Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie

Marilys Pradel, J. Garcia, M.S. Vaija

▶ **To cite this version:**

Marilys Pradel, J. Garcia, M.S. Vaija. Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie. [Rapport de recherche] irstea. 2019, pp.84. hal-02609812

HAL Id: hal-02609812
https://hal.inrae.fr/hal-02609812

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Réseau EcoSD Eco-conception de systèmes durables

Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie

Marilys PRADEL, Julien GARCIA, Samuli VAIJA

PRC17.6 – Réseau EcoSD – Juin 2019

irstea

PSA GROUPE

orange™

Avant-propos

Ce guide a été élaboré dans le cadre du projet PRC17.6 du Réseau EcoSD « Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en analyse du cycle de vie ».

Il est destiné aux membres du réseau EcoSD intéressés par ces thématiques et aux praticiens de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) qui s'intéressent à la problématique des ressources et de la criticité en ACV.

Il a été réalisé à partir des contributions de deux stages de master/ingénieur (Alexis Lalevée, UTT, et Eric Philipot, EME) et des membres du réseau EcoSD participants.

Les auteurs du guide – Marilys Pradel (Irstea Clermont-Ferrand), Julien Garcia (Groupe PSA) et Samuli Vaija (Orange) – remercient chaleureusement les membres du réseau EcoSD ayant contribué à la relecture du guide de bonnes pratiques :

- Stéphane Le Pochat (EVEA Conseil)
- Pierre Collet, Anne Bouter (IFPEN)
- Guillaume Busato (RTE)
- Jade Garcia (ScoreLCA)
- Lynda Aissani (Irstea Rennes)
- Julio Rivera Garcia (Arcelormittal)
- Stephanie Muller (BRGM)
- Stéphanie Desrousseaux, Emmanuelle Cor (CEA)

Table des matières

Avant-propos 3
1. Introduction 6
2. Quelles bonnes pratiques pour une meilleure prise en compte du critère « ressources minérales » dans les ACV ? 8
3. Comment est pris en compte le critère « ressources minérales » en Analyse du Cycle de Vie ? 11
3.1. Problème de l'évaluation des ressources en ACV 11
3.1.1. Valeur accordée à la ressource 11
3.1.2. Disponibilité de la ressource 11
3.2. Problème de la terminologie utilisée pour définir les ressources 12
3.3. Typologie des méthodes de caractérisation des ressources en ACV 13
3.3.1. Modélisation basée sur la thermodynamique (cat. 1) 14
3.3.2. Modélisation basée sur la quantification physique des ressources (cat. 2) 14
3.3.3. Modélisation basée sur les efforts futurs nécessaires à l'extraction des ressources (cat. 4) 14
3.4. Evolutions actuelles des méthodes de caractérisation des ressources en ACV 16
3.4.1. Méthode AADP (Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential) 16
3.4.2. Méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019) 17
3.5. Préconisations actuelles à destination des praticiens de l'ACV 18
3.5.1. Préconisations de l'Union Européenne 18
3.5.2. Préconisations de l'industrie minière 19
3.5.3. Préconisations pour l'affichage environnemental 20
4. Comment évaluer la criticité d'une ressource minérale ? Lien avec la méthode d'Analyse du Cycle de Vie 21
4.1. Problème de l'évaluation de la criticité des ressources 21
4.2. Méthodes d'évaluation de la criticité des ressources 23
4.3. Liste des matériaux considérés comme critiques selon les méthodes appliquées 24
4.4. Limites des méthodes d'évaluation de la criticité et intégration de la criticité dans les Analyses du Cycle de Vie 27
4.5. Evolution des méthodes ACV permettant d'intégrer la criticité des ressources 29
4.5.1. Méthode GRI (Global Resource Indicator) 29
4.5.2. Méthode ESP (Economic scarcity potential) 30
5. Quels sont les points de vigilance auxquels doivent faire face les praticiens lorsque des ressources minérales sont mises en œuvre dans leurs ACV ? 33
5.1. Vigilance au regard du choix de la méthode de caractérisation 33
5.2. Vigilance au regard du choix du logiciel de modélisation 36

5.3. Vigilance au regard de l'implémentation des méthodes de caractérisation dans les logiciels ACV 36
5.4. Vigilance au regard de la sensibilité des résultats et de l'incertitude associées à l'usage des méthodes de caractérisation 40
6. Illustrations avec des cas d'études 42
6.1. Cas de l'indium sur lien ICV/LCIA 42
6.2. Cas du germanium sur lien ICV/LCIA 43
6.3. Cas de la récupération du phosphore issu des boues d'épuration urbaines 47
6.4. Cas des batteries de véhicules électriques 52
7. Conclusion 54
Table des figures et des tableaux 56
Annexe 1. Réserves ou ressources ? 58
Annexe 2. Les méthodes de caractérisation en ACV 61
Annexe 3. Ressources prises en compte par les principales méthodes de caractérisation 68
Annexe 4. Comparaison des facteurs de caractérisation CML-IA (réserves ultimes) utilisés par les logiciel GaBi® et Simapro® 69
Annexe 5. Eléments identifiés par les auteurs des méthodes comme contribuant aux incertitudes des facteurs de caractérisation 78
Annexe 6. Pour aller plus loin… 83

1. Introduction

Les ressources minérales sont utilisées par l'Homme pour la production de biens depuis l'Antiquité. La diversité des ressources minérales exploitées n'a cessé de croitre depuis le début de l'ère industrielle en corrélation étroite avec la quantité de produits contenant des éléments à haute technologie mis sur le marché (Figure 1).

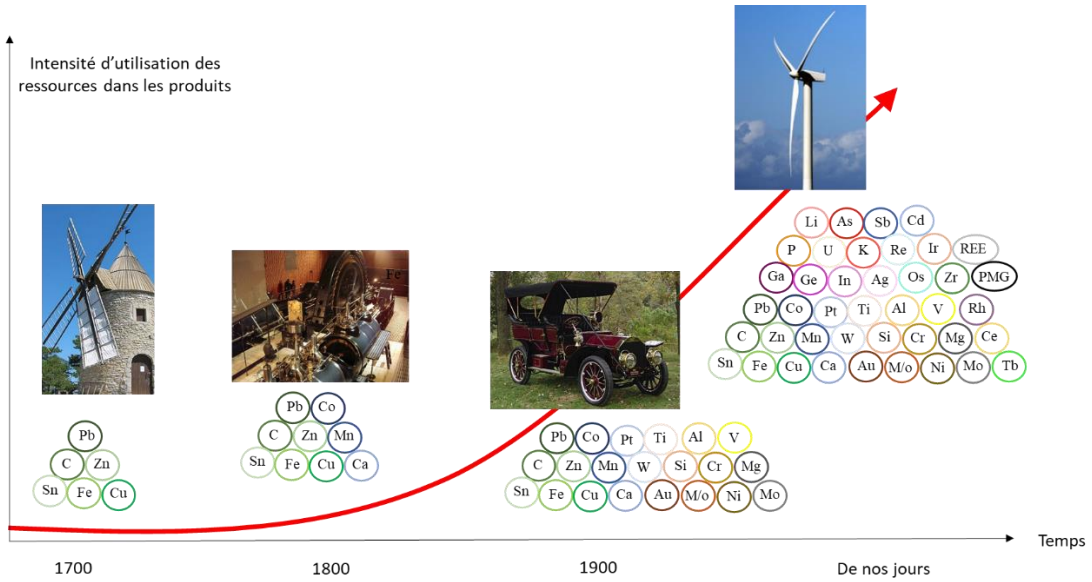


Figure 1. Augmentation de la complexité des assemblages métalliques dans les produits génériques (adapté de UNEP, 2013)[1]

Le développement de solutions technologiques, notamment pour satisfaire la transition énergétique et numérique, entraine également une exploitation accrue des ressources minérales nécessaires au fonctionnement de ces produits qui exposerait notre système économique aux risques d'une raréfaction des minéraux et, conséquemment, d'une augmentation sévère de leur prix. Par ailleurs, la présence très localisée de certains éléments dans la croûte terrestre, parfois dans des zones de grande instabilité géopolitique, peut également avoir un impact sur l'approvisionnement de ces matières.

Ainsi, à partir de 2005-2006 et suite à l'émergence rapide de la puissance chinoise en tant que premier producteur mondial de nombreuses ressources minérales, la Commission Européenne a développé l'initiative matières premières minérales (publiée en novembre 2008). L'Union européenne importe environ 20 à 30 % des matières premières minérales produites au monde mais ne produit, dans le meilleur des cas, que 5 ou 6 % de la production mondiale de matières premières minérales.

Cette initiative matières premières minérales vise à sécuriser les approvisionnements de l'Union dans des domaines où elle est extrêmement dépendante des importations. Elle repose sur trois piliers :

- La sécurisation de l'approvisionnement de l'Union européenne par un meilleur accès à nos propres ressources productives par l'amélioration des conditions d'accès aux ressources de son sous-sol.
- Le développement de règles de plus grande transparence et d'accès plus équitable sur les marchés internationaux.
- Le développement de l'économie circulaire, via le recyclage des produits, l'augmentation de leur durée de vie, la lutte contre l'obsolescence programmée, la substitution de certaines matières

[1] UNEP, 2013. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C. Disponible à l'adresse : https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8423/-Metal%20Recycling%20Opportunities%2c%20Limits%2c%20Infrastructure-2013Metal_recycling.pdf?sequence=3&isAllowed=y

premières particulièrement rares ou à forts enjeux géopolitiques par des matières premières d'usage plus courant, etc.

Cette prise de conscience de l'intérêt stratégique de certains métaux pour l'économie, associée au caractère fini des ressources, a conduit l'Union Européenne à mettre en place des méthodes pour évaluer la criticité des métaux. Est ainsi qualifié de critique un métal « dont la chaîne d'approvisionnement est menacée et pour lequel l'impact d'une restriction d'approvisionnement serait néfaste à l'économie d'un pays » (NRCNA, 2008 ; Barreau et al, 2013)[2].

En parallèle, la Commission Européenne a adopté en mars 2011, dans l'optique de favoriser l'économie circulaire, la définition des critères de sortie du statut de déchets en vue du recyclage des débris de fer, d'acier et d'aluminium et travaille sur d'autres règlements concernant le cuivre et les déchets organiques permettant de récupérer des éléments tels que le phosphore notamment (UE, 2011 ; Saveyn et Eder, 2014)[3].

La question de l'évaluation des ressources minérales comme indicateur d'impact en ACV a également été abordée par la communauté scientifique au cours des vingt dernières années avec de très riches contributions. Le caractère complexe de la notion de dommage sur les ressources a toutefois fait émerger une multitude d'indicateurs d'impacts reposant sur des principes et fondements différents rendant difficile parfois le choix et l'interprétation de ces indicateurs. Par ailleurs, ces derniers ne s'intéressent qu'aux aspects environnementaux et ne prennent souvent pas en compte les aspects de criticité évoqués ci-dessus (Petiot et al., 2013)[4].

Ce guide ne vise pas à proposer une nouvelle analyse critique des indicateurs de criticité ou d'impact ACV portant sur les ressources. De nombreuses études et articles de revues scientifiques ont déjà été proposés sur ce sujet et sont répertoriés dans la partie « Pour en savoir plus » du guide. Les lecteurs désireux d'approfondir le sujet pourront s'y référer.

Ce guide vise plutôt à aider les membres du réseau EcoSD à mieux prendre en compte le critère « ressources » dans leurs ACV et à mieux appréhender la notion de criticité des ressources.

Ce guide se donne donc quatre objectifs principaux :

- Proposer un ensemble de bonnes pratiques pour guider les praticiens ACV dans le choix et l'interprétation de leur résultat ACV en lien avec l'usage des ressources minérales,
- Présenter l'état des recherches sur les indicateurs d'impact « ressources » en ACV d'une part et sur les indicateurs de criticité d'autre part,
- Identifier les différents points de vigilance auxquels doivent faire face les praticiens ACV,
- Illustrer le propos à l'aide de cas d'application concrets mis en œuvre par les membres du réseau EcoSD.

[2] National Research Council of the National Academies (2008) "Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy." The National Economy Press, Washington, D.C., USA
Barreau B, Hossie G, Lutfalla S (2013) « Approvisionnements en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ? » Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Paris

[3] Règlement (UE) N°333/2011 du conseil du 31 mars 2011 établissant les critères permettant de déterminer à quel moment certains types de débris métalliques cessent d'être des déchets au sens de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil, 10 pages.
Saveyn, H. and P. Eder (2014). End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. JRC Scientific and Policy Reports, European Commission, 312 pages.

[4] Petiot et al., 2013. Indicateurs d'épuisement des ressources en analyse de cycle de vie. Rapport final étude SCORELCA 2012-02. 161 pages.

2. Quelles bonnes pratiques pour une meilleure prise en compte du critère « ressources minérales » dans les ACV ?

Afin d'aider les praticiens ACV vers une meilleure prise en compte du critère « ressources minérales » dans les ACV qu'ils sont amenés à réaliser, la démarche méthodologique proposée dans ce guide est présentée en Figure 2 sous la forme d'un arbre de décision.

L'arbre de décision est basé sur deux questions que doivent se poser les praticiens au moment de la réalisation de leur ACV :

- le praticien a-t'il une bonne connaissance de la problématique associée aux ressources minérales et à leur criticité en ACV ?
- le praticien dispose-t-il d'une méthodologie propre pour la prise en compte des ressources et de leur criticité en ACV ?

Si le praticien n'a pas une bonne connaissance de la problématique associée aux ressources minérales, une première recommandation consiste à lui faire prendre connaissance du contenu du présent guide. Pour cela, le praticien peut prendre connaissance de la problématique associée à la prise en compte des ressources en ACV dans le paragraphe « Comment est pris en compte le critère « ressources minérales » en Analyse du Cycle de Vie ? » et à celle associée à la criticité dans le paragraphe « Comment évaluer la criticité d'une ressource minérale ? Lien avec la méthode d'Analyse du Cycle de Vie ».

Si le praticien dispose d'une connaissance suffisante de la problématique associée aux ressources minérales, il lui est ensuite demandé s'il dispose ou non de sa propre démarche méthodologique. S'il n'a pas de démarche propre, il lui est proposé de suivre la démarche proposée en Figure 2. Par contre, s'il a sa propre démarche, la bonne pratique consistera à comparer sa démarche avec celle proposée par le guide afin d'identifier et discuter les points de divergence et de convergence entre les deux méthodes.

La méthode proposée dans le guide nécessite trois prérequis qui sont implémentés dans une étape 0 :

- Prérequis 1 : le praticien doit nécessairement vérifier que l'ensemble des procédés ayant potentiellement un impact sur les ressources soit pris en compte,
- Prérequis 2 : le praticien doit choisir les méthodes de caractérisation qu'il va utiliser par rapport aux objectifs de l'étude, à la durée de vie du système et au regard de l'inventaire des ressources minérales en fonction des méthodes de caractérisation et des objectifs de l'étude,
- Prérequis 3 : le praticien ne doit pas mettre en place de règles de cut-off.

Ces prérequis en tête, le praticien peut ensuite suivre la méthode en 5 étapes proposée dans le guide :

- Etape 1 : Réalisation d'une ACV screening. Cette étape consiste à réaliser une ACV de manière rapide et simplifiée en évaluant l'ordre de grandeur des contributions des différentes étapes du cycle de vie et des flux de ressources mobilisés et des principales contributions environnementales clés au regard de la méthode de caractérisation choisie. Elle permet de limiter le temps investi sur des points d'importance mineure.

- Etape 2 : Interprétation des résultats de l'ACV screening. L'interprétation de l'ACV screening doit se faire avec un triple objectif :
  - Déterminer les flux de ressources minérales à prendre en compte, notamment au regard de la liste des ressources considérées comme critiques (Etape 2.1),
  - Déterminer les procédés à prendre en compte (Etape 2.2),
  - Analyser les méthodes de caractérisation les plus pertinentes pour l'étude (Etape 2.3).

- Etape 3 : Réalisation de l'ACV selon les quatre étapes classiques de la norme
    - Etape 3.1 : Identification des objectifs et du champ de l'étude. En plus des éléments classiques que l'on retrouve lors cette étape (analyse de la fonction, choix de l'unité fonctionnelle, détermination des frontières du systèmes…), les bonnes pratiques associées à une meilleure prise en compte des ressources lors de ces étapes sont :
        - En lien avec l'étape 2.1., le praticien pourra réaliser une règle de cut-off basée sur la pertinence environnementale des flux de ressources minérales.
        - En lien avec l'étape 2.2., le praticien s'attachera à définir des scénarios contrastés présentant une sensibilité sur l'impact des ressources minérales.
        - En lien avec l'étape 2.3., le praticien devra choisir la méthode la plus pertinente au regard de l'objectif de l'étude et au problème évalué : perte de propriété utile des ressources minérales par l'approche thermodynamique, utilisation des ressources selon leur disponibilité ou selon leur stock, conséquences futures associées à l'extraction des ressources minérales.
        - Enfin, le praticien devra positionner l'objet d'étude par rapport à l'horizon temporel.
    - Etape 3.2 : Réalisation de l'inventaire et quantification des incertitudes sur les valeurs d'inventaires, notamment sur les ressources mobilisées.
    - Etape 3.3 : Evaluation des impacts sur les ressources en appliquant la(les) méthode(s) les plus pertinentes au regard des ressources à évaluer.
    - Etape 3.4 : Interprétation des résultats en réalisant des analyses de sensibilité au sein des méthodes choisies.

- Etape 4 : Discussion des résultats de l'ACV au regard des points de vigilances proposés dans le guide de bonnes pratiques :
    - Au regard du choix de la méthode de caractérisation,
    - Au regard du choix du logiciel de modélisation,
    - Au regard de la variabilité des données d'inventaires et des incertitudes associées à la modélisation et aux facteurs de caractérisation utilisés dans les méthodes de caractérisation.

- Etape 5 : Possibilité de compléter l'ACV réalisée avec d'autres indicateurs (de criticité, d'efficience des ressources par exemple).

Pour chaque étape de la démarche méthodologique proposée en Figure 2, des indications renvoient aux paragraphes présentés par la suite dans le guide.

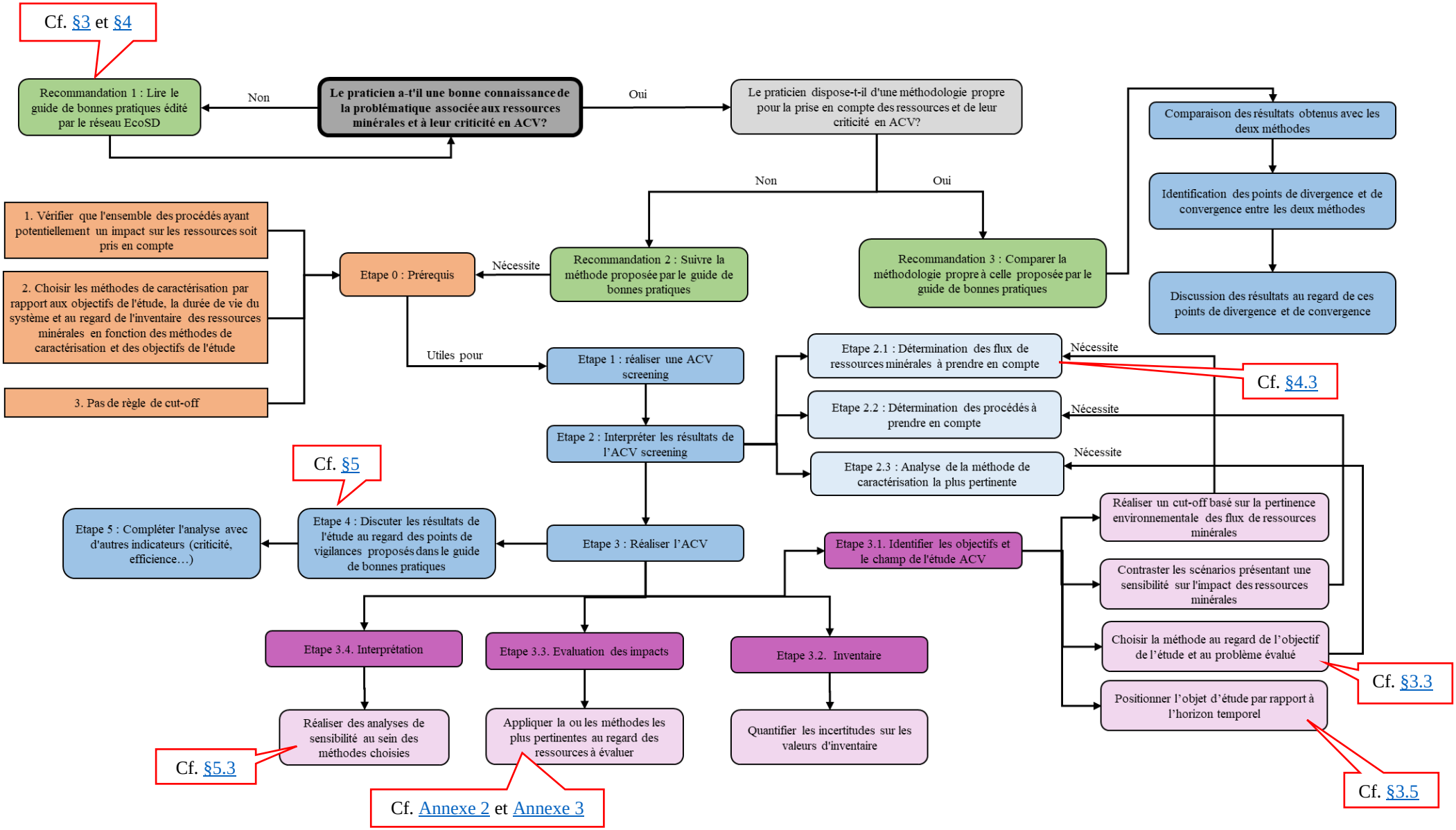


Figure 2. Arbre de décision pour la prise en compte du critère « ressources minérales » dans les ACV

3. Comment est pris en compte le critère « ressources minérales » en Analyse du Cycle de Vie ?

3.1. Problème de l'évaluation des ressources en ACV

Plusieurs méthodes de caractérisation permettent d'évaluer l'impact des ressources minérales en Analyse du Cycle de Vie. La diversité des méthodes disponibles est liée à la définition même du problème environnemental de l'usage des ressources en ACV et au manque de consensus sur la manière de le quantifier.

Le problème environnemental principal auquel l'humanité fait face est celui de la diminution des ressources pour pouvoir continuer à assurer le développement actuel et futur des sociétés. La quantification de cette diminution des ressources est étroitement liée à plusieurs éléments :

- La valeur accordée à la ressource
- La disponibilité de la ressource

3.1.1. Valeur accordée à la ressource

Selon Van Oers (2002) et Lindeijer et al. (2002)[5], l'environnement naturel peut avoir une valeur fonctionnelle et non fonctionnelle (i.e. intrinsèque). Cette distinction est également valable pour les ressources minérales.

La valeur intrinsèque peut être définie comme la valeur de la ressource en elle-même et pour elle-même, en considérant que, quel que soit son usage éventuel par l'homme, elle doit être préservée et que le seul fait de l'extraire détruit cette valeur intrinsèque.

La valeur fonctionnelle représente la fonction support de vie et peut être définie par les fonctions qu'apportent les ressources à l'homme. D'un point de vue fonctionnel, l'intérêt de l'humanité pour les ressources minérales n'est pas la ressource elle-même (valeur intrinsèque) mais le potentiel qu'elle a de remplir des fonctions pour contribuer au développement de l'humanité. La valeur fonctionnelle n'est détruite que lorsque la ressource est dissipée sous forme d'émission diffuse dans l'environnement par exemple.

3.1.2. Disponibilité de la ressource

La disponibilité de la ressource est déterminée à la fois quantitativement et qualitativement.

La disponibilité d'une ressource est associée aux quantités de réserves de gisements disponibles, qu'ils soient d'origine géologiques (gisements de minerais) ou anthropiques (mines urbaines) (Figure 3). Ainsi l'épuisement quantitatif d'une ressource peut être déterminé par la taille des réserves disponibles ou le taux d'extraction de la ressource en relation avec la taille des réserves disponibles.

La disponibilité d'une ressource est également associée à la qualité structurelle des stocks de ressources, i.e. la concentration en éléments de ces gisements. L'épuisement qualitatif de la ressource pourra être déterminé par le contenu exergétique de la ressource ou la concentration en minéraux des gisements.

La perte de disponibilité quantitative et qualitative de la ressource est une des composantes permettant de déterminer la rareté d'une ressource. Mais, au-delà des considérations environnementales

[5] Van Oers, L.; De Koning, A.; Guinée, J.B.; Huppes, G. Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA handbook. RWS-DWW: Delft, The Netherlands, 2002. Available online: http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/report_abiotic_depletion_web.pdf
E. Lindeijer, R. Mueller-Wenk, B. Steen, Impact assessment of resources and land use. [in]: U. de Haes et al. (eds.), Lifecycle impact assessment: striving towards best practice. SETAC, Pensacola, 2002.

d'extraction des ressources de gisements suffisamment concentrés et accessibles, la rareté de la ressource est également associée à des critères socio-économiques tels que des critères de marchés (loi de l'offre et de la demande, hausse des prix…) ou des critères géopolitiques (instabilité des pays producteurs, localisation de la production dans des pays à risques…) qui ne sont pour l'instant pas intégrés en ACV mais comme des éléments permettant d'évaluer la criticité d'une ressource.

3.2. Problème de la terminologie utilisée pour définir les ressources

Le problème de l'évaluation des ressources en ACV est aussi associé à un manque de cohérence dans la terminologie utilisée pour qualifier les ressources et les réserves entre les experts de l'exploitation minière et les experts ACV. L'Annexe 1 présente une synthèse des définitions des termes utilisés dans l'industrie minière et en ACV. Les termes sont présentés dans la langue originelle (anglais) et une traduction française est proposée. C'est cette traduction qui est reprise dans la Figure 3 ci-dessous, qui synthétise les termes choisis pour qualifier les ressources dans l'environnement et dans la technosphère et les liens qui les unissent.

