisement de Cobalt, consisterait donc à rechercher soit un gisement de Cuivre de type Red Bed (Copper Belt), soit un gisement de type Nickel-Cuivre sulfuré, soit un gisement latéritique de Nickel-Cobalt.

Bien que plus rares, les gisements de cobalt arsénié ne sont pas à écarter car ils peuvent présenter des volumes et des teneurs intéressants⁹.

La géologie particulière des gisements de cobalt fait que l'Amérique Latine n'a pas fait l'objet d'une exploration intensive jusqu'à présent. En effet, bien que premier producteur mondial de cuivre, les gisements sont apparentés principalement au modèle porphyre cuprifère, modèle qui n'est pas un porteur potentiel de cobalt. Seul le Brésil, qui possède un socle précambrien riche en roches ultrabasiques, est apte à développer des gisements associés au modèle latéritique ou au modèle Nickel-Cuivre sulfuré et a débuté une petite production. Ainsi, si les possibilités de découverte de gisements de cobalt ne sont pas à exclure, ces probabilités restent cependant plus faibles que dans les zones possédant un socle plus favorable.

Une voie de recherche particulièrement intéressante est de rechercher le cobalt dans les tailings d'anciennes exploitations de cuivre associées aux modèles Nickel sulfuré, Red Bed ou Kuperschiefer (Pologne).

Pareillement, on pourra rechercher les rejets arséniés d'exploitations à priori ignorées pour leur potentiel en Cobalt (le glodot ou la danaïte pouvant facilement être confondu avec de

⁹ Le classeur Excel joint à ce texte, fait le point sur la production mondiale de cobalt en 2018. Les statistiques présentées permettent de hiérarchiser les potentialités en fonction d'une part des productions, et d'autre part du nombre d'indices et de gisements susceptibles de connaître un développement minier.

l'arsénopyrite) : la ceinture pyriteuse de Huelva est un exemple de ce potentiel resté insoupçonné.

Cette possibilité ouvre un champ nouveau pour l'exploration de ce métal ; on notera que le gisement de Tharsis en Espagne, présente un stockwerk de grande dimension (kilométrique) riche en glocodot. Si les observations réalisées sur Tharsis se confirmaient sur d'autres gisements, il conviendrait de considérer une nouvelle classe de gisements à Or-Cobalt (l'or accompagnant généralement les minéralisations arséniées).

3.6.3.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction du cobalt dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 60. Les BDD ne donnent accès qu'à des sets de données décrivant la production de métal raffiné : la modélisation de l'extraction du minerai seule n'est pas possible.

Tableau 60. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de cobalt. Les procédés grisés correspondent à des données non incluses dans la licence standard du logiciel.

Ecoinvent v3.6		GaBi v8.7	
Cobalt	○ Cobalt {GLO} / production / APOS, U	○ Cobalt, refined (metal) CDI GLO	
		○ Cobalt (only Cu/Co route) GLO	
		○ Cobalt (only Ni/Co route) AU	
		○ Cobalt (only Ni/Co route) GLO	
		○ Cobalt mix (Ni/Co and Cu/Co route) GLO	

Les détails de la modélisation du cobalt dans ecoinvent sont décrit dans le rapport de (Hischier, 2007) en tant qu'agent colorant pour le verre d'emballage. Le procédé El correspond à la production moyenne globale de cobalt à partir d'oxyde de cobalt gris et noir. Les étapes d'extraction et d'enrichissement sont modélisées par celles de l'extraction du nickel de classe I. Le post traitement qui consiste habituellement soit en une réduction des oxydes, une pyrolyse des carboxylates ou une réduction des ions cobalt, est modélisé par une approximation d'un procédé de réduction d'oxydes selon les paramètres suivants :

- Les matériaux de départ sont de l'oxyde gris de cobalt (CoO) à 50% et de l'oxyde noir de cobalt (Co₃O₄) à 50% avec un rendement de 80%.
- Le post traitement considéré présente un rendement de 95% et correspond à une réduction des oxydes avec 50% de monoxyde de carbone et 50% d'hydrogène.
- La consommation d'électricité est supposée correspondre à 1.2 MJ d'électricité et 2 MJ de gaz.
- Aucunes émissions ne sont considérées à cette étape.

Les données d'intrants et extrants résultantes de toutes ces étapes sont présentées dans le Tableau 61.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 61. Données d'intrants et d'extrants pour la production d'1 kg de poudre de cobalt dans ecoinvent.

Materials / Energy / Emissions		per kg cobalt	Remarks
Input			
Cobalt, in ground	kg	1.32E+00	yield of 80% (mining & beneficiation) plus 95% (oxide red.)
Water, river	m3	3.80E-02	data from nickel mining
Water, well, in ground	m3	2.20E-01	data from nickel mining & beneficiation
Electricity	kWh	4.69E+00	data from nickel mining & estimation for further treatment
heat, natural gas	MJ	2.00E+00	estimation for further treatment
diesel, burned in machine	MJ	1.12E+01	data from nickel mining
Sand, at mine	kg	4.56E+01	dito
Portland calcareous cement, at plant	kg	3.62E+00	dito
limestone, milled, packed, at plant	kg	5.00E-02	data from nickel beneficiation
chemicals organic, unspecified, at plant	kg	2.50E-02	dito
chemicals inorganic, unspecified, at plant	kg	8.50E-02	dito
carbon monoxide, at plant	kg	2.92E-01	stoichiometric amount for reduction of oxides, yield 95%
hydrogen, liquid, at plant	kg	2.08E-02	dito
hydrogen cyanide, at plant	kg	3.93E-03	data from nickel beneficiation
blasting	kg	1.66E-01	data from nickel mining
transport, lorry 32t	tkm	2.48E+00	data from nickel mining & beneficiation
conveyor belt, at plant	m	4.20E-06	data from nickel mining
nickel, mine, underground	unit	5.50E-09	dito
aluminium hydroxide, plant	unit	9.00E-10	data from nickel beneficiation
disposal, non-sulfidic overburden, off-site	kg	3.49E+01	data from nickel mining
disposal, sulfidic tailings, off-site	kg	6.50E+01	data from nickel beneficiation
Output			
waste, heat, to air	MJ	1.69E+01	
particulates, > 10 um, to air	kg	2.03E-02	data from nickel beneficiation
particulates, > 2.5 um and < 10 um, to air	kg	1.77E-02	dito
particulates, < 2.5 um, to air	kg	1.97E-03	dito
carbon disulfide, to air	kg	1.10E-02	dito
Calcium ion, to water	kg	1.51E-01	data from nickel mining & beneficiation
Sulfate, to water	kg	5.19E-01	dito
COD, chemical oxygen demand, to water	kg	2.30E-03	dito
Solved solids, to water	kg	1.14E-03	dito
Aluminium, to water	kg	1.90E-05	dito
Arsenic, ion, to water	kg	6.49E-07	dito
Cadmium, ion, to water	kg	6.96E-08	dito
Cobalt, to water	kg	1.72E-07	dito
Chromium, ion, to water	kg	1.21E-07	dito
Copper, ion, to water	kg	1.75E-06	dito
Iron, ion, to water	kg	6.40E-05	dito
Manganese, to water	kg	5.44E-06	dito
Mercury, to water	kg	8.30E-09	dito
Nickel, ion, to water	kg	5.36E-06	dito
Lead, to water	kg	6.16E-07	dito
Zinc, ion, to water	kg	1.68E-05	dito
Nitrogen, organic bound, to water	kg	5.02E-03	dito
Cyanide, to water	kg	4.12E-04	data from nickel beneficiation

Le set de données GaBi disponible couvre la production de cobalt par les deux principales routes : en tant que coproduit de la production de cuivre et de nickel. Les données proviennent du Cobalt Institute dont le but était de fournir au Cobalt Development Institute (CDI) et aux membres du CDI un inventaire de cycle de vie cradle-to-gate représentatif de l'industrie de production du cobalt ainsi qu'une analyse d'impacts du cobalt raffiné, à partir de données de 2012 représentatives de la production globale. La matière première est un minerai de cobalt issu de minerais de cuivre et de nickel extraits au Canada, à Cuba, en République Démocratique du Congo (RDC) et en Nouvelle Calédonie. Les technologies couvertes par l'étude incluent une extraction souterraine et à partir de mines à ciel ouvert, et le traitement des oxydes et sulfures de nickel et des oxydes de cuivre grâce à des techniques pyrométallurgiques et hydrométallurgiques. Cela comprend : four à arc électrique, lixiviation à l'acide haute pression, lixiviation au chlore, lixiviation atmosphérique à l'acide, extraction solvant, précipitation sélective, électrowinning et réduction hydrogène. Ces technologies de traitement sont modélisées pour la Belgique, le Canada, la Finlande, le Japon, la Norvège, les Philippines et la Zambie. Le set de données est basé sur les données moyennes collectées sur site par huit producteurs de cobalt et couvrant 17 mines et sites de traitement à l'échelle mondiale. Les données ont été modélisées par les

entreprises et industries, rassemblées verticalement par étape du cycle de vie et ensuite moyennées entre les participants sur la base des volumes de production.

3.6.3.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Au sein de la littérature ACV, la production de cobalt sous sa forme métallique (c'est-à-dire l'extraction et la concentration de son minerai, et le raffinage) ne constitue pas l'objet de beaucoup d'études. Ainsi, seules deux études portant sur la production de ce métal ont pu être trouvées dans la littérature scientifique ACV :

- Dai et al., 2018 - Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET model
- Farjana et al., 2019 - Life cycle assessment of cobalt extraction process

Similairement aux autres métaux étudiés, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre, et enfin les résultats d'impacts (EICV).

3.6.3.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.6.3.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les BDD ACV analysées permettent de modéliser uniquement le cobalt raffiné. Que ce soit avec EI ou avec GaBi, il est impossible d'accéder directement à un set de données spécifique à l'extraction du minerai sulfuré.

Dans EI, la production de cobalt n'implique pas de coproduits et le système est donc monofonctionnel. A l'inverse, GaBi utilise une allocation économique entre les coproduits du cobalt mais celle-ci, ainsi que la nature des coproduits ne sont pas détaillées. Le système produit les coproduits métalliques (autres produits du cobalt, cathode de nickel et autres produits du nickel, cathode de cuivre et autres produits du cuivre, autres composés métalliques et MGP) et des coproduits non-métalliques (scories, acide sulphurique, soufre, hydroxide d'ammonium et sulphate d'ammonium). Les coproduits métalliques séparés à la fin de la chaîne de valeur sont alloués économiquement alors que les coproduits métalliques séparés plus tôt dans la chaîne de valeur sont alloués par masse. Les coproduits non-métalliques sont gérés par une extension du système (substitution). L'allocation selon la valeur du marché est effectuée d'après une valeur de marché moyenne sur la période 2003-2012. Lorsque les valeurs de marché n'étaient pas disponibles, de plus courtes périodes ont été utilisées.

Les inventaires EI et GaBi peuvent difficilement être comparés pour le cobalt par le fait que l'inventaire GaBi est désagrégé. Cependant, une analyse d'impact est effectuée afin de comparer les deux procédés (Figure 60). Le procédé GaBi présente globalement des impacts supérieurs comparé au procédé EI, à l'exception de quelques catégories d'impact comme l'eutrophisation terrestre, l'occupation des sols et la consommation d'eau.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

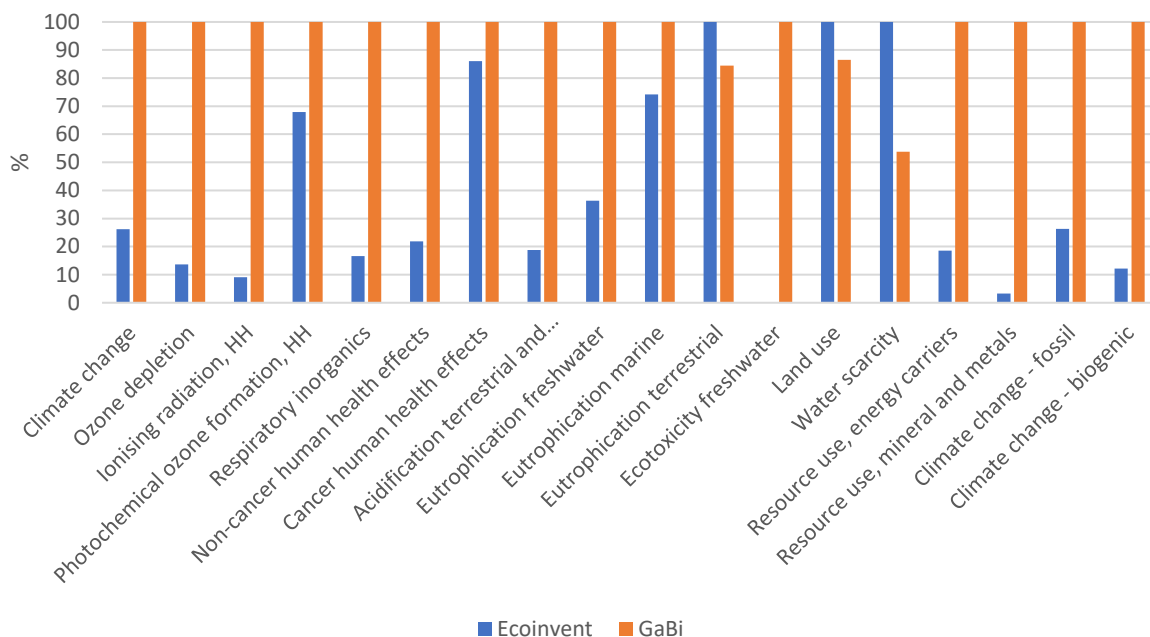


Figure 60. Contribution relative des procédés EI et GaBi de production de cobalt aux catégories d'impact de la méthode EF (production d'1 kg de cobalt).

Les parts de marché des procédés de production de cobalt au sein du procédé global « market for » sont reportées sur la Figure 61. Ces valeurs représentent la part (en masse) des différentes sources de cobalt. La production primaire est majoritairement représentée à 99% alors que le cobalt recyclé à partir de batteries Li-ion usagées ne représente que 1% de la consommation globale.

