



IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

SYNTHESE

Octobre 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.

Sommaire

1. Introduction.....	3
2. Etat de l'art et recommandations spécifiques	4
2.1. Cuivre	4
2.2. Aluminium	6
2.3. Lithium.....	7
2.4. Terres rares	9
2.5. Platinoïdes.....	10
2.6. Nickel et cobalt.....	12
2.6.1. Nickel.....	12
2.6.2. Cobalt	15
2.7. Cadmium	16
3. Limites générales.....	18
4. Recommandations générales.....	19
Références.....	22

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 consummatrice 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'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). D'autre part, 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. En effet, la qualité d'une ACV dépend fortement de la disponibilité et de la qualité des données utilisées lors de sa réalisation (Jolliet et al., 2010).

L'objectif de l'étude est donc de vérifier comment et dans quelle mesure le cadre complexe de l'exploitation minière est représenté dans les bases de données (selon les paramètres du Tableau 1) pour l'Analyse du Cycle de vie actuellement disponibles et s'il existe des informations complémentaires pour surmonter les limites identifiées. Les BDD ACV analysées dans cette étude sont Ecoinvent (EI), GaBi, le nœud ELCD du LCDN et éventuelles études PEF/OEF. Les matières

premières traitées dans l'étude sont le cuivre, l'aluminium, le lithium, les terres rares, les platinoïdes, le cobalt, le cadmium et le nickel. L'analyse servira ainsi de base pour produire des recommandations sur l'utilisation correcte et fonctionnelle des BDD.

Tableau 1. Paramètres étudiés dans les procédés relatifs aux activités minières dans les BDD ACV et dans la littérature.

Paramètres étudiés	Détails
Accès aux données et transparence	Dans les BDD gratuites, les informations disponibles ne sont pas substantielles et la documentation n'est pas standardisée. Néanmoins, la consultation publique des BDD payantes (EI, GaBi) permet d'accéder aux spécificités de l'inventaire agrégé ou à des informations supplémentaires.
Représentativité	Les données de l'inventaire sont souvent des moyennes (pondérées ou non) annuelles, géographiques, sectorielles où 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.
Obsolescence	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 des activités minières décrit souvent des procédés <i>multi-output</i> et une solution doit être trouvée pour allouer les impacts entre les différents produits. Les méthodes d'allocation utilisées dans les sets de données seront analysées selon les informations de la documentation.
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 peuvent simplifier la variété de mines et des méthodes d'exploitation existantes.
Vraisemblance	Une confrontation avec la littérature et les experts du secteur pourront servir à évaluer la vraisemblance des sets de données analysés.

2. Etat de l'art et recommandations spécifiques

2.1. Cuivre

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 procédés d'extraction du cuivre dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 2. 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.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 2. Sets de données disponibles dans les BDD 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 ○ 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	Pas de procédé.
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 IN¹ ○ Copper; from electrolysis; production mix, at plant; 99,999% Cu SE¹

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.

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 utilisé 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. 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.

2.2. Aluminium

Le minerai primaire utilisé pour la fabrication de l'aluminium est la bauxite. 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 (IAI, 2018).

Les procédés d'extraction de la bauxite dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 3. Il n'existe qu'un seul procédé sur ecoinvent contrairement aux quatre disponibles sur GaBi. Les données du procédé EI ainsi que celles du procédé GaBi disponible par défaut (en noir dans le tableau) sont issues d'un sondage de 2015 par le IAI, qui a ensuite donné lieu à une publication (IAI, 2017).

Tableau 3. Sets de données disponibles dans les BDD pour la production de bauxite. Les procédés grisés ne sont pas disponibles avec la licence standard des logiciels.

Ecoinvent v3.6		GaBi v8.7	
Bauxite	○ <i>Bauxite, without water {GLO} / bauxite mine operation</i>	○ <i>Bauxite, primary production; consumption mix, at plant; RNA¹</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 diasporite α-AlO(OH); GLO (empty)</i>	○ <i>Bauxite, at mine; GLO¹</i>

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.

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 γ-AlO(OH) and diasporite α-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

¹ Data on demand.

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.

2.3. Lithium

Sa principale source provient actuellement de l'extraction à partir de pegmatites à spodumène, suivie par l'exploitation des saumures lithinifères intracontinentales. Le lithium n'est pas un métal rare. D'une part, son exploitation minière est possible grâce à la présence de ce métal dans des pegmatites formées à moyenne profondeur, riches en lithium, césium et tantale. 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). Dans ce cas, le lithium est obtenu par chimie, à partir de l'évaporation des saumures.

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 4. 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, 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.