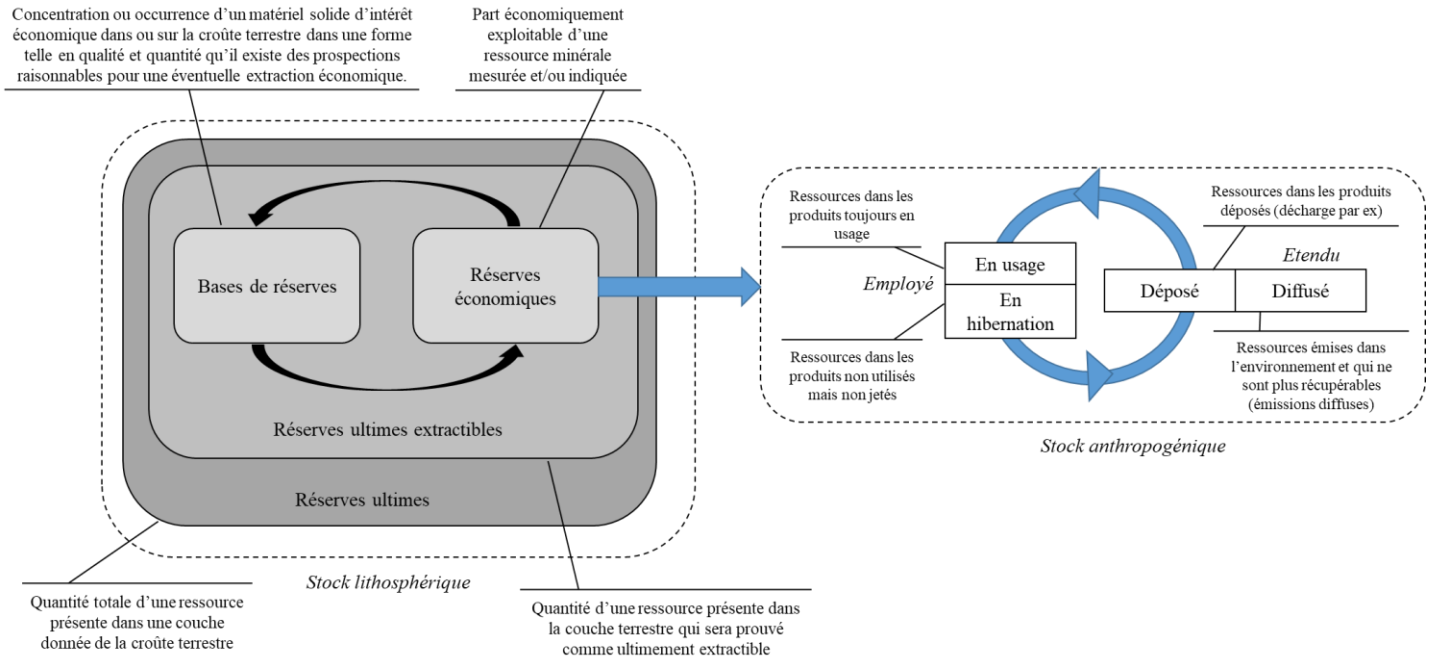


Figure 3. Réserves dans l'environnement et réserves anthropiques (adapté de Drielsma et al., 2016 et Schneider et al., 2011[6])

Les réserves économiques, constituant la part exploitable des ressources minérales, vont être utilisées pour la fabrication des produits de grande consommation et constituer ainsi le stock anthropogénique. Ce stock anthropogénique évolue en fonction de l'utilisation que font les consommateurs des produits. Les produits en usage ou en hibernation constituent une réserve de ressources minérales dites « mines urbaines ». Une fois que ces produits ne sont plus employés et qu'ils sont recyclés, ils vont pouvoir réalimenter le marché des matières premières et réduire ainsi les ressources puisées dans l'environnement. Par contre, dès lors que les ressources sont émises dans l'environnement sous forme diffuses, elles ne sont plus récupérables et la fonctionnalité des ressources est perdue.

[6] J. A. Drielsma, A. J. Russell-Vaccari, T. Drnek, T. Brady, P. Weihed, M. Mistry, and L. P. Simbor, "Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward," Int. J. Life Cycle Assess., vol. 21, no. 1, pp. 85–105, 2016.
Schneider, L., Berger, M., Finkbeiner, M. 2011. The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. Int J Life Cycle Assess 16:929–936

3.3. Typologie des méthodes de caractérisation des ressources en ACV

Une description des différentes méthodes de caractérisation utilisées en ACV est présentée en Annexe 2. Parmi ces méthodes, certaines d'entre elles permettent de caractériser les impacts de l'utilisation des ressources minérales, regroupées par le Joint Research Center (JRC) au sein de l'ILCD Handbook en trois catégories distinctes selon leur place dans la chaîne de cause à effet de l'épuisement des ressources naturelles (Figure 4). Un descriptif des ressources évaluées par les principales méthodes de caractérisation est présenté en Annexe 3.

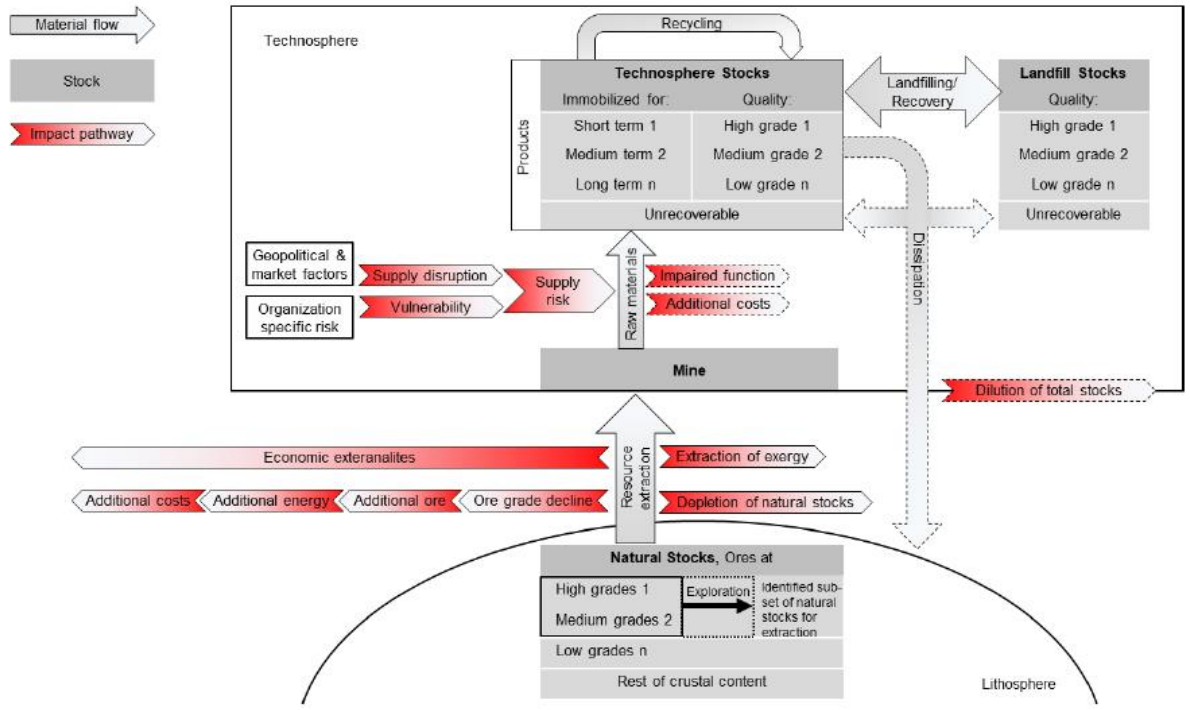


Figure 4. Chaîne de cause à effet permettant d'évaluer l'impact de l'usage des ressources en ACV (tiré de Berger et al., 2018)

Ces trois catégories[7] évaluent l'impact de l'usage des ressources en ACV selon trois types de modélisation :

- Une modélisation basée sur la **thermodynamique** mettant en avant l'exergie, l'émergie et l'entropie (méthodes de catégorie 1, relatif à « extraction of exergy » de la Figure 4)
- Une modélisation basée sur une quantification **physique des ressources** (méthodes de catégorie 2, relatif à « depletion of natural stocks » de la Figure 4)
- Une modélisation basée sur les **efforts futurs nécessaires** pour l'extraction des ressources résultant d'une dégradation de la qualité des gisements (méthodes de catégorie 4, relatif à « additionnal costs » de la Figure 4).

Une nouvelle catégorie a été proposée à l'issue des Pellston workshops organisés par l'UNEP/SETAC Life Cycle Initiative dans le cadre de la *flagship activity* "Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Methods". Cette catégorie porte sur le risque d'approvisionnement en matières premières (Berger et al., 2018)[8].

[7] La méthode de catégorie 3 ne porte que sur l'épuisement de la ressource « eau » et non sur les ressources minérales.
[8] Berger et al., 2018. Harmonizing the LCIA of mineral resource use. 13th Biennial International Conference on EcoBalance. October 9-12, 2018, Tokyo, Japan. Poster

3.3.1. Modélisation basée sur la thermodynamique (cat. 1)

Les méthodes de catégorie 1 sont définies par le JRC comme des méthodes dont les indicateurs visent à évaluer l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource.

Ces méthodes sont basées sur l'exergie comme unité de mesure de l'épuisement et de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques. L'exergie mesure l'énergie « utile » qui peut être extraite d'un réservoir ou d'un flux énergétique. L'énergie est dite « utile » si elle est entièrement transformable par un système idéal (c'est-à-dire sans pertes) en n'importe quelle autre forme d'énergie. L'exergie est une grandeur permettant donc de mesurer la qualité d'une énergie. En effet, plus la part « utile » de l'énergie est importante, plus cette énergie est de « haute qualité ».

Pour calculer l'énergie chimique des ressources E_{ch} (sur la base de leur exergie chimique), Finnveden et Östlund (1997)[9] utilisent la formule suivante : $E_{ch} = \sum n_i \ e_{ch,i}$ où n_i est la quantité de matière i (nombre de moles dans la substance) et $e_{ch,i}$ l'exergie chimique molaire de la substance i.

Les méthodes CexD et CEENE sont basées sur cette approche.

3.3.2. Modélisation basée sur la quantification physique des ressources (cat. 2)

Les méthodes de catégorie 2 sont définies par le JRC comme des méthodes dont les indicateurs visent à évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource.

La modélisation derrière ces méthodes repose sur le taux d'épuisement des ressources et consiste à estimer l'épuisement de la ressource par le calcul d'un ratio entre le taux d'extraction de la ressource et les réserves disponibles pour cette ressource. Ce type de modélisation est utilisé dans les méthodes CML-IA et Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential (AADP). La méthode EDIP 2003 se base uniquement sur les réserves. Les facteurs de caractérisation de ces méthodes varient selon le type de réserves étudié (ultimes, bases de réserves, économiques).

Exemple 1 : Indicateur « Abiotic Depletion Potential » - Méthode CML-IA

$$ADP_i = \frac{\frac{DR_i}{(R_i)^2}}{\frac{DR_{sb}}{(R_{sb})^2}}$$

ADP_i : Potentiel d'épuisement de la ressource i (sans unité)
R_i : réserve ultime de la ressource i (en kg)
DR_i : taux d'extraction de la ressource i
R_{sb} : réserve ultime d'une ressource de référence (ici l'antimoine)
DR_{sb} : taux d'extraction de la ressource de référence (ici l'antimoine)

3.3.3. Modélisation basée sur les efforts futurs nécessaires à l'extraction des ressources (cat. 4)

Les méthodes de catégorie 4 sont définies par le JRC comme des méthodes dont les indicateurs visent à évaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future.

Le type de modélisation de ces méthodes repose à la fois sur l'effort économique et énergétique fait pour extraire une ressource dans le futur. En effet, l'utilisation que nous faisons actuellement des ressources implique qu'à l'avenir les ressources seront plus rares et en concentration moindre. Des efforts plus

8 (suite) https://www.lifecycleinitiative.org/pellston-workshop-works-towards-volume-2-of-global-guidance-for-lcia-indicators/

9 Finnveden, G. and P. Ostlund, Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications. Energy, 1997. 22(9): p. 923-931.

importants seront nécessaires pour extraire la ressource en admettant que les mêmes technologies soient utilisées.

Deux types de modélisation sont effectués. Le premier type de modélisation est basé sur le surcoût engendré pour l'exploitation des ressources. Ce type de modélisation est utilisé par ReCiPe (catégorie endpoint) ou encore EPS2000 lors de l'étape de pondération des impacts. Cette dernière propose un indicateur « Abiotic stock resource » qui se base sur les quantités de réserves de minéraux disponibles mais dont l'étape de pondération se base sur le consentement à payer pour éviter les changements *(« willingness to pay (WTP) to restore impacts on the safeguard subjects, as measured amongst today's OECD inhabitants »)*[10].

Exemple 2 : Indicateur « Mineral depletion potential » - Méthode ReCiPe 2008

$$\sum_{t=1}^{T} MCI_{r,kg} * P_{r,t} * \frac{1}{(1+d)^t}$$

$MCI_{r,kg}$: augmentation marginale du coût d'extraction, en \$/kg^2
$P_{r,t}$: Consommation annuelle à l'année t, en kg
d : taux d'actualisation
T : nombre d'années considérées.

La méthode ReCiPe a été mise à jour en 2016 et propose un nouvel indicateur « Mineral resource scarcity » décliné au niveau midpoint et endpoint. L'indicateur midpoint est le « Surplus Ore Potential » (SOP). Le SOP exprime la quantité supplémentaire moyenne de minerai produit à l'avenir du fait de l'extraction de 1 kg d'une ressource minérale x, en considérant toute la production future (R) de cette ressource minérale par rapport à la quantité supplémentaire moyenne de minerai produite dans le futur en raison de l'extraction de 1 kg de cuivre (Cu), en tenant compte de toute la production future de cuivre.

Exemple 3 : Indicateur « Surplus Ore Potential » - Méthode ReCiPe 2016

$$SOP_{x,R} = \frac{ASOP_{x,R}}{ASOP_{Cu,R}} \qquad \text{Avec } ASOP_x = \frac{\int_{CME_x}^{MME_x} (\Delta OP_x) dME_x}{R_x}$$

où OP (kg de minerai) est le minerai produit pour une certaine quantité de ressources minérales x extraites ME_x (kg x), R_x (kg x) est la réserve réelle de la ressource minérale x, MME_x (kg x) est la quantité maximale pouvant être extraite de cette ressource minérale et CME_x est le tonnage cumulatif actuel de la ressource minérale x extraite.

Le second type de modélisation est basé sur le surcoût énergétique engendré pour l'exploitation de la ressource dans le futur. Ce point dans le futur est une hypothèse de travail, définie par les auteurs de la méthode comme étant le moment où la quantité extraite cumulée de la ressource i aura atteint 5 fois la quantité extraite cumulée avant 1990. Ce type de modélisation est utilisée par la méthode Ecoindicator99 (EI99) et Impact2002+ (FC EI99 ressource i / FC EI99 Fe).

Exemple 4 : Indicateur « Resources, Minerals » - Méthode EcoIndicator99

$$\Delta E_i = E_{future\ i} - E_{actuelle\ i}$$

ΔE_i : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i
$E_{actuelle\ i}$: Énergie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement
$E_{future\ i}$: Énergie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir

[10] Steen, B., 1999. A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics CPM report Chalmers University of Technology Sweden.

3.4. Evolutions actuelles des méthodes de caractérisation des ressources en ACV

La manière de prendre en compte l'impact de l'utilisation des ressources en ACV reste un sujet fortement débattu par la communauté scientifique. Une des principales critiques des méthodes de caractérisation est liée au concept d'épuisement physique de la ressource. La plupart des méthodes de caractérisation actuelles considèrent en effet qu'une fois la ressource extraite de la couche terrestre, elle est considérée comme épuisée. Or, cette ressource reste dans le stock anthropogénique pour une durée plus ou moins longue si elle est recyclée et/ou réutilisée. La ressource n'est alors considérée comme vraiment épuisée qu'au moment où elle est dissipée dans l'environnement (Figure 3).

La prise en compte de la dissipation comme un indicateur de l'épuisement des ressources est au cœur des derniers développements méthodologiques en ACV. Certains auteurs se sont penchés sur la prise en compte des ressources dans les stocks anthropogéniques pour améliorer les méthodes existantes (cas de la méthode AADP). D'autres se sont penchés sur la compétition due à l'épuisement des fonctionnalités des ressources minérales en considérant : i) la fonctionnalité des ressources, ii) l'intégration de la distinction entre ressource extraite et ressource dissipée et iii) la compétition entre utilisateurs due à l'épuisement des ressources (cas de la méthode IMPACT World+).

3.4.1. Méthode AADP (Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential)

La méthode AADP (Schneider et al., 2011)[11] adapte la méthode CML-IA en considérant les ressources présentes dans les stocks anthropiques. Le stock anthropogénique est calculé en comptabilisant les taux d'extraction annuelle de chaque ressource depuis 1900. L'hypothèse est faite que le stock anthropogénique dissolu, c'est-à-dire dont la fonction est perdue car dissipée dans l'environnement, est négligeable. Cette hypothèse est basée sur le fait qu'une étude de données MFA a montré que le stock dissipé du cuivre représentait moins de 1% du stock anthropogénique total du cuivre.

Basé sur le modèle de l'indicateur Abiotic Depletion Potential de CML-IA, le calcul des facteurs de caractérisation est basé sur le calcul suivant :

$$\mathrm{AADP}_{\mathrm{i,resources}} = \frac{\text{extraction rate i}}{(\text{resources i} + \text{anthropogenic stock i})^2} * \frac{(\text{resources antimony} + \text{anthropogenic stock i})^2}{\text{extraction rate antimony}}$$

Dans ce calcul, les réserves ultimes sont remplacées par les « ressources » et les stocks anthropiques de ces ressources. Schneider et al. (2011) définissent les « ressources » comme « *the amount of mineral in such concentrated form that economic extraction is currently or potentially feasible* », ce qui correspond à la définition des bases de réserve (Annexe 1).

La prise en compte des stocks anthropogéniques tend à une meilleure prise en compte non seulement du recyclage mais aussi de la réutilisation et/ou la substitution des ressources. La difficulté de cette méthode réside toutefois dans la manière de mesurer ces stocks anthropogéniques pour chaque ressource.

[11] Schneider, L., M. Berger and M. Finkbeiner (2011). "The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources." International Journal of Life Cycle Assessment 16(9): 929-936.

3.4.2. Méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019)[12]

Pour le calcul de l'impact de l'utilisation des ressources minérales, IMPACT World+ utilise le MACSI (Material Competition Scarcity Index) comme indicateur midpoint (de Bruille, 2014)[13]. Ce facteur représente la fraction de matériel répondant aux besoins des futurs utilisateurs qui ne sont pas capables de s'adapter à une dissipation complète des stocks aisément disponibles. Il est exprimé en termes de kg de ressource dont l'utilisateur est privé par kg de ressource dissipée. Le MACSI est calculé de deux manières selon que les ressources sont monofonctionnelles ou multifonctionnelles.

Calcul du MACSI pour les ressources monofonctionnelles :

$$MACSI = \left(\sqrt{1 - 2 \cdot \left(\frac{sDi + \gamma}{t_{adapt}} \right)} + \frac{t_{start}}{t_{adapt}} \right) \cdot 100\%$$

Avec :

t_{start}	Moment when users start to adapt
t_{adapt}	Adaptation time (years)
sDi	Static depletion index : $\frac{WRB}{WDR}$ with WRB : Worldwide reserve base, WDR: Worldwide dissipation rate (calculated as Worldwide production rate (WPR) – Worldwide recycling rate (WRR)
γ	Calculated as $t_0 - \frac{t_{start}^2}{2 \cdot t_{adapt}}$ where t_0 is present time

Calcul du MACSI pour les ressources multifonctionnelles :

$$MACSI = \sum_1 a_i \cdot \left(1 - \frac{dDI - t_{start}}{t_{adapt,i}} \right) \cdot 100\%$$

Avec :

dDI	Dynamic depletion index. Calculated as $\left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \left(\frac{sDi+\gamma}{t_{adapt}} \right)} \right)$
t_{start}	Moment when users start to adapt
$t_{adapt,i}$	Respective adaptation time of resource i
a_i	Current end-use % of each function fulfilled by the resource i

Un facteur d'effet spécifique à la fonctionnalité peut être ensuite appliqué, donnant le prix d'adaptation nécessaire pour remplir le besoin des utilisateurs non adaptés utilisant une technologie back-up ($/kg de ressource dont l'utilisateur est privé), afin d'obtenir le facteur de caractérisation de l'impact.

[12] Bulle, C., M. Margni, L. Patouillard, A.-M. Boulay, G. Bourgault, V. De Bruille, V. Cao, M. Hauschild, A. Henderson, S. Humbert, S. Kashef-Haghighi, A. Kounina, A. Laurent, A. Levasseur, G. Liard, R. K. Rosenbaum, P.-O. Roy, S. Shaked, P. Fantke and O. Jolliet (2019). "IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method." The International Journal of Life Cycle Assessment. Published online: 6 February 2019.

[13] De Bruille, V., (2014). "Impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte cycle de vie : une approche fonctionnelle. " PhD Thesis, Université de Montréal, 145 pages.

3.5. Préconisations actuelles à destination des praticiens de l'ACV

3.5.1. Préconisations de l'Union Européenne

En 2011, suite au travail d'évaluation des méthodes de caractérisation des impacts en ACV, le JRC a proposé un ensemble de recommandations pour le choix des indicateurs d'impact à privilégier en fonction des catégories et du niveau de maturité des méthodes.

Ainsi, bien que le JRC considère la méthode basée sur l'exergie (catégorie 1) comme la meilleure, il ne la recommande pas car elle ne permet pas de traduire la rareté de la ressource. Pour la catégorie 2, le JRC recommande l'utilisation des facteurs de caractérisation de la méthode CML-IA calculés sur les bases de réserves car elles permettent de refléter un horizon temporel suffisamment long tout en tenant compte des améliorations technologiques possibles pour l'extraction des ressources minières. Toutefois, la recommandation est de niveau 2[14] car la méthode nécessite des améliorations. Le JRC recommande également de réaliser une analyse de sensibilité sur le choix du type de réserves utilisées (réserves ultimes et réserves économiques). Pour la catégorie 4, la méthode ReCiPe est celle représentant le mieux la catégorie. Elle présente des indicateurs identifiés comme prometteur au sein de sa catégorie d'impact mais n'est pas suffisamment développée pour pouvoir être recommandée par le JRC (niveau intérim).

Ces recommandations du JRC ne prennent cependant pas en compte les derniers développements méthodologiques initiés depuis 2011. Dans le cadre de la *flagship activity* "Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Methods" de l'UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, un groupe de travail a rendu des recommandations relatives au choix des méthodes d'impacts en fonction d'un ensemble de questions portant sur l'utilisation des ressources minérales (Berger et al., 2018). Deux groupes de questions ont été identifiées ainsi que les méthodes disponibles et celles recommandées par le groupe de travail (Figure 5).

How can I quantify the…

…changing opportunities of future generations to use resources due to a current resource use? (inside-out)					…potential resource availability issues for a product system? (outside-in)	
…contribution of a product system to the depletion of resources?	…contribution of a product system to changing re-source quality?	…consequences of the contribution of a product system due to changing resource quality?	…(economic) externalities of resource use?	…mineral resource use based on thermo-dynamics?	…potential resource availability issues for a product system related to mid-term physico-economic resource scarcity?	…potential resource availability issues for a product system related to short-term geopolitcal and socio-economic aspects?
$ADP_{ultimate\ reserves}$	Ore grade decline	Ore requirement ind.	Future wellfare loss	Solar energy demand	$ADP_{reserve\ base}$	Economic scarcity pot.
$ADP_{reserve\ base}$		**Surplus ore potential**	**LIME2 (endpoint)**	CExD	**$ADP_{economic\ reserves}$**	**ESSENZ**
$ADP_{economic\ reserves}$		Surplus cost potential		**CEENE**	Ecoscarcity	**GeoPolRisk**
Ecoscarcity		Eco-indicator 99		Thermodynamic rarity	EDIP	
EDIP		Impact2002+			LIME2 (midpoint)	
LIME2 (midpoint)		Stepwise2006			AADP	
AADP		ReCiPe2008				
		EPS, TR (ERC)				*Interim recommended*
Recomended		*Interim recommended*	*Interim recommended*	*Interim recommended*	*Suggested*	*Suggested*

Figure 5. Questions relatives aux impacts de l'usage des ressources minérales, les méthodes appropriées, recommandées (en gras) et le niveau de recommandation (en italique) (tiré de Berger et al., 2018)

[14] Le JRC propose des niveaux de recommandations pour les méthodes de caractérisation. Le « Niveau II: recommandé, certaines améliorations sont nécessaires » est défini de la manière suivante : « Les modèles et les facteurs de caractérisation sont recommandés pour tous les types d'aide à la décision basée sur le cycle de vie. L'incertitude des modèles et des facteurs de caractérisation résultants doit être davantage mise en évidence. L'impact sur les résultats et l'interprétation doit être évalué avec plus de soin, notamment dans les comparaisons publiées. Nous avons identifié la nécessité de mener des recherches spécifiques sur ces méthodes / facteurs afin de les améliorer davantage en termes de précision, de différenciation, de couverture des flux élémentaires, etc. »
Le niveau « Intérimaire: immature pour recommandation mais la plus appropriée parmi les approches existantes » est défini de la manière suivante : « Les méthodes et les facteurs de caractérisation définis comme intermédiaires ne doivent être utilisés qu'avec une extrême prudence et limités aux applications internes, compte tenu de l'incertitude considérable, de l'incomplétude et / ou d'autres faiblesses des méthodes et des facteurs. »

Le premier groupe de questions se concentre sur comment l'usage des ressources d'un système de production peut affecter les chances des générations futures (« inside-out »). Le second groupe de questions se concentre sur comment l'environnement ou la société peut affecter un système de production (« outside-in »).

3.5.2. Préconisations de l'industrie minière

Suite à 4 années de discussion dans le cadre des workshops organisés dans le cadre du projet MMSD (Mining, Metals and Sustainable Development), les experts participant à ce projet ont produit un rapport final pouvant être une référence précieuse pour les praticiens ACV souhaitant évaluer les impacts environnementaux de l'utilisation des ressources minérales (IIED, 2002)[15]. Ce travail, synthétisé par Drielsma et al. (2016), propose notamment un certain nombre de recommandations.

Selon leur point de vue, le stock fixe (i.e. le contenu crustal) est la seule mesure d'estimation des ressources minérales convenant à la logique de construction de l'ACV telle que normée par l'ISO14040. L'usage du stock fixe est à la fois cohérent avec le principe de l'ACV et les connaissances relatives à la présence des minéraux dans la nature. Cependant, la mesure des coûts d'opportunités tels que les bases de réserves ou les réserves économiques, les prix et les coûts de production sont plus applicables si l'on souhaite comprendre la demande et la disponibilité des ressources minérales et prendre des décisions à une échelle de temps assez courte. Ces outils ont été développés par des économistes des ressources et des géologues mais intéressent de plus en plus la communauté ACV pour le développement d'une aire de protection relative aux ressources du fait de la montée en puissance du concept de criticité (voir chapitre suivant).

L'industrie minière recommande donc de choisir l'outil le plus approprié en considérant l'échelle de temps à laquelle on désire comprendre les impacts d'un système de produit ou les risques pour le système de produit (Tableau 1).

Tableau 1. Outils d'évaluation de l'épuisement et de la disponibilité des ressources selon l'échelle de temps considérée

Echelle temporelle	Objectifs pour le décideur	Outils utilisés
1 à 3 ans	Connaître l'impact environnemental des matériaux sélectionnés pour la fabrication des produits	Couplage de rapports analytiques avec des résultats ACV
10 à 20 ans	Connaître la disponibilité des ressources pour les produits	Pour des décisions organisationnelles : modèle ESP ; pour des décisions régionales ou politiques : évaluation de la criticité
30 à 100 ans	Réaliser une analyse individuelle des matériaux contenus dans les produits	Courbes de disponibilité cumulative
300 ans et +	Evaluer les impacts de l'épuisement potentiel d'un stock fixe sur le très long terme	Abiotic Depletion Potential utilisant les réserves ultimes (basées sur le contenu crustal) mais outil non adapté pour un décideur
Toute échelle confondue	Comprendre les échelles temporelles pertinentes pour une ressource donnée ou un système de produit donné	Usage de chacun des outils ci-dessus

[15] IIED, 2002. Breaking new ground: the report of the Mining, Minerals, and Sustainable Development project. Earthscan Publications Ltd, London, 450 pages. Available at: http://pubs.iied.org/9084IIED/

3.5.3. Préconisations pour l'affichage environnemental

Enfin, dans le cadre d'une étude de 2012 sur les indicateurs d'épuisement des ressources en ACV, ScoreLCA recommandait de réaliser les études ACV destinées à fournir un support de communication (FDES, Affichage environnemental, …) s'inscrivant dans le cadre d'un programme de déclaration environnemental de type III (ISO 14025) en conformité avec un référentiel (ou Product Category Rules) qui indique de façon détaillée la méthodologie à mettre en œuvre (Petiot et al., 2013).

En ce qui concerne l'évaluation de l'épuisement des ressources dans ce type d'étude, il convient selon ScoreLCA de respecter les exigences du référentiel en ce qui concerne :

- la méthode de prise en compte du recyclage (qui peut avoir une influence forte sur les résultats),
- les indicateurs d'impact à utiliser.