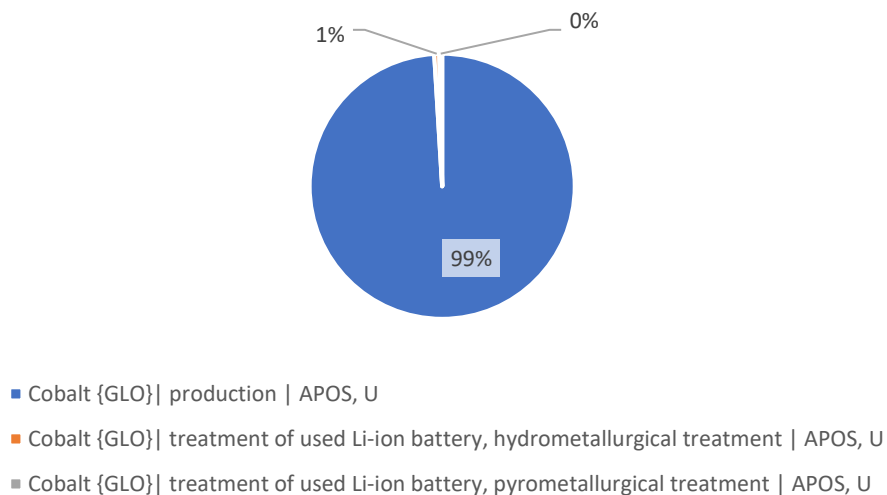


Figure 61. Parts de matière première et de matière secondaire du procédé « market for » de production de cobalt (EI).

Enfin la contribution des matières premières impliquées dans la production de cobalt d'après les inventaires EI et GaBi est représentée sur la Figure 62. La contribution de chaque métal diffère selon les sets de données. En effet, pour le set de données issu de EI, le cobalt est le contributeur majeur, suivi par le cuivre, le cadmium et le zinc. A l'inverse, d'après le procédé GaBi, le cobalt n'est pas du tout représenté et le contributeur majeur est le cuivre suivi par le soufre et le chrome.

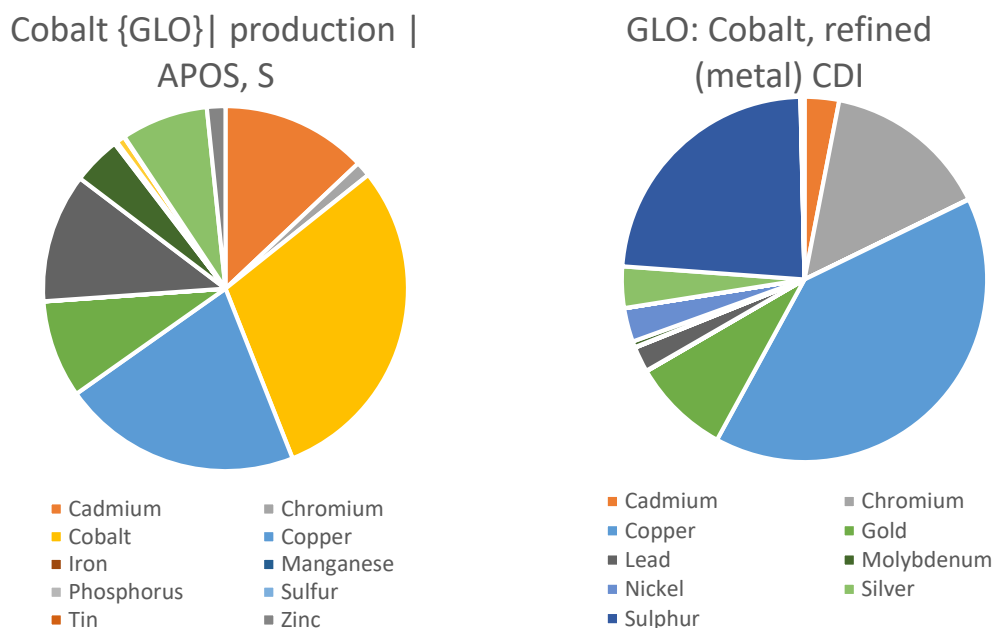


Figure 62. Contribution par métal des procédés ecoinvent (à gauche) et GaBi (à droite) de production de cobalt à l'appauvrissement des ressources.

3.6.3.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Le Tableau 62 présente une rapide description des deux études ACV analysées dans le cadre de cette étude. L'analyse détaillée de ces publications est disponible en Annexe B. Parmi ces deux études, celle réalisée par Dai et al. (2018) ne se focalise que sur la description de l'étape d'inventaire du cycle de vie en présentant les données d'ICV du cobalt considérées dans le modèle GREET (The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model). Ainsi cette étude ne réalise pas de calculs d'impacts environnementaux. Les données utilisées dans ce modèle s'appuient essentiellement sur des sources publiques telles que la littérature ou encore des rapports et statistiques publiques, et visent à couvrir l'ensemble de l'industrie mondiale du cobalt avec notamment une couverture géographique couvrant la république démocratique du Congo et la Chine, deux acteurs majeurs dans la chaîne de valeur du cobalt.

L'étude de Farjana et al. (2019), quant à elle, fournit également des données d'inventaire qui cependant s'appuient essentiellement sur des données issues de BDD ACV telles que ecoinvent ou AusLCI (BDD australiennes). Il convient toutefois de noter que cette étude présente quelques incohérences et incompréhensions en termes de méthodologie ACV et d'analyse des résultats, ce qui laisse penser que la qualité scientifique de cette étude est quelque peu limitée.

La Figure 63 compare l'empreinte carbone associée à la production de cobalt issue de l'étude de Farjana et al. (2019) et des BDD ACV. Globalement, l'étude de Farjana et al. (2019) présente une valeur relativement proche de celles fournies par ecoinvent, ce qui semble cohérent dans la mesure où les données utilisées dans l'étude proviennent en partie d'ecoinvent. En revanche, la valeur d'empreinte carbone issue de la BDD GaBi est très largement supérieure aux autres valeurs (4 fois supérieure). Cela peut éventuellement s'expliquer par le fait que les valeurs d'impacts données par ecoinvent sont quelque peu sous-estimées en partie en raison de données d'inventaire qui peuvent être considérées comme étant approximatives, tandis que les données d'inventaire de GaBi peuvent être considérées comme étant plus réalistes, étant directement issues de sources primaires (industriels du secteur).

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

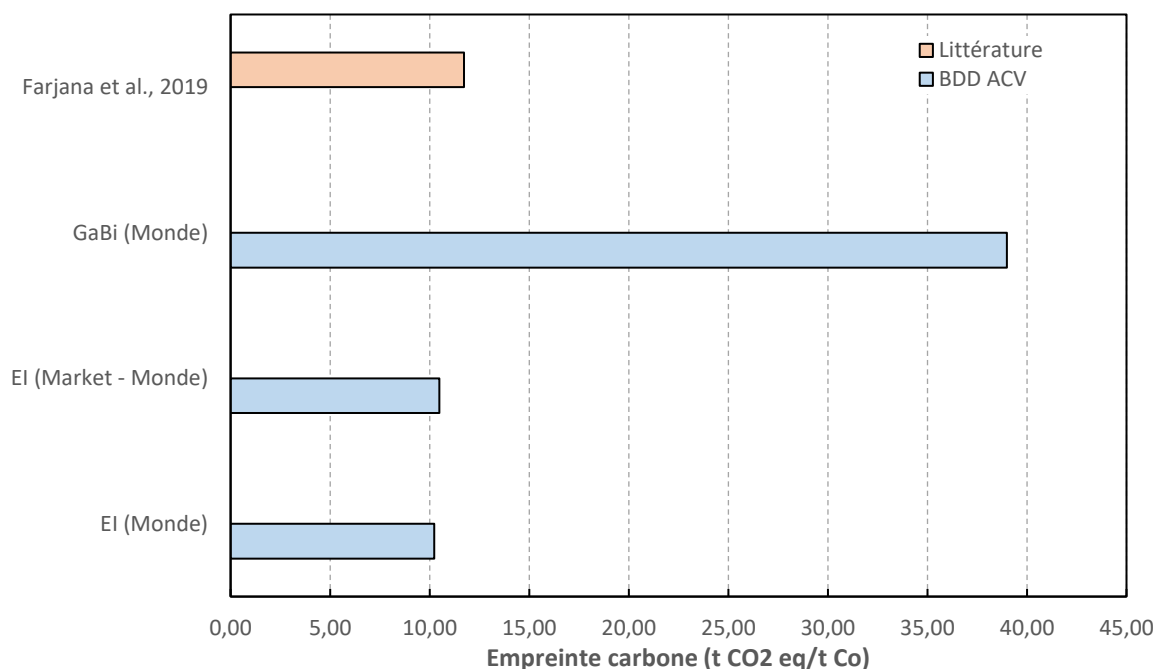


Figure 63. Comparaison de l'empreinte carbone de la production de cobalt issue de la littérature et des BDD ACV.

Tableau 62. Revue de littérature ACV de la production de cobalt – description des différentes études analysées.

Auteurs – titre	Année	Produit – Unité fonctionnelle	Couverture géographique	Allocation	ICV ?	Source des données
Dai et al. <i>Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET model</i>	2018	Métal raffiné 1 ton of cobalt products	RDC Chine	Massique Economi- que	Oui	Données publiques (littérature, statistiques, rapports, etc.)
Farjana et al. <i>Life cycle assessment of cobalt extraction process</i>	2019	Métal raffiné 1 kg of cobalt	Monde	Expansion du système	Oui	BDD ACV (ecoinvent et AusLCI)

3.6.3.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Certaines limites des BDD existantes peuvent être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière du cobalt, notamment concernant la représentativité géographique et la variabilité de certaines informations. Concernant la représentativité géographique des sets de données, il est possible de conclure d'une représentativité partielle de la production mondiale par les bases de données (Tableau 57). En effet, tous les pays sont potentiellement représentés par ecoinvent dans leurs procédés « GLO » mais un manque de documentation empêche leur identification précise. A l'inverse, les procédés GaBi de production cobalt issus du Cobalt Development Institute (CDI) indiquent des pays d'origine bien définis (extraction et raffinage).

Tableau 63. Représentativité géographique de la production de cobalt dans les BDD ACV.

Zone géographique	Part de la production minière (2018)	Représentativité dans les sets de données		Commentaires
		EI	GaBi	
RDC	70%	~	✓	Procédé « GLO » sur EI. Extraction en RDC représentée sur GaBi.
Russie	5.1%	~	✗	Procédé « GLO » sur EI. Non représenté sur GaBi.
Cuba	4.2%	~	✓	Procédé « GLO » sur EI. Extraction à Cuba représentée sur GaBi.
Philippines	4%	~	✓	Procédé « GLO » sur EI. Philippines représentées sur GaBi pour le raffinage.
Canada	3.3%	~	✓	Procédé « GLO » sur EI. Cuba représenté sur GaBi pour le raffinage.
Papouasie N. G.	2.8%	~	✗	Procédé « GLO » sur EI. Non représenté sur GaBi.
Chine	2.7%	~	✗	Procédé « GLO » sur EI. Non représenté sur GaBi.
Madagascar	2.5%	~	✗	Procédé « GLO » sur EI. Non représenté sur GaBi.
Autres	5%	~	✓	Procédé « GLO » sur EI. Extraction en Nouvelle Calédonie représentée sur GaBi.

La représentativité géographique du procédé « market for » sur EI par rapport aux producteurs majeurs de cobalt représente une moyenne mondiale de la production à laquelle les étapes de transport ont été ajoutées.

Il est à noter que le module EI représente seulement une estimation des besoins du procédé et devrait être utilisé uniquement lorsque l'impact du cobalt n'est pas considéré comme élevé. En effet, des données provenant de l'extraction et l'enrichissement du nickel sont utilisées comme proxy. Par conséquent, la fiabilité, la complétude et les potentielles corrélations technologiques sont élevées, résultant en une incertitude élevée du procédé.

Les BDD disponibles ont une période de validité annoncée qui arrive jusqu'en 2000 pour le procédé EI et jusqu'en 2020 pour les procédés GaBi. Les différentes limites identifiées et les considérations relatives à l'utilisation des BDD pour la modélisation du cobalt sont résumées dans le Tableau 58.

Tableau 64. Extraction du cobalt dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques	
	Ecoinvent	GaBi
Accès aux données et transparence	Rapport EI assez détaillé.	- Description des données assez floue dans la documentation gratuite. - Accès uniquement aux données d'inventaire désagrégées. - Facteurs d'allocation économique non disponibles.
Représentativité	- Mauvaise représentativité car les données ne sont pas des données primaires mais adaptées de l'extraction et raffinage du nickel de classe I. - Représentativité globale uniquement. Pas de pays indiqués dans la documentation.	- Impossibilité de modéliser uniquement l'extraction des minerais de cobalt à cause de l'agrégation des inventaires. - Représentativité géographique détaillée couvrant 30 % de la production mondiale.
Allocation	Pas de coproduits considérés.	- Pas de détails sur la procédure d'allocation économique pour les coproduits du cobalt. - Procédure d'allocation potentiellement obsolète d'après les valeurs de marché utilisées (2003-2012).
Obsolescence	Validité annoncée jusqu'en 2000.	Sets de données dont la validité annoncée est large (2020) malgré une source des données assez ancienne (2012).
Complétude et étendue	Données assez complètes.	Le set de données est basé sur des données spécifiques collectées sur site par 8 producteurs de cobalt couvrant 17 sites d'extraction et de raffinage. Une bonne complétude est donc constatée.
Vraisemblance	Le set de données EI n'est pas vraisemblable car extrapolé à partir des données d'extraction du nickel.	Le procédé GaBi est issu principalement de données primaires de production collectées par le Cobalt Development Institute. Il est donc estimé vraisemblable.

3.6.3.3. RECOMMANDATIONS

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations pour la modélisation du cobalt via les BDD. Pour rappel, les scénarios représentés dans les BDD sont les suivants :

- Production de cobalt raffiné à l'échelle mondiale,
- Production de cobalt extrait au Canada, à Cuba, en RDC et en Nouvelle Calédonie et enrichi en Belgique, au Canada, en Finlande, au Japon, en Norvège, aux Philippines et en Zambie.