Tableau 4. Sets de données disponibles dans les BDD 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	○ <i>Spodumene {RER} production Alloc Def, U</i> ○ <i>Spodumene {RoW} production Alloc Def, U</i>	○ <i>Pas de procédé</i>
Saumure	○ <i>Lithium brine, 6.7 % Li {GLO} lithium brine inspissation APOS, U</i>	○ <i>Pas de procédé</i>
Carbonate de lithium	○ <i>Lithium carbonate {GLO} production, from concentrated brine APOS, U</i> ○ <i>Lithium carbonate {GLO} leaching of spodumene with sulfuric acid APOS, U</i>	○ <i>Lithium carbonate (from brine); extraction from brine; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol CL</i> ○ <i>Lithium carbonate (spodumene route); spodumene route; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol CN</i> ○ <i>Lithium Carbonate mix; technology mix; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol GLO</i> ○ <i>Lithium carbonate mix (brine); extraction from brine; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol GLO</i> ○ <i>Lithium carbonate mix (spodumene); spodumene route; production mix, at plant; 2.11 g/cm3, 73.89 g/mol GLO</i>

Les scénarios d'exploitation du lithium à partir de minerai 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 dans ecoinvent à partir du carbonate de lithium.

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 (Chili). 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 5.

Tableau 5. 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.

2.4. Terres rares

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. 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.

Les procédés d'extraction des terres rares dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 6. 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 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. 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. Il est ainsi précisé que 0.28 % des oxydes de terres rares du minerai modélisé ne sont pas pris en compte. Une allocation économique est utilisée entre les OTR (Oxydes de Terres Rares).

Tableau 6. Sets de données disponibles dans les BDD 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>

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 :

- 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.

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. 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 7).

Tableau 7. 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.		

2.5. Platinoïdes

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 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 procédés d'extraction des platinoïdes dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 8. Trois types de MGP sont représentés dans 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.

Tableau 8. Sets de données disponibles dans les BDD 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 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 7). 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. 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 9. 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 rapport complet).	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 rapport complet) 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.

2.6. Nickel et cobalt

Dans l'écorce terrestre, le nickel, le cobalt et le chrome sont toujours étroitement associés aux roches basiques et ultrabasiques. Ces roches renfermant systématiquement des teneurs élevées en cuivre, les gisements exploités pourront associer le cuivre, le nickel et le cobalt. Ainsi, les gisements de cuivre, sont de très loin la principale source primaire de cobalt et représentent la moitié de la source primaire de nickel.

2.6.1. NICKEL

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 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 10. 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 10. Sets de données disponibles dans les BDD 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 mix; ore mining and processing, roasting, reduction, magnetic separation; production mix, at plant; 99.9% Nickel ² - Nickel (Class 1, 99.95%) ILCD 2017; technology mix; production mix, at plant; 99.9% Ni

² Extension database V : nonferrous metals 2020

	○ <i>Nickel, 99.5% {ZA} platinum group metal mine operation, ore with high rhodium content APOS, U</i>
Ferronickel (minerais latéritiques)	○ <i>Ferronickel, 25% Ni {GLO} production APOS, U</i> ○ <i>Ferro nickel (29%); mining, separation, electric arc furnace; production mix, at plant; 29 % nickel³</i> ○ <i>Ferro Nickel (29% Ni) ILCD 2017; technology mix; production mix, at plant; 29% Nickel</i>

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 11).

³ Extension database XVII : full US 2020

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES ACTIVITES MINIERES POUR QUELQUES MATIERES PREMIERES

Tableau 11. 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 « <i>market for</i> » 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 benefication of nickel ore APOS, U</i> » en modifiant le mix énergétique selon le pays envisagé.			Utiliser le procédé EI « <i>market for</i> » 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 « <i>ZA</i> » ou « <i>RU</i> » 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 « <i>GLO</i> » en modifiant les mix énergétiques selon le pays modélisé.	Utiliser le procédé EI « <i>market for</i> ».

2.6.2. COBALT

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.

Les procédés d'extraction du cobalt dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 12. 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 disponible.

Tableau 12. Sets de données disponibles dans les BDD 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 données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations pour la modélisation du cobalt via les BDD. 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 13).

Tableau 13. 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.		

2.7. Cadmium

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.

Les procédés d'extraction du cadmium dans les bases de données ecoinvent v3.6 et GaBi v8.7 sont résumés dans le Tableau 14. 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 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 14. Sets de données disponibles dans les BDD pour la production de minerai, de boues de cadmium et de cadmium. Les procédés décrits 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	○ <i>Cadmium sludge from zinc electrolysis {CA-QC} primary zinc production from concentrate APOS, U</i> ○ <i>Cadmium sludge from zinc electrolysis {RoW} primary zinc production from concentrate APOS, U</i> ○ <i>Cadmium sludge from zinc electrolysis {RoW} molybdenum production APOS, U</i> ○ <i>Cadmium sludge from zinc electrolysis {RER} molybdenum production APOS, U</i>	○ <i>Pas de procédé.</i>
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>

Les données récoltées et les considérations associées permettent la formulation de certaines recommandations pour la modélisation du cadmium via les BDD. 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 au 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 15).

Tableau 15. 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.

3. Limites générales

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. 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 premières 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 1.