Ce respect du référentiel garantit ensuite que tous les produits faisant l'objet d'une déclaration environnementale sont évalués sur une même base. Les indicateurs d'épuisement des ressources exigés dans les référentiels les plus courants sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Indicateurs d'épuisement des ressources exigés dans les principaux référentiels (Product Category Rules) concernant les déclarations environnementales sur les produits (tiré de Petiot et al., 2013)

Référentiel	Type de produits/Secteur	Couverture Géographique	Indicateur(s) ressources à utiliser	Commentaires
Affichage Environnemental BPX30-323	Produits de grande consommation	France	EDIP97 (mise à jour 2004)	Un alignement futur du référentiel sur les recommandations JRC est probable. Ainsi, l'indicateur EDIP sera probablement remplacé par l'indicateur ADP de CML.
Product Environmental Footprint	Produits de grande consommation	Europe	-	Pas d'indicateur exigé
FDES NFP01-010 (2004)	Construction	France	CML- ADP	La norme distingue les ressources non-épuisables des ressources non-renouvelables. Les ressources sont considérées comme non-épuisables lorsque leur facteur de caractérisation est strictement inférieur à celui du charbon.
			CED (par type de ressource et par usage)	Des indicateurs distincts sont calculés par type de ressources (non-renouvelables et renouvelables) et par usage (matière ou énergie). Les indicateurs sont basés sur le Pouvoir Calorifique Inférieur des ressources
NF EN 15804 (2012)	Construction	Europe	CML-ADPelements et CML-ADP fossil fuels	L'utilisation de ces indicateurs pourra être revue en fonction des travaux en cours sur les indicateurs d'épuisement des ressources.
			CED (par type de ressource et par usage)	Des indicateurs distincts sont calculés par type de ressources (non-renouvelables et renouvelables) et par usage (matière ou énergie). Les indicateurs sont basés sur le Pouvoir Calorifique Inférieur des ressources.
PEP Ecopassport	Produits électriques, électroniques et de génie climatique	International	RMD[32]	Il s'agit d'un indicateur optionnel du programme.
EPD (Environdec)	Tous types de produits ou services	International	Masse	La programme préconise de réaliser le bilan massique et énergétique des ressources utilisées (en masse uniquement pour les ressources sans contenu énergétique, en énergie uniquement pour les flux élémentaires énergétiques, en énergie et en masse pour les ressources avec contenu énergétique).
			CED	

4. Comment évaluer la criticité d'une ressource minérale ? Lien avec la méthode d'Analyse du Cycle de Vie

4.1. Problème de l'évaluation de la criticité des ressources

Il n'existe pas de définition harmonisée et normée de la notion de criticité (Mancini et al., 2018)[16]. La criticité des ressources peut être définie comme la vulnérabilité d'un consommateur donné vis-à-vis de la perturbation ou de l'interruption des approvisionnements en une ressource, en considérant l'importance de ce matériau et les conséquences possibles d'une chute des approvisionnements, ainsi que la probabilité d'une telle pénurie (aussi appelé risque d'approvisionnement) (Frenzel et al., 2017)[17].

La notion de criticité est un concept assez récent. Représentée initialement comme une simple matrice, la criticité fait l'objet depuis environ 5 ans d'un réel intérêt car en lien direct avec l'économie circulaire et la transition énergétique. L'Union Européenne s'est intéressée à la notion de criticité des matériaux suite à l'affaire des « terres rares » chinoises. La limitation des exportations a entrainé une crise majeure sur les ressources pour l'Europe, les États-Unis et le Japon notamment (Mancini et al., 2015 ; Thouverez, 2018)[18].

En effet, la perspective d'une baisse en approvisionnement des marchés mondiaux en terres rares de la part de la Chine qui extrait 95% de ces ressources (cf. Tableau 3) a fait prendre conscience d'une part de la rareté de certains métaux et d'autre part des potentiels risques d'approvisionnement de ces ressources d'intérêt stratégique pour l'Union Européenne. La notion de criticité se penche donc plus sur des problèmes anthropiques (risque d'approvisionnement, importance stratégique) que des problèmes physiques et environnementaux (épuisement des gisements).

L'approche qui fait consensus dans l'évaluation de la criticité repose sur la prise en compte de 2 grandes dimensions, chacune composée de sous-indicateurs : le risque d'approvisionnement et la vulnérabilité (Figure 6).

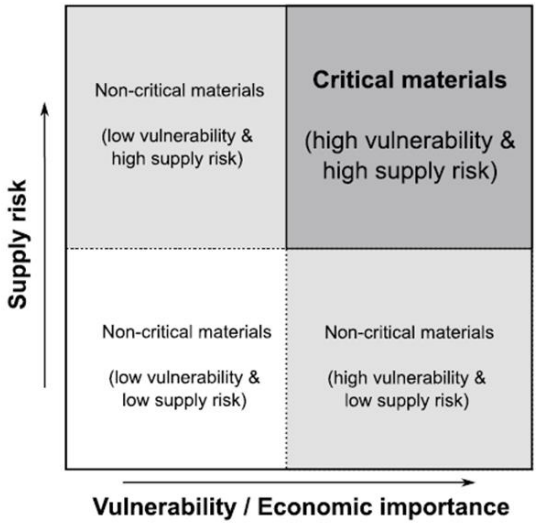


Figure 6. Risque d'approvisionnement en fonction de la vulnérabilité

[16] Mancini, L., L. Benini, and S. Sala, Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe. International Journal of Life Cycle Assessment, 2018. 23(3): p. 726-738.

[17] Frenzel, M., et al., *Raw material 'criticality'-sense or nonsense?* Journal of Physics D-Applied Physics, 2017. **50**(12).

[18] Thouverez, P. *La Chine, un quasi-monopole sur la production de terres rares*. 2018; Available from: https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/chine-monopole-production-terres-rares-51380/?utm_campaign=72-WQ-YYRACTU.

Mancini, L., Sala, S., Recchioni, M., Benini, L., Goralczyk, M., Pennington, D., Potential of life cycle assessment for supporting the management pf critical raw materials. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015. 20: p. 100-116.

Issus directement du concept de matrice de criticité, les éléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité sont les suivants (Figure 7) :

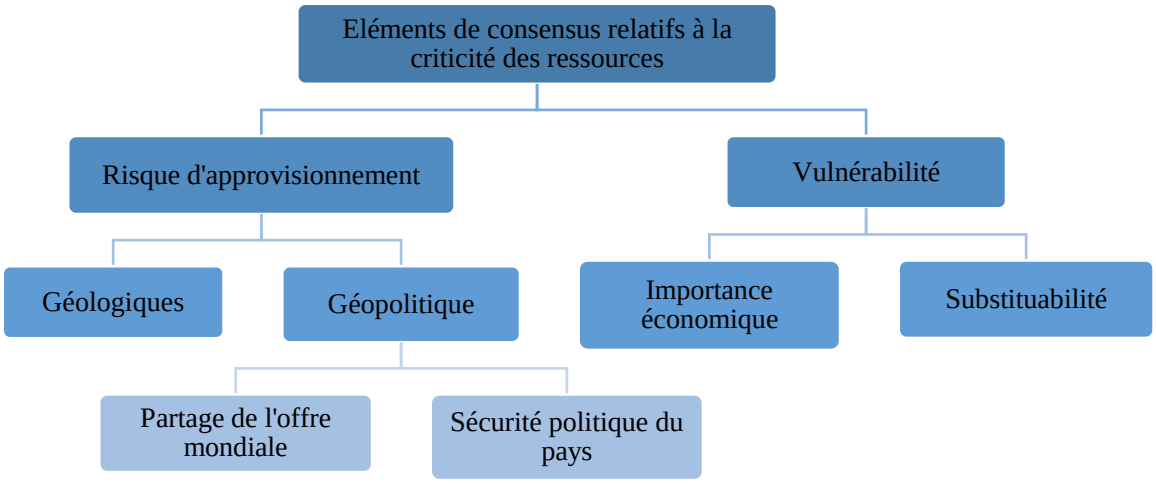


Figure 7. Eléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité (Habib and Wenzel, 2016) [19]

Le risque d'approvisionnement permet d'évaluer le risque de perturbation ou d'interruption dans la fourniture d'un matériau. Le risque d'approvisionnement géologique permet de mesurer la disponibilité d'un matériau. Le calcul est le plus souvent donné comme étant le ratio entre la réserve considérée (qui peut reposer sur des réserves différentes : économiques, base de réserves, ultimes…) et sa consommation annuelle. Le résultat est donné sous forme de « durée de vie » ou « durée avant épuisement » de la ressource en question. Le risque d'approvisionnement géopolitique traite des obstacles pouvant empêcher un approvisionnement « normal » en un matériau et prend en compte l'offre offerte par les pays fournisseurs mais également les politiques de ces pays afin d'évaluer leur stabilité.
Ce risque géopolitique est évalué à l'aide de 2 sous-indicateurs : le partage de l'offre mondiale (« Global Supply Share ») et la sécurité politique du pays (« Worldwide Governance Indicator »).
Le premier représente le degré de « monopole » que peut avoir une nation sur une ressource. Il est évalué à l'aide de l'indicateur « Herfindahl Hirschman Index » (HHI), qui permet de montrer le risque d'approvisionnement d'un ou plusieurs pays contrôlant l'offre mondiale pour un matériau donné. Un score élevé montre une offre qui est concentrée donc un risque d'autant plus grand.
Le second permet d'évaluer si le pays producteur est par exemple assujetti aux conflits. Beaucoup d'études préconisent le WGI afin d'évaluer le risque d'approvisionnement lié à des pays politiquement instables. Cet indicateur est fourni par la Banque Mondiale et est agrégé sur la base d'un ensemble de 6 sous-indicateurs comme la stabilité politique et l'absence de violence, la voix citoyenne et la responsabilité, l'efficacité des pouvoirs publics…

La vulnérabilité évalue l'importance qu'ont les différentes ressources pour un pays, une région, voire un secteur d'activités. Elle est basée sur deux sous-indicateurs : l'importance économique et la substituabilité. Le premier permet d'évaluer l'impact d'un déficit potentiel d'une ressource donnée sur le revenu global de l'entreprise ou sur le produit intérieur brut (PIB) d'un pays (ou d'une région) tandis que le second correspond à la capacité d'une ressource à être remplacée par une autre. Si une ressource est facilement substituable (score élevé), cela réduit la vulnérabilité de la ressource.

Toutefois, en fonction des auteurs, la définition de la criticité peut être ou non enrichie avec d'autres composantes. Il existe ainsi beaucoup de variantes et de discussions liées à la construction d'un indicateur de criticité.

[19] Habib, K. and H. Wenzel, Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines. Journal of Cleaner Production, 2016. **112**: p. 3852-3863.

4.2. Méthodes d'évaluation de la criticité des ressources

Deux méthodes ont été construites pour évaluer la criticité des matières premières.

La première méthode est une méthode américaine développée par Thomas Graedel et collaborateurs de l'Université de Yale (Graedel et al., 2012). Cette méthode évalue la criticité des matières premières au regard de trois composantes principales : la vulnérabilité aux restrictions d'approvisionnement, le risque d'approvisionnement et les implications environnementales (Figure 8). Cette dernière composante est basée sur un indicateur établi à partir des résultats ACV obtenus avec la méthode endpoint ReCiPe 2008. Cet indicateur unique est déterminé en agrégeant les catégories dommages Ecosystèmes et Santé humaine en utilisant la normalisation « World » et la pondération « Hierarchist »[20]. Ces ACV ont été réalisées à partir des ICV de la base de données ecoinvent 2.2. La méthode de Graedel ne s'intéresse qu'aux métaux mais pourrait être adaptée à d'autres ressources abiotiques.

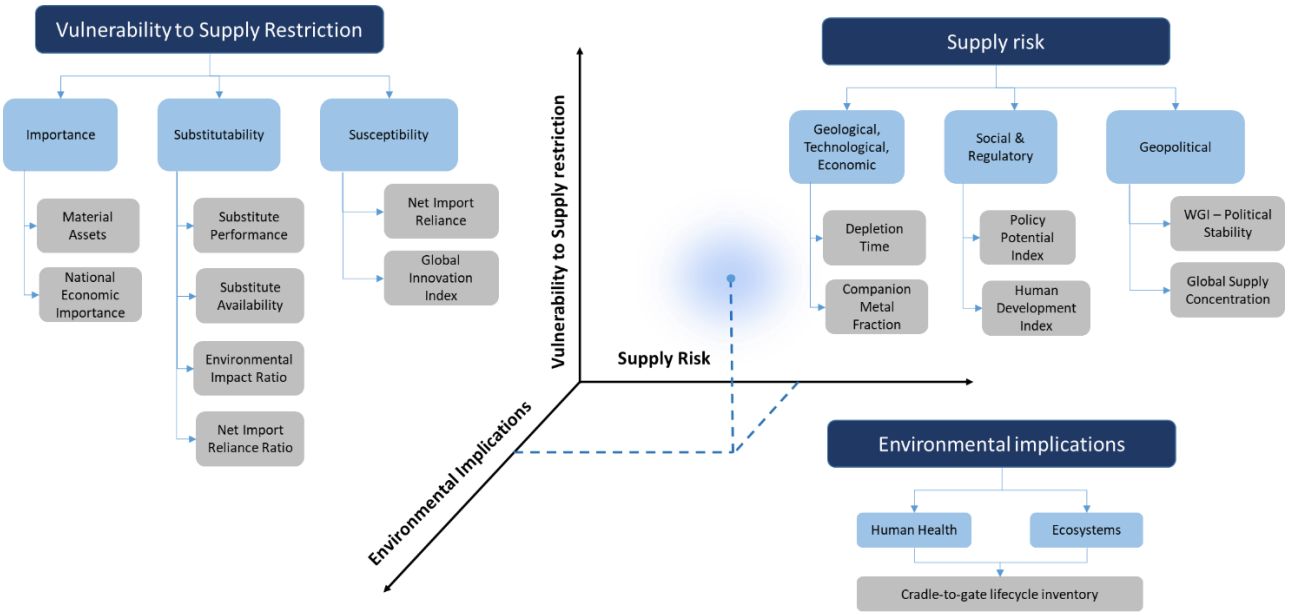


Figure 8. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par Graedel et al. (2012, 2015)[21]

La seconde méthode a été développée par la Direction générale du Joint Research Centre (JRC) de la Commission Européenne en étroite collaboration avec la Direction générale du Marché Interne, de l'Industrie, de l'Entreprenariat et des PMEs (GROW). Cette méthode a été révisée en 2017 et permet de mettre à jour la liste des matières premières critiques établies précédemment en 2011 et 2014[22].

[20] La perspective hiérarchique repose sur un consensus scientifique concernant l'échelle temporelle et la plausibilité des mécanismes d'impact.

[21] Graedel, T. E., et al. (2012). Methodology of Metal Criticality Determination. Environmental Science & Technology **46**(2): 1063-1070.
Graedel, T. E., E. M. Harper, N. T. Nassar, P. Nuss & B. K. Reck (2015) Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112, 4257-4262.

[22] Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., Vidal-Legaz, B., Latunussa, C.E.L., Kayam, Y., Talens Peirò, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves-Dias, P., Pavel, C., Tzimas, E., Mathieux, F., Pennington, D. and Ciupagea, C. Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials, Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2017, 978-92-79-69611-4, doi:10.2760/130462, JRC106997

Cette méthode évalue la criticité des matières premières au regard de deux composantes principales : l'importance économique des matières premières pour l'UE et le risque d'approvisionnement (Figure 9).

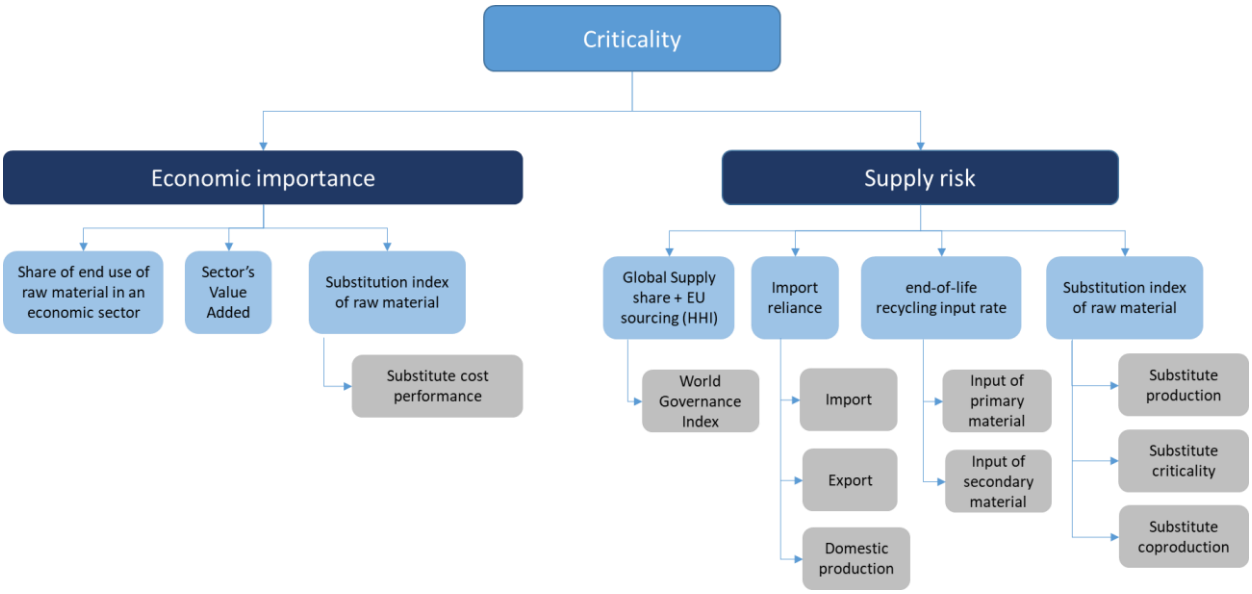


Figure 9. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par la Commission Européenne (European commission, 2017 ; Blengini et al., 2017)[23]

L'établissement de cette liste par la Commission Européenne a pour objectif :

- de renforcer la compétitivité de l'industrie européenne conformément à la stratégie industrielle renouvelée pour l'Europe,
- de stimuler la production de matières premières critiques en renforçant les nouvelles activités d'extraction et de recyclage dans l'UE,
- d'encourager l'utilisation efficace et le recyclage des matières premières critiques, un domaine prioritaire du plan d'action de l'UE en faveur de l'économie circulaire,
- de sensibiliser davantage les pays de l'UE, les entreprises et les investisseurs aux risques potentiels d'approvisionnement en matières premières et aux opportunités associées,
- de négocier des accords commerciaux, contester les mesures de distorsion des échanges, développer des actions de recherche et d'innovation et mettre en œuvre le « Programme pour le développement durable à l'horizon 2030 et ses objectifs de développement durable ».

4.3. Liste des matériaux considérés comme critiques selon les méthodes appliquées

Afin de déterminer les matières premières critiques, la méthode de la Commission Européenne ne considère comme critiques que les matières dépassant à la fois le seuil déterminé pour le critère « Importance économique » (i.e. valeur supérieure ou égale à 2.8) et celui déterminé pour le critère « Risque d'approvisionnement » (i.e. valeur supérieure ou égale à 1).

La Figure 10 montre ainsi la répartition des matières premières critiques (points rouges) et celles qui ne sont pas critiques (points bleus).

[23] European commission, 2017. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials – Guidelines. 30 pages
Blengini, G. A., et al. (2017). "EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements." Resources Policy **53**: 12-19.

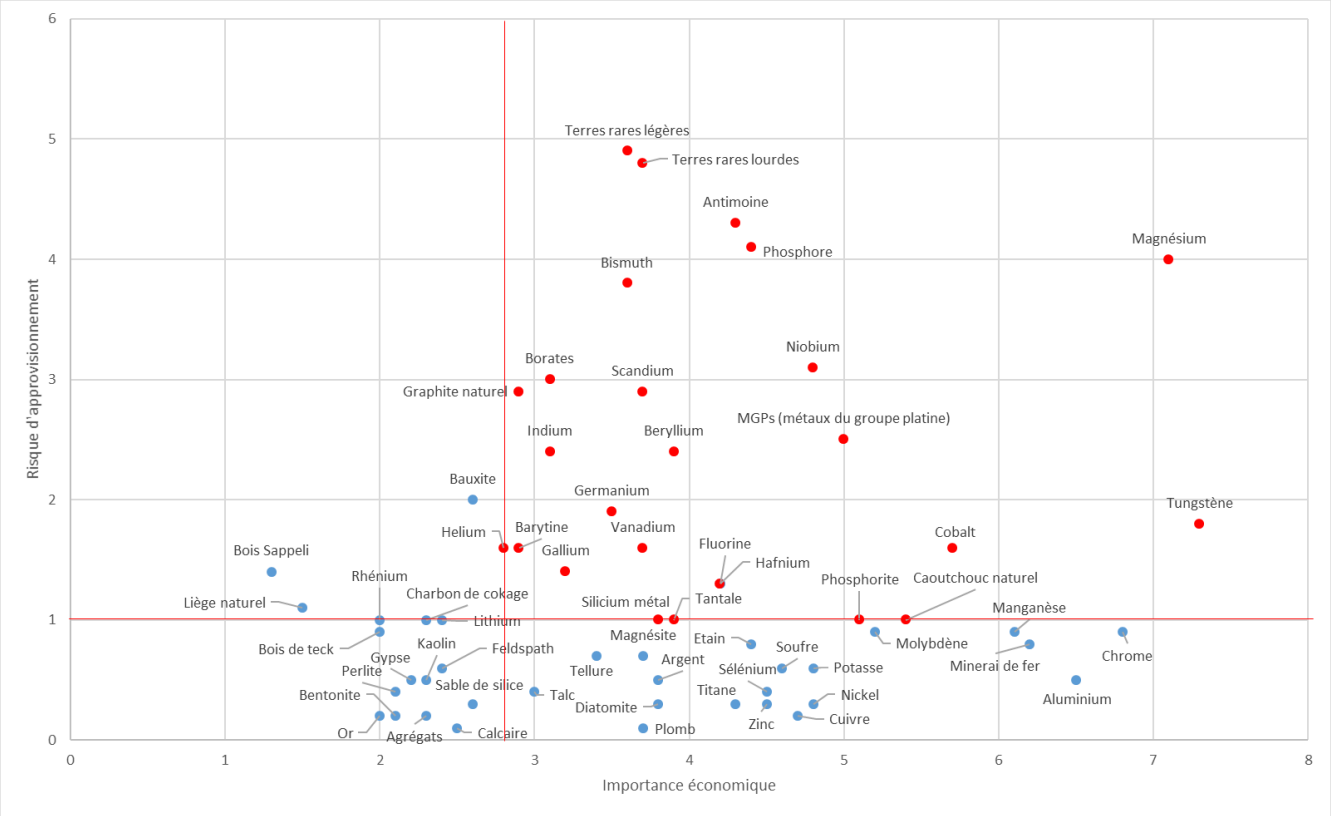


Figure 10. Résultats 2017 de l'évaluation de la criticité au regard de l'importance économique et du risque d'approvisionnement (European Commission, 2017)[24]

La Commission Européenne a défini à l'aide de cette méthode 26 matériaux critiques en 2017 ainsi que le principal fournisseur mondial (Tableau 3.).

Dans le Tableau 3, les matières premières critiques identifiées en rouge sont celles pour lesquelles la Chine n'est pas le principal fournisseur de l'Europe. Les matières premières critiques identifiées en gras sont celles pour lesquelles un cas d'étude est présenté dans ce guide de bonnes pratiques.

La méthode de Graedel *a contrario* ne détermine pas de seuil pour l'évaluation des matières premières critiques mais donne des indicateurs du niveau de criticité pour chaque composante et sous-composantes comme le montre la Figure 11. Ne sont reprises dans cette figure que les composantes principales et les matières premières définies comme critiques par la Commission Européenne à titre comparatif.

[24] European Commission, 2017. Study on the review of the list of Critical Raw Materials – Criticality Assessments, 93 pages.

Tableau 3. Ressources identifiées comme critiques par la Commission Européenne

Matières	Principal fournisseur mondial	Part (E : extraction, R : raffinage)	Matières	Principal fournisseur mondial	Part (E : extraction, R : raffinage)
Antimoine	Chine	R : 87%	Caoutchouc naturel	Thaïlande	E : 32%
Barytine	Chine	E : 44%	Niobium	Brésil	R : 90%
Béryllium	Etats-Unis	E : 90%	Phosphorite	Chine	E : 44%
Bismuth	Chine	R : 82%	**Phosphore**	Chine	R : 58%
Borate	Turquie	E : 38%	Scandium	Chine	R : 66%
Cobalt	RDC	E : 64%	Silicium métal	Chine	R : 61%
Fluorine	Chine	E : 64%	Tantale	Rwanda	E : 31%
Gallium	Chine	R : 73%	Tungstène	Chine	E : 84%
Germanium	Chine	R : 67%	Vanadium	Chine	R : 53%
Hafnium	France	R : 43%	Platinoïdes[25] (hors Palladium)	Afrique du Sud	R : 70-93%
Hélium	Etats-Unis	R : 73%	Platinoïdes (Palladium)	Russie	R : 46%
Indium	Chine	R : 56%	Terres rares lourdes[26]	Chine	E : 95%
Magnésium	Chine	R : 87%	Terres rares légères[27]	Chine	E : 95%
Graphite naturel	Chine	E : 69%			

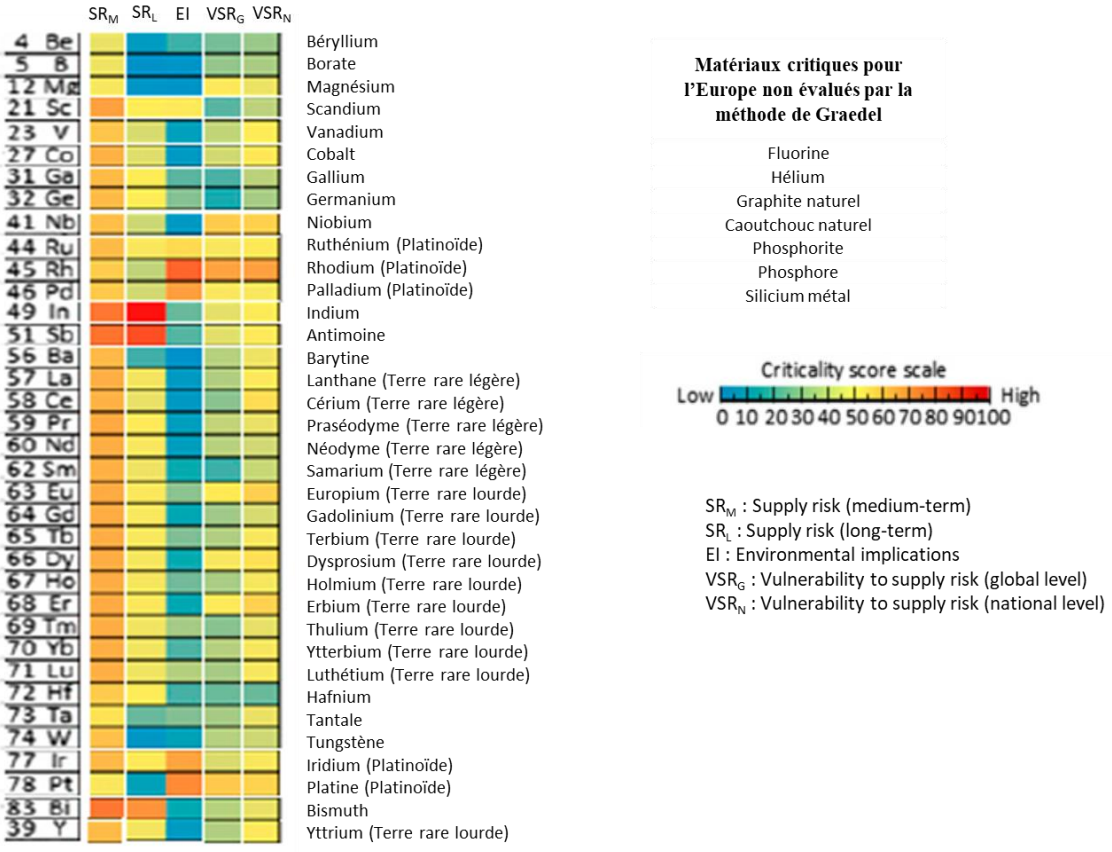


Figure 11. Evaluation des indicateurs de criticité selon Graedel et al. (2015)

[25] Les métaux du groupe du platine comprennent l'Iridium, le Palladium, le Platine, le Rhodium et le Ruthénium.
[26] Les terres rares lourdes comprennent le Dysprosium, l'Erbium, l'Europium, le Gadolinium, l'Holmium, le Lutétium, le Terbium, le Thulium, l'Ytterbium et l'Yttrium.
[27] Les terres rares légères comprennent le Cérium, le Lanthane, le Néodyme, le Praséodyme et le Samarium.