Les considérations suivantes peuvent s'appliquer pour la modélisation de cobalt en ACV selon leur origine (Tableau 65).

Tableau 65. Conseils de modélisation du cobalt en ACV selon la provenance du matériau.

Origine de la matière première	Canada, Cuba, RDC, Nouvelle Calédonie	Reste du monde	Inconnue
Cobalt	Utiliser le procédé Gabi ou des données issues de la littérature, ex : (Dai et al.,2018).	Utiliser le procédé GaBi et modifier le mix énergétique selon le pays ou des données issues de la littérature, ex : (Dai et al., 2018).	Utiliser le procédé Gabi.
	Eviter l'utilisation du procédé EI.		

3.7. Cadmium

3.7.1. ETAT DE L'ART

3.7.1.1. PRODUCTION DE CADMIUM DANS LE MONDE

La greenockite (CdS) est le minéral le plus commun de Cd. C'est un minéral relativement commun présent dans les filons hydrothermaux riches en zinc et contenant du cadmium, ainsi que dans les cavités de certaines roches basiques. Elle se présente généralement en enduits poudreux jaune citron ou en encroûtements terreux sur la sphalérite et les minéraux contigus ; elle possède un éclat adamantin à résineux.

Ce minéral est généralement trop rare pour constituer un minerai exploitable par lui-même ; il n'existe donc pas de mines de cadmium. Ce métal sera donc valorisé dans les gisements de zinc dans lesquels il pourra participer à la définition économique du minerai.

Dans les gisements de zinc, le Cd se trouvera sous deux formes possibles :

- Des cristaux de greenockite, en général de petite taille et récupérés préférentiellement dans les concentrés de Zn, mais également de Pb (la majorité des gisements de Zn renferment du Pb).
- En substitution de l'atome de Zn dans la sphalérite, si les conditions thermodynamiques de la précipitation du minerai ne permettent pas la formation de greenockite ou d'autres espèces minérales plus rares contenant du Cd.

Dans tous les cas, la valorisation du métal ne sera pas effectuée au niveau de la mine mais au niveau des usines qui traiteront les concentrés de Zn. Ainsi, le cadmium sera un sous-produit de l'industrie de transformation des concentrés de zinc.

Dans les gisements de zinc, le cadmium est systématiquement accompagné de germanium et d'indium, plus rares, qui seront récupérables dans les mêmes conditions.

Il existe également une petite production de cadmium liée à la décontamination des phosphates. En effet, ce métal est également présent en faibles proportions (quelques dizaines de ppm) dans les phosphates naturels, et lorsque cette proportion s'élève trop, comme par exemple en Tunisie où les gisements de phosphates peuvent contenir jusqu'à 380 ppm de Cd, il faut alors décontaminer les engrais du fait de la haute toxicité du cadmium.

Le taux de recyclage du Cd est de l'ordre de 20%, principalement à partir des batteries Cd-Ni dans lesquelles le Cd est facilement récupérable.

Le Cd est un marché de niche, les données de production primaires et de recyclages sont difficilement accessibles et demeurent confidentielles.

Par ailleurs, le caractère stratégique de ce métal renforce les difficultés pour accéder à des données fiables. Les rapports annuels des sociétés ne mentionnent aucunement les productions. Les Etats-Unis ont rendu confidentielles toutes les informations de production depuis 2011.

L'approche la plus fiable à partir de données publiques reste donc une estimation à partir des productions de zinc. Il faut toutefois prendre en compte les observations suivantes :

- Les teneurs en Cd, Ge et In varient de manière importante entre les gisements.
 - Par exemple, parmi les rares informations communiquées en 2018, Grupo Mexico a raffiné 107 500 tonnes de Zinc et produit 632 tonnes de Cd, soit une production de 6 kg de Cd par tonne de Zn produite.
 - La raffinerie de Nordenham du Groupe Glencore, en Allemagne, a produit 160 000 tonnes de Zinc et 500 (?) tonnes de Cadmium, soit une production de 3 kg de Cd par tonne de Zn.
- Les grands producteurs de Zinc disposent généralement de raffineries dont les capacités excèdent leur production interne. Ces sociétés importent donc des concentrés de sources différentes. Par ailleurs, elles peuvent simultanément exporter des concentrés de leur propre production. Les informations fournies au niveau des rapports annuels ne sont pas d'un niveau de précision suffisant pour permettre une étude détaillée de la globalité de ces transactions.
- Toutes les raffineries de Zn ne procèdent pas à la valorisation du Cd.
- Les productions fournies par les raffineries peuvent inclure une partie de Zn raffiné qui par définition ne correspondra pas à une production de Cd.

Si d'une manière conservatrice, on estime que chaque tonne de zinc produite pourrait générer la production de 2.5 kg de Cd dans les raffineries, on peut donc estimer une production et des réserves mondiale à partir de celles du zinc¹⁰ :

- Réserves mondiales
 - Zinc : 230 000 000 t
 - Cadmium estimé : 575 000 t
- Production mondiale
 - Zinc : 13 176 000 tonnes
 - Cadmium estimé : 32 940 t
 - Cadmium produit (Hors USA) : 26 000 t

La production de Cd, au même titre que celle de l'indium et du germanium, peut être considérée comme une production « fatale » de la mine de Zn. L'impact de la production primaire du cadmium ne dépend pas du marché de ce dernier, mais exclusivement du marché du Zn, et marginalement de celui des phosphates.

L'analyse du cycle de vie peut se focaliser sur le recyclage des batteries Cd-Ni qui est une activité choisie et non dépendante de la mine de Zn. Elle intéresse environ 20% des besoins de la consommation mondiale.

3.7.1.2. BASES DE DONNEES ACV

Les procédés d'extraction du cadmium dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 66. La base de données EI permet d'accéder à des sets de données représentatifs du procédé intermédiaire d'extraction et concentration de zinc, source de boues de cadmium en tant que sous-produit. Plusieurs procédés de production de boues de cadmium sont également présents sur EI. Les BDD EI et GaBi proposent ensuite 3 procédés de production de cadmium à partir de boues de cadmium. Contrairement à EI, la BDD GaBi ne propose pas de procédé pour la modélisation des intermédiaires de la production de cadmium. Les deux inventaires EI de la production de cadmium primaire sont issus des mêmes données de production. La seule différence correspond à l'origine du mix énergétique : un procédé spécifique est proposé pour le Canada. A l'inverse, le procédé Gabi représente la situation moyenne globale, d'après les principales technologies

¹⁰ Source L'Elémentarium (<https://www.lelementarium.fr/element-fiche/cadmium/>)

existantes et les caractéristiques spécifiques et ou d'importation. La documentation gratuite apporte néanmoins très peu d'informations.

Sur EI, le cadmium est, comme prévu, un sous-produit de l'extraction de zinc et de plomb mais aussi étonnamment de la production de molybdène alors que les boues de cadmium ne sont normalement jamais un sous-produit de cette chaîne de valeur. L'existence de ces procédés s'explique par la construction spécifique du set de données de la production de molybdène. En effet, le molybdène est produit à partir de molybdénite par un grillage de MoO_3 suivi d'étapes métallurgiques. Comme aucune donnée spécifique de procédé n'était disponible, le grillage et les procédés métallurgiques de la production de zinc ont été utilisés comme proxy par EI. Le concentré de zinc et la molybdénite sont sulfurés et la concentration en métal est similaire. Par conséquent l'inventaire de la production d'1 kg de « zinc, at regional storage » est utilisée directement pour décrire la production d'1 kg de molybdène. Ainsi les mêmes sous-produits de la production de zinc apparaissent pour la production de molybdène d'où l'existence de ces sets de données.

Tableau 66. Sets de données disponibles dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 pour la production de minerai, de boues de cadmium et de cadmium. Les procédés décrit en rouge sont impliqués dans la production de boues de cadmium à cause de l'utilisation de proxy pour la modélisation de la production du molybdène et donc non représentatifs. Les procédés grisés correspondent à des données non disponibles avec la version standard de la licence du logiciel.

	Ecoinvent v3.6	GaBi v8.7
Concentré de zinc	○ Zinc concentrate {CA-QC} gold-silver-zinc-lead-copper mining and beneficiation APOS, U ○ Zinc concentrate {GLO} metalliferous hydroxide sludge to market for zinc concentrate APOS, U ○ Zinc concentrate {GLO} zinc-lead mine operation APOS, U ○ Molybdenite {GLO} mine operation APOS, U ○ Molybdenite {RAS} copper mine operation, sulfide ore APOS, U ○ Molybdenite {RLA} copper mine operation, sulfide ore APOS, U ○ Molybdenite {RNA} copper mine operation, sulfide ore APOS, U	○ Pas de procédé.
Boues de cadmium	○ Cadmium sludge from zinc electrolysis {CA-QC} primary zinc production from concentrate APOS, U ○ Cadmium sludge from zinc electrolysis {RoW} primary zinc production from concentrate APOS, U ○ Cadmium sludge from zinc electrolysis {RoW} molybdenum production APOS, U ○ Cadmium sludge from zinc electrolysis {RER} molybdenum production APOS, U	○ Pas de procédé.

Cadmium	○ <i>Cadmium {CA-QC}/ cadmium production, primary / APOS, U</i> ○ <i>Cadmium {RoW}/ cadmium production, primary / APOS, U</i>	○ <i>Cadmium; technology mix; production mix, at plant; 8.65 g/cm3, 112.4 g/mol</i>
----------------	--	---

La construction de la chaîne de valeur du cadmium sur EI est décrite sur la Figure 64. Sont distinguées les étapes d'extraction et de concentration du minerai pour l'obtention de concentré de zinc, l'étape de fonte et électrolyse pour l'obtention des boues de cadmium en tant que sous-produit et la production de cadmium primaire.

Comme l'extraction de zinc et de plomb est très similaire à celle d'autres dépôts sulfurés tels que les minerais de nickel et de cuivre, et qu'aucune information sur les procédés spécifiques d'extraction de minerais de plomb et de zinc n'étaient disponibles, les données pour l'exploitation du nickel de (Hilbrans & Hinrichs, 1999) sont utilisées dans les inventaires EI. Les flux de masse sont ajustés aux valeurs spécifiques de l'extraction de zinc et de plomb, selon l'information fournie par (Ayres, Ayres, & Råde, 2002). Les modules décrivent le mix de production globale pour les concentrés de zinc et de plomb produit conjointement à partir de dépôts sulfurés. Le procédé multi-output « exploitation, zinc-lead-deposit » fournit les coproduits « lead, concentrate, at beneficiation » et « zinc, concentrate, at beneficiation ». Il est conçu pour l'utilisation du concentré en tant que matière première pour la production de plomb et de zinc. Les procédés EI de production de concentré de zinc considèrent donc une extraction en mines souterraines. Les résidus miniers sont stockés en piles près de la mine, pour lesquels le module standard de dépôts des résidus sulfuré est choisi, incluant l'occupation et la transformation des sols du résidu. Les résidus de remblai de la mine sont sans charge environnementale. Le degré de remblayage est documenté par rapport à l'extraction de minerais de nickel dans (Hilbrans & Hinrichs, 1999). Cette source est aussi utilisée pour l'utilisation d'eau et les volumes d'effluents de la mine. L'utilisation d'eau douce est inventoriée en tant qu'eau de rivière, alors que l'eau de la mine est considérée en tant qu'eau souterraine, étant aussi pompée. La composition de l'effluent est modélisée par les valeurs du GIEC de 2002. Aucun traitement des eaux usées n'est considéré. Aucune information sur la production d'énergie à partir de la mine n'est disponible. Dans la plupart des cas, l'électricité utilisée dans les opérations d'extraction à distance est faite sur site par des centrales à charbon ou à gaz. Le ciment, les explosifs et le sable sont transportés par des camions sur 100 km. Pour le remplissage de la mine, les matériaux utilisés sont principalement du sable et du ciment.

Le procédé EI multi-output « smelting, primary zinc production » fournit les trois coproduits « zinc, primary, at regional storage », « cadmium sludge, from zinc electrolysis, at plant » et « leaching residues, indium rich, from zinc circuit, at smelter ». Le flux de zinc représente le mix de l'offre européenne de zinc primaire. Les coproduits reçoivent une partie des charges environnementales et entrent dans la chaîne de production primaire. Le module décrit donc la production primaire de zinc SHG utilisé pour le zingage en Europe et ne considère pas la production secondaire représentant près de 30 % de la consommation du matériau.

Le set de données EI de production du cadmium fournit une estimation de la production primaire de cadmium à partir de lixiviation des opérations hydrométallurgiques de production de zinc par affinage électrolytique. Les données proviennent principalement de la littérature (Schulte-Schrepping & Piscator, 2002) et sont conçues pour l'utilisation du cadmium dans des appareils électriques, en particulier des applications impliquant des semi-conducteurs et des films CdTe. Les étapes de production comprennent une précipitation, une oxydation et une électrolyse. La poussière de zinc utilisée pour la cémentation en éponge de cadmium est récupérée dans les boues de l'électrolyse et sont réutilisées dans le cycle de production du zinc. Par conséquent la poussière de zinc n'est pas inventoriée. L'oxydation de l'éponge est effectuée à l'air et n'implique pas l'utilisation de produits chimiques ou de chaleur. Pour

l'électrolyse, la consommation d'électricité est de 1.25 kWh par kg de feuille. En considérant les données d'électrowinning du cuivre comme proxy, 0.2 m3 d'électrolyte par tonne est drainée et purifiée pour un recyclage en affinage électrolytique. Comme aucune donnée sur le procédé de purification de l'électrolyte usagée n'a été identifiée, tout ce volume est considéré comme renouvelé avec un nouvel électrolyte (180 kg H2SO4 par m3).