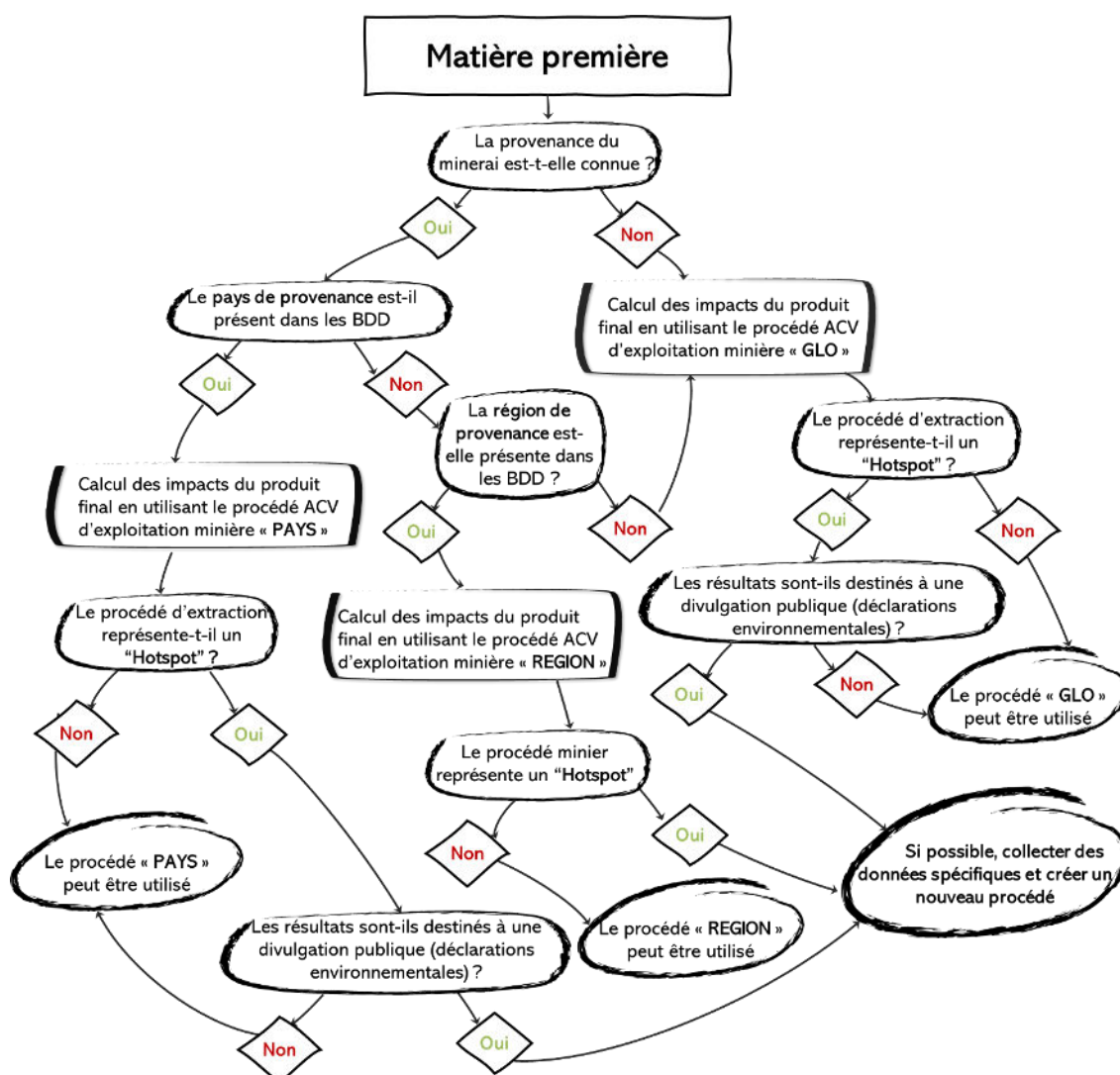


Figure 1. Diagramme décisionnel pour supporter le choix des procédés des BDD relatives aux activités minières, dans le cadre d'une étude ACV.

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.

Références

- 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>
- Carvalho, F.P., 2017. Mining industry and sustainable development: Time for change. Food Energy Secur.
- Dai, Q., Kelly, J.C., Elgowainy, A., 2018. Update of Life Cycle Analysis of Cobalt in the GREET® Model 30.
- 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.
- 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.
- 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>
- 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
- IAI. (2016). Global Aluminium Cycle 2017. Retrieved March 23, 2020, from World Aluminium website: <http://www.world-aluminium.org/statistics/massflow/>
- 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.
- 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.
- Junge M, Wirth R, Oberthür T, Melcher F, Schreiber A. Mineralogical siting of platinumgroup elements in Pentlandite from the Bushveld complex, South Africa. Mineralium. Deposita. 2015;50(1):41-54
- LME, 2020. Market Data [WWW Document]. London Met. Exch. - an HKEX Co. URL <https://www.lme.com/en-GB/Market-Data> (accessed 8.25.20).
- 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>