4.4. Limites des méthodes d'évaluation de la criticité et intégration de la criticité dans les Analyses du Cycle de Vie

La criticité des matériaux est un problème complexe et les méthodes d'évaluation de cette criticité présentent toutes inévitablement de nombreuses limites. Toutefois, du fait que ces méthodes peuvent être utilisées pour des prises de décision à l'échelle nationale (mise en place de politiques publiques) ou industrielles (réduire la dépendance aux matériaux stratégiques), il est nécessaire d'adopter de bons réflexes dès lors que l'on s'intéresse à cette notion de criticité des ressources (Lloyd et al., 2012)[28].

En s'appuyant sur les attributs de l'aide à la décision dans des contextes complexes, Lloyd et al. (2012) proposent les recommandations suivantes sur la façon dont le problème d'évaluation de la criticité peut être surmonté :

- Les méthodes d'évaluation doivent être transparentes de façon à rendre claire la manière dont les choix méthodologiques réalisés ont permis de conduire aux résultats obtenus. Cela comprend notamment l'intégration des incertitudes, surtout lorsque les résultats sont utilisés à des fins de prises de décision.
- Les méthodes d'évaluation doivent être dépendantes du contexte et impliquer les communautés des parties prenantes, notamment ceux qui ont une bonne connaissance de la problématique. Ces méthodes doivent reposer sur des métriques et un cadre conceptuel bien identifié permettant de définir un guide pour la conduite des évaluations de criticité.
- Il est nécessaire de s'appuyer sur des méthodes d'évaluation basées sur des métriques en développant des scénarios d'approvisionnement et de la demande future en matériaux.

Hormis le cadre général proposé par Lloyd et al. (2012) pour l'évaluation de la criticité des ressources, aucun document ne présente de préconisations sur la manière de mener des études d'évaluation de criticité des matériaux. Les préconisations proposées concernent plus le positionnement stratégique à adopter vis-à-vis des métaux stratégiques (COMES, 2018)[29].

Bien qu'elle puisse être raisonnée selon la pensée cycle de vie, il n'existe pas non plus à l'heure actuelle de préconisations qui fassent consensus pour intégrer la criticité dans les Analyses du Cycle de Vie. Les réflexions ne sont pas suffisamment matures et consensuelles pour proposer des recommandations. Ce domaine n'est pour l'instant traité que par la communauté scientifique.

Ainsi, deux revues critiques ont été réalisées sur la criticité : celle de Habib and Wenzel (2016) et celle de Sonnemann et al. (2015)[30]. Ces deux revues critiques montrent qu'il existe de nombreuses approches possibles de la criticité. Certains auteurs n'ont pas l'ambition de rapprocher la criticité de la méthode ACV ; la criticité est vue comme plus large qu'un simple sujet environnemental, en y associant la société et l'économie ; ou encore comme un sujet de recherche qui doit encore être travaillé en tant que tel. D'autres auteurs s'intéressent (i) aux liens entre criticité des ressources et ACV, (ii) à l'intérêt de proposer un indicateur « criticité » en ACV ou (iii) comment un tel indicateur pourrait être utilisé en Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (ADCV, ou LCSA en anglais).

La revue critique de Sonnemann et al. (2015) présente la méthode proposée par Graedel et al. (2012) comme étant la plus mature et la plus robuste pour évaluer la criticité mais cette dernière présente des inconvénients qui font qu'elle ne peut être utilisée telle quelle dans un contexte ACV (pondération trop

[28] Lloyd, S., Lee, J., Clifton, A., Elghali, L., France, C., 2012. Recommendations for assessing materials criticality. Proceedings of the ICE – Waste and Resource Management, 165(WR4), pp. 191-200.
[29] COMES. Note de position sur la criticité des métaux pour l'économie française, Avril 2018.
[30] Habib, K. and H. Wenzel, 2016. Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines. Journal of Cleaner Production, 112: p. 3852-3863.
Sonnemann, G., et al., 2015. From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment. Journal of Cleaner Production, 94: p. 20-34.

simplifiée, nécessité d'intégrer les sous-composantes avant agrégation, sous-composantes n'affectant pas de manière additive les mêmes aires de protection…) (Figure 12).

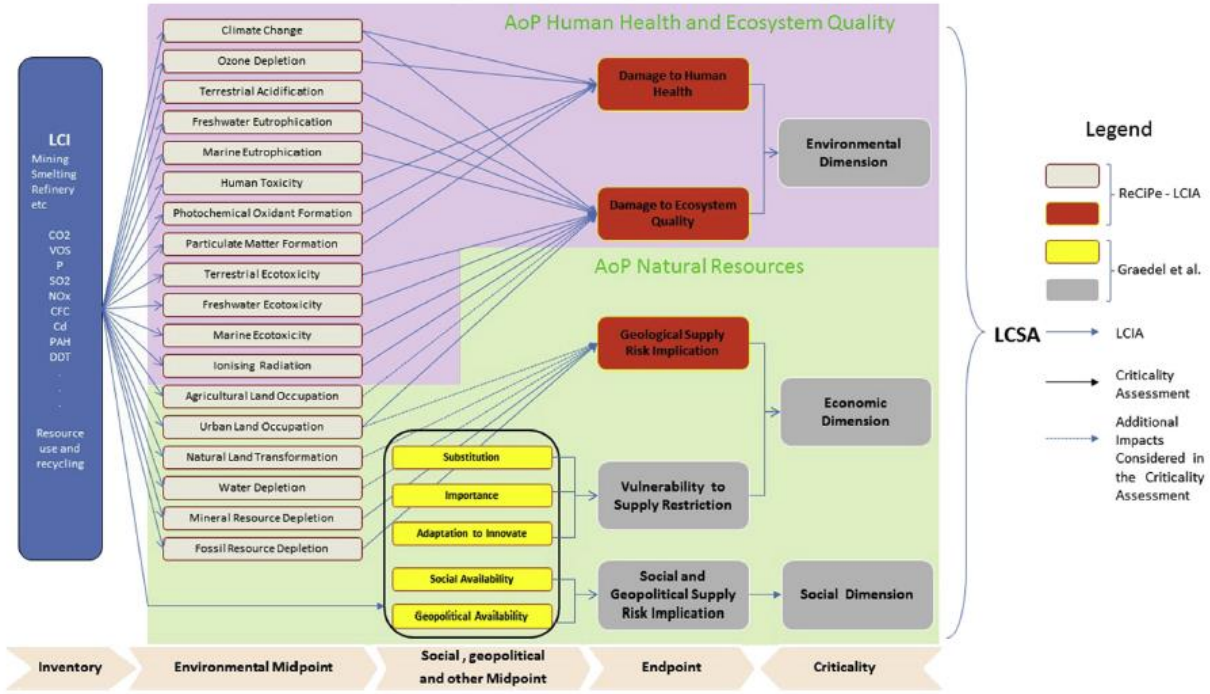


Figure 12. Représentation schématique de l'intégration de la méthode de Graedel et al. (2012) dans un contexte d'Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (tiré de Sonnemann et al., 2015)

Le JRC s'est également penché sur la question de l'intégration des indicateurs de criticité en ACV, notamment sur le risque d'approvisionnement (Mancini et al., 2018). Le concept de criticité étant multidimensionnel, les auteurs identifient quels indicateurs ACV permettent de couvrir les trois dimensions (environnementale, sociale et économique) de la criticité des ressources (Tableau 4, Figure 13).

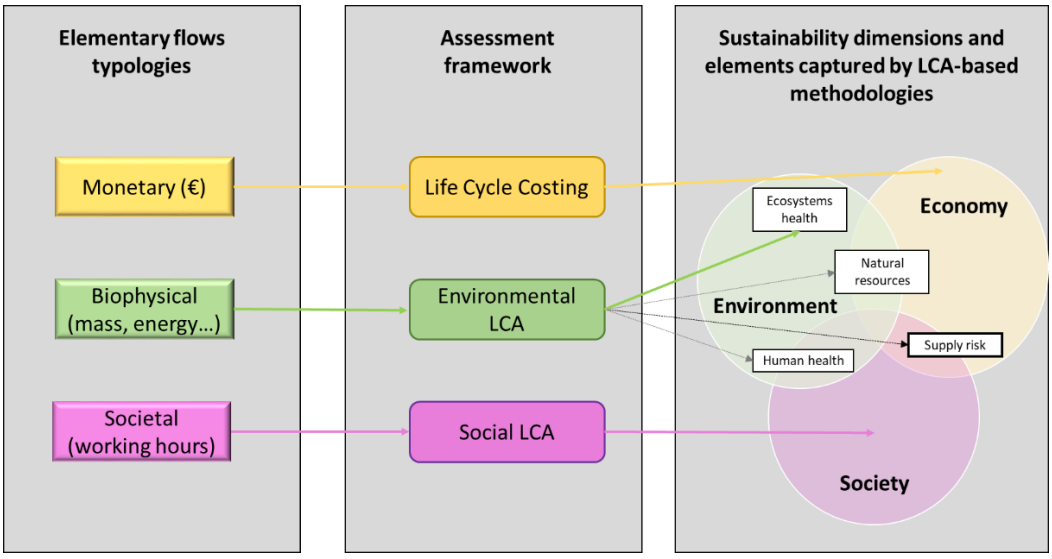


Figure 13. Lien entre flux élémentaires, cadre conceptuel de l'ACV et dimension de la durabilité (tiré de Mancini et al., 2018)

Tableau 4. La criticité des ressources dans son contexte multidimensionnel (tiré de Mancini et al., 2018)

RESOURCE CRITICALITY		Critical factors	Coverage in LCA indicators	Coverage in criticality methodologies (a, b)
	Environmental dimension	Concentration of extraction and environmental pressures		in Environmental Implications (b)
		Recyclability	Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential (ELCA) *(partially captured)*	in Supply Risk (a, b[1])
		Potential ecosystem deprivation (Competition of resources between human needs and ecosystems)	-	-
		Overuse of ecosystems (above their carrying capacity)	-	-
	Economic dimension	Depletion of reserves	Abiotic Depletion Potential (ELCA)	in Depletion time (b)
		Import-dependency		in Vulnerability to Supply Restrictions (b)
		Lifecycle wide material losses		in Supply Risk (b[2])
		Concentration of production	set of indicators in SLCA[3]	Herfindahl-Hirschman Index (HHI) in Supply Risk (a, b)
		Substitutability		in Supply Risk (a,b)
	Socio-political dimension	Human rights violations / Child labour	set of indicators in SLCA[4]	
		Precarious and dangerous working conditions	set of indicators in SLCA[5]	
		Illicit trade	-	-
		Imbalances of power	-	-
		Governance and institutional setting	set of indicators in SLCA[6]	in Supply Risk: Policy Potential Index (b), Human Development Index (b), Worldwide Governance Indicator (a, b)
		(Potential) resource conflicts and competition between different resource uses	in SLCA[7]	

Resource criticality as a multidimensional concept: coverage of critical factors in existing indicators used in the life cycle assessment framework (environmental and social LCA) and in two criticality assessment methodologies (a: EU methodology for Critical Raw Materials, 2013; b: methodology for criticality assessment by Graedel et al. 2012). Own elaboration based on Bleischwitz et al. 2012. Indicators in SLCA refer to the list of indicators in the Product Social Impact Life Cycle Assessment (PSILCA) database (Sala et al. 2015) - : not covered in existing methodologies; (1) included in the calculation of depletion time; (2) included in the calculation of depletion time as "net loss to tailings, slag and from other processes" ;(3) under "fair competition" category: presence of anti-competitive behaviour or violation of anti-trust and monopoly legislation and presence of policies to prevent anti-competitive behaviour; (4) under the subcategory "child labour"; (5) under the subcategories "forced labour" and "health and safety"; (6) under the subcategory "corruption"; and (7) indicator: description of potential material resource conflicts under the subcategory "access to material resources"

Ce travail est très récent et continue d'être exploré par la recherche. De nouveaux développements méthodologiques doivent être proposés pour pouvoir améliorer les méthodes d'évaluation de la criticité. A l'heure actuelle, ces développements sont focalisés sur une meilleure prise en compte de la substituabilité et de la recyclabilité des ressources pour améliorer les indicateurs de criticité.

4.5. Evolution des méthodes ACV permettant d'intégrer la criticité des ressources

Parmi les méthodes récemment développées en ACV, deux se distinguent plus particulièrement du fait qu'elles incluent dans le calcul des facteurs de caractérisation des éléments économiques ou/et socio-économiques. Ces deux méthodes sont la méthode GRI (Global Resource Indicator) et ESP (Economic scarcity potential).

4.5.1. Méthode GRI (Global Resource Indicator)

La méthode GRI a été développée pour pouvoir étendre l'indicateur ACV « épuisement des ressources » non pas au seul risque d'approvisionnement géologique mais aussi géopolitique. Cette méthode propose des facteurs de caractérisation utilisables en ACV prenant en compte à la fois une dimension environnementale et une dimension socio-économique (Adibi et al., 2017)[31].

[31] Adibi, N., Z. Lafhaj, M. Yehya & J. Payet, 2017. Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study. Journal of Cleaner Production, 165, 1517-1528.

Le calcul du GRI prend en compte la rareté, la recyclabilité et la disponibilité géopolitique de la ressource évaluée. Le calcul est le suivant :

$$GRI = \frac{X}{Y.Z}$$

avec :

x La rareté de la ressource. Calculé sur la même base que l'impact « Abiotic Depletion Potential » de la méthode CML-IA mais avec le Fer (Fe) comme substance équivalente

$$ADP_i = \frac{Ext_i}{Res_i^2} \times \frac{Res_Fe_i^2}{Ext_Fe_i}$$

Où pour une ressource i, on a :

ADP : impact de la ressource i en kg équivalent Fer,

Ext : taux d'extraction annuel de la ressource i,

Res : Base de réserve de la ressource i

Res_Fe : taux d'extraction annuel du la ressource de référence (Fe)

Ext_Fe : base de réserve de la ressource de référence (Fe)

y La recyclabilité qui dépend des taux de dispersion et de recyclage ($F_{dispersion}$ et $F_{recycling}$)

z La disponibilité géopolitique, qui dépend de l'index WGI, du nombre de pays producteur et de la dérivation standard (F_{WGI}, $F_{countries}$ et $F_{deviation}$)

En développant un peu, le GRI (en kg Fe-eq) correspond au calcul suivant :

$$\frac{F_{CML-Fe-eq}^{normalized}}{\left(1 - F_{dispersion}\right) \times 10 \times F_{recycling} \times \sqrt[3]{F_{WGI} \times F_{countries} \times F_{deviation}}} \times \frac{F_{recycling}^{Fe} \times 10 \times \sqrt[3]{F_{WGI}^{Fe} \times F_{deviation}^{Fe} \times F_{countries}^{Fe}} \times \left(1 - F_{dispersion}^{Fe}\right)}{1}$$

Cette méthode a été pour l'instant utilisée pour déterminer de nouveaux facteurs de caractérisation pour les terres rares.

4.5.2. Méthode ESP (Economic scarcity potential)

La méthode Economic resource Scarcity Potential (ESP) a été développée par Schneider et al. (2014) et intègre des aspects sociaux et économiques afin d'avoir une vision plus globale du problème de l'épuisement des ressources. Les dimensions environnementales seules ne peuvent suffire à entreprendre cette dernière selon les auteurs. Un listing des critères économiques pouvant affecter l'approvisionnement des ressources a été établi par les auteurs et est repris dans le Tableau 5.

Tableau 5. Critères économiques pouvant affecter l'approvisionnement en ressources

Critères économiques	
• Disponibilité des réserves	• Coproduction / Taux de métal compagnon
• Stabilité économique	• Potentiel de substitution
• Concentration des réserves ou production de certains pays	• Disponibilité exploitable des stocks anthropiques
• Concentration des activités de production de certaines entreprises	• Croissance de la demande / taux de changement de la demande
• Barrières commerciales	• Contraintes logistiques
• Volatilité du marché	• Technologies compétitives
• Élasticité-prix de la demande et de l'offre	• Capacité d'utilisation
• Recyclage / Disponibilité du	• Disponibilité énergétique
• matériau secondaire (ou matériau recyclé)	
• Acceptation sociétale des activités d'exploitation minière	• Utilisation dissipative des ressources
• Susceptibilité d'avoir des catastrophes naturelles	• Investissements dans l'industrie minière
• Coûts du transport	• Coûts de production

Le résultat du facteur d'impact (I) de l'ESP se calcule de la manière suivante, i étant une ressource et j une catégorie d'impact :

$$I_{i,j} = Max\left\{\left(\frac{valeur\ d'indicateur_{i,j}}{seuil_{i,j}}\right)^2 ; 1\right\}$$

Le facteur d'impact (I) est fonction des valeurs actuelles de l'indicateur et du seuil au-dessus duquel un risque élevé d'approvisionnement est attendu. Ce rapport est dit de « débit critique », car il correspond à la limite exploitable d'une ressource. Il est élevé au carré afin de montrer que le dépassement majeur de la valeur cible (impliquant des risques élevés) est pondéré au-dessus de la proportionnelle. Dans le but de rendre le calcul plus explicite, nous pouvons envisager d'inverser l'ordre, de sorte qu'un score plus élevé correspond à un risque élevé (similaire aux méthodes existantes dans l'ACV). Cela donne une indication sur la potentialité du risque et permet d'être plus clair. C'est en combinant ces catégories d'impact que l'on obtient l'ESP qui est exploitable par la suite en ACV. Les facteurs d'impact sont alors agrégés en utilisant une multiplication où chaque facteur a le même poids. Le calcul est le suivant :

$$ESP_i = \prod_j (I_{i,j})$$

Chacun des indicateurs utilisé pour le calcul de l'ESP, ainsi que son seuil, sont présentés dans le Tableau 6. Les seuils ont été définis par les auteurs sur la base de la perception générale du risque faite dans la littérature scientifique et des meilleures pratiques actuelles dans l'industrie (DOJ and FDT 2010; Oryx Stainless 2012; The World Bank Group 2012; UNDP 2011)[32].

Le choix des seuils déterminant le facteur d'impact et influençant la valeur de l'ESP, les auteurs ont choisi une approche conservative et sélectionné des seuils difficilement atteignables (résultant en une « distance to target » élevée).

[32] DOJ, FDT (2010) Horizontal merger guidelines §5.2. The United States Department of Justice and the Federal Trade Commission, Washington DC; Oryx Stainless (2012) Key raw materials nickel, chrome and iron: limited availability despite sufficient geological reserves. Oryx Stainless Group, Mühlheim an der Ruhr/Dordrecht; The World Bank Group (2012) Worldwide governance indicators; UNDP (2011) Human development report 2011—sustainability and equity: a better future for all. New York

Tableau 6. Indicateurs d'impact utilisés pour le calcul de l'ESP

Catégorie d'impact	Description	Indicateurs d'impacts utilisés pour le calcul de l'ESP :	Seuils et risques
Disponibilité des réserves	Temps d'épuisement (technologies actuelles)	Rapport entre l'extraction de l'année (en tonnes) et les réserves connues (en tonnes), pour une année donnée. Le calcul est le suivant : E = $\frac{Extraction\ de\ l'année}{Réserves\ connues}$	Bas > 40 >Haut
Recyclage	Taux de recyclage de la ressource	Pourcentage de nouveau matériau utilisé (UNEP 2011). Le calcul est le suivant : $P = 1 - \left(\frac{Quantité\ de\ matériau\ recyclé}{Quantité\ de\ matériau\ vendu}\right)$)	Bas < 0,50 < Haut
Concentration du marché	Concentration des réserves dans certains pays	L'Indice Herfindahl-Hirschman (Herfindahl-Hirschman Index (HHI) en anglais) est trouvé en additionnant le carré des parts de toutes les entreprises du secteur considéré. IHH élevé = production concentrée. Le calcul est le suivant : $H = \sum_{i=1}^{N} s_i^2$	Bas < 0,15 < Haut
Concentration des activités des mines par pays	Concentration de la production dans certains pays		
Concentration des activités des mines par entreprise	Concentration de la production dans certaines entreprises		
Stabilité de gouvernance	Stabilité des instances dirigeantes (pays producteurs)	Basé sur le World Governance Indicator, WGI (indice de gouvernance mondiale), avec les dimensions clés de la gouvernance. Ici, l'indicateur est agrégé et basé sur trois dimensions : voix citoyenne et responsabilité, stabilité politique et absence de violence et efficacité du gouvernement.	Bas < 0,25 < Haut
Stabilité socioéconomique	Développement humain (pays producteurs)	Basé sur l'Human Development Index (Indice de Développement Humain en français) en combinant les facteurs suivants : l'espérance de vie à la naissance, le niveau d'éducation des enfants et le PIB par habitant. Le calcul est le suivant : $IDH = \sqrt[3]{I_{Vie} \times I_{Revenu} \times I_{Education}}$	Bas < 0,12 < Haut
Croissance de la demande	Augmentation de la demande	Pourcentage de croissance annuelle fondée sur le passé (pour les industries des métaux) et les scénarios de demande future (pilotés par les technologies futures, à voir dans chaque cas). Le calcul est le suivant : $D = \frac{Croissance\ années\ passées}{Nombre\ d'années}$	Bas < 0,01 < Haut
Barrières commerciales	Matières premières soumises à des contraintes commerciales (taxes, quotas…)	Pourcentage de la part de la production minière soumis aux contraintes commerciales publié par BDI (2010). Le calcul est le suivant : $CC = \frac{Production\ soumise\ à\ contraintes}{Production\ totale}$	Bas < 0,25 < Haut
Taux de métaux compagnons	Présence de métaux compagnons dans les gisements de minerais	Pourcentage de la production en tant que métaux compagnons. Le calcul est le suivant : $C = \frac{Métaux\ compagnions\ (en\ t)}{Extractions\ de\ minerai\ (en\ t)}$	Bas < 0,20 < Haut

5. Quels sont les points de vigilance auxquels doivent faire face les praticiens lorsque des ressources minérales sont mises en œuvre dans leurs ACV ?

Afin de bien représenter l'impact des ressources minérales dans leurs ACV, les praticiens doivent être vigilants sur plusieurs points.

5.1. Vigilance au regard du choix de la méthode de caractérisation

Le premier point de vigilance est relatif au choix de la méthode de caractérisation. La différence de modélisation inhérent à chaque méthode peut rendre difficile l'interprétation que l'on peut faire des résultats car les méthodes n'évaluent pas la même chose :

- Perte de propriété utile des ressources minérales par l'approche thermodynamique pour les méthodes CEENE et CExD.
- Utilisation des ressources selon leur disponibilité (*use-to-availability ratio*) pour les méthodes CML-IA (indicateurs ADP réserve base (RB), ADP economic reserve (ER)), AADP (version 2011), EDIP 2003, Eco-scarcity.
- Utilisation des ressources selon leur stock (*use-to-stock ratio*) pour les méthodes CML-IA (indicateurs ADP ultimate reserves (UR)), AADP (version 2015)
- Conséquences futures associées à l'extraction des ressources minérales pour les méthodes Eco Indicator 99, EPS 2000, IMPACT2002+, LIME (1 et 2), TRACI (1 et 2), ReCiPe (2008, 2016)

Par ailleurs, on observe une grande variabilité dans le nombre de ressources minérales couvertes par les facteurs de caractérisation des différentes méthodes (Figure 14).

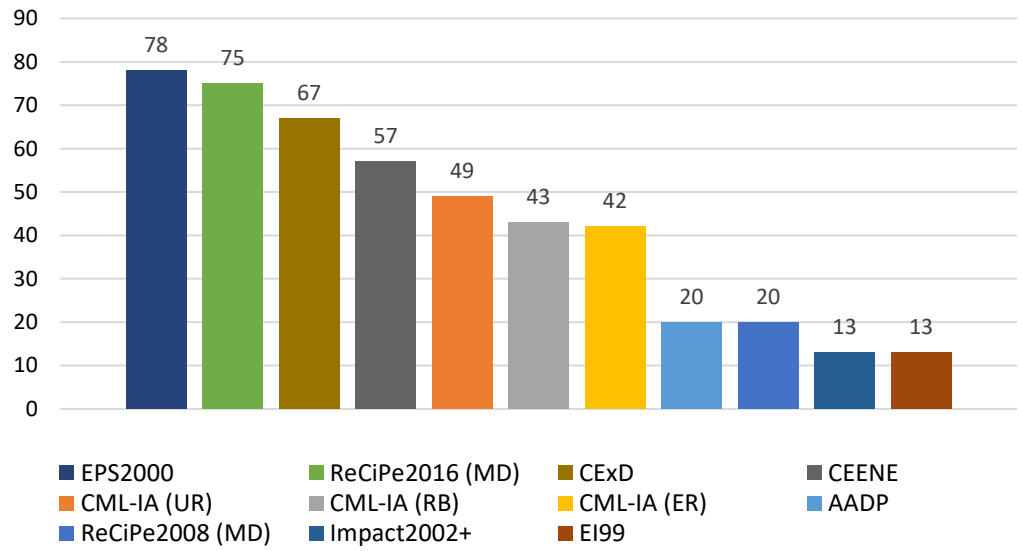


Figure 14. Nombre de ressources minérales évaluées pour quelques méthodes de caractérisation ACV

Certaines méthodes comme IMPACT2002+ ou Eco Indicator 99 n'évaluent qu'une dizaine de ressources alors que d'autres peuvent en évaluer plus d'une cinquantaine (ReCiPe2016, CEENE, CExD, EPS 2000). Le praticien devra donc être vigilant à ce que le choix de la méthode d'évaluation soit en adéquation avec les ressources répertoriées dans l'inventaire du cycle de vie. La méthode choisie devra en effet disposer de facteurs de caractérisation suffisamment exhaustifs pour permettre une évaluation du plus grand nombre possible de ressources présentes dans l'inventaire.

Le type de réserves utilisées (économiques, base de réserve ou ultimes) et la source utilisée pour le taux d'extraction (USGS ou autre) peuvent également impacter fortement le calcul des facteurs de caractérisation, y compris au sein d'un même type de modélisation (use-to-stock/use-to-availability ratio par exemple). Un cas illustratif présentant les différences constatées dans le calcul des facteurs de caractérisation du germanium est donné page 43.

Enfin, la temporalité des données utilisées pour le calcul des facteurs de caractérisation peut également être un point portant atteinte à la robustesse des méthodes. Les données actuelles pour les méthodes de type use-to-stock/use-to-availability ratio sont relativement anciennes. Les réserves ultimes sont issues de la thèse de Guinée (1995) et n'ont pas été recalculées depuis. Les bases de réserves ont été collectées par l'USGS jusqu'en 2007 et ne sont plus mises à jour. Les réserves économiques sont actualisées tous les ans par l'USGS or cas particulier où les ressources sont des coproduits de l'industrie et pour lesquelles l'USGS n'est pas en mesure de calculer les quantités produites (cas de l'indium).