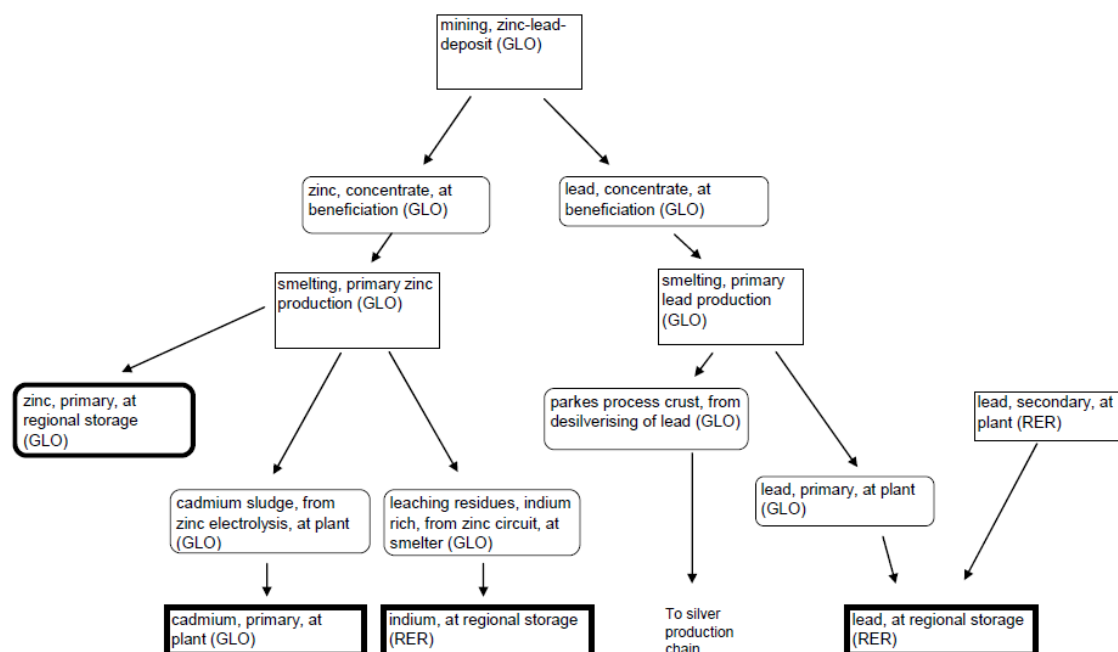


Figure 64. Représentation graphique des modules et flux résultants de l'extraction des dépôts Zn-Pb sur El (Althaus et al., 2004).

L'inventaire Gabi de production de cadmium comprend l'extraction du minerai, le broyage et la concentration par un procédé de flottation. L'enrichissement est généralement conduit aux alentours de la mine. Lorsque le concentré sulfuré de zinc-cadmium atteint l'usine de raffinage, la première étape après le stockage est un procédé de grillage oxydant. Cette étape convertit les sulfures de zinc en oxydes de zinc. Lors de l'étape de lixiviation, les différentes impuretés telles que le fer sont éliminées. Lors de l'étape de purification de la liqueur, les boues de cadmium sont séparées et utilisées dans la production de cadmium primaire.

3.7.1.3. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Au sein de la littérature scientifique ACV, la production de cadmium sous sa forme métallique est un objet d'études quasiment inexistant, la plupart des études se focalisant plutôt sur les produits contenant ce métal (panneaux CdTe, batteries Ni-Cd). De même, une revue des études ACV portant sur le zinc (le cadmium étant généralement un coproduit du zinc) a été réalisée, cependant toutes ces études ne considèrent que le cadmium comme étant un sous-produit sans intérêt et en conséquence n'incluent pas ce métal dans leurs études. Ainsi, une seule étude a pu être analysée dans le cadre de cette étude SCORE LCA :

- Fthenakis et al., 2009 – Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics

Similairement aux autres métaux étudiés, l'analyse de la littérature a été réalisée en considérant différents critères : l'unité fonctionnelle, les technologies étudiées, les caractéristiques du minerai, la couverture géographique, les frontières du système, la

présence d'ICV et le cas échéant le type de données collectées et les sources des données, l'approche d'allocation mise en œuvre.

3.7.2. ANALYSE DE L'ETAT DE L'ART

3.7.2.1. ANALYSE DES INVENTAIRES

Les BDD ACV analysées permettent de modéliser plusieurs produits issus de l'extraction de minerai de zinc-plomb et des différents sous-produits de la chaîne de valeur correspondante : la production de concentré de zinc et de boues de cadmium (en particulier EI) ainsi que la production de cadmium raffiné. Dans le cas d'EI, il est possible d'accéder directement à un set de données spécifique à l'extraction et concentration de minerai de zinc, contrairement à GaBi. Les caractéristiques des sets de données EI sont décrites explicitement dans le rapport des inventaires utilisés pour la modélisation des métaux (Althaus et al., 2004). A l'inverse, la documentation de l'inventaire GaBi est très maigre.

Le module de production de concentré de zinc sur EI est décrit dans les paragraphes suivants. La Figure 65 présente les hypothèses générales faites dans les flux de matière du module. Il est supposé virtuellement que deux concentrés de produit distincts sont produits (plomb et zinc). Ce n'est évidemment pas représentatif de la réalité, mais formellement nécessaire pour l'utilisation des modules de la production de zinc et de plomb dans ecoinvent. La composition du concentré décrit peut varier considérablement. Selon la technologie de traitement, un concentré de haut grade peut être requis (60 – 70% d'un seul métal, plomb ou zinc). Une compilation de concentrés provenant de 80 mines a montré des concentrations de zinc comprises entre 45 et 60%, avec une valeur moyenne de 53%. Une autre source mentionne une concentration moyenne de zinc de 50% et utilise une valeur de 54% dans les calculs. Afin de respecter les chiffres de la production mondiale, l'hypothèse est faite que tous les métaux mineurs (indium et cadmium) ne sont pas entièrement récupérés. Seulement une partie du volume extrait de ces métaux est travaillée, car les autres opérations éliminent ces métaux avec la gangue. La quantité de cadmium valorisée correspond donc à 17% de la quantité présente initialement dans le minerai.

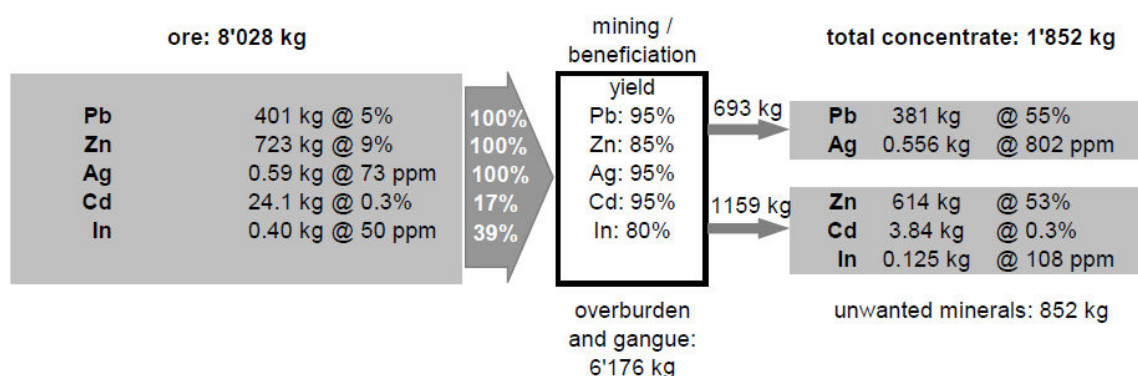


Figure 65. Hypothèses de base pour le procédé d'extraction du minerai de zinc et plomb à partir de dépôts sulfurés. Les valeurs concernent la production d'une tonne de métaux contenus dans le concentré (Althaus et al., 2004).

Selon les principes d'allocation suivis pour la modélisation de l'inventaire, une allocation économique pour les sous-produits du concentré de plomb et de zinc est utilisée (Tableau 67). Les charges environnementales de la série de procédés multifonctionnels sont allouées selon les prix du marché moyens entre 2004 et 2006 reportés par le U.S. Geological Survey. Comme le cadmium est considéré en tant que polluant et n'affecte donc pas la procédure d'allocation, il ne reçoit pas de valeur lors de la production de concentré de zinc. Les déchets contenant du cadmium deviennent « valables » seulement après le raffinage.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 67. Aperçu des paramètres pour déterminer les facteurs d'allocation entre le concentré de zinc et le concentré de plomb sur EI : composition des sous-produits et valeur des métaux (Althaus et al., 2004).

	Concentré de zinc	Concentré de plomb	Valeur en \$/kg
Intrant en kg	0.699	0.301	
Pb en kg	-	0.166	1.26
Zn en kg	0.370	-	3.09
Ag en kg	-	3.29E-04	360
Cd en kg	0.0023	-	Polluant
In en kg	6.03E-05	-	855
Valeur en \$	1.19	0.33	
Allocation économique	79%	21%	
Allocation massique	70%	30%	

Le traitement du concentré considéré correspond au mix de production mondial c.à.d. 80% hydrométallurgie et 20% pyrométallurgie. L'intrant de concentré de zinc est représentatif des données de (Ayres et al., 2002), la plupart des autres valeurs proviennent de (Xiao, Songwen, Xueyi, Kelong, & Ryoichi, 2003) dont l'inventaire représente des fonderies hydrométallurgiques et pyrométallurgiques en Chine.

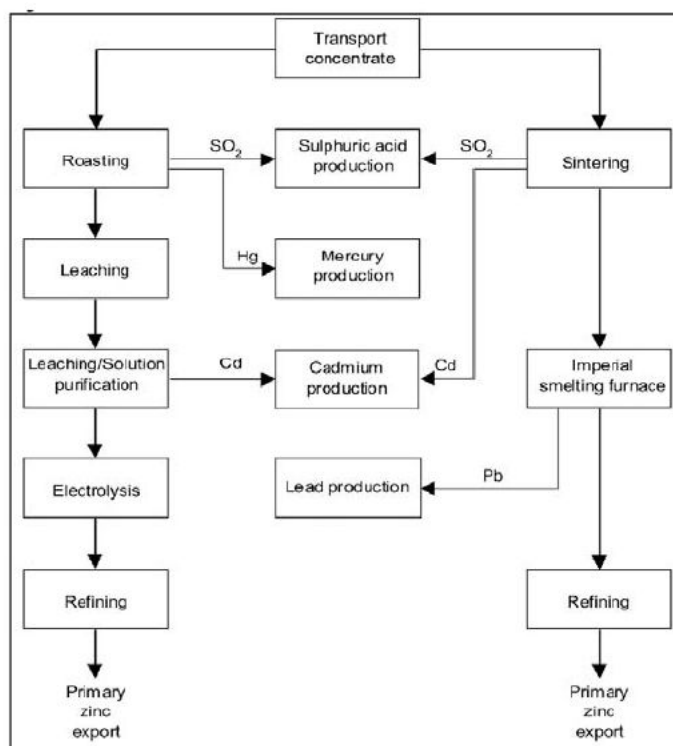


Figure 66. Schéma général de la production de zinc et de ses coproduits, dont le cadmium, dans EI (Althaus et al., 2004).

Afin d'attribuer une partie des charges environnementales de l'extraction jointe aux sous-produits (cadmium et indium), un facteur d'allocation économique est attribué à chaque coproduit c.à.d. le zinc, le cadmium et l'indium (Tableau 68). Cependant l'allocation des sous-procédés de la production de chaque coproduit n'est pas évidente à déterminer puisque les prix connus sont ceux des métaux affinés et non ceux des résidus contenant le cadmium et l'indium à la sortie de ce procédé. La production de cadmium à partir de boues de cadmium est traitée dans un inventaire différent. Par conséquent, l'allocation doit être

effectuée entre le zinc, les résidus de lixiviation contenant l'indium et les boues de cadmium. Ainsi, la considération de départ est que le profit effectué sur la production d'argent (coproduit du plomb) correspond à la performance de l'entreprise. Pour une valeur de performance de 10%, la valeur des résidus contenant l'indium correspond à 10% des bénéfices obtenus de la vente de l'indium. Par conséquent, le prix des résidus devrait correspondre à 10% du prix de l'indium. Comme le cadmium est un polluant devant dans tous les cas être isolé du produit principal, les boues de cadmium sont considérées libres de charges (cut-off).

Tableau 68. Sous-produits de la production primaire de zinc : composition, flux et valeurs utilisés pour l'allocation économique dans EI (Althaus et al., 2004).

Metal	Process Yield	zinc concentrate (input)	cadmium sludge (output)	leaching residues, In (output)	Zinc, primary (output)	Value
	%	Content	Content	Content	Content	\$ / kg
Zn	97 %	53%			100%	1.88
Cd	99 %		45%			-
In	60 %			0.01%		77.5
Amount in kg		1.91	0.00338	0.34	1.00	
Value contained (in \$)			-	0.003	1.88	
Allocation by Value			-	0.14%	99.86%	

Dans le cas du procédé GaBi, la documentation disponible ne permet pas d'identifier les procédures d'allocation exactes. Il est néanmoins indiqué que le système considéré n'implique pas d'allocation spécifique et que les sous-produits du système d'arrière-plan sont alloués selon leur valeur de marché

Les parts de marché des procédés de production de boues de cadmium et de cadmium au sein du procédé global « market for », ainsi que les parts de production incluses dans le procédé GaBi sont reportées sur la Figure 67. Ces valeurs représentent la part (en masse) des différentes sources de boues de cadmium et de cadmium. Concernant la production de concentré de zinc, les parts de marché sont exclusivement représentatives du procédé d'extraction de minerai Zn-Pb. Pour les boues de cadmium (EI), la production à partir de l'électrolyse du zinc est majoritairement représentée à 99%. L'autre voie issue de la production de zinc canadienne est négligeable (1%) alors que la production de cadmium considère un pourcentage plus élevé (12%) de la production issue du Québec. Pour le procédé GaBi, la représentation géographique de production du cadmium raffiné est basée sur des données de 2014 et inclut une description plus précise des pays considérés. La Chine et la Corée sont majoritairement représentées avec 35% et 20 % respectivement des parts de marché. Elles sont suivies par le Japon, le Mexique et le Kazakhstan.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