La Figure 15 présente l'évolution des facteurs de caractérisation de la méthode CML-IA pour chaque type de réserve mobilisée en fonction des données collectées par l'USGS pour chaque année entre 1995 et 2017 afin de montrer la variabilité occasionnée pour 4 ressources : phosphore, indium, cobalt et lithium.

Le calcul des facteurs de caractérisation prend également en compte l'évolution des données pour la substance de référence, l'antimoine.

On constate ainsi que la faible évolution des facteurs de caractérisation pour les réserves ultimes et les bases de réserves est uniquement due à l'évolution des taux d'extraction. Les facteurs de caractérisation pour les réserves économiques sont ceux qui évoluent le plus et qui ont une tendance à la baisse.

Enfin, certaines méthodes de caractérisation proposent un indicateur combinant des facteurs de caractérisation pour les ressources énergétiques et minérales (CEENE, CExD…) tandis que d'autres proposent des indicateurs spécifiques à chaque ressource (CML-IA, ReCiPe2016). Ce document ne traite que des méthodes portant sur les ressources minérales. Pour les ressources fossiles, il est conseillé de se référer à Petiot et al. (2013).

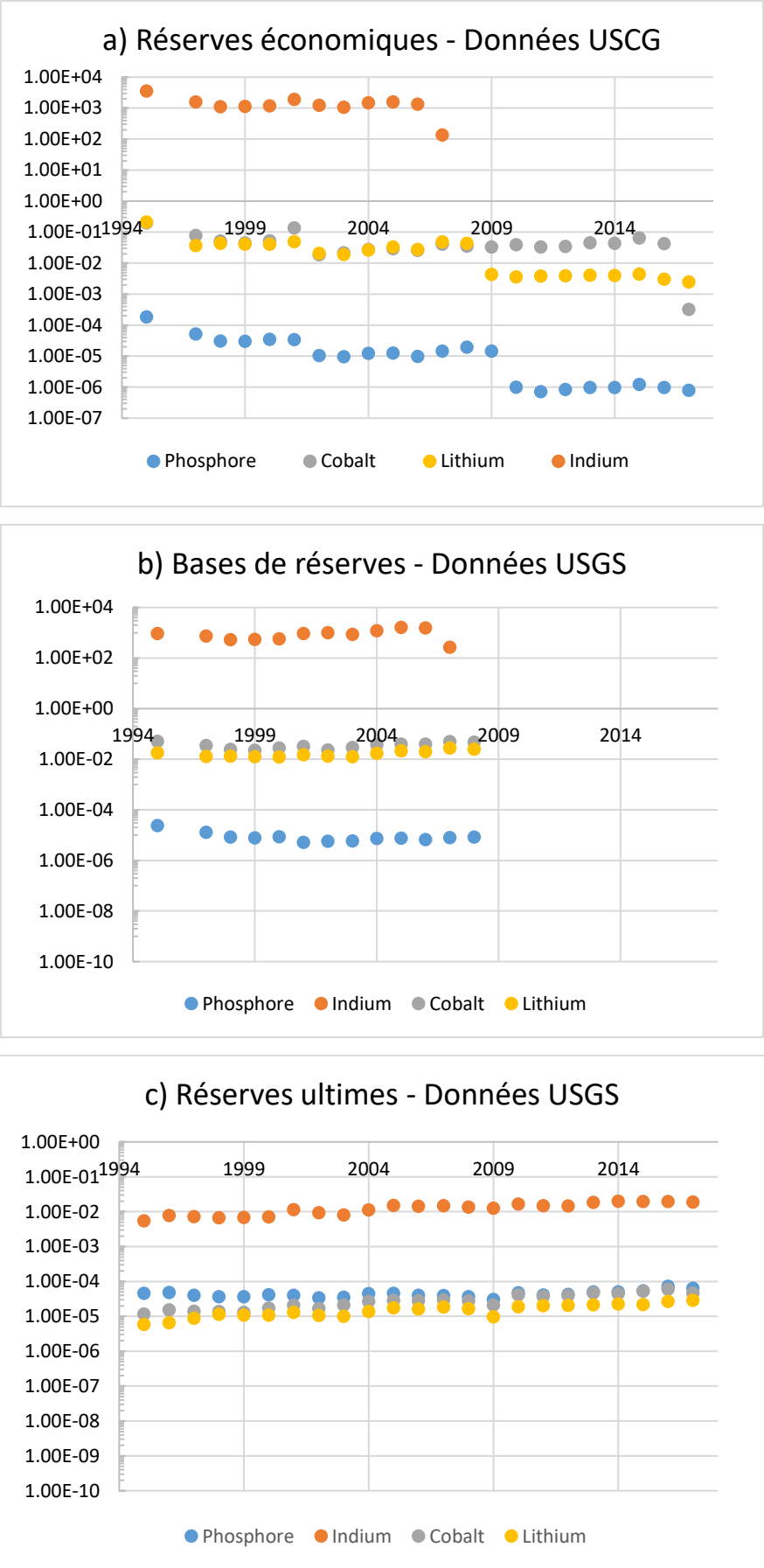


Figure 15. Evolutions des facteurs de caractérisation pour la méthode CML-IA selon le type de réserves utilisée et l'année

5.2. Vigilance au regard du choix du logiciel de modélisation

Le second point de vigilance est relatif au choix du logiciel de modélisation utilisé. En effet, les flux élémentaires qui seront utilisés ensuite pour calculer les impacts « épuisement des ressources » sont modélisés de manière différente et de façon plus ou moins exhaustive. C'est le cas des principaux logiciels ACV GaBi® et Simapro®. En effet, le logiciel Simapro® propose des flux « éléments » qui sont issus du tableau de classification périodique (ex : Cuivre, Aluminium, Nickel…) pour lesquels un facteur de caractérisation spécifique est proposé selon la méthode de caractérisation choisie. Le logiciel GaBi® propose à la fois des flux « élements » et des flux « ressources » (ex : barium sulphate, chrysolite, cinnabar…), ces derniers ayant des facteurs de caractérisation dérivés des facteurs de caractérisation des éléments qui les composent (Tableau 13, Annexe 4).

Dans de nombreux cas, les résultats entre les deux logiciels sont presque identiques ou à peu près identiques, mais les observations présentées dans l'étude de Herrmann et Moltesen (2015)[33] indiquent néanmoins des différences tant au niveau de l'inventaire que de l'évaluation de l'impact. En comparant une centaine d'inventaires choisis au hasard, les auteurs ont identifié six flux élémentaires présentant des différences entre les deux logiciels (PM10 to air, Thorium 232 to air et Zirconium 95 to air avec un ratio différentiel proche de 1 et Sulfate to air, Niobium 95 to air et Thorium 230 to air avec un ratio bien supérieur à 1). Les facteurs de caractérisation des flux PM10 to air, Thorium 230 et Sulfate to air n'étant implémentés que dans quelques méthodes selon les logiciels, il est probable que lors de la réalisation d'ACV mobilisant ces flux, le choix du logiciel puisse impacter les résultats.

Les auteurs ont également comparé les résultats d'impacts pour trois méthodes pour le « Soybean Brazil Farm (SBF) unit process » issu de la base de données ecoinvent. Ils ont observé de grandes différences dans les résultats pour les impacts « Photochemical ozone formation » d'EDIP2003, « climate change » et « land use » d'EcoIndicator99 et « Marine aquatic ecotoxicity, infinite » et « Terrestrial ecotoxicity, infinite » de CML-IA. Certaines de ces différences, en particulier pour l'analyse d'impact, sont si grandes qu'elles pourraient potentiellement influencer les conclusions tirées d'une étude d'ACV. Les résultats des études ACV doivent donc être interprétés avec précaution du fait de l'usage de l'un ou l'autre de ces logiciels.

5.3. Vigilance au regard de l'implémentation des méthodes de caractérisation dans les logiciels ACV

En complément du paragraphe précédent, si on regarde de plus près les facteurs de caractérisation associés aux flux « éléments » implémentés dans les logiciels ACV GaBi® (version 8.7.1.30) et Simapro® (version 9.0.0.31) pour quatre méthodes de caractérisation, on observe un certain nombre de différences répertoriées dans le Tableau 7. Les cases présentant un signe - indiquent que les flux ne sont pas présents dans le logiciel tandis que celles présentant un ? indiquent que les flux existent dans le logiciel mais que la méthode de caractérisation ne présente pas de facteurs de caractérisation correspondant.

Ainsi, la méthode AADP (dans sa version de 2011) est uniquement implémentée dans le logiciel GaBi®. Les facteurs de caractérisation de la nouvelle version de 2015 (dont ceux des terres rares) sont présentés en Annexe 3. De même, des éléments tels que Cerium, Dysprosium, Erbium, Europium, Gadolinium, Holmium, Iridium, Lanthanum, Lutetium, Neodymium, Osmium, Praseodymium, Rare-earth metals, Ruthenium, Samarium, Scandium, Terbium, Ytterbium ne sont implémentés que dans GaBi® alors que l'Uranium n'est implémenté comme ressource minérale que dans Simapro®. Le choix du logiciel présente donc également une importance dans le choix de la méthode de caractérisation.

[33] Herrmann, I. T. and A. Moltesen, 2015. "Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi." Journal of Cleaner Production 86: 163-169.

Tableau 7. Facteurs de caractérisation des principales méthodes de caractérisation pour les flux « éléments » tels qu'implémentés dans les logiciels Gabi® et Simapro®

Méthode	CML-IA - UR		CML-IA RB		CML-IA - ER		AADP (2011)		Impact2002+		ReCiPe 2016 H/E		ReCiPe 2016 I	
Unité	kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq		MJ surplus		kg Cu eq		kg Cu eq	
Logiciel	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro
Aluminium	1.09E-09	1.09E-09	2.53E-05	2.53E-05	2.14E-05	2.14E-05	4.46E-06	-	2.38E+00	2.38E+00	1.69E-01	1.69E-01	1.01E-01	1.01E-01
Antimony	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	-	?	?	5.72E-01	5.72E-01	1.03E+00	1.03E+00
Arsenic	2.97E-03	2.97E-03	3.17E+00	3.17E+00	3.07E+00	3.07E+00	?	-	?	?	1.31E-01	1.31E-01	8.89E-02	8.89E-02
Barium	6.04E-06	6.04E-06	3.37E-03	3.37E-03	1.55E-02	1.55E-02	?	-	?	?	3.88E-02	?	2.31E-02	?
Beryllium	1.26E-05	1.26E-05	?	?	?	?	1.72E+01	-	?	?	7.67E+01	7.67E+01	8.42E+01	8.42E+01
Bismuth	4.11E-02	4.11E-02	4.49E+00	4.49E+00	1.08E+01	1.08E+01	?	-	?	?	3.20E+00	3.20E+00	2.77E+00	2.77E+00
Boron	4.27E-03	4.27E-03	5.28E-03	5.28E-03	1.74E-02	1.74E-02	?	-	?	?	1.16E-01	1.16E-01	7.77E-02	7.77E-02
Bromine	4.39E-03	4.39E-03	?	?	?	?	?	-	?	?	?	?	?	?
Cadmium	1.57E-01	1.57E-01	1.11E+00	1.11E+00	1.92E+00	1.92E+00	2.72E-01	-	?	?	3.20E-01	3.20E-01	2.32E-01	2.32E-01
Cerium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Cesium	?	?	?	?	?	?	?	-	?	?	1.18E+04	1.18E+04	1.90E+04	1.90E+04
Chlorine	2.71E-05	2.71E-05	?	?	?	?	?	-	?	?	?	?	?	?
Chromium	4.43E-04	4.43E-04	1.96E-05	1.96E-05	3.77E-05	3.77E-05	9.10E-05	-	9.17E-01	9.17E-01	9.51E-02	9.51E-02	5.57E-02	5.57E-02
Cobalt	1.57E-05	1.57E-05	2.56E-02	2.56E-02	4.89E-02	4.89E-02	2.27E-01	-	?	?	6.57E+00	6.57E+00	4.01E+00	4.01E+00
Copper	1.37E-03	1.37E-03	2.50E-03	2.50E-03	3.94E-03	3.94E-03	7.82E-04	-	3.67E+01	3.67E+01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
Dysprosium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Erbium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Europium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Gadolinium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Gallium	1.46E-07	1.46E-07	?	?	?	?	?	-	?	?	8.38E+01	8.38E+01	9.28E+01	9.28E+01
Germanium	6.52E-07	6.52E-07	1.95E+04	1.95E+04	1.04E+04	1.04E+04	?	-	?	?	3.17E+02	3.17E+02	3.89E+02	3.89E+02
Gold	5.20E+01	5.20E+01	3.60E+01	3.60E+01	3.99E+01	3.99E+01	?	-	?	?	3.73E+03	3.73E+03	5.12E+03	5.12E+03
Hafnium	?	?	?	?	?	?	?	-	?	?	9.67E+01	9.67E+01	1.08E+02	1.08E+02
Helium	?	?	9.42E-02	9.42E-02	?	?	?	-	?	?	?	?	?	?

Tableau 7 (suite)

Méthode	CML-IA - UR		CML-IA RB		CML-IA - ER		AADP (2011)		Impact2002+		ReCiPe 2016 H/E		ReCiPe 2016 I	
Unité	kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq		MJ surplus		kg Cu eq		kg Cu eq	
Logiciel	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro
Holmium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Indium	6.89E-03	6.89E-03	5.55E+02	5.55E+02	1.15E+03	1.15E+03	?	-	?	?	1.03E+02	1.03E+02	1.15E+02	1.15E+02
Iodine	2.50E-02	2.50E-02	2.22E-03	2.22E-03	3.10E-03	3.10E-03	?	-	?	?	7.09E+00	7.09E+00	6.51E+00	6.51E+00
Iridium	?	-	?	-	?	-	2.18E+01	-	?	-	?	-	?	-
Iron	5.24E-08	5.24E-08	1.66E-06	1.66E-06	3.64E-06	3.64E-06	2.35E-06	-	5.10E-02	5.10E-02	6.19E-02	6.19E-02	3.82E-02	3.82E-02
Lanthanum	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Lead	6.34E-03	6.34E-03	1.50E-02	1.50E-02	2.67E-02	2.67E-02	5.70E-04	-	7.35E+00	7.35E+00	4.91E-01	4.91E-01	4.83E-01	4.83E-01
Lithium	1.15E-05	1.15E-05	1.33E-02	1.33E-02	4.38E-02	4.38E-02	9.03E-03	-	?	?	4.86E+00	4.86E+00	2.42E+00	2.42E+00
Lutetium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Magnesium	2.02E-09	2.02E-09	?	?	?	?	?	-	?	?	7.90E-01	7.90E-01	6.14E-01	6.14E-01
Manganese	2.54E-06	2.54E-06	2.35E-05	2.35E-05	5.80E-04	5.80E-04	2.67E-03	-	3.13E-01	3.13E-01	8.23E-02	8.23E-02	3.76E-02	3.76E-02
Mercury	9.22E-02	9.22E-02	2.62E+00	2.62E+00	4.52E+00	4.52E+00	1.07E+00	-	1.66E+02	1.66E+02	8.96E+00	8.96E+00	8.37E+00	8.37E+00
Molybdenum	1.78E-02	1.78E-02	7.11E-02	7.11E-02	1.46E-01	1.46E-01	2.46E-01	-	4.10E+01	4.10E+01	2.92E+01	2.92E+01	2.90E+01	2.90E+01
Neodymium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Nickel	6.53E-05	6.53E-05	4.18E-03	4.18E-03	1.69E-02	1.69E-02	3.84E-02	-	1.63E+02	2.38E+01	2.89E+00	2.89E+00	1.85E+00	1.85E+00
Niobium	1.93E-05	1.93E-05	6.55E-02	6.55E-02	6.96E-02	6.96E-02	?	-	?	?	5.20E+00	5.20E+00	4.46E+00	4.46E+00
Osmium	?	-	?	-	?	-	2.18E+01	-	?	-	?	-	?	-
Palladium	5.71E-01	5.71E-01	9.36E+00	9.36E+00	4.99E+00	4.99E+00	2.18E+01	-	?	?	4.28E+03	4.28E+03	6.37E+03	6.37E+03
Phosphorus	5.52E-06	5.52E-06	6.21E-05	6.21E-05	2.54E-04	2.54E-04	?	-	?	?	1.67E-01	1.67E-01	1.40E-01	1.40E-01
Platinum	2.22E+00	2.22E+00	9.09E+00	9.09E+00	4.85E+00	4.85E+00	2.18E+01	-	?	?	8.77E+03	8.77E+03	1.38E+04	1.38E+04
Potassium	1.60E-08	1.60E-08	9.00E-06	9.00E-06	1.59E-05	1.59E-05	?	-	?	?	?	?	?	?
Praseodymium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Rare-earth metals	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Rhenium	6.03E-01	6.03E-01	3.19E+01	3.19E+01	2.66E+02	2.66E+02	2.10E+02	-	?	?	5.28E+02	5.28E+02	6.72E+02	6.72E+02

Tableau 7 (suite)

Méthode	CML-IA - UR		CML-IA RB		CML-IA - ER		AADP (2011)		Impact2002+		ReCiPe 2016 H/E		ReCiPe 2016 I	
Unité	kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq		MJ surplus		kg Cu eq		kg Cu eq	
Logiciel	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro	GaBi	Simapro
Rhodium	?	?	?	?	?	?	2.18E+01	-	?	?	6.34E+03	6.34E+03	9.73E+03	9.73E+03
Ruthenium	?	-	?	-	?	-	2.18E+01	-	?	-	?	-	?	-
Samarium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Scandium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Selenium	1.94E-01	1.94E-01	7.35E+00	7.35E+00	1.09E+01	1.09E+01	?	-	?	?	1.33E+01	1.33E+01	1.28E+01	1.28E+01
Silicon	1.40E-11	1.40E-11	?	?	?	?	?	-	?	?	4.28E-01	4.28E-01	3.18E-01	3.18E-01
Silver	1.18E+00	1.18E+00	8.42E+00	8.42E+00	8.16E+00	8.16E+00	?	-	?	?	1.53E+02	1.53E+02	1.61E+02	1.61E+02
Sodium	5.50E-08	5.50E-08	?	?	?	?	?	-	?	?	?	?	?	?
Strontium	7.07E-07	7.07E-07	1.77E-01	1.77E-01	2.38E-01	2.38E-01	?	-	?	?	8.75E-02	8.75E-02	5.76E-02	5.76E-02
Sulfur	1.93E-04	1.93E-04	3.91E-04	3.91E-04	1.05E-03	1.05E-03	7.33E-04	-	?	?	?	?	?	?
Tantalum	4.06E-05	4.06E-05	1.15E+01	1.15E+01	2.28E+01	2.28E+01	?	-	?	?	5.29E+01	5.29E+01	5.66E+01	5.66E+01
Tellurium	4.07E+01	4.07E+01	7.21E+00	7.21E+00	1.12E+01	1.12E+01	?	-	?	?	1.87E+01	1.87E+01	1.85E+01	1.85E+01
Terbium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Thallium	2.43E-05	2.43E-05	2.98E+03	2.98E+03	3.75E+03	3.75E+03	1.38E-02	-	?	?	1.20E+03	1.20E+03	1.63E+03	1.63E+03
Tin	1.62E-02	1.62E-02	1.15E-01	1.15E-01	7.77E-02	7.77E-02	?	-	6.00E+02	6.00E+02	5.03E+00	5.03E+00	5.23E+00	5.23E+00
Titanium	2.79E-08	2.79E-08	1.52E-03	1.52E-03	1.78E-03	1.78E-03	7.71E-04	-	?	?	8.79E-01	8.79E-01	6.89E-01	6.89E-01
Tungsten	4.52E-03	4.52E-03	2.54E-01	2.54E-01	2.80E-01	2.80E-01	?	-	3.23E-01	?	7.78E+00	7.78E+00	7.19E+00	7.19E+00
Uranium	-	1.40E-03	-	6.56E-02	-	3.85E-02	-	-	-	?	-	2.52E+01	-	3.58E+01
Vanadium	7.70E-07	7.70E-07	4.93E-03	4.93E-03	1.55E-02	1.55E-02	8.73E-03	-	?	?	3.97E+00	3.97E+00	3.49E+00	3.49E+00
Ytterbium	?	-	?	-	?	-	?	-	?	-	3.19E+00	-	2.75E+00	-
Yttrium	5.69E-07	5.69E-07	8.16E-01	8.16E-01	4.23E-01	4.23E-01	?	-	?	?	3.19E+00	?	2.75E+00	?
Zinc	5.38E-04	5.38E-04	3.65E-03	3.65E-03	8.05E-03	8.05E-03	1.47E-03	-	1.89E+00	4.09E+00	1.53E-01	1.53E-01	1.16E-01	1.16E-01
Zirconium	5.44E-06	5.44E-06	1.64E-02	1.64E-02	2.30E-02	2.30E-02	?	-	?	?	1.75E-01	?	1.21E-01	?

5.4. Vigilance au regard de la sensibilité des résultats et de l'incertitude associées à l'usage des méthodes de caractérisation

Le dernier point de vigilance est relatif à la fois à la sensibilité des résultats et à l'incertitude associée aux méthodes de caractérisation et aux données. La réalisation d'une analyse de sensibilité est fortement recommandée en ACV car elle permet d'identifier l'impact de la variabilité des données et facteurs de caractérisation sur les résultats de l'ACV. Elle permet ainsi d'identifier les données critiques pour lesquelles une analyse plus poussée est nécessaire (ex : distance de transport, quantité de réactif utilisé dans un procédé…) et d'orienter les recommandations ou préconisations qui découleront de l'étude.

Les incertitudes quant à elles peuvent avoir plusieurs origines. Des exemples d'incertitudes pour chaque étape de l'ACV tirés des travaux de Igos et al. (2019) sont présentés dans le Tableau 8.

En ce qui concerne les ressources minérales, les incertitudes associées aux facteurs de caractérisation des méthodes telles que proposées par leurs auteurs respectifs sont détaillées en Annexe 5. Ces incertitudes sont généralement qualifiées par les concepteurs des méthodes comme étant très fortes, mais ne sont que très peu quantifiées ou bien explicitées. Ces incertitudes proviennent entre autres de la difficulté d'estimer la taille des réserves minérales disponibles, des méthodes de calcul propres aux facteurs de caractérisation et des sources de données utilisées.

Les fortes incertitudes dans les méthodes de caractérisation ont contraint certains concepteurs de méthode à proposer un jeu varié de facteurs de caractérisation afin de pouvoir conduire des analyses de sensibilité. Ainsi, la méthode CML-IA propose trois types de facteurs de caractérisation basés sur des types de réserves différentes (ultimes, bases de réserve et économiques) pour prendre en compte les variabilités technique et économique associées à l'extraction des ressources. La méthode ReCiPe2016 propose trois classifications des impacts selon une perspective hiérarchique, égalitaire ou individualiste :

- La perspective individualiste est basée sur l'intérêt à court terme, les types d'impact indiscutables et l'optimisme technologique en matière d'adaptation humaine.
- La perspective hiérarchique repose sur un consensus scientifique concernant l'échelle temporelle et la plausibilité des mécanismes d'impact.
- La perspective égalitaire est la perspective la plus prudente, prenant en compte la période la plus longue et toutes les voies d'impact pour lesquelles des données sont disponibles.

Ces fortes incertitudes questionnent la robustesse des méthodes et l'utilisation de l'ACV dans un but d'aide à la décision. Elles ne permettent pas à l'heure actuelle de fournir des éléments suffisamment robustes pour savoir si les choix technologiques mis en œuvre ont vraiment un impact sur la réduction de l'épuisement des ressources. Afin d'améliorer la robustesse de ces méthodes, il est donc nécessaire de connaître l'incertitude associée à chaque facteur de caractérisation. En attendant, de fortes précautions doivent être prises dans l'interprétation des résultats ACV.

Tableau 8. Exemples d'incertitudes en ACV classées selon la localisation et la nature de l'incertitude (tiré de Igos et al., 2019)

Exemples d'incertitudes en ACV		Localisation de l'incertitude			Nature de l'incertitude	
Etape	Exemple	Contexte	Structure du modèle	Quantité	Epistémique	Aléatoire
Objectif et champ de l'étude						
	Définition de l'unité fonctionnelle					
	Cohérence avec l'objectif et le champ de l'étude	X			X	
	Représentativité des caractéristiques de performance	X			X	
	Variabilité des caractéristique de performance	X				X
	Définition des frontières du systèmes					
	Représentativité technologique	X			X	
	Représentativité géographique	X			X	
	Représentativité temporelle	X			X	
	Définition de la modélisation de la structure de l'inventaire					
	Cohérence avec l'objet et le champ de l'étude	X			X	
	Cohérence avec l'approche utilisée pour résoudre la multifonctionnalité du système	X			X	
	Définition des indicateurs et de la méthode de caractérisation					
	Cohérence avec l'objectif et le champ de l'étude	X			X	
	Représentativité des impacts environnementaux	X			X	
Inventaire						
	Pour chaque procédé de premier-plan					
	Représentativité des flux considérés		X		X	
	Représentations des relation		X		X	
	Variabilité des relations avec le flux de référence		X			X
	Représentation des procédés d'arrière-plan utilisés		X		X	
	Représentativité des données utilisées pour chaque flux			X	X	
	Variabilité de chaque flux			X		X
Evaluation des impacts						
	Pour chaque indicateurs d'impact					
	Représentativité des substances caractérisées		X		X	
	Représentativité de la structure de modélisation		X		X	
	Variabilité des relations		X			X
	Représentativité de chaque facteur de caractérisation			X	X	
	Variabilité de chaque facteur de caractérisation			X		X

6. Illustrations avec des cas d'études

6.1. Cas de l'indium sur lien ICV/LCIA

Dans le cadre de la mise en place de l'affichage environnemental pour la téléphonie mobile, plusieurs analyses du cycle de vie de cartes électroniques et de téléphones entiers ont été menées par Orange entre 2010 et 2015 (Andrae et Vaija, 2014)[34], (Andrae et Vaija, 2017)[35]. Les premières études exploitaient le set d'indicateurs « Indicators for PEP ecopassport® - PCR 2.1 » et plus particulièrement l'indicateur « Raw Materials Depletion » pour la mesure de l'épuisement des ressources naturelles. En effet, elles étaient uniquement destinées à être utilisées en interne, en conjonction d'autres analyses pour évaluer des services ou des réseaux. Avec cette méthode, la majorité de l'impact d'un téléphone mobile est causé par 3 métaux (argent, or et étain, cf. Figure 16 colonne de gauche).

En 2012, la Commission Européenne lançait un appel à candidature pour tester la méthode « Product Environmental Footprint »[36]. Pour les besoins de cette étude, la méthode d'analyse de l'épuisement des ressources préconisée était celle mentionnée dans le guide ILCD[37], à savoir Ressources Depletion – Mineral, fossil (basée sur le modèle de CML-IA ADP) dans sa version reserve base (RB). Avec cette méthode, mentionnée dans la suite du texte sous le nom de méthode CML-IA Abiotic Ressources Depletion (CML-IA ARD), l'impact du téléphone mobile est relié quasi exclusivement à la quantité d'indium contenue dans l'afficheur LCD et la dalle tactile sous forme de film ITO (indium-tin oxide). Ce résultat est présenté dans la seconde colonne à partir de la gauche dans la Figure 16. La version ultimate reserves (UR) de CML-IA ARD fut aussi testée dans le cadre de cette analyse (cf. Figure 16, deuxième colonne en partant de la droite), avec l'or apparaissant comme contributeur majoritaire.

Avec la version RB, la très forte contribution de l'indium est due à deux facteurs. Premièrement, la réserve de base utilisée dans CML-IA ARD date de 1999, avec une estimation à 5 700 tonnes au niveau mondial[38]. En 2008, l'USGS a publié sa dernière mise à jour avec une estimation à 16 000 tonnes au niveau mondial. Ce chiffre a ensuite été revu à la hausse à 50 000 tonnes en 2012 (Mikolajczak et Jackson, 2012)[39] voire jusqu'à 125 000 tonnes en incluant l'ensemble du minerai de zinc et de cuivre qui pourrait servir de source (Schwarz-Schampera, 2014)[40]. En effet, il est à noter que l'indium est actuellement uniquement exploité en tant que sous-produit du zinc et que seules 35 % des raffineries sont équipées pour en extraire l'indium (Leguérinel et al., 2018)[41]. Ainsi, même si la production d'indium primaire a fortement augmenté entre 1999 et 2014, passant de 215 à 820 tonnes, une évaluation réalisée avec les chiffres de 2014 donnerait un facteur de caractérisation bien plus faible. Le second problème vient de l'évaluation de l'épaisseur des couches d'ITO dans l'afficheur LCD et la dalle tactile des modèles utilisés.

[34] Anders SG Andrae, Mikko Samuli Vaija (2014). To which degree does sector specific standardization make life cycle assessments comparable?—the case of global warming potential of smartphones. Challenges 2014, 5(2), 409-429; doi:10.3390/challe5020409

[35] Anders SG Andrae, Mikko Samuli Vaija (2017). Precision of a Streamlined Life Cycle Assessment Approach Used in Eco-Rating of Mobile Phones. Challenges 2017, 8(2), 21; https://doi.org/10.3390/challe8020021

[36] http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/dev_methods.htm

[37] Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (2010), JRC (http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/dev_methods.htm)

[38] USGS (2001). Mineral Commodity Summaries Indium, World Refinery Production, Reserves, and Reserve Base 1999 (https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/490301.pdf)

[39] Mikolajczak, C. et B. Jackson. 2012. Availability of indium and gallium. Indium Corporation Tech Paper. Indium Corporation, Clinton, NY, USA.

[40] Schwarz-Schampera, U. 2014. Indium. In Critical metals handbook, edited by G. Gunn. London: Wiley-Blackwell.

[41] Mathieu Leguérinel, Gaétan Lefebvre, Patrice Christmann (2018). Compétition entre secteurs industriels pour l'accès aux matières premières. BRGM – KRYSMINE (http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/1_presentation_competition_interfiliere_v12_finale_0.pdf)

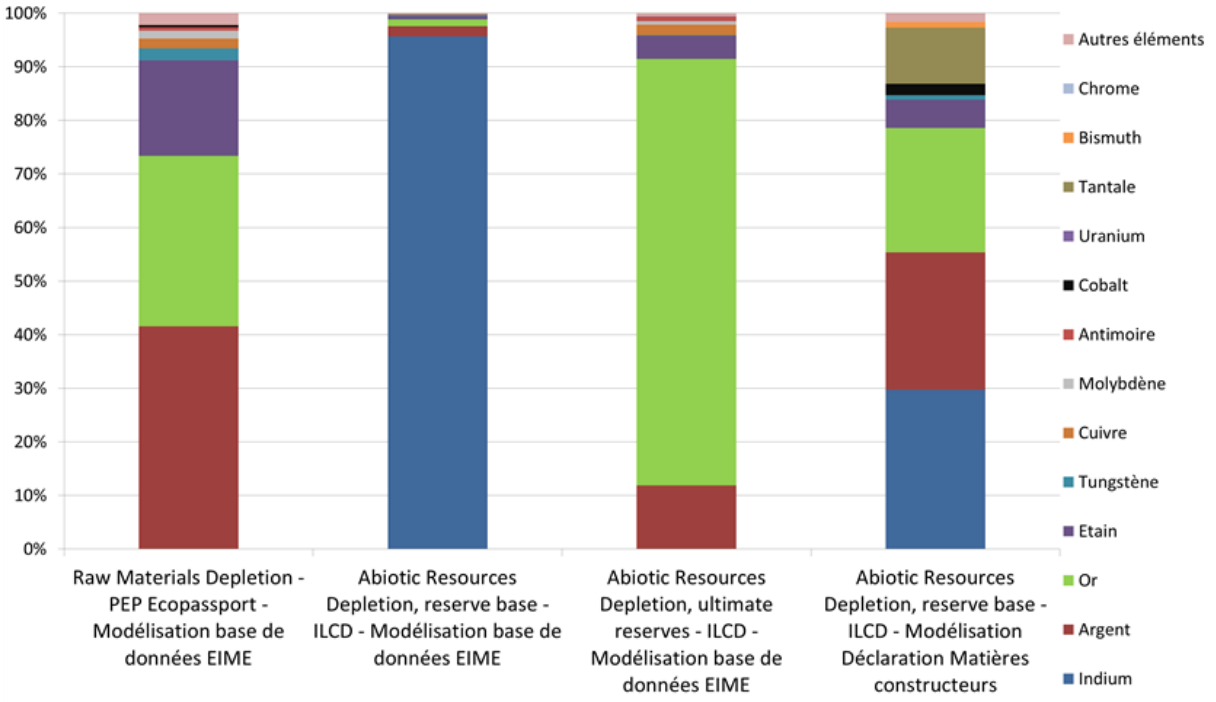


Figure 16. Principaux métaux contribuant à l'impact d'épuisement des ressources naturelles pour un téléphone mobile

Les résultats des analyses étant destinés à une communication externe, il était difficile de remettre en cause une partie des facteurs de caractérisation d'une méthode évaluée comme la plus robuste par le JRC. Le travail d'Orange s'est donc porté sur une amélioration de l'évaluation du contenu en matériaux des différents composants électroniques. En lieu et place des modèles issus des bases de données de logiciels d'analyse du cycle de vie, un ensemble de déclarations matières ont été compilées pour recréer l'architecture d'un produit (Vaija, 2017)[42]. Les résultats avec cette modélisation (en utilisant CML-IA ARD dans sa version RB*)* sont visibles dans la Figure 16 (colonne de droite). Cette méthode permet de mieux faire apparaître les autres métaux, comme l'argent, l'or et l'étain déjà identifiés avec la méthode *Raw Materials Depletion*. De plus, elle souligne l'importance du tantale contenu à la fois dans les condensateurs, ainsi que les filtres à onde de surface (sous forme de tantalate de lithium).

6.2. Cas du germanium sur lien ICV/LCIA

En 2017, une Analyse du Cycle de Vie de service sur la maintenance d'un câble de télécommunications optique sous-marin était lancée avec le câblier Orange Marine. Afin d'effectuer l'opération de réparation, la production de plusieurs kilomètres de câble de rechange était nécessaire et a donc amené à sa modélisation. La Figure 17 présente un exemple de section de câble avec ces matériaux constitutifs. La fibre optique ne représente qu'une infime fraction de la masse du câble. Le cœur de la fibre elle-même n'étant que très faiblement dopée au germanium pour en augmenter l'indice de réfraction.

[42] Mikko Samuli VAIJA (2017). Impact des métaux rares pour le secteur des technologies de l'information et de la communication. Orange (http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/5_orange_-_impact_des_metaux_rares_pour_le_secteur_des_tic_-_version_pdf.pdf)

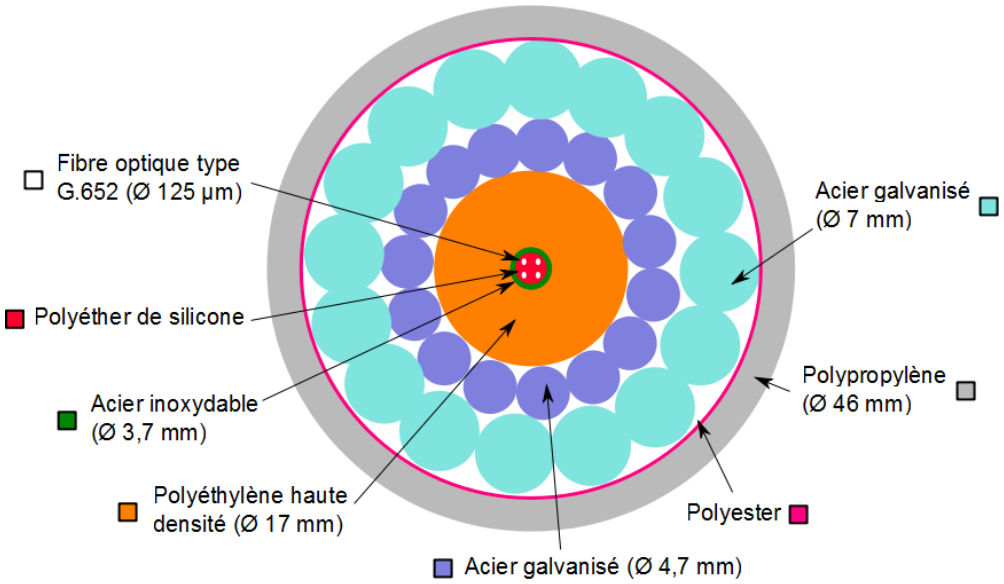


Figure 17. Exemple de section de câble de télécommunication optique sous-marin (source : Orange)

Sur l'ensemble de l'opération de maintenance, la consommation de carburant du navire et la fabrication du câble de rechange sont les deux contributeurs les plus importants pour l'ensemble des indicateurs environnementaux avec la méthode ILCD. Pour l'indicateur CML-IA ARD (dans sa version RB), la fabrication du câble représente 99,93% de l'impact. La Figure 18 présente les principaux matériaux contributeurs à cet indicateur.

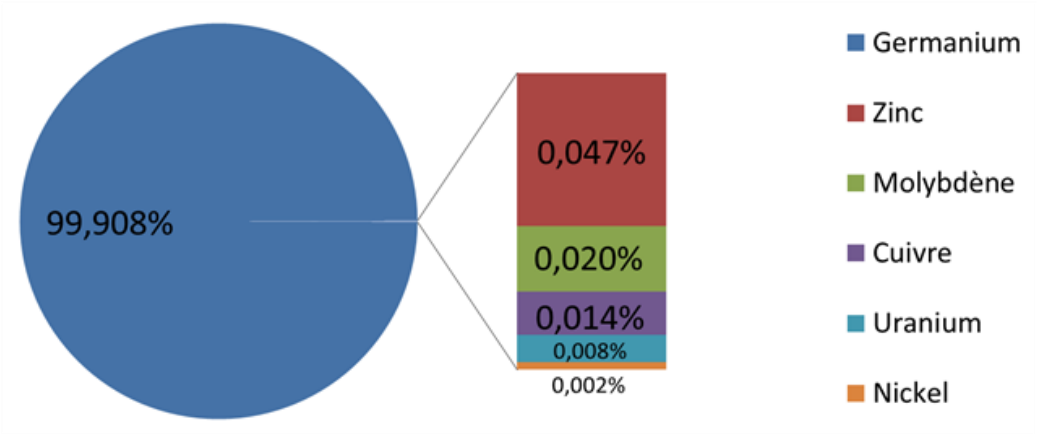


Figure 18. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble

Alors que le germanium ne représente que quelques ppm de la composition du câble, il est le contributeur quasi-exclusif à l'indicateur CML-IA ARD.

Dans la version RB de CML-IA ARD, le germanium est l'élément avec le facteur de caractérisation le plus élevé (19472,8 contre 555,4 pour l'indium ou 35,9 pour l'or). Dans l'analyse sur les matériaux critiques pour l'industrie Européenne[43] de 2018, le germanium est bien noté comme un métal sensible. Cependant, ceci est surtout lié à sa non-substituabilité avec des indices « Economic Importance » et

[43] EU Critical Raw Materials list 2018 (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490)

« Supply Risk » à 1,0 soit le pire score possible, mais également au fait que 64 % soit importé hors d'Europe et que seul 2 % soit recyclé en fin de vie.

Le facteur de caractérisation très élevé du germanium dans CML-IA ARD en version RB s'explique par la source de la donnée. Depuis 2008, l'USGS ne met plus à jour les estimations de réserves de base pour ce métal et entre 1995 et 2007 la valeur communiquée correspond uniquement à la quantité disponible aux Etats-Unis. En reprenant cette valeur (500 000 kg), la production annuelle de germanium (58 000 kg /an), les données pour l'antimoine et en appliquant la formule de l'Exemple 1 (page 14) il est possible de recalculer le facteur de caractérisation noté dans le paragraphe avec l'Équation 1.

Équation 1

$$ARD_{ge} = \frac{\frac{DR_{ge}}{(R_{ge})^2}}{\frac{DR_{sb}}{(R_{sb})^2}} = \frac{\frac{58\,000}{(500\,000)^2}}{\frac{122\,000\,000}{(3\,200\,000\,000)^2}} = 19\,472{,}78$$

La valeur utilisée pour les réserves (500 000 kg) pose deux problèmes. Tout d'abord, elle est calculée uniquement sur le périmètre des Etats-Unis. En 1999, ce raisonnement pouvait se justifier par le fait que la majorité de la production provenait de ce pays. Mais, en 2018, le fait de ne pas considérer les réserves de pays comme la Chine, qui fournit plus de 65 % de la production, est plus difficile à justifier. Le rapport de l'EU sur les profils des matériaux critiques indique par exemple que les réserves prouvées dans ce pays se chiffrent à 3 500 tonnes[44]. De plus, comme pour l'indium, seule une partie des sources d'approvisionnement sont considérées, à savoir ici l'extraction à partir de minerai de zinc. A titre d'exemple, en incluant le charbon et ses cendres comme sources de germanium, les ressources disponibles passent au niveau mondial de 11 000 à 24 600 tonnes[45].

Afin de vérifier l'évolution du facteur de caractérisation, les valeurs 2008 de l'USGS pour les réserves de base de l'antimoine (R'_{sb}), sa production annuelle (DR'_{sb}) et la production annuelle de germanium (DR'_{ge}) ont été combinées avec les valeurs de réserves de base de germanium (R'_{ge}) pour la Chine en 2008 d'après Melcher et Buchholz, 2012[46]. L'Équation 2 donne le résultat de ce calcul.

Équation 2

$$ARD'_{ge} = \frac{\frac{DR'_{ge}}{(R'_{ge})^2}}{\frac{DR'_{sb}}{(R'_{sb})^2}} = \frac{\frac{105\,000}{(3\,055\,000)^2}}{\frac{165\,000\,000}{(4\,300\,000\,000)^2}} = 1\,260{,}72$$

En considérant le périmètre monde pour les réserves de base de germanium (R''_{ge}), toujours d'après Melcher et Buchholz, 2012[47], le facteur de caractérisation se calcule selon l'Équation 3.

[44] Report on critical raw materials for the EU - Critical raw materials profiles (http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11911/attachments/1/translations)
[45] Report on critical raw materials for the EU - Critical raw materials profiles (http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11911/attachments/1/translations)
[46] Frank Melcher et Peter Buchholz (2012). Current and future Germanium availability from primary sources, Minor Metals Conference, Cologne, April 24, 2012 (https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag_germanium.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
[47] Frank Melcher et Peter Buchholz (2012). Current and future Germanium availability from primary sources, Minor Metals Conference, Cologne, April 24, 2012 (https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag_germanium.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

Équation 3

$$ARD''_{ge} = \frac{\frac{DR''_{ge}}{(R''_{ge})^2}}{\frac{DR''_{sb}}{(R''_{sb})^2}} = \frac{\frac{105\,000}{(38\,000\,000)^2}}{\frac{165\,000\,000}{(4\,300\,000\,000)^2}} = 8{,}15$$

Comme le montrent l'Équation 1, l'Équation 2 et l'Équation 3, le facteur de caractérisation du germanium dans la version RB de CML-IA ARD est très fortement lié à l'estimation des réserves. Entre l'Équation 1 et l'Équation 2, l'actualisation de 1999 vers 2008 en considérant uniquement dans les deux cas les réserves du plus grand pays producteur (respectivement Etats-Unis et Chine) a fait divisé la valeur du facteur de caractérisation par 15. Entre l'Équation 1 et l'Équation 3, en plus de l'actualisation des données, les réserves sont aussi considérées au niveau monde. Ceci divise la valeur du facteur de caractérisation du germanium par plus de 2 000, le ramenant sur une valeur comparable à celle de l'argent (8,42).

En utilisant le facteur de caractérisation de l'Équation 3, l'impact CML-IA ARD pour la fabrication du câble a été recalculé. Les résultats sont visibles dans la Figure 19.

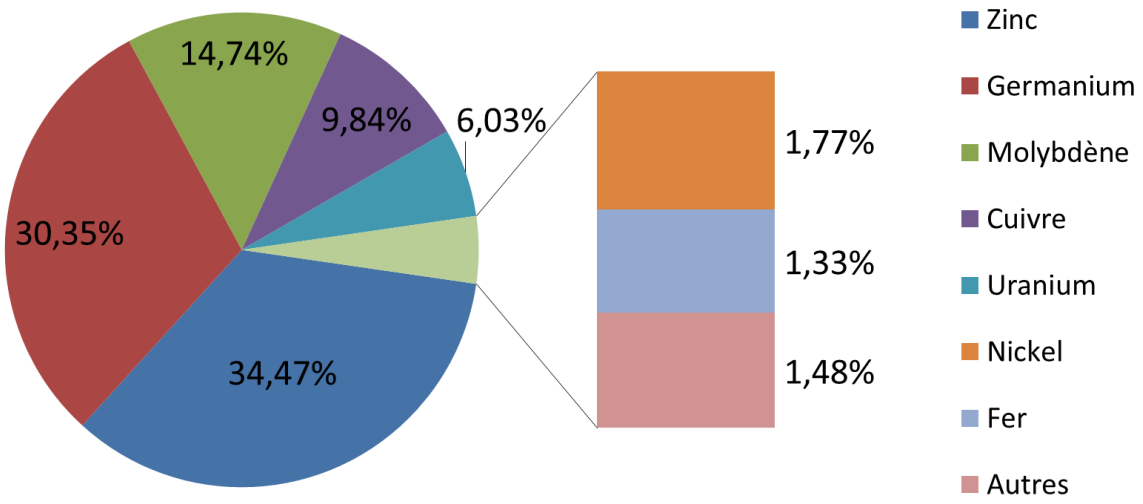


Figure 19. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble après révision de la valeur du facteur de caractérisation du germanium à 8,15

Les illustrations sur le cas de l'indium contenu dans les téléphones portables, comme celui du germanium dans les câbles sous-marin optique, ont démontré qu'il est important de sélectionner une méthode qui considère le maximum de matériaux contenu dans le produit étudié. Il souligne également qu'une attention toute particulière doit être portée aux modèles utilisés, afin de ne pas sur ou sous-estimer la masse de certains matériaux. Les valeurs des facteurs de caractérisation de la version RB de CML-IA ARD s'étendent sur une fourchette allant de $1{,}66.10^{-6}$ pour le fer à $1{,}95.10^{+4}$ pour le germanium, soit un rapport de 1 pour $1{,}17.10^{+10}$. Le fait de modifier, même de façon marginale, la quantité des matériaux ayant les valeurs de facteurs de caractérisation les plus élevées modifie totalement le résultat de l'analyse (cf. Figure 16).

Le cas illustratif sur le germanium démontre la problématique posée par l'évaluation des bases de réserves, d'autant plus lorsqu'il s'agit d'un matériau comme le germanium qui dans la méthode initiale possède la valeur de facteur de caractérisation la plus élevée. La valeur proposée dans l'Équation 3 n'est

cependant pas exploitable toute seule. Il faudrait en effet recalculer les valeurs pour l'ensemble des matériaux afin de conserver l'homogénéité de la méthode.

6.3. Cas de la récupération du phosphore issu des boues d'épuration urbaines

Dans le cadre d'un projet financé par l'AFB (Agence Française pour la Biodiversité), Irstea a réalisé une Analyse du Cycle de Vie de la production de fertilisants phosphatés à partir de boues d'épuration urbaines (Pradel et Aissani, 2019)[48]. Un des arguments en faveur de la récupération du phosphore à partir des déchets est de pouvoir limiter l'extraction minière du phosphore issu de roches phosphatées tout en permettant de fournir une source alternative de phosphore, élément indispensable au fonctionnement du vivant et non substituable. Du fait de sa non-substituabilité, la Commission Européenne a inscrit le phosphore sur la liste des matières premières critiques en 2017.

La récupération du phosphore à partir de sources diverses, y compris les boues d'épuration urbaines, présente donc un fort enjeu. De plus en plus de technologies de récupération sont développées avec différents degrés de maturité, allant du prototype expérimental au prototype industriel opérationnel. L'ACV conduite a donc eu pour objectif d'évaluer, selon une approche ACV « produit », si la production d'engrais phosphatés issue d'une source diffuse telle que la boue d'épuration urbaine pouvait constituer une alternative appropriée à la production d'engrais minéraux issue d'une source plus concentrée et non renouvelable (les roches phosphatées). Pour atteindre cet objectif, quatre scénarios de production d'engrais phosphatés boues-sourcés ont été comparés à la production d'un engrais phosphaté, le Triple Super Phosphate (TSP). Les quatre techniques de récupération du phosphore étudiées sont les suivantes :

- cristallisation de struvite avant la digestion anaérobie par acidification biologique (S1-AcidBio),
- cristallisation de struvite post-digestion anaérobie (S2-Crystal),
- cristallisation de struvite lors de la déshydratation avec le procédé Gifhorn® (S4-Gifhorn),
- traitement thermochimique des cendres par le procédé Ashdec® (S3-AshDec).

Les frontières du système évaluées sont présentées dans la Figure 20 et les résultats ont été ramenés à l'unité fonctionnelle (UF) définie comme « la production annuelle d'1kg de phosphore disponible pour les plantes sous forme minérale ». La forme minérale définie dans l'UF correspond à la struvite, au phosphate Rhénania ou au TSP.

La boue appauvrie en phosphore subit deux types de valorisation. Elle peut être épandue comme amendement organique, le phosphore restant pouvant ainsi se substituer à du Triple Super Phosphate et de l'Ammonitrate (S1-AcidBio et S2-Crystal). Elle peut être également incinérée, le phosphore restant est perdu mais l'électricité et la chaleur produites peuvent se substituer à celles du réseau (S3-AshDec et S4-Gifhorn).

Les scénarios ont été modélisés avec le logiciel GaBi® version 8.7.0.18.

[48] Pradel, M., Aissani, L., 2019. Environmental impacts of phosphorus recovery from a "product" Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers. Science of The Total Environment, 656, pp 55-69

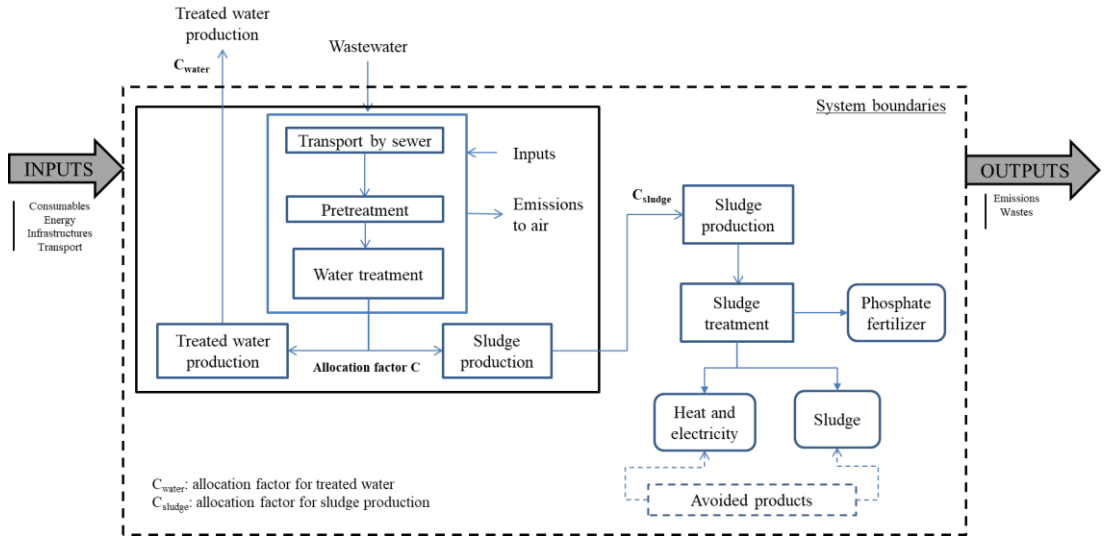


Figure 20. Frontières du système pour l'ACV des produits fertilisants phosphatés boue-sourcés

Le choix de la méthode de caractérisation s'est porté sur une méthode permettant d'évaluer l'épuisement de la ressource phosphore. Au moment où cette étude a été réalisée, seules deux méthodes proposaient des facteurs de caractérisation pour le phosphore, CML-IA et la méthode recommandée par l'ILCD, elle-même basée sur CML-IA.

Les principaux résultats obtenus avec la version *baseline* de CML-IA, c'est-à-dire la version *ultimate reserves* (UR), ont montré que la production de fertilisants boue-sourcés est nettement plus impactante que la production de TSP, essentiellement du fait de la consommation de réactifs nécessaires à la concentration du phosphore diffus et du faible taux de récupération du phosphore pour certains procédés. L'étape de production des fertilisants boue-sourcés, la plus consommatrice de réactifs, est celle qui contribue le plus à la version *ultimate reserve* de l'impact *Abiotic Ressources Depletion* (ARD-UR) (Figure 21).