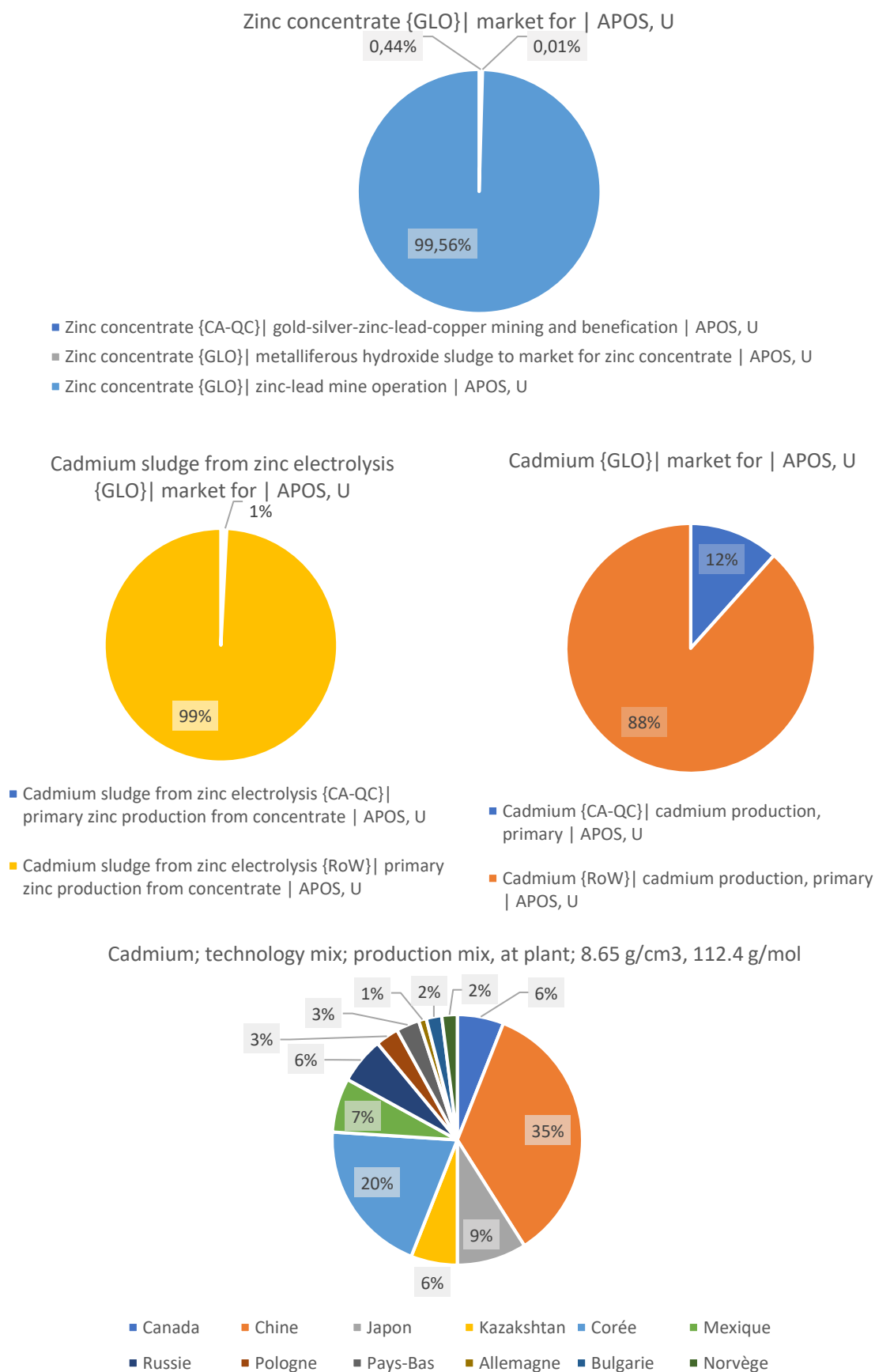
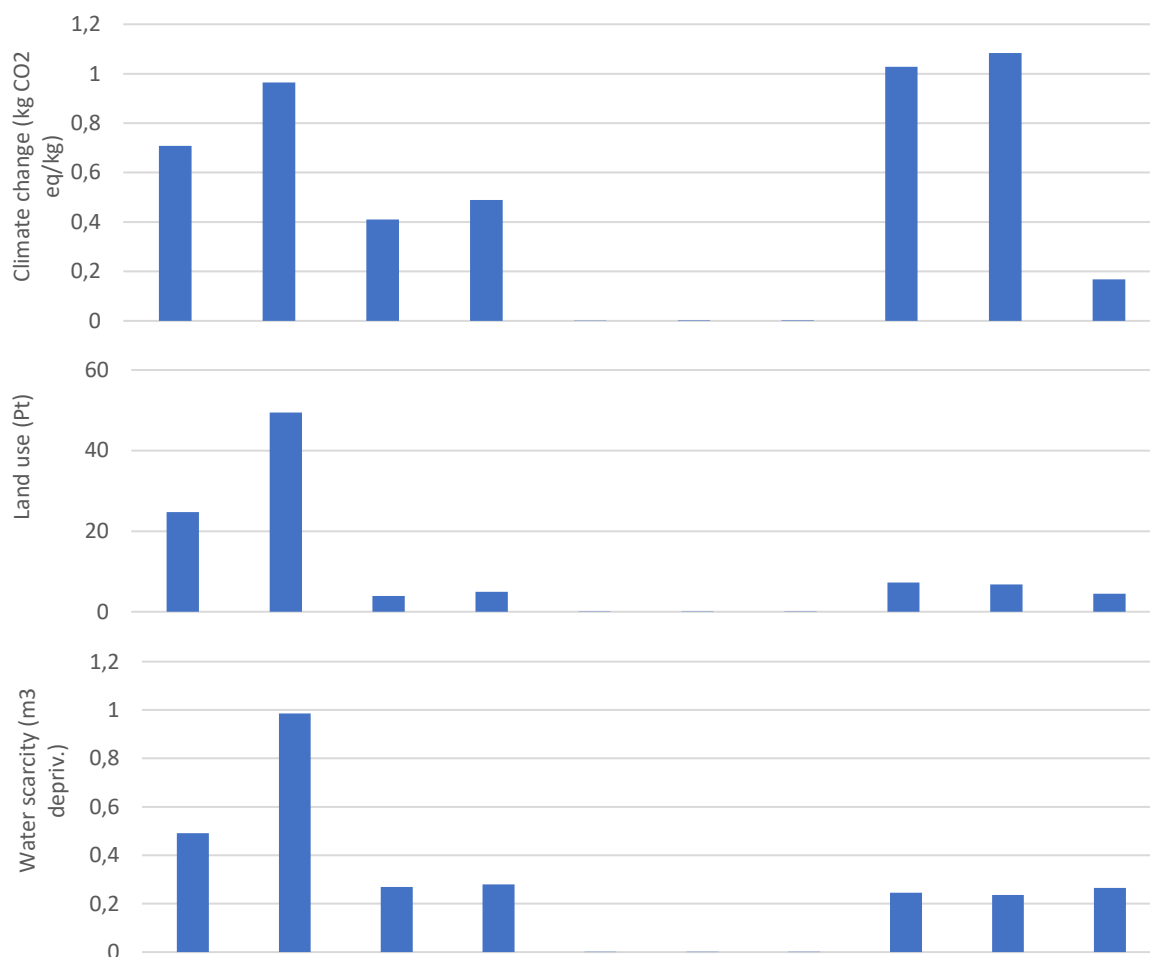


Figure 67. Parts de marché des procédés "market for" de EI pour la production de concentré de zinc (haut) boues de cadmium (milieu-gauche) et de cadmium (milieu-droite) et du procédé GaBi pour la production de cadmium (bas).

Enfin, les catégories d'impacts sélectionnées de la méthode EF adaptée sont évaluées et comparées pour les différents sets de données EI de production de concentré de zinc, de boues de cadmium et de cadmium (Figure 68). Le fait que l'impact de la production des boues de cadmium soit inexistant dans toutes les catégories analysées illustre la procédure d'allocation appliquée à ce sous-produit de la production de concentré de zinc. En effet, le caractère polluant des boues de cadmium en fait des sous-produits non-désirés et donc sans valeur économique, d'où le « cut-off » appliqué. Concernant l'extraction du concentré de zinc, l'impact du concentré issu de boues d'hydroxyde métallifères présente généralement le plus d'impact. Néanmoins le procédé « maket for » est principalement composé de la production globale à partir de minerais zinc-plomb. Pour la production de cadmium raffiné, le procédé « RoW » a des impacts beaucoup plus importants que le procédé « CA-QC » en termes de réchauffement climatique à cause de l'origine des mix énergétiques. Finalement, la catégorie d'impact d'appauvrissement des ressources montre des résultats intéressants représentatifs du « cut-off » appliqué aux boues de cadmium puisque l'impact est presque nul également pour la production de cadmium raffiné dont les boues de cadmium sont l'intrant principal.



IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

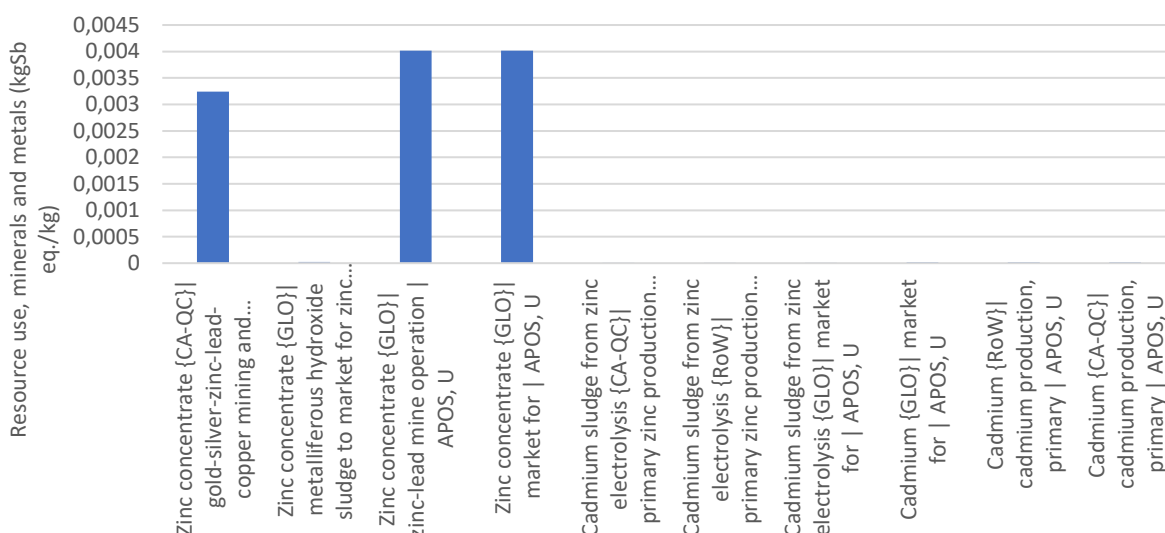


Figure 68. Impacts environnementaux des sets de données EI de production de concentré de zinc, de boues de cadmium et de cadmium sur les catégories d'impact sélectionnées de la méthode EF, FU = 1 kg de concentré, de boues de cadmium ou de cadmium.

Enfin, la contribution des matières premières de la production de concentré de zinc à l'appauvrissement des ressources est analysée sur la Figure 69. Le cadmium contribue majoritairement à 51 %, suivi par le plomb représentant 34 % des impacts. Le zinc ne contribue pas de manière significative à l'appauvrissement des ressources lié à la production de concentré de zinc.

Zinc concentrate {GLO} market for | APOS, S

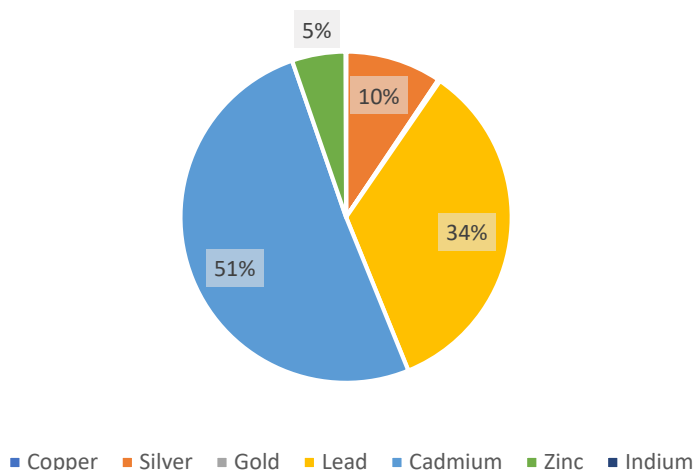


Figure 69. Contribution des matières premières impliquées dans le set de données de la production de concentré de zinc (EI) à l'appauvrissement des ressources.

3.7.2.2. MODELISATION ACV DANS LA LITTERATURE

Comme précisé précédemment, une seule étude ACV portant sur la production de cadmium a pu être analysée (Fthenakis et al., 2009) dans le cadre de cette étude (cf. Annexe B pour l'analyse détaillée de la publication).

Ainsi, l'étude de Fthenakis et al. (2009) se focalise sur les métaux utilisés dans les panneaux photovoltaïques, incluant l'étude du cadmium. Cependant, cette étude ne s'intéresse qu'à l'étape d'inventaire du cycle de vie associé à la production d'une tonne de cadmium et ne réalise aucun calcul d'impacts environnementaux. De fait, l'ICV de la production du cadmium

est disponible dans cette étude, avec des données issues de sources publiques américaines (Etats-Unis et Canada). L'inventaire associé à la production de cadmium résulte de la mise en œuvre d'allocations massiques et économiques permettant l'allocation des intrants (e.g. électricité) et des extrants (e.g. émissions dans l'air) au zinc et au cadmium.

3.7.2.3. IDENTIFICATION DES LIMITES

Malgré une quantité importante de sets de données pour la modélisation de la production de concentré de zinc, de boues de cadmium et de cadmium, certaines limites des BDD existantes peuvent être identifiées dans le cadre de l'exploitation minière du cadmium, notamment concernant la représentativité géographique, la variabilité de certaines informations et les frontières des systèmes étudiés.

Concernant l'origine géographique des sets de données, celle-ci a peu d'importance pour le procédé de production de cadmium puisque les étapes d'extraction du minerai et de concentration subissent un « cut-off ». Le choix d'effectuer un « cut-off » sur les impacts liés aux boues de cadmium implique donc une mauvaise représentativité du procédé de production. Pour l'étape de raffinage des boues de cadmium, tous les pays sont potentiellement représentés par EI dans le procédé « RoW » ainsi que le Canada dans le procédé « CA-QC » mais un manque de documentation empêche leur identification précise. L'unique information réside donc dans le fait que le procédé considère une part de marché du raffinage effectué au Canada de 12% et de 88 % au reste du monde.

Ensuite, le fait que l'inventaire de l'extraction du zinc soit complètement basé sur des valeurs de l'extraction du nickel reportées par (Hilbrans & Hinrichs, 1999) peut apporter une incertitude considérable. Pour des conclusions spécifiques, des recherches supplémentaires sont nécessaires, en particulier concernant la composition des effluents et les émissions des tailings. L'incertitude des émissions adaptées de l'industrie du nickel est reflétée arbitrairement par une déviation standard géométrique de 10. Le choix du mix énergétique est basé sur des hypothèses devant être améliorées avec de plus amples recherches.

La documentation indique également que le set de données de production du zinc, impliquant la sous-production des boues de cadmium est conçu pour l'utilisation du zinc dans des procédés de revêtement et n'est pas comparable avec des produits contenant une proportion importante de zinc. Cela signifie donc que son utilisation pour une application nécessitant une grande quantité de boues de cadmium est également déconseillée.

Enfin, concernant le procédé de production de cadmium à partir de boues de cadmium, il est également mentionné qu'aucunes émissions vers l'air et l'eau n'ont pu être inventoriées. L'inventaire du procédé peut paraître approximatif puisqu'il ne tient pas compte de tous les impacts environnementaux, à l'exception des plus importants attribuables au procédé. Cependant, comme le cadmium n'est pas souvent utilisé dans des applications en tant que métal pur, mais dilué dans des alliages ou produits chimiques, ce set de données est de qualité suffisante. Pour une utilisation de cet inventaire dans des applications où le cadmium est le constituant majeur, comme par exemple dans des systèmes de batteries NiCd, le set de données doit être complété par des facteurs d'émissions spécifiques additionnels ainsi que par le procédé de production secondaire.

Pour le procédé GaBi, certaines des émissions vers l'eau les moins importantes décrites dans la littérature ainsi que certains sels (chlorures et sulfates) ne sont pas couverts par l'inventaire. La qualité du set de données pourrait être améliorée par de plus amples recherches sur le sujet. Cependant pour un set de données illustrant un procédé d'arrière-plan, la qualité est suffisante.

Les différentes limites identifiées et les considérations relatives à l'utilisation des BDD pour la modélisation du cadmium sont résumées dans le Tableau 69.

Tableau 69. Exploitation minière du cadmium dans les BDD ACV. Limites identifiées.

Typologie de limite identifiée	Considérations spécifiques
Accès aux données et transparence	▪ Rapport EI assez détaillé et exhaustif. ▪ Littérature avec données d'inventaire qui pourraient être utilisées comme complémentaires.
Représentativité	▪ Couverture géographique partielle/mauvaise dû à un « cut-off » des impacts de l'extraction du minerai Zn-Pb et à une représentation globale des paramètres de production (sauf pour le Canada). ▪ Manque de détail sur l'origine géographique des données des procédés globaux.
Allocation	▪ Procédure d'allocation économique des coproduits du minerai Zn-Pb et du concentré de zinc clairement décrite dans le rapport. ▪ « Cut-off » des impacts liés à la production de boues de cadmium. ▪ L'allocation économique obsolète basée sur des prix des années 2000 n'impacte pas le cadmium (cut-off).
Obsolescence	▪ EI a une période de validité annoncée jusqu'aux années 2000-2013.
Complétude et étendue	▪ En général, les modèles simplifient la variété de mines et des méthodes d'exploitation existants. ▪ Certains paramètres comme les émissions directes vers l'eau ne sont pas considérés.
Vraisemblance	▪ La qualité des données décrite dans la documentation ne permet pas d'estimer que les procédés sont vraisemblables pour des systèmes où le cadmium est présent en quantités considérables.

3.7.3. RECOMMANDATIONS

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations pour la modélisation du cadmium via les BDD. Pour rappel, les scénarios représentés dans les BDD sont les suivants :

- Production de concentré de zinc :
 - A partir de minerai Zn-Pb à l'échelle mondiale,
 - A partir de boues d'hydroxydes métallifères à l'échelle mondiale,
 - A partir de minerai Au-Ag-Zn-Pb-Cu extrait et enrichi au Québec.
- Production de boues de cadmium :
 - Issues de l'électrolyse du zinc en tant que sous-produit au Québec,
 - Issues de l'électrolyse du zinc en tant que sous-produit dans le reste du monde,
 - Issues de l'électrolyse du zinc en tant que sous-produit (production de molybdène) en Europe,
 - Issues de l'électrolyse du zinc en tant que sous-produit (production de molybdène) dans le reste du monde,

- Production de cadmium raffiné :
 - A partir de boues de cadmium raffinées aux Québec,
 - A partir de boues de cadmium raffinées dans le reste du monde.

Aux vues des limites des procédés identifiées, les recommandations suivantes peuvent s'appliquer pour la modélisation de cadmium en ACV selon la portée de l'étude (Tableau 70).

Tableau 70. Recommandations pour la modélisation des produits issus de la chaîne de valeur du cadmium en ACV.

Modélisation du produit	Procédé central de l'ICV	Procédé d'arrière-plan
Concentré de zinc	Utiliser des données spécifiques ou de la littérature (ex : Van Genderen et al., 2016).	Utiliser le procédé EI « GLO » et adapter le mix énergétique au pays d'origine si celui-ci est connu.
Boues de cadmium	- Eviter l'utilisation des procédés issus de la production de molybdène. - Utiliser des données spécifiques.	- Eviter l'utilisation des procédés issus de la production de molybdène. - Utiliser le procédé EI « CA-QC » ou « GLO », adapter le mix énergétique au pays d'origine si celui-ci est connu. - Ajuster les facteurs d'allocation selon la portée de l'étude. - Faire attention lors de l'interprétation des résultats si le « cut-off » est utilisé.
Cadmium	Utiliser des données spécifiques ou de la littérature (ex : Fthenakis et al., 2009).	- Utiliser le procédé EI « CA-QC », « GLO » ou « market for » et adapter le mix énergétique au pays d'origine si celui-ci est connu. - Faire attention lors de l'interprétation des résultats si le « cut-off » est utilisé.

4. Conclusions

4.1. Remarques additionnelles

Dans le cadre d'une ACV liée aux activités minières, l'impact potentiel du traitement des résidus est pris en compte dans les catégories suivantes :

- Toxicité (humaine et environnementale),
- Eutrophisation,
- Occupation des sols.

Il existe une possibilité pour les procédés d'Ecoinvent d'inclure les émissions à long terme. En effet, Weidema et al. (2013) explique que les émissions ayant lieu sur des périodes substantiellement étendues de plus de 100 ans sont assignées à des sous-catégories spécifiques (appelées « à long terme »). De telles émissions à long terme ont lieu sur des sites de décharges (lixiviation), dans les mines d'uranium et sur les chantiers de fraisage (émissions de radon) et – probablement – lors des stockages finaux de déchets nucléaires. La BDD Ecoinvent contient donc des sous-catégories « à long terme » correspondantes dans le but de distinguer ces émissions à long terme de celles ayant lieu dans les 100 premières années.

L'impact potentiel du traitement des résidus de l'exploitation minière devient beaucoup plus significatif lorsque les émissions à long terme sont considérées (Figure 70). Il s'agit donc d'un aspect à ne pas négliger.

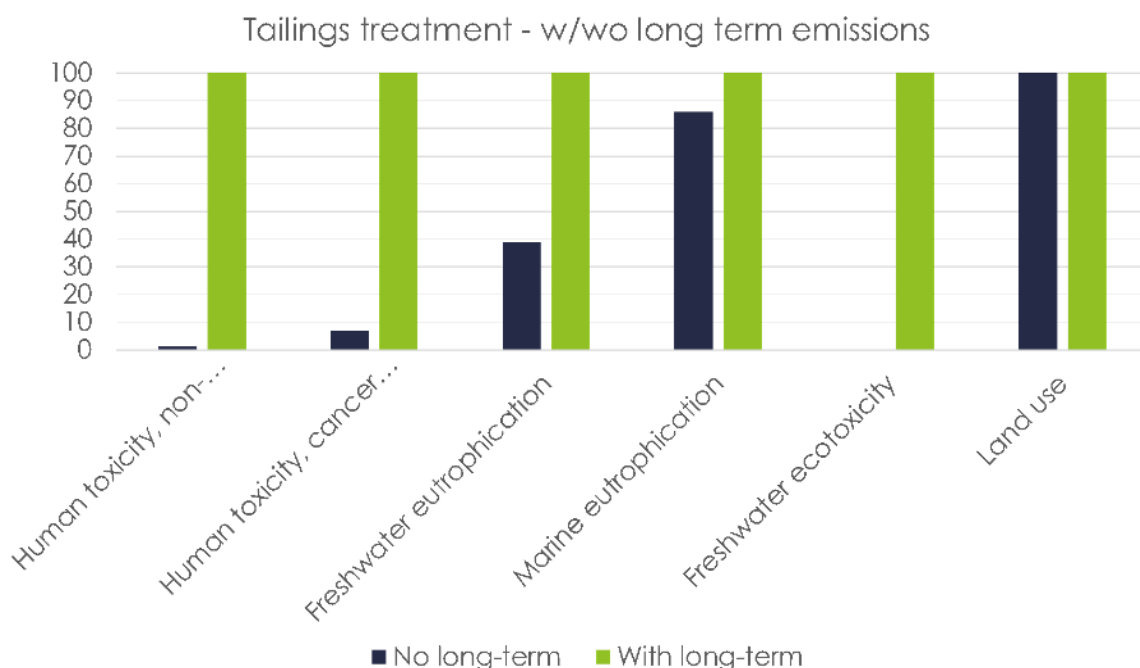


Figure 70. Impact potentiel relatif du traitement des résidus de l'exploitation minière avec et sans émissions à long terme.

4.2. Limites générales des BDD

Le corps de l'analyse a permis de relever des limites spécifiques à la modélisation de chaque métal étudié dans ce rapport. Cependant, certaines limites générales ont été identifiées et sont reportées dans cette section, notamment concernant l'accès aux données et leur transparence, la représentativité géographique, l'allocation, l'obsolescence et la complétude. A partir de l'analyse précédente, il est possible d'identifier et de catégoriser deux types de limites des BDD ACV décrivant les activités minières :

Limites liées à la modélisation dans l'approche ACV :

- La méthode d'allocation utilisée n'est souvent pas identifiable dans le détail et comporte toujours une approximation qui cause des distorsions dans la répartition des impacts potentiels entre les différents coproduits.
- Les données sont parfois agrégées, ce qui cause un manque de transparence et une difficulté à produire une analyse de contribution des sous-procédés.
- La documentation de support aux BDD ACV n'est pas totalement transparente : elle est souvent incomplète et ne mentionne pas toujours tous les aspects relatifs aux sources des données, aux limites du système, aux types de mines considérées, aux proxys utilisés etc.
- La documentation relative aux BDD ACV n'est pas non plus standardisée (les informations reportées peuvent être plus ou moins détaillées selon le procédé considéré et les auteurs, même à l'intérieur de la même BDD), ce qui rend difficile, entre autres, la comparaison des différents procédés.

Limites liées à la variété et à la mise à jour des BDD :

- La représentativité géographique est incomplète, avec des données souvent moyennes et/ou des zones géographiques différentes utilisées comme proxy et surtout un manque de données représentatives des producteurs majeurs des différents minerais. En particulier,ecoinvent adapte parfois certains sets de données à d'autres régions en modifiant uniquement l'origine du mix énergétique alors que toutes les autres données restent identiques (comme par exemple dans le cas du concentré de cuivre).
- Une obsolescence relative et un défaut d'inclusion de nouvelles technologies.

En termes de transparence et d'accès aux données, les BDD existantes ne permettent pas un accès simplifié à tous les paramètres de la modélisation. En effet, la consultation des procédés EI est gratuite mais les données d'inventaire sont fournies de manière agrégée et sans allocation. Pour GaBi, l'accès à la « Professional database » est inclus avec la licence du logiciel mais certains procédés unitaires sont disponibles sur demande ou présents uniquement dans des extensions à payer séparément. La consultation de la documentation est gratuite, mais on ne peut visualiser qu'une description générale du procédé, certains renvois à la littérature et considérations liées à la modélisation mais pas les données d'inventaire. La consultation des sets de données existants est publique avec enregistrement sur les sites respectifs. Comme indiqué, Ecoinvent permet d'accéder aux spécificités de l'inventaire agrégé (sans distinctions entre les sous-procédés) et des flux, tandis que GaBi permet de lire simplement certaines informations supplémentaires. D'autre part, la documentation est non standardisée, même à l'intérieur d'une même base de données. Les informations fournies peuvent être différentes et plus ou moins complètes.

Enfin, pour beaucoup de minerais, les modèles utilisés pour représenter leur extraction sont des systèmes multi-output, car plusieurs matières premières sont issues du même minerai. Cela pose le problème, commun en ACV, de l'allocation des impacts entre les différents coproduits et sous-produits. En ne pouvant pas éviter l'allocation avec une extension du système (comme suggéré par l'ISO 14044), deux scénarios principaux sont possibles, notamment l'allocation économique et l'allocation massique. L'ISO 14044 indique une préférence pour l'allocation massique, même si l'allocation économique est probablement la plus adoptée par les pratiquants en ACV. Dans tous les cas, les deux solutions impliquent des choix qui peuvent causer une distorsion de la distribution des impacts. Dans le cadre de l'exploitation minière :

- Allocation économique → Risque d'une distribution des impacts trop dépendante du prix des métaux précieux présents dans le même minerai. De plus, les prix considérés ne sont pas souvent mis à jour alors qu'ils peuvent fluctuer rapidement.
- Allocation massique → Risque d'une distribution des impacts trop dépendante de la masse volumique et/ou de la composition du minerai sans tenir en compte de la demande effective (hiérarchie produit et sous-produit).