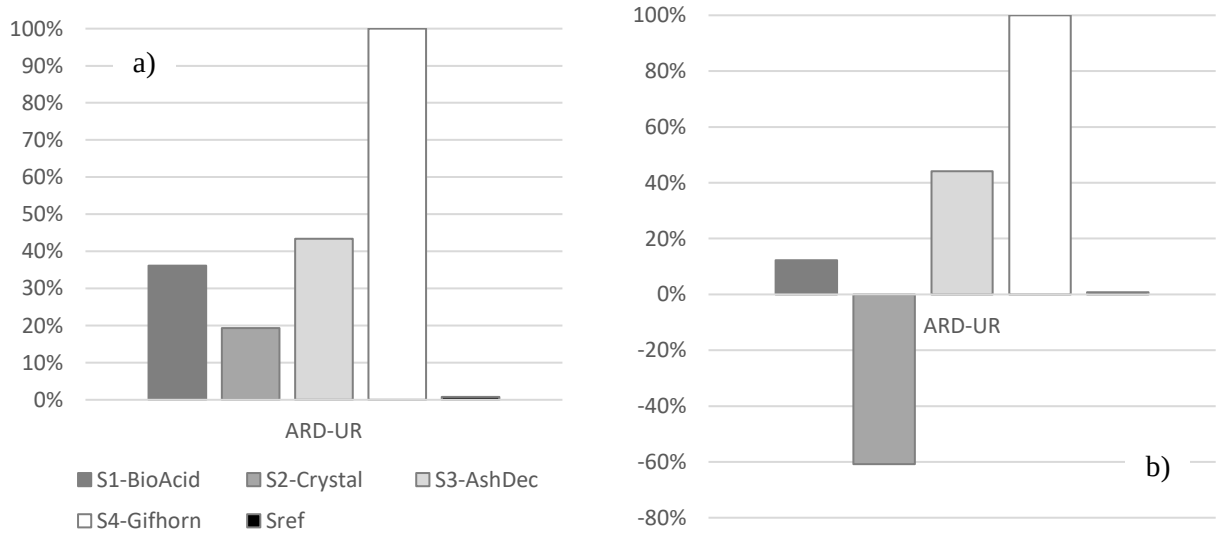


Figure 21. Impacts générés (a) et balance (b) obtenus pour l'impact Abiotic Ressources Depletion (ultimate reserves) pour chaque scenario étudié

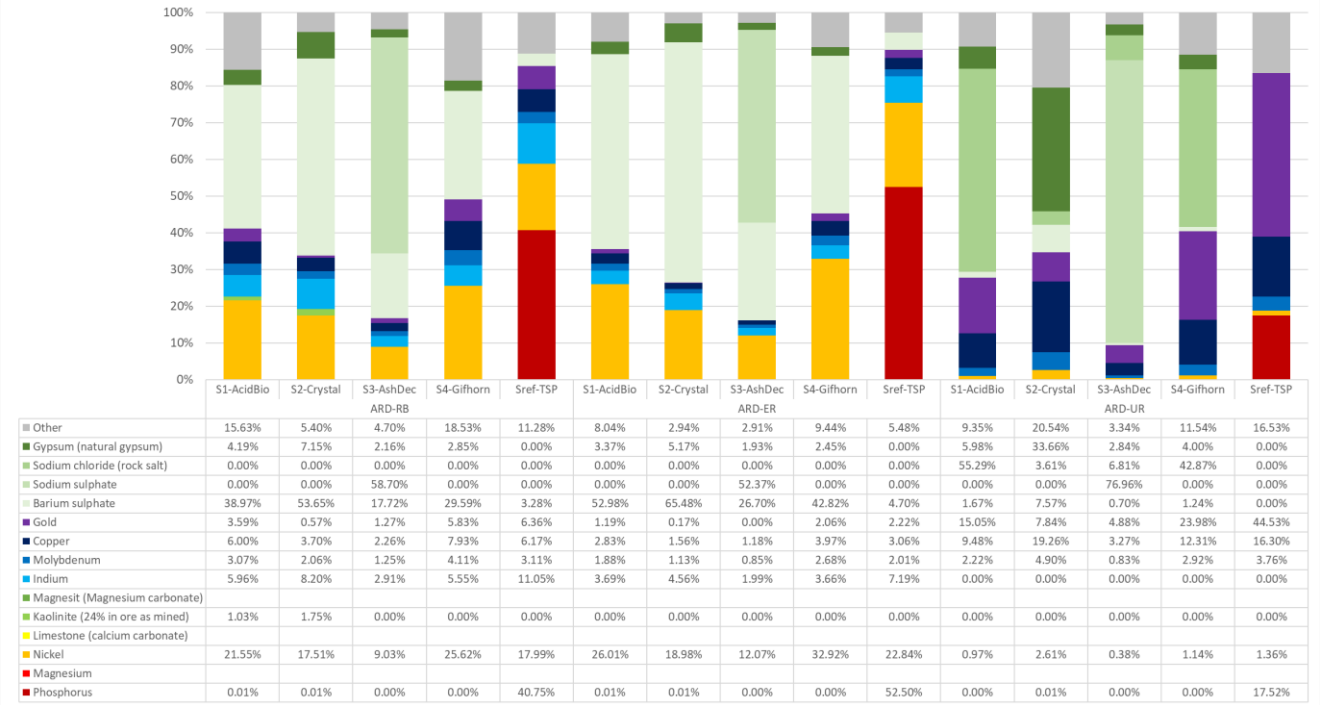
La prise en compte des impacts évités permet une forte réduction des impacts des scénarios S1-AcidBio et S2-Crystal, ce dernier présentant même une balance négative (plus d'impacts évités que d'impacts générés) contrairement aux deux autres scénarios. La boue étant épandue dans les scénarios S1-AcidBio et S2-Crystal, elle a le potentiel d'éviter d'épandre les engrais minéraux substitués (Ammonitrate et TSP) et potentiellement leur production, ce qui favorise la réduction des impacts pour cet indicateur. Les deux autres scénarios valorisant la boue par incinération ne permettent pas une telle réduction.

Une analyse détaillée de l'impact ARD a été réalisée avec ces différentes versions (*economic reserve* (ER), *reserve base* (RB) et *ultimate reserve* (UR)) et comparée à la nouvelle version de la méthode ReCiPe (ReCiPe2016 – metal depletion (MD)), présentant un facteur de caractérisation pour le phosphore contrairement à la version précédente. Les résultats pour les impacts générés sont respectivement présentés en Figure 22 et Figure 23.

Il est difficile de comparer directement les méthodes CML-IA ARD et ReCiPe2016 car d'une part le modèle de calcul des facteurs de caractérisation derrière chaque méthode est différent (modèle d'épuisement physique des ressources pour CML-IA, modèle économique évaluant les efforts d'extraction futurs pour ReCiPe2016) et d'autre part les unités équivalentes sont différentes (équivalent antimoine pour CML-IA, équivalent cuivre pour ReCiPe2016).

L'interprétation des résultats pour chacune des méthodes doit donc se faire de manière distincte. Ainsi, il apparaît pour CML-IA ARD (Figure 22) que la hiérarchie des principales ressources mobilisées pour récupérer le phosphore en utilisant les versions RB et ER est quasiment identique. Les principales ressources épuisées en utilisant ces deux versions sont le barium sulphate, le sodium sulphate, le nickel, l'indium, le gypse et le cuivre pour les scénarios boue-sourcés et le phosphore, le nickel, l'indium, l'or et le cuivre pour le scénario de référence.

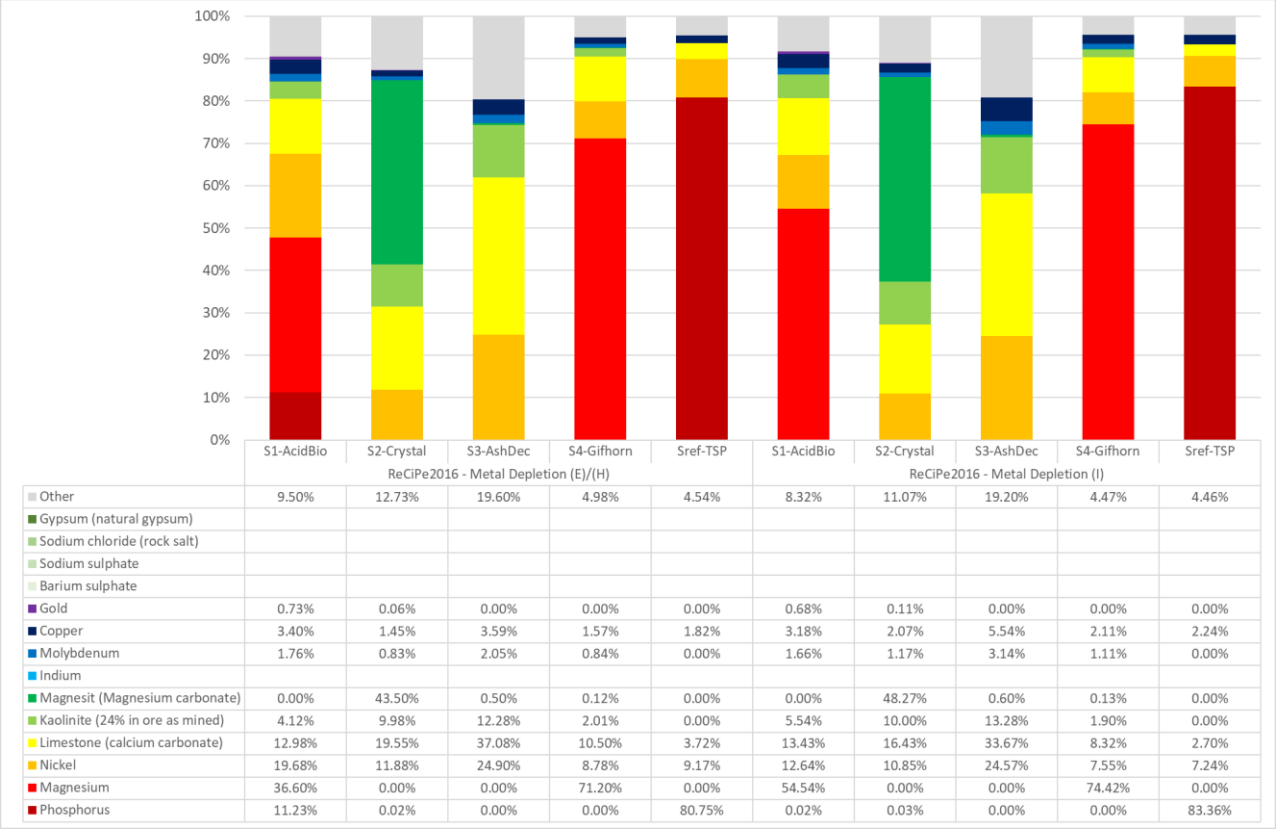
L'utilisation de la version UR modifie cette hiérarchie, l'indium et le nickel disparaissant au profil de l'or, du gypse et du sodium chloride.



	S1-AcidBio	S2-Crystal	S3-AshDec ARD-RB	S4-Gifhorn	Sref-TSP	S1-AcidBio	S2-Crystal	S3-AshDec ARD-ER	S4-Gifhorn	Sref-TSP	S1-AcidBio	S2-Crystal	S3-AshDec ARD-UR	S4-Gifhorn	Sref-TSP
Other	15.63%	5.40%	4.70%	18.53%	11.28%	8.04%	2.94%	2.91%	9.44%	5.48%	9.35%	20.54%	3.34%	11.54%	16.53%
Gypsum (natural gypsum)	4.19%	7.15%	2.16%	2.85%	0.00%	3.37%	5.17%	1.93%	2.45%	0.00%	5.98%	33.66%	2.84%	4.00%	0.00%
Sodium chloride (rock salt)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	55.29%	3.61%	6.81%	42.87%	0.00%
Sodium sulphate	0.00%	0.00%	58.70%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	52.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	76.96%	0.00%	0.00%
Barium sulphate	38.97%	53.65%	17.72%	29.59%	3.28%	52.98%	65.48%	26.70%	42.82%	4.70%	1.67%	7.57%	0.70%	1.24%	0.00%
Gold	3.59%	0.57%	1.27%	5.83%	6.36%	1.19%	0.17%	0.00%	2.06%	2.22%	15.05%	7.84%	4.88%	23.98%	44.53%
Copper	6.00%	3.70%	2.26%	7.93%	6.17%	2.83%	1.56%	1.18%	3.97%	3.06%	9.48%	19.26%	3.27%	12.31%	16.30%
Molybdenum	3.07%	2.06%	1.25%	4.11%	3.11%	1.88%	1.13%	0.85%	2.68%	2.01%	2.22%	4.90%	0.83%	2.92%	3.76%
Indium	5.96%	8.20%	2.91%	5.55%	11.05%	3.69%	4.56%	1.99%	3.66%	7.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Magnesit (Magnesium carbonate)															
Kaolinite (24% in ore as mined)	1.03%	1.75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Limestone (calcium carbonate)															
Nickel	21.55%	17.51%	9.03%	25.62%	17.99%	26.01%	18.98%	12.07%	32.92%	22.84%	0.97%	2.61%	0.38%	1.14%	1.36%
Magnesium															
Phosphorus	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	40.75%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	52.50%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	17.52%

Figure 22. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode CML-IA ARD (version reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR))

Les ressources contributrices aux impacts de l'indicateur MD de la méthode ReCiPe2016 sont différentes (Figure 23). Le phosphore du scénario de référence apparaît comme étant le principal élément pour lequel des efforts économiques devront être réalisés pour extraire la ressource. Les ressources nécessitant des efforts économiques d'extraction pour les scénarios boue-sourcés sont le magnésium (ou la magnésite), le nickel, le limestone et la kaolinite. La version E/H et la version I donnent une hiérarchisation des ressources quasiment identiques.



	S1-AcidBio	S2-Crystal	S3-AshDec	S4-Gifhorn	Sref-TSP	S1-AcidBio	S2-Crystal	S3-AshDec	S4-Gifhorn	Sref-TSP
	ReCiPe2016 - Metal Depletion (E)/(H)					ReCiPe2016 - Metal Depletion (I)				
Other	9.50%	12.73%	19.60%	4.98%	4.54%	8.32%	11.07%	19.20%	4.47%	4.46%
Gypsum (natural gypsum)										
Sodium chloride (rock salt)										
Sodium sulphate										
Barium sulphate										
Gold	0.73%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.68%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%
Copper	3.40%	1.45%	3.59%	1.57%	1.82%	3.18%	2.07%	5.54%	2.11%	2.24%
Molybdenum	1.76%	0.83%	2.05%	0.84%	0.00%	1.66%	1.17%	3.14%	1.11%	0.00%
Indium										
Magnesit (Magnesium carbonate)	0.00%	43.50%	0.50%	0.12%	0.00%	0.00%	48.27%	0.60%	0.13%	0.00%
Kaolinite (24% in ore as mined)	4.12%	9.98%	12.28%	2.01%	0.00%	5.54%	10.00%	13.28%	1.90%	0.00%
Limestone (calcium carbonate)	12.98%	19.55%	37.08%	10.50%	3.72%	13.43%	16.43%	33.67%	8.32%	2.70%
Nickel	19.68%	11.88%	24.90%	8.78%	9.17%	12.64%	10.85%	24.57%	7.55%	7.24%
Magnesium	36.60%	0.00%	0.00%	71.20%	0.00%	54.54%	0.00%	0.00%	74.42%	0.00%
Phosphorus	11.23%	0.02%	0.00%	0.00%	80.75%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	83.36%

Figure 23. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode ReCiPe2016 (version Egalitarian (E), Hierarchist (H) et Individualist (I))

Concernant les impacts évités, lorsque l'on utilise la méthode ReCiPe2016, le nickel et le phosphore sont les principales ressources évitées pour les scénarios S1-AcidBio et S2-Crystal (respectivement 74% et 76% des contributions) et le nickel et le fer pour les scénarios S3-AshDec et S4-Gifhorn (75% pour chaque scénario). Le détail des contributions pour les impacts évités est donné dans le Tableau 9.

Bien que dans une moindre mesure, le nickel et le barium sulphate restent les principales ressources évitées lorsque l'on choisit la méthode CML-IA ARD dans ses versions RB et ER. Le phosphore évité ne représente toutefois qu'environ 10% des impacts évités pour les scénarios S1-AcidBio et S2-Crystal. Le cuivre et l'or sont les deux ressources principalement évitées en utilisant la méthode CML-IA ARD dans sa version UR.

Dans le cadre d'une telle étude, les ressources mobilisées (sodium sulphate, sodium chloride…) étant implementées dans GaBi® et non dans Simapro®, il aurait été intéressant de comparer les résultats obtenus avec ces deux logiciels pour identifier l'impact du choix du logiciel sur les résultats.

Tableau 9. Détail des ressources dont l'épuisement est potentiellement évité pour chaque scénario et méthode de caractérisation utilisée

	ReCiPe2016 - Metal Depletion (E)/(H)				ReCiPe2016 - Metal Depletion (I)				CML-IA ARD (RB)				CML-IA ARD (ER)				CML-IA ARD (UR)			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Nickel	**37%**	**32%**	**50%**	**51%**	**33%**	**27%**	**47%**	**48%**	**33%**	**31%**	**37%**	**37%**	**46%**	**43%**	**39%**	**41%**	2%	2%	6%	5%
Phosphorus	**37%**	**45%**	0%	0%	**37%**	**49%**	0%	0%	7%	11%	0%	0%	11%	16%	0%	0%	2%	4%	0%	0%
Copper	7%	6%	8%	8%	9%	7%	11%	11%	10%	10%	8%	8%	6%	5%	3%	4%	**19%**	**20%**	**45%**	**39%**
Gold	2%	1%	0%	0%	3%	3%	0%	0%	10%	10%	0%	1%	4%	4%	0%	0%	**50%**	**52%**	2%	15%
Zinc									5%	5%	3%	3%	4%	3%	2%	2%	2%	3%	5%	4%
Indium									5%	7%	2%	2%	4%	5%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Silver									6%	6%	0%	1%	2%	2%	0%	0%	3%	3%	0%	1%
Iron	6%	5%	25%	23%	5%	4%	**23%**	**21%**												
Molybdenum	3%	3%	5%	5%	5%	4%	7%	7%	5%	5%	5%	5%	4%	3%	3%	3%	4%	5%	13%	11%
Barium sulphate									11%	10%	**43%**	**39%**	17%	15%	**51%**	**48%**	1%	1%	6%	5%
Limestone (calcium carbonate)	4%	4%	7%	7%	3%	3%	6%	6%												
Chromium									0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	5%	15%	13%
Others	5%	4%	6%	6%	4%	4%	6%	7%	7%	6%	2%	3%	4%	3%	1%	1%	12%	8%	8%	8%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

6.4. Cas des batteries de véhicules électriques

L'électromobilité est une mutation technologique ambitieuse pour le secteur automobile : il s'agit de substituer, pour la propulsion d'un véhicule automobile, l'énergie électrique à l'énergie thermique. Dans le mode de propulsion thermique, l'énergie thermique est libérée par la combustion d'un carburant fossile (essence ou gazole essentiellement) dans un moteur qui la transforme en énergie mécanique pour mouvoir le véhicule. Dans le mode de propulsion électrique, c'est la génération d'un courant électrique par une batterie d'accumulateurs électrochimiques, au sein d'une ou plusieurs machines électriques reliées aux roues, qui permet cette mise en mouvement. L'industrie automobile a majoritairement adopté la technologie Lithium-ion constituée d'une électrode positive métallique (métaux de transition), d'une électrode négative en « matériau d'insertion », et d'un électrolyte (liquide ou solide) composé de sel de lithium ou d'un mélange de solvants organiques. Le choix de la combinaison de matières actives détermine la performance globale de la batterie. De plus, l'approvisionnement de certains éléments contenus dans ces matières actives est aujourd'hui surveillé, que ce soit du point de vue des ressources disponibles, des problématiques géostratégiques ou de responsabilité sociétale (travail des enfants, etc.). Au final, cette mutation est celle d'une technologie basée sur la ressource fossile vers une technologie basée sur la ressource métallique.

La technologie de batterie lithium-ion retenue dans ce cas d'étude est la suivante :

- Electrode positive : oxydes de lithium nickel manganèse cobalt (NMC), avec 60% de nickel, 20% de manganèse, et 20% de cobalt ;
- Electrode négative : Carbone graphite ;
- Electrolyte : solution d'hexafluorophosphate de lithium ($LiPF_6$) ;

Elle est utilisée pour un véhicule électrique, avec une énergie emmagasinée de 50 kWh. La batterie a été modélisée sur le logiciel GaBi® de Thinkstep[49]. Pour l'analyse environnementale ; les indicateurs de ressources utilisés sont les suivants :

- CML-IA – Abiotic Depletion Potential (ultimate reserve) en kg Sb-eq. : ADP-UR;
- CML-IA – Abiotic Depletion Potential (reserve base) en kg Sb-eq. : ADP-RB ;
- CML-IA – Abiotic Depletion Potential (economic reserve) en kg Sb-eq. : ADP-ER;
- ReCiPe 2016 (Hierarchist) – Metal depletion en kg Cu-eq. : MD.

Les Figure 24 et Figure 25 montrent la contribution des principaux éléments de la batterie en fonction de la méthode de calcul, respectivement ADP et MD. On y retrouve les principaux constituants d'une batterie : l'électrode positive (en bleu) ; l'électrode négative (en orange) ; la solution électrolytique (en gris) ; et l'électronique pour le système de *management* de la batterie (en jaune). On remarque que selon la méthode de calcul choisie, la contribution de l'électrode positive varie significativement : de 17% pour la méthode ADP-UR à plus de 90% pour la méthode MD.

[49] La version de GaBi thinkstep utilisée est la 8.7.0.18, avec une base de donnée à la version « service Pack » 36

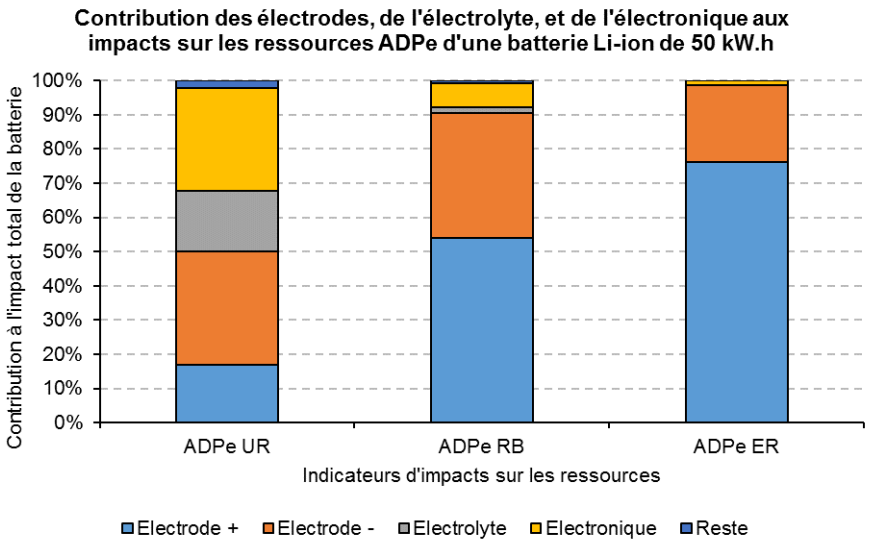


Figure 24. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon les trois versions de calcul de la méthode CML-IA Abiotic Depletion Potential (reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR))

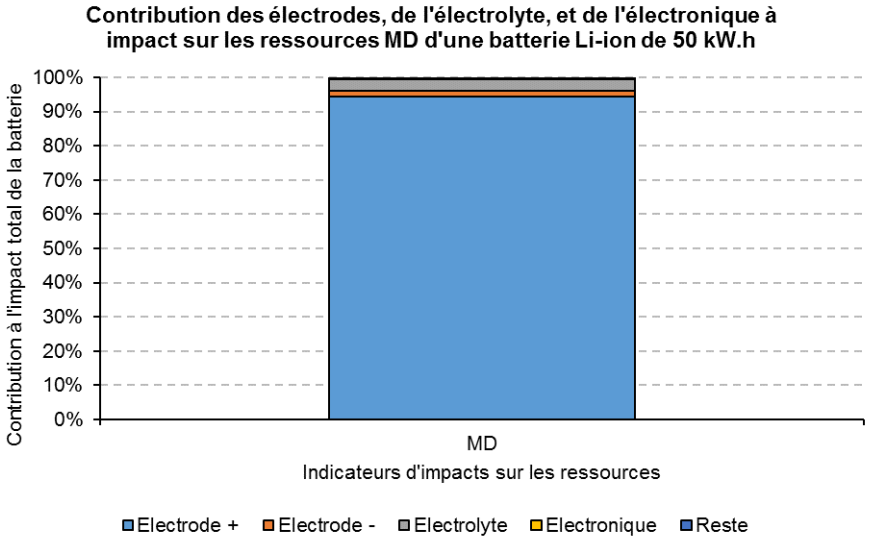


Figure 25. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon la méthode de calcul de l'indicateur MD

La Figure 26 présente les principaux flux élémentaires contributeurs à l'impact de la cathode, selon les quatre indicateurs utilisés pour le calcul. On remarque que d'un indicateur à l'autre, l'importance des flux dans la contribution à l'impact peut varier. Pour la méthode CML-IA, d'un jeu de facteurs de caractérisation à l'autre, les principaux flux contributeurs varient, avec notamment le nickel, qui représente à peine 5% de l'indicateur ADP-UR contre respectivement 31% et 42% pour les indicateurs ADP-RB et ADP-ER ; le lithium, qui contribue pour moins de 5% pour l'indicateur ADP-UR contre respectivement 31% et 33% pour les indicateurs ADP-RB et ADP-ER ; et le cuivre, qui représente 32% de l'indicateur ADP-UR contre respectivement 6% et moins de 3% pour les indicateurs ADP-RB et ADP-ER.

Pour l'indicateur MD, le contributeur majoritaire est le magnésium, qui intervient dans la production du cobalt présent dans l'électrode positive.

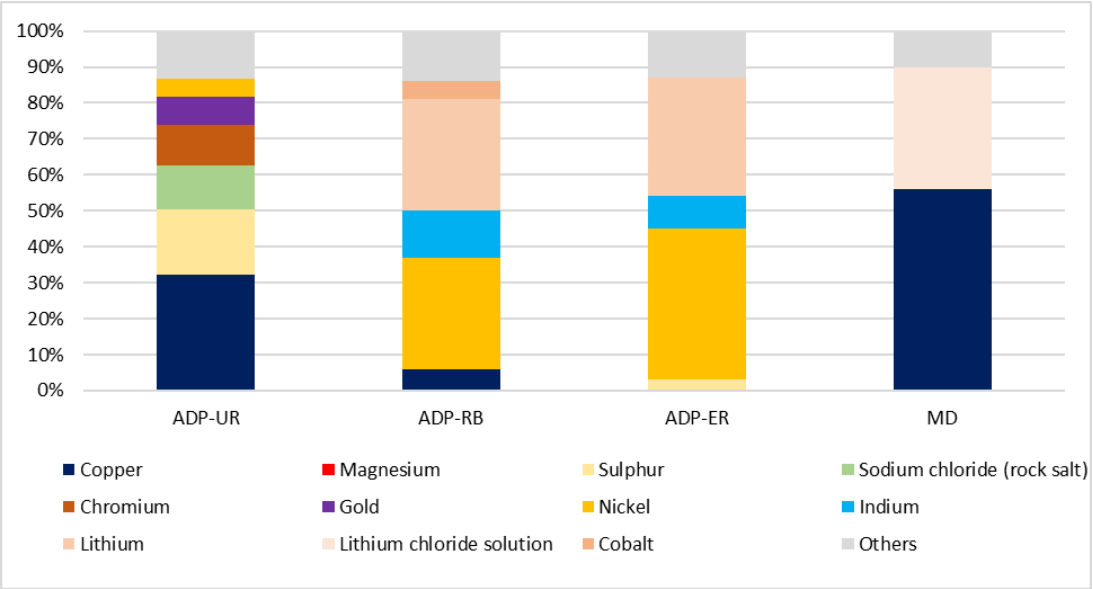


Figure 26. Principaux flux élémentaires contributeurs à l'impact environnemental de la cathode selon la méthode utilisée

7. Conclusion

L'ambition de ce guide a été de fournir à la fois une démarche méthodologique structurée et une synthèse des connaissances disponibles à ce jour pour mieux prendre en compte le critère « ressources minérales » dans les ACV. Ce guide n'a pas eu pour ambition d'apporter des solutions « clés en main » aux ACVistes du fait de la diversité des situations pouvant être rencontrées et des domaines d'activités mobilisant les ressources minérales (techniques de l'information et de la communication, production d'énergie, industrie, agriculture…).

Le choix a donc été délibéré de proposer un guide de bonnes pratiques qui présente les grandes lignes de « Comment faire pour bien prendre en compte les ressources dans mes ACV et comment puis-je évaluer leur criticité ? » plutôt qu'un guide de recommandations qui nécessiterait une application pour chaque secteur d'activités.

En rappel et en conclusion, une synthèse des points importants de ce guide sont présentés ci-après.

1. Proposition d'une démarche méthodologique structurée

Ce guide met en avant une démarche méthodologie structurée représentée sous la forme d'un arbre décisionnel en six étapes. Chacune des étapes reprend le dérouler classique d'une ACV en focalisant sur le critère « ressources ». Des liens hypertextes ont été implémentés dans l'arbre décisionnel pour permettre à l'utilisateur d'accéder facilement aux chapitres du guide concernés. Dans la mesure du possible, un rapprochement a été établi entre criticité des ressources et ACV.

2. Mise à disposition des dernières connaissances disponibles sur les méthodes de caractérisation ACV et les méthodes d'évaluation de la criticité pour les ressources minérales abiotiques

Outre la mise à disposition d'un arbre décisionnel pour orienter le praticien dans sa démarche, l'intérêt de ce guide repose également sur la mise à disposition de l'ensemble des connaissances actuelles relatives à l'épuisement des ressources minérales dans les méthodes ACV et à l'évaluation de leur criticité. Ces connaissances sont récapitulées dans le Tableau 10.