La modélisation du système choisie pour cette analyse parmi celles proposées par Ecoinvent est la méthode « APOS » (Allocation at the point of substitution). Cette méthode utilise la production moyenne et préfère l'allocation économique. Il est difficile d'extrapoler l'allocation spécifique utilisée dans chaque procédé unitaire, car les chiffres reportés dans les flux d'inventaire sont déjà alloués. GaBi applique uniquement une modélisation attributionnelle, parfois sans allocation ou en utilisant une allocation économique.

4.3. Recommandations générales

Lorsque la provenance du métal est connue avec plus ou moins de précision, il faudra rechercher dans les BDD ACV le procédé le plus représentatif possible du produit d'intérêt. En particulier, il est conseillé de prêter attention aux points suivants :

- Choisir les procédés dont les limites du système sont adaptées au produit d'intérêt (minerai concentré, métal raffiné, inclusions des transports).
- Choisir les procédés représentatifs du pays d'approvisionnement (quand disponible), ou de la zone géographique d'intérêt. Cela peut entraîner une différence importante dans les quantités des intrants d'inventaire et une différence importante dans les impacts causés par les mix énergétiques utilisés.
- Pour les matières première raffinées, choisir des procédés qui considèrent le type de traitement métallurgique désiré.

Lorsque les BDD ACV ne sont pas représentatives et en fonction de l'importance du processus d'exploitation minière de la matière première considérée par rapport au processus de production complet, une intégration des BDD pourra être nécessaire. L'importance est ici entendue en termes d'impacts environnementaux et l'intégration des données pourra se faire soit en utilisant les données d'inventaires présents dans la littérature, soit en utilisant des données spécifiques.

Un diagramme de flux pour guider la sélection des procédés des BDD ACV lors de l'analyse de la production d'un produit fini ou semi-fini est proposé en Figure 71.

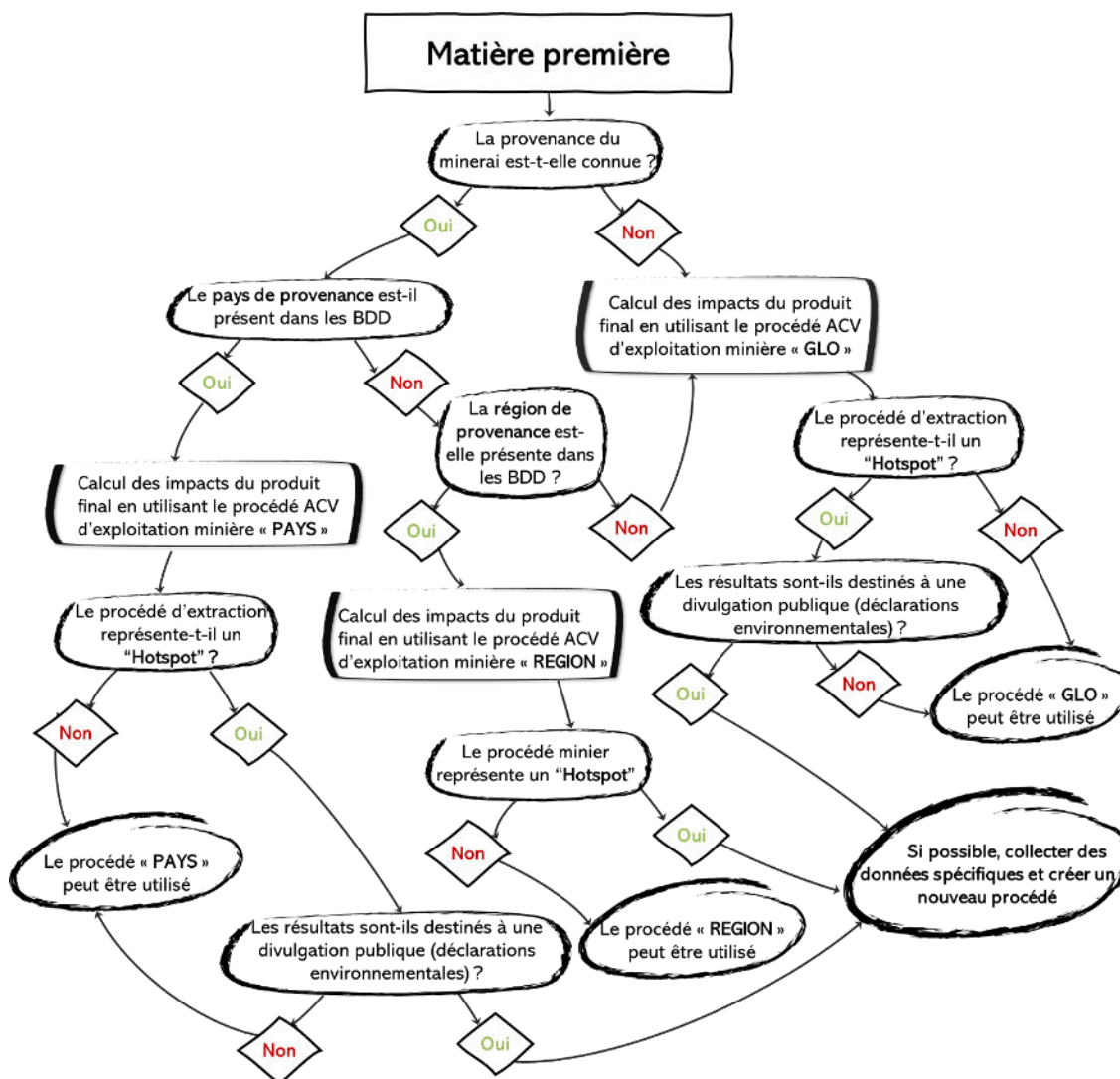


Figure 71. Diagramme décisionnel pour supporter le choix des procédés des BDD relatives aux activités minières, dans le cadre d'une étude ACV.

Le PEF Pilot Guidance (EC, 2016) suggère des seuils pour évaluer si un procédé peut être considéré comme un hotspot dans le cadre d'une ACV. En particulier, les procédés sont identifiés comme plus importants s'ils contribuent au moins à 80% des impacts potentiels d'une catégorie d'impact, avant normalisation et pondération. L'identification des hotspots doit être faite au niveau du cycle de vie entier. Une « analyse de contribution » est l'une des méthodes recommandées également par l'ISO 14044:2006 et l'un des exemples présentés, le « ranking criteria » considère comme plus importants les intrants qui ont une contribution majeure de 50%. Dans tous les cas, il est important de rappeler que différents critères peuvent être choisis, selon les cas spécifiques et le but de l'analyse.

Il faudra toujours faire attention à ce que le choix des limites du système soit cohérent, par exemple pour éviter des doubles comptages ou pour analyser séparément le traitement métallurgique et l'exploitation minière. Le procédé global ecoinvent qui décrit la production de cuivre primaire (« market for ») inclut par exemple aussi les transports, qui ne sont pas considérés dans les autres procédés. Les objectifs de l'analyse jouent aussi un rôle important dans l'utilisation des BDD ACV. En effet, une analyse de « screening », sans dissémination et/ou comparaison externe, exige normalement des données moins précises et moins complètes. L'utilisation des BDD ACV pourra donc varier en fonction de la connaissance de la chaîne de fournisseurs et du processus de production, de l'importance

relative du sous-procédé dans le calcul des impacts potentiels, mais aussi des caractéristiques du scénario considéré (qui peut être représenté plus ou moins précisément) et du but de l'analyse (limites du système, objectifs et champ d'étude).

Une fois ces aspects considérés, il sera possible de mieux choisir les sets de données ACV existants. La littérature fournit aussi des données d'inventaire qui pourraient être utilisées en alternative ou en complément aux BDD ACV ainsi que des résultats du calcul des impacts potentiels pour certains cas d'étude spécifiques. Enfin, il est important de rappeler de considérer un pourcentage de matière première secondaire dans le cadre de la modélisation et de l'analyse d'un produit fini ou semi-fini.

5. Références

- Adachi, T., Mogi, G., 2006. Inventory Analysis of CO₂ Emission for Copper Ingot Production Including Mining and Mineral Processing Processes by Cost Estimating System. *J. Life Cycle Assessment*, Japan 2, 238–245. <https://doi.org/10.3370/lca.2.238>
- Agusdinata, D. B., Liu, W., Eakin, H., & Romero, H. (2018). Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda. *Environmental Research Letters*, 13(12), 123001.
- Althaus, H.-J., Classen, M., 2005. Life Cycle Inventories of Metals and Methodological Aspects of Inventorying Material Resources in ecoinvent (7 pp). *Int. J. Life Cycle Assess.* 10, 43–49. <https://doi.org/10.1065/lca2004.11.181.5>
- Althaus, H. J., Hirschier, R., & Osses, M. (2007). Life Cycle Inventories of Chemicals. In *ecoinvent report No.8, v2.0*.
- Ambrose, H., Kendall, A., 2019. Understanding the future of lithium: Part 2, temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling. *J. Ind. Ecol.* n/a. <https://doi.org/10.1111/jiec.12942>
- Ayres, R. U., Ayres, L. W., & Råde, I. (2002). The Life cycle of Copper, its Co-Products and By-Products. In *MMSD - Mining, Minerals and Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1162/108819899569458>
- Bartzas, G., Komnitsas, K., 2015. Life cycle assessment of ferronickel production in Greece. *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 113–122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.016>
- Beylot, A., Villeneuve, J., 2017. Accounting for the environmental impacts of sulfidic tailings storage in the Life Cycle Assessment of copper production: A case study. *J. Clean. Prod.* 153, 139–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.129>
- Bossi, T., Gediga, J., 2017. The Environmental Profile of Platinum Group Metals. *Johnson Matthey Technol. Rev.* 61, 111–121. <https://doi.org/doi:10.1595/205651317X694713>
- Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: Time for change. *Food and Energy Security*. <https://doi.org/10.1002/fes3.109>
- Classen M., Althaus H.-J., Blaser S., Tuchschruid M., Jungbluth N., Doka G., Faist Emmenegger M. and Scharnhorst W. (2009) Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch
- Classen, M., Althaus, H.-J., Blaser, S., Tuchschruid, M., Jungbluth, N., Doka, G., Faist Emmenegger, M., Scharnhorst, W., 2009. Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch
- Classen, M., Althaus, H.-J., Blaser, S., Scharnhorst, W., Tuchschruid, M., Jungbluth, N., & Emmenegger, M. (2009). Platinum Group Metals (PGM) Platinum, Palladium, Rhodium. In *Life Cycle Inventories of Metals: Final report ecoinvent data v2.1 No. 10*. <https://doi.org/10.1065/lca2004.11.181.5>.
- Dai, Q., Kelly, J. C., & Elgowainy, A. (2018). *Update of Life Cycle Analysis of Cobalt in the*

GREET® Model. (September), 30.

- Dessemond, C., Lajoie-Leroux, F., Soucy, G., Laroche, N., & Magnan, J. F. (2019). Spodumene: The lithium market, resources and processes. *Minerals*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/min9060334>
- Elshkaki, A., Graedel, T.E., Ciacchi, L., Reck, B.K., 2018. Resource demand scenarios for the major metals. *Environ. Sci. Technol.* 52 (5), 2491–2497.
- Eurometaux. (2015). *Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for “ Metal Sheets for various applications ”* (Vol. 3).
- European Commission, 2016, Environmental Footprint Pilot Guidance document, - Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase, version 5.2, February 2016.
- European Commission. (n.d.). The Life Cycle Data Network. Retrieved March 11, 2020, from European Platform on Life Cycle Assessment website: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/>
- European Copper Institute. (2018). Processes: copper mining and production. Retrieved March 11, 2020, from Processes website: <https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/>
- Farjana, S. H., Huda, N., & Mahmud, M. P. (2019). Impacts of aluminum production: A cradle to gate investigation using life-cycle assessment. *Science of The Total Environment*, 663, 958-970.
- Farjana, S.H., Huda, N., Mahmud, M.A.P., 2019. Life cycle assessment of cobalt extraction process. *J. Sustain. Min.* 18, 150–161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.002>
- Fthenakis, V. M. (2004). Environmental life cycle assessment of cadmium telluride solar cells: Cd emissions. National Photovoltaic Environmental Research Center, Department of Environmental Sciences, Brookhaven National Laboratory.
- Fthenakis, V., Wang, W., Kim, H.C., 2009. Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 493–517. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.012>
- Giurco, D.P., Stewart, M., Petrie, J.G., 2001. Decision-making to support sustainability in the copper industry: technology selection, in: 6th World Congress of Chemical Engineering. Melbourne
- Glaister BJ, Mudd GM. The environmental costs of platinum–PGM mining and sustainability: Is the glass half-full or half-empty? *Minerals Engineering*. 2010;23(5):438-450
- Glöser, Simon; Soulier, Marcel; Tercero Espinoza, Luis A. (2013): Dynamic Analysis of Global Copper Flows. Global Stocks, Postconsumer Material Flows, Recycling Indicators, and Uncertainty Evaluation. *Environ. Sci. Technology*
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C., 2014. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resour.* . <https://doi.org/10.3390/resources3040614>
- Haque, N., Norgate, T., 2014. The greenhouse gas footprint of in-situ leaching of uranium, gold and copper in Australia. *J. Clean. Prod.* 84, 382–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.033>

- Hayes PC. Process Principles in Minerals & Materials Production. 3rd ed. Australia: Hayes Publishing CO; 2003. pp. 278-279.
- Heijungs, R., Huijbregts, M. A. (2004). A review of approaches to treat uncertainty in LCA.
- Hilbrans, H., & Hinrichs, W. (1999). Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe; Teilstudie Nickel. *Geologisches Jahrbuch, Sonderheft*(Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- Hischier, R. (2007). Packaging glass. *Life Cycle Inventories of Packagings and Graphical Papers. Ecoinvent-Report No. 11, (11)*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Life+Cycle+Inventories+of+Packaging+and+Graphical+Papers#0>
- Hong, J., Chen, Y., Liu, J., Ma, X., Qi, C., & Ye, L. (2018). Life cycle assessment of copper production: a case study in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(9), 1814-1824.
- IAI. (2016). Global Aluminium Cycle 2017. Retrieved March 23, 2020, from World Aluminium website: <http://www.world-aluminium.org/statistics/massflow/>
- Institut Eddec, 2017. Analyse du cycle de vie - Métaux et économie circulaire au Québec.
- International Copper Association - Copper Alliance. (2017). *Copper Environmental Profile*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 976.
- Jébrak, M., & Marcoux, E. (2008). *Géologie des ressources minérales* (Ressources Minérales et Faune du Québec, Ed.).
- Jewell S, Kimball SM. Mineral Commodity Summaries 2015. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia: CreateSpace Independent Publishing Platform; 2015;196:120-121
- Jolliet, O., Saade, M., Crettaz, P. et Shaked S. (2010), Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, [2ème éd.], 302p.
- Jones RT. An overview of Southern African PGM smelting, nickel and cobalt 2005: Challenges in extraction and production. In: 44th Annual Conference of Metallurgists, Calgary, Alberta, Canada: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 21-24 August 2005. pp. 147-178
- Junge M, Wirth R, Oberthür T, Melcher F, Schreiber A. Mineralogical siting of platinum group elements in Pentlandite from the Bushveld complex, South Africa. *Mineralium Deposita*. 2015;50(1):41-54
- Khoo, J.Z., Haque, N., Woodbridge, G., McDonald, R., Bhattacharya, S., 2017. A life cycle assessment of a new laterite processing technology. *J. Clean. Prod.* 142, 1765–1777. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.111>
- Kulczycka, J., Lelek, Ł., Lewandowska, A., Wirth, H., D. Bergesen, J., 2015. Environmental Impacts of Energy-Efficient Pyrometallurgical Copper Smelting Technologies: The Consequences of Technological Changes from 2010 to 2050. *J. Ind. Ecol.* 20, 304–316. <https://doi.org/10.1111/jiec.12369>

- Lee, J.C.K., Wen, Z., 2017. Rare Earths from Mines to Metals: Comparing Environmental Impacts from China's Main Production Pathways. *J. Ind. Ecol.* 21, 1277–1290. <https://doi.org/10.1111/jiec.12491>
- Lefebvre, G., & Tavignot, D. (2020). Le marché du lithium en 2020 : enjeux et paradoxes. Retrieved June 18, 2020, from MineralInfo website: <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/marche-lithium-en-2020-enjeux-paradoxes>
- Leroy, Y., & Lasvaux, S. (2013). De la gestion des incertitudes en analyse de cycle de vie. *Marché et organisations*, (1), 65-82.
- Liu, G., Müller, D.B., 2012. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. *J. Clean. Prod.* 35, 108–117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.030>
- Mabiza-ma-Mabiza, J., Mbohwa, C., 2016. Ore Processing by PGM Concentration Process and Assessment of CO2 Equivalent Emissions and Environmental Damage Directly Involved. *Trans. Eng. Technol.* [https://doi.org/DOI 10.1007/978-981-10-1088-0_21](https://doi.org/DOI%2010.1007/978-981-10-1088-0_21)
- Memary, R., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., 2012. Life cycle assessment: a time-series analysis of copper. *J. Clean. Prod.* 33, 97–108 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.025>
- Mistry, M., Gediga, J., Boonzaier, S., 2016. Life cycle assessment of nickel products. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1559–1572. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1085-x>
- Navarro, J., & Zhao, F. (2014). Life-Cycle Assessment of the Production of Rare-Earth Elements for Energy Applications: A Review. *Frontiers in Energy Research*, 2. Retrieved 10 22, 2019, from <https://frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2014.00045/full>
- Norgate, T. E., & Rankin, W. J. (2000). Life cycle assessment of copper and nickel production.
- Norgate, T., Haque, N., 2010. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *J. Clean. Prod.* 18, 266–274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>
- Norgate, T.E., Jahanshahi, S., Rankin, W.J., 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. *J. Clean. Prod.* 15, 838–848 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
- Norgate, T., Jahanshahi, S., 2011. Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing. *Miner. Eng.* 24, 698–707. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.002>
- Nunez, P., Jones, S., 2016. Cradle to gate: life cycle impact of primary aluminium production. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1594–1604. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1003-7>
- Nuss, P., Eckelman, M.J., 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLoS One* 9, e101298
- Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokryska Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.-J., Save M. (2017). Exploitation minière et traitement des minerais. Collection « La mine en France ». Tome 6, 77 p., 43

- Safarzadeh MS, Horton M, Van Rythoven AD. Review of recovery of platinum group metals from copper leach residues and other resources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018;39(1):1-17
- Saurat, M., Bringezu, S., 2008. Platinum Group Metal Flows of Europe, Part 1. *J. Ind. Ecol.* 12, 754–767. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00087.x>
- Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P., Hake, J. F., Voßenkaul, D., & Friedrich, B. (2016). Environmental impacts of rare earth mining and separation based on eudialyte: a new European way. *Resources*, 5(4), 32.
- Schulte-Schrepping, K. H., & Piscator, M. (2002). Cadmium and Cadmium Compounds. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (2000 Editi). Wiley-Interscience.
- Song, X., Pettersen, J.B., Pedersen, K.B., Røberg, S., 2017. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway. *J. Clean. Prod.* 164, 892–904. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.021>
- Stamp, A., Lang, D. J., & Wäger, P. A. (2012). Environmental impacts of a transition toward e-mobility: The present and future role of lithium carbonate production. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.026>
- Sun, X., Hao, H., Zhao, F., & Liu, Z. (2017). Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis. *Resources Conservation and Recycling*, 124, 50-61. Retrieved 10 22, 2019, from <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917301118>
- Thethwayo, B. M. (2018). Extraction of Platinum Group Metals. Retrieved 10 22, 2019, from <https://intechopen.com/books/noble-and-precious-metals-properties-nanoscale-effects-and-applications/extraction-of-platinum-group-metals>
- Vahidi, E., Zhao, F., 2018. Assessing the environmental footprint of the production of rare earth metals and alloys via molten salt electrolysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 139, 178–187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.010>
- Van Genderen, E., Wildnauer, M., Santero, N., Sidi, N., 2016. A global life cycle assessment for primary zinc production. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1580–1593. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1131-8>
- Weidema B P, Bauer C, Hischer R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo C O, Wernet G. (2013). Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre, © Swiss Centre for Life Cycle Inventories / 2009-2013
- Weng, Z., Haque, N., Mudd, G.M., Jowitt, S.M., 2016. Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements. *J. Clean. Prod.* 139, 1282–1297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.132>
- Xiao, X., Songwen, X., Xueyi, G., Kelong, H., & Ryoichi, Y. (2003). LCA case study of zinc hydro and pyro-metallurgical process in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(3), 151–155. <https://doi.org/10.1007/BF02978460>
- Xiao Z, Laplante AR. Characterizing and recovering the platinum group minerals – A review. *Minerals Engineering*. 2004;17(9):961-979

- Yang, X., Hao, X., Li, H., Sun, S., 2014. The life cycle assessment of copper metallurgical process, EPD Congress.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118889664.ch70>
- Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W., Li, X., 2016. Environmental footprint of aluminum production in China. J. Clean. Prod. 133, 1242–1251.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.137>

Annexe A

Tableau des producteurs de métaux (fichier excel).

Annexe B

Détails de l'analyse de la littérature (fichier excel).

Annexe C

Cette annexe fournit le détail des projets pouvant, à terme, fournir des informations complémentaires aux résultats de cette étude.

Industrie minière

SUPRIM - SUsustainable management of PRIMary raw materials through a better approach in Life Cycle Sustainability Assessment.

Il s'agit d'un projet de 3 ans financé par EIT Raw Materials, un organe de l'union Européenne formé et financé par le EIT (European Institute of Innovation and Technology). Le projet veut offrir des solutions et des services pour adresser les impacts liés à l'utilisation des ressources dans le cadre d'analyses de durabilité pour l'exploitation des matières premières.

Parmi les objectifs du projet, le développement d'une méthode d'impact ACV pour adresser les impacts de l'utilisation de ressources et le développement d'un inventaire de cycle de vie spécifique pour deux cas d'étude en collaboration avec des partenaires industriels du secteur minier.

En réalité, seuls des résultats préliminaires pour le développement d'une méthode d'impact sur les ressources abiotiques, approuvé par les parties intéressées, sont disponibles.

Pour plus d'information : <http://suprim.eitrawmaterials.eu/about-project>.

ERA-MIN - European Research Area – Network on the industrial handling of raw materials for European industries.

Financé par l'UE (FP7), ce programme s'est attaqué à la fragmentation au niveau de l'UE et a fait la promotion de la recherche dans la production et la fourniture industrielles de matières premières.

Trois appels à propositions lancés entre 2013 et 2015 ont conduit au financement de 17 projets transnationaux. Parmi ces projets, GEOSULF (« Utilization of sulphide mine tailings in geopolymer materials ») et AMDREY (« Extraction of Earth Elements from Acid Mine Drainage ») pourraient apporter quelques informations intéressantes, mais les sources en lignes ne fournissent pas de rapports ou de documents à télécharger.

Pour plus d'information : <http://www.era-min-eu.org/>

ITERAMS

Un projet de 3 ans (2017-2020), qui a comme partenaires le BRGM et GreenDelta. Il adresse l'exploitation durable de minéraux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



Figure 72. Domaines d'investigation du projet ITERAMS.

Source : <http://www.iterams.eu/Home/TheProjectInANutShell>.

Le WP5 est dédié à la durabilité et prévoit les livrables suivants :

- D5.1: Report on sustainability screening;
- D5.2: Report on life cycle sustainability assessment of ITERAMS mining technologies;
- D5.3: Data sets: LCA data sets for ITERAMS mining technologies submitted to LCDN network;
- D5.4: Report on recommendations for communication of mining sustainability assessment results;
- D5.5: Report on improvements of social impacts in new mining technology combinations;
- D5.6: Report on draft procedure for Life Cycle Sustainability Assessment of mining processes and products.

Les livrables 5.3 et 5.4 semblent être pertinents dans le cadre de l'étude présente, mais en réalité les sets de données en train d'être développés s'intéressent principalement au traitement de l'eau (information fournie par le BRGM).

Aluminium

BRAVO - Bauxite Residue and Aluminium Valorisation Operations

Bravo est un « European Innovation Partnership » qui se concentre sur la récupération innovante de métaux et dont le projet "Al-Ore" veut optimiser la production d'aluminium et d'alumine pour accroître la valeur et recyclabilité de sous-produit comme le "red mud". Plus d'information sur ce projet se trouvent au lien <http://bravoeip.eu/bravo-projects/>.

RemovAL - Removing the waste streams from the primary Aluminium production and other metal sectors in Europe

Il s'agit d'un projet Horizon2020 de l'union Européenne visant à réduire les résidus dérivants de la production d'aluminium et d'autres métaux en Europe.

Plus d'information sur ce projet se trouvent au lien <https://www.removal-project.com/>

Annexe D

ICV global de l'extraction de la bauxite. A partir de Appendix A, IAI (2017).

		Bauxite mining	% global production reporting
		Bauxite	
Reference Flow (Material)		5.5	
Reference Flow (t product per t Al ingot)			
Transport			
Average sea transport	tkm/t product		
Average road transport	tkm/t product		
Average rail transport	tkm/t product		
Average conveyor belt transport	tkm/t product		
Material input			
Bauxite	kg/t product		
Caustic soda	kg/t product		
Calcined lime	kg/t product		
Fresh water	m3/t product	0.5	44%
Sea water	m3/t product	0	41%
Petrol coke	kg/t product		
Pitch	kg/t product		
Refractory material	kg/t product		
Steel	kg/t product		
Alumina	kg/t product		
Anodes (net)/Söderberg Paste	kg/t product		
Cathode carbon	kg/t product		
Aluminium fluoride	kg/t product		
Electrolysis metal	kg/t product		
Chlorine	kg/t product		
Water and Land Use			
Fresh water consumption	m3/t product	0	44%
Sea water consumption	m3/t product	0	43%

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Land occupation	m2/t product	0.0000	50%
Land use type before	land use type	Other forest	37%
Land use type after	land use type	Forest	44%
Regeneration Period	years/t product	0.0000004	27%
Energy input			
Heavy oil	kg/t product	0.5	44%
Diesel oil	kg/t product	1.6	44%
Natural gas	m3/t product	0.0	44%
Coal	kg/t product	0.0	44%
Electricity	kWh/t product	1.5	40%
Air emissions			
Particulates	kg/t product	0.1	
<2.5	kg/t product		
2.5-10	kg/t product		
Sulfur dioxide	kg/t product		
Nitrous oxides (as NO₂)	kg/t product		
Mercury	g/t product		
Particulate fluoride (as F)	kg/t product		
Gaseous fluoride (as F)	kg/t product		
Total polycyclic aromatic hydrocarbons	kg/t product		
Benzo(a)pyrene	g/t product		
Tetrafluoromethane	kg/t product		
Hexafluoroethane	kg/t product		
Hydrogen chloride	kg/t product		
Dioxin/furans	kg/t product		
Water emissions			
Fresh water	m3/t product	0.03	
Sea water	m3/t product	0	

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Suspended solids	kg/t product		
Oil and grease/total hydrocarbons	kg/t product		
Mercury	g/t product		
Fluoride (as F)	kg/t product		
Polycyclic aromatic hydrocarbons (6 Borneff components)	g/t product		
By-Products (for external recycling)			
Bauxite residue	kg/t product		
Spent pot lining carbon	kg/t product		
Spent pot lining refractory	kg/t product		
Refractory	kg/t product		
Steel	kg/t product		
Dross	kg/t product		
Filter dust	kg/t product		
Other	kg/t product		
Solid waste (for landfilling)			
Mine solid waste	kg/t product	0.1	
Bauxite residues (red mud)	kg/t product		
Spent pot lining	kg/t product		
Waste alumina	kg/t product		
Waste carbon or mix	kg/t product		
Scrubber sludges	kg/t product		
Refractory (excl. spent pot lining)	kg/t product		
Dross	kg/t product		
Filter dust	kg/t product		
Other solid industrial waste of which hazardous waste	kg/t product		
Calculated Emissions		<i>(Based on GHG Protocol Tools - Aluminium Sector GHG Workbook &</i>	

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

		<i>Stationary Combustion Tool)</i>	
Carbon dioxide (non-fuel)	kg/t product		
Carbon dioxide (fuels)	kg/t product	7	
Methane (fuels)	kg/t product	0.0003	
Nitrous oxide (fuels)	kg/t product	0.0001	