Tableau 10. Synthèse des éléments disponibles dans l'état des connaissances relatives aux méthodes ACV et à la criticité

Méthodes ACV	Méthode d'évaluation de la criticité
• Problème fondamental de l'épuisement des ressources • Difficultés associées à la terminologie utilisée par les différents acteurs œuvrant dans ce domaine • Classification des familles de méthodes disponibles en fonction de ce qu'elles permettent d'évaluer • Derniers développements méthodologiques disponibles • Différentes préconisations apportées à la fois par les institutionnels et pas le monde industriel	• Définition de la criticité • Synthèse des méthode d'évaluation de la criticité • Lien entre méthodes ACV et criticité • Derniers développements méthodologiques disponibles

3. Identification des points de vigilance nécessaires pour la réalisation des ACV

Trois points de vigilances ont été identifiés comme pouvant fortement impacter les résultats ACV et pour lesquels une attention toute particulière doit être portée dans la réalisation des ACV. Le premier point porte sur le choix des méthodes de caractérisation qui doit être réfléchi à la fois d'un point de vue de la cohérence avec l'objectif et le champ et l'échelle temporelle cible de l'étude et en cohérence avec les ressources minérales mises en œuvre par les procédés inclus dans le champ de l'étude. En effet, choisir une méthode pour laquelle aucun facteur de caractérisation n'est disponible pour évaluer les ressources mobilisées par le système n'a pas de sens.

Le deuxième point porte sur le choix du logiciel ACV utilisé pour réaliser la modélisation du système et les calculs d'impacts. En effet, ce choix peut avoir également une grande importance du fait que certaines méthodes ne sont implémentées que dans un seul logiciel (cas d'AADP implémenté dans GaBi® et non dans Simapro®) et que certains flux ne sont pas tous implémentés dans les logiciels (cas du cerium, dysprosium, erbium, europium, gadolinium, holmium, iridium, lanthanum, lutetium, neodymium, osmium, praseodymium, rare-earth metals, ruthenium, samarium, scandium, terbium, ytterbium implémentés uniquement dans GaBi® et Uranium uniquement dans Simapro®).

Enfin, le dernier point de vigilance est relatif aux incertitudes et aux variabilités inhérentes à la réalisation d'une ACV qui peuvent être évaluées par la réalisation d'une analyse de sensibilité, étape incontournable pour une bonne interprétation des résultats.

4. Identification des manques et points d'amélioration nécessaires à une meilleure prise en compte du critère « ressources »

Ce guide a identifié certains manques notamment sur le couplage entre les méthodes d'évaluation de la criticité et les méthodes ACV bien que des développements méthodologiques aient permis d'amorcer ce couplage (méthode GRI par exemple). De nouveaux développements sont également nécessaires pour mieux prendre en compte la substitution et le recyclage des matériaux afin de réduire la criticité des ressources dans un indicateur utilisable en ACV. Enfin, l'épuisement des ressources est pour l'instant abordé uniquement selon une approche statique. Or, la détermination même du fait qu'une ressource s'épuise ou non dépend de nombreux facteurs tels que la découverte de nouveaux gisements, le marché des matières premières et à la volatilité des prix qui vont conditionner l'offre et la demande en ressources, la disponibilité de ressources issus de la technosphère (via le recyclage) ou les potentialités de substitution. Cette question de l'épuisement des ressources se doit donc maintenant de franchir une étape supplémentaire en proposant des méthodes d'évaluation basées sur des approches dynamiques.

Table des figures et des tableaux

Figure 1. Augmentation de la complexité des assemblages métalliques dans les produits génériques (adapté de UNEP, 2013) 6
Figure 2. Arbre de décision pour la prise en compte du critère « ressources minérales » dans les ACV 10
Figure 3. Réserves dans l'environnement et réserves anthropiques (adapté de Drielsma et al., 2016 et Schneider et al., 2011) 12
Figure 4. Chaîne de cause à effet permettant d'évaluer l'impact de l'usage des ressources en ACV (tiré de Berger et al., 2018) 13
Figure 5. Questions relatives aux impacts de l'usage des ressources minérales, les méthodes appropriées, recommandées (en gras) et le niveau de recommandation (en italique) (tiré de Berger et al., 2018) 18
Figure 6. Risque d'approvisionnement en fonction de la vulnérabilité 21
Figure 7. Eléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité (Habib and Wenzel, 2016) 22
Figure 8. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par Graedel et al. (2012, 2015) 23
Figure 9. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par la Commission Européenne (European commission, 2017 ; Blengini et al., 2017) 24
Figure 10. Résultats 2017 de l'évaluation de la criticité au regard de l'importance économique et du risque d'approvisionnement (European Commission, 2017) 25
Figure 11. Evaluation des indicateurs de criticité selon Graedel et al. (2015) 26
Figure 12. Représentation schématique de l'intégration de la méthode de Graedel et al. (2012) dans un contexte d'Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (tiré de Sonnemann et al., 2015) 28
Figure 13. Lien entre flux élémentaires, cadre conceptuel de l'ACV et dimension de la durabilité (tiré de Mancini et al., 2018) 28
Figure 14. Nombre de ressources minérales évaluées pour quelques méthodes de caractérisation ACV 33
Figure 15. Evolutions des facteurs de caractérisation pour la méthode CML-IA selon le type de réserves utilisée et l'année 35
Figure 16. Principaux métaux contribuant à l'impact d'épuisement des ressources naturelles pour un téléphone mobile 43
Figure 17. Exemple de section de câble de télécommunication optique sous-marin (source : Orange) 44
Figure 18. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble 44
Figure 19. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble après révision de la valeur du facteur de caractérisation du germanium à 8,15 46
Figure 20. Frontières du système pour l'ACV des produits fertilisants phosphatés boue-sourcés 48
Figure 21. Impacts générés (a) et balance (b) obtenus pour l'impact Abiotic Ressources Depletion (ultimate reserves) pour chaque scenario étudié 48
Figure 22. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode CML-IA ARD (version reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR)) 49
Figure 23. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode ReCiPe2016 (version Egalitarian (E), Hierarchist (H) et Individualist (I)) 50
Figure 24. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon les trois versions de calcul de la méthode CML-IA Abiotic Depletion Potential (reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR)) 53
Figure 25. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon la méthode de calcul de l'indicateur MD 53
Figure 26. Principaux flux élémentaires contributeurs à l'impact environnemental de la cathode selon la méthode utilisée 54
Figure 27. Relation entre contenu crustal, ressource minérale et réserve minérale (adapté de Drielsma et al., 2016) 60
Figure 28. Evaluation de l'impact environnemental du cycle de vie 61

Tableau 1. Outils d'évaluation de l'épuisement et de la disponibilité des ressources selon l'échelle de temps considérée 19
Tableau 2. Indicateurs d'épuisement des ressources exigés dans les principaux référentiels (Product Category Rules) concernant les déclarations environnementales sur les produits (tiré de Petiot et al., 2013) 20
Tableau 3. Ressources identifiées comme critiques par la Commission Européenne 26
Tableau 4. La criticité des ressources dans son contexte multidimensionnel (tiré de Mancini et al., 2018) 29
Tableau 5. Critères économiques pouvant affecter l'approvisionnement en ressources 31
Tableau 6. Indicateurs d'impact utilisés pour le calcul de l'ESP 32
Tableau 7. Facteurs de caractérisation des principales méthodes de caractérisation pour les flux « éléments » tels qu'implémentés dans les logiciels Gabi® et Simapro® 37
Tableau 8. Exemples d'incertitudes en ACV classées selon la localisation et la nature de l'incertitude (tiré de Igos et al., 2019) 41
Tableau 9. Détail des ressources dont l'épuisement est potentiellement évité pour chaque scénario et méthode de caractérisation utilisée 51
Tableau 10. Synthèse des éléments disponibles dans l'état des connaissances relatives aux méthodes ACV et à la criticité 55
Tableau 11. Glossaire des définitions utilisées dans le contexte minier et celui de l'ACV 59
Tableau 12. Principales méthodes de caractérisation existantes 63
Tableau 13. Comparaison des facteurs de caractérisation CML-IA (réserves ultimes) utilisés par les logiciel GaBi et Simapro 69

Annexe 1. Réserves ou ressources ?

L'industrie minière s'est intéressée à comment évaluer l'usage des ressources minérales dans un contexte de développement durable. Tilton, économiste américain reconnu, a identifié en 2002 que le débat sur l'épuisement des ressources reposait sur deux modèles de pensée :

- Un modèle basé sur le « **fixed stock paradigm** », considérant les ressources comme finies et présentant l'épuisement des ressources selon un point de vue pessimiste. Ce modèle considère que l'ensemble des ressources présentes sur Terre ne sont pas renouvelables à l'échelle de temps humaine et qu'une fois extraites, elles disparaissent.
- Un modèle basé sur le « **opportunity cost paradigm** », considérant qu'à partir du moment où il sera nécessaire de payer pour disposer d'une quantité supplémentaire de ressource, l'épuisement desdites ressources se fera ressentir par une envolée des prix de marché. Un moyen de contrôle de la disponibilité des ressources reposerait donc sur le contrôle des prix du marché.

Les méthodes de caractérisation développées en ACV oscillent entre ces deux modèles de pensée ce qui peut être problématique car ils offrent différentes visions de la nature des ressources qui ne sont pas bien retranscrites dans les résultats ACV et l'interprétation qui peut en être faite. Ainsi, dans le cas du modèle « fixed stock paradigm », les ressources sont à préserver et une utilisation des ressources conduit nécessairement à une pénalisation ou une diminution de sa disponibilité/valeur. Dans le modèle « opportunity cost paradigm », les ressources sont considérées comme des flux qui doivent être gérés au mieux pour satisfaire la demande des activités humaines (Drielsma et al., 2016).

La question de la disponibilité des ressources, terme économique référant à l'accessibilité, la présence ou la disposition d'une ressource pour un usage humain, n'est pas forcément corrélée à son épuisement. Ainsi, une ressource peut avoir un fort potentiel d'épuisement et être économiquement disponible (cas du mercure) ou au contraire avoir un faible potentiel d'épuisement mais être économiquement peu disponible (cas des phosphates). Dans ce cas précis, la disponibilité des ressources s'apparente à la notion de criticité définie par l'Union Européenne.

Aussi, afin de disposer d'une terminologie identique sur les ressources entre professionnels de l'industrie minière et experts ACV, Drielsma et al. (2016) proposent un glossaire des définitions repris par Sala et al. (2016)[50]. Ces définitions sont répertoriées dans le Tableau 11. Les termes sont indiqués en langue originelle (anglais) et une traduction est proposée pour chaque terme en français (an gras italique).

Le point le plus critique porte sur l'usage du terme « réserve », qui, pour l'industrie minière, détermine tout ce qui réfère à un fort niveau de faisabilité et pour lequel l'extraction est économiquement viable actuellement et dans un futur proche alors que ce terme est utilisé en ACV pour désigner tout gisement potentiel de ressources.

[50] S. Sala, L. Benini, V. Castellani, B. Viadal-Legaz, and R. Pant, "Environmental Footprint - Update of life cycle impact assessment methods; DRAFT for TAB (status: May 2, 2016). Resources, water, land," 2016.

Tableau 11. Glossaire des définitions utilisées dans le contexte minier et celui de l'ACV

Terminologie utilisée par l'industrie minière	Terminologie utilisée en ACV	Définitions
Crustal content ***Contenu de la croûte terrestre***	Ultimate reserve ***Réserve ultime***	Quantité totale d'un élément dans une couche donnée de la croûte terrestre Cette quantité est estimée en multipliant les concentrations moyennes des éléments chimiques dans la couche de la croûte terrestre (couche crustale) par la masse de cette même couche. Le contenu en éléments de la couche crustale (contenu crustal) ne sera jamais extrait complètement du fait que certains gisements resteront indisponibles tels que soit les conditions économiques prévisibles.
Extractable global resource ***Ressource globale extractible***	Ultimately extractable reserve ***Réserve ultime extractible***	Quantité du contenu crustal qui sera prouvé comme ultimement extractible par les Humains
Mineral resource ***Ressource minérale***	Reserves base ***Base de réserves***	Concentration ou occurrence d'un matériel solide d'intérêt économique dans ou sur la croûte terrestre dans une forme telle en qualité et quantité qu'il existe des prospections raisonnables pour une éventuelle extraction économique. La localisation, la quantité, la qualité, la continuité et autres caractéristiques géologiques de la ressource minérale sont connues, estimées ou interprétées à partir de preuves et connaissances géologiques incluant l'échantillonnage.
Mineral reserve ***Réserve minérale***	Economic reserve ***Réserve économique***	Part économiquement exploitable d'une ressource minérale mesurée et/ou indiquée Cela inclut les possibilités de dilution ou de perte du matériel qui peuvent se produire quand le matériel est exploité ou extrait et est défini par des études de préfaisabilité ou de faisabilité appropriées[51]. De telles études démontrent, qu'au moment du rapport, l'exploitation peut être raisonnablement justifiée.
Resource depletion ***Epuisement des ressources***	Resource depletion ***Epuisement des ressources***	Processus de réduction physique d'une quantité globale d'une ressource spécifique Se réfère à la réduction de l'ensemble des stocks naturels/géologiques dans le temps.
Reserve depletion ***Epuisement des réserves***		Production minière des réserves minérales déjà identifiées

[51] Les études de préfaisabilité et de faisabilité déterminent la viabilité d'un projet minier en prenant conjointement en compte de multiples domaines : le choix des techniques minières, sous-terraines, à ciel ouvert, lixiviation en tas, le choix des procédés de traitement du minerai, la gestion des résidus miniers et des stériles, la gestion des eaux, les plans de réhabilitation et la gestion de l'après-mine, les aspects environnementaux et sociaux, les infrastructures associées, notamment de transport ou d'approvisionnement en énergie.

Une distinction plus précise existe pour distinguer les ressources minérales des réserves minérales proposée par le CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Accounting Reporting Standard), ainsi que la relation existante avec le contenu crustal (Figure 27).

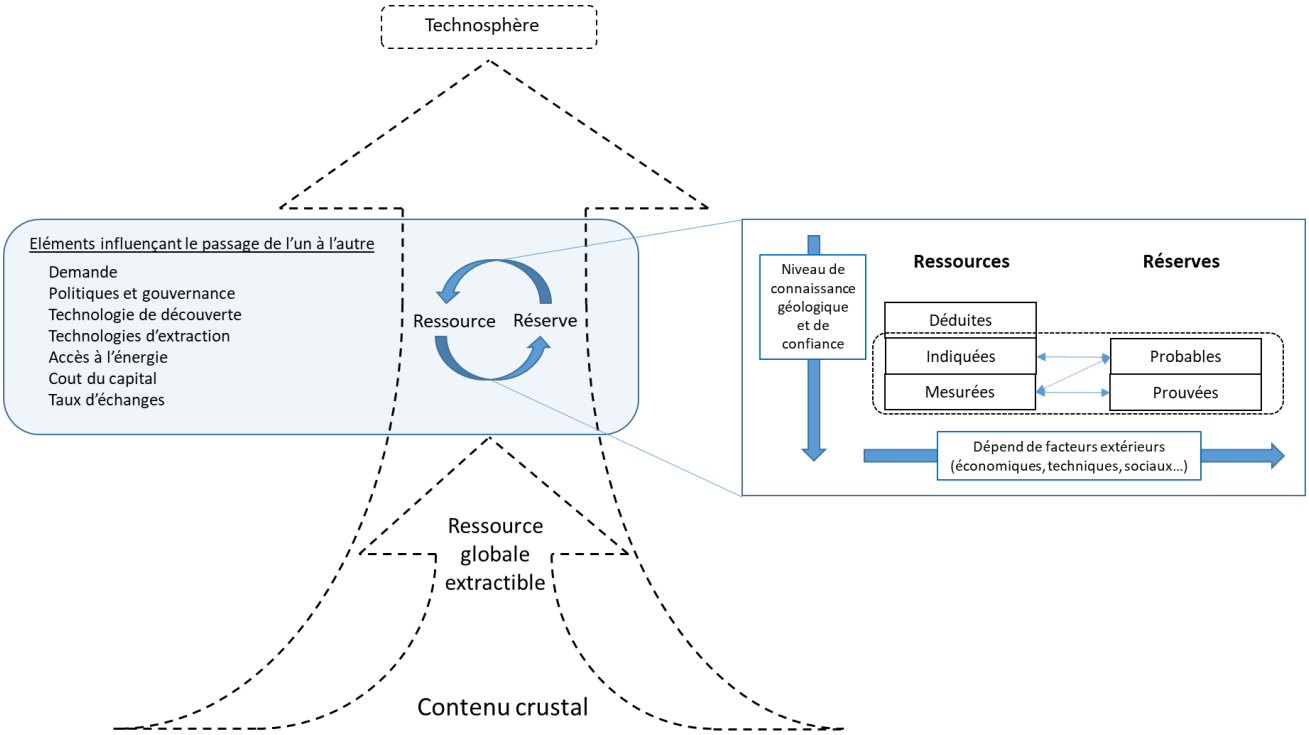


Figure 27. Relation entre contenu crustal, ressource minérale et réserve minérale (adapté de Drielsma et al., 2016)

En ACV, les réserves ultimes sont estimées en déterminant le pourcentage de chaque élément que l'on choisit de prendre en compte dans la croûte terrestre continentale mais également dans les océans et l'atmosphère (Guinée, 1995)[52]. Le calcul est basé sur l'équation suivante : ($mass_{crust}$ x $concentration_{crust}$) + ($volume_{oceans}$ x $concentration_{oceans}$) + ($mass_{atmosphere}$ x $concentration_{atmosphere}$) où $mass_{crust}$ = 2.31 x 1022 kg (profondeur : 17 km, densité : 2500 $kg.m^{-3}$, surface : 5.14 x 1014 m^2), $volume_{oceans}$ = 1.35 X 1021 l, $masse_{atmosphere}$ = 5.14 x 1018 kg. Les réserves ultimes extractibles sont calculées sur la même base mais en ne prenant en compte que les zones accessibles.

Au final, afin de faciliter la lecture du document, les termes « ACV » seront utilisés dans l'ensemble du document.

[52] Guinée, J.B., 1995. Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products wit ha case study on margarines. PhD Thesis, 225 pages.

Annexe 2. Les méthodes de caractérisation en ACV

L'ACV est une procédure itérative constituée de quatre étapes à savoir : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'analyse de l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation des impacts environnementaux et l'interprétation. L'évaluation des impacts environnementaux consiste à traduire les flux inventoriés lors de l'étape du cycle de vie en impacts potentiels (Figure 28).

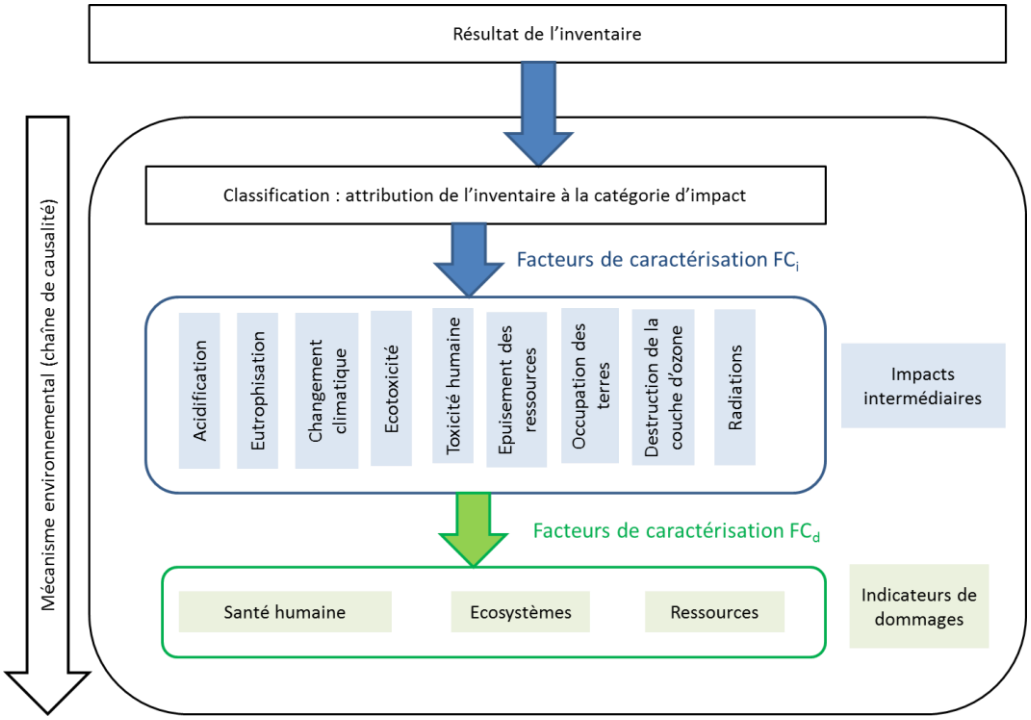


Figure 28. Evaluation de l'impact environnemental du cycle de vie

Les flux d'inventaire font en premier lieu l'objet d'une classification, c'est-à-dire qu'ils sont identifiés comme étant contributeurs à une ou plusieurs catégories d'impacts environnementaux. A titre d'exemple, le protoxyde d'azote (N_2O) contribue à l'impact de changement climatique et à l'impact d'eutrophisation.

Les flux référencés lors de l'analyse de l'inventaire sont ensuite convertis, le plus souvent, en quantité de substance « équivalente » par un *facteur de caractérisation* (on parle alors de « caractérisation des impacts ») pour chaque impact étudié selon la formule suivante (Guinée et al., 2002) :

$$I_c = \sum_{i}^{n} (m_i \cdot CF_{c,i})$$

Où I_c est l'impact relatif à la catégorie d'impact c issus de l'émission de n substances pour un cycle de vie donné (mesuré en kg), m_i la masse de substance i inventoriée dans le processus (mesurée en kg) et $CF_{c,i}$ le facteur de caractérisation de l'impact c relatif à la substance i, (exprimée en quantité de substance équivalente par kg de substance i).

Les facteurs de caractérisation sont construits sur la base de modèles appelés modèles de caractérisation. Ces modèles visent à représenter quantitativement la contribution de chacune des substances émises tout

au long de la chaîne de cause à effet pour chacun des impacts. Deux approches existent : l'approche midpoint (ou intermédiaire) décrite ci-dessus et l'approche endpoint (ou dommage).

Les indicateurs de dommages (ou impacts finaux) ont pour principale vocation de regrouper les impacts intermédiaires en fonction de leurs contributions respectives à la détérioration des aires de protection que sont la santé humaine, les ressources naturelles et les écosystèmes (ILCD Handbook, 2010). Ils sont calculés par la formule suivante (Guinée et al., 2002) :

$$I_c = \sum_{i}^{n} (m_i \cdot dommage_{c,i})$$

Où I_c est l'impact relatif à la catégorie de dommage c issu de l'émission de n substances (mesuré en DALY ou PDF.m².an ou MJ), m_i la masse de substance *i* inventoriée dans le processus du cycle de vie du scénario considéré (mesurée en kg) et $dommage_{c,i}$ le résultat de l'indicateur de catégorie de dommage c relatif à la substance i (mesuré en DALY.kg^{-1} ou PDF.m².an.kg^{-1} ou MJ.kg^{-1} selon l'aire de protection et la méthode de caractérisation).

Leur principal avantage réside dans la capacité de présenter des résultats d'impact plus facilement appropriables. Toutefois, une incertitude importante réside dans la construction de la chaîne de cause à effet des impacts jusqu'à leur dommage sur les aires de protection en raison de la complexité, de la temporalité et du manque de connaissance des phénomènes mis en œuvre.

Il existe enfin des méthodes de compilation des résultats de caractérisation des impacts finaux (normalisation, agrégation, pondération, monétarisation) permettant d'obtenir un score unique. Ces méthodes sont facultatives d'après la norme et font l'objet de discussion quant à leur objectivisme.

Les principales méthodes de caractérisation existantes sont répertoriées dans le Tableau 12.

Tableau 12. Principales méthodes de caractérisation existantes

Nom de la méthode	Concepteur	Indicateurs d'impact intermédiaire (midpoint)	Indicateurs d'impact finaux (endpoint)	Aires de protection	Document de référence
CML-IA	Institute of Environmental Sciences of the University of Leiden (CML)	Depletion of mineral abiotic resources, depletion of fossil abiotic resources, land competition, climate change, stratospheric ozone depletion, human toxicity, freshwater aquatic ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, photo-oxidant formation, acidification, eutrophication.	Pas d'indicateurs endpoint développés	Human health, natural environment, man-made environment, natural resources	Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; Huijbregts, M.A.J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp. https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-new-dutch-lca-guide
EDIP 2003	Institute for Product development at the Danish Technical University	Global warming, stratospheric ozone depletion, acidification, terrestrial and aquatic eutrophication, photochemical ozone formation, human toxicity, ecotoxicity, noise, abiotic resource use	Pas d'indicateurs endpoint développés	Human health, ecosystems, resources	Hauschild, M. Z. and H. Wenzel, 1998. Environmental Assessment of Products, Volume 2. London, Chapman & Hall, 565 pages. Hauschild, M., Potting, J., 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment, the EDIP2003 methodology. Danish Ministry of The Environment, Environmental news No. 80, 195 pages. http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-579-4/pdf/87-7614-580-8.pdf
TRACI et TRACI2	US Environmental Protection Agency (EPA)	Ozone depletion, global warming, photochemical smog formation, acidification, eutrophication, human health (cancer, non-cancer, particulate), ecotoxicity, resource depletion (fossil fuel use, water use, land use)	Pas d'indicateurs endpoint développés	Human health, ecosystems, resources	Bare, J. C. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI), Version 2.1 - User's Manual; EPA/600/R-12/554 2012. https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci
Eco Indicator 99	PRé consultants	Pas d'indicateurs midpoint développés	Carcinogenic substances, respiratory effects, climate change, ionizing radiation, ozone layer depletion, ecotoxicity, acidification, eutrophication, land-use, resources (mineral, fossil)	Human health, ecosystems quality, resources	M. Goedkoop and R. Spriensma, Eco-indicator 99, a damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology report, Third edition, June 2001, Ministry of Housing, Spatial planning and the Environment, The Netherlands, 87 pages. https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_annexe_v3.pdf

Tableau 12 (suite)

Nom de la méthode	Concepteur	Indicateurs d'impact intermédiaire (midpoint)	Indicateurs d'impact finaux (endpoint)	Aires de protection	Document de référence
EPS 2000	Swedish Environmental Research Institute (IVL)	Pas d'indicateurs midpoint développés	Human health : Life expectancy, severe morbidity and suffering, morbidity, severe nuisance, nuisance Production capacity of ecosystems: crop production capacity, wood production capacity, fish and meat production capacity, base cation capacity, production capacity for water Biodiversity: Extinction of Species Abiotic stock resource: depletion of element reserves, depletion of fossil reserves (gas, coal, oil), depletion of mineral reserves	Human health, ecosystem production capacity, biodiversity, abiotic stock resources	B. Steen, A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS), Version 2000 – General system characteristics, CPM report, 1999, 67 pages.[53] B. Steen, A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS), Version 2000 – Models and data of default method, CPM report, 1999, 312 pages.[54]
ReCiPe 2016	RIVM, NTNU Trondheim, PRé Consultants, Radboud University Nijmegen	Climate change, stratospheric ozone depletion, terrestrial acidification , freshwater and marine eutrophication, toxicity, photochemical ozone formation, fine particulate matter formation, ionizing radiation, land use, water use, mineral resource scarcity, fossil fuel scarcity	Damage to human health, damage to ecosystem quality, damage to resources availability	Human health, natural environment, resource scarcity	Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, A., Zijp, M., van Zelm, R.. 2017. ReCiPe 2016 v1.1. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: Characterization. National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands, RIVM Report 2016-0104a, 201 pages. https://www.rivm.nl/documenten/recipe2016v11

[53] https://www.ivl.se/download/18.7e136029152c7d48c202bba/1465979612076/CPM%20report%201999_4.pdf
[54] https://pdfs.semanticscholar.org/9e74/a647fa13e8ceba079d885d8be8174fd941c6.pdf

Tableau 12 (suite)

Nom de la méthode	Concepteur	Indicateurs d'impact intermédiaire (midpoint)	Indicateurs d'impact finaux (endpoint)	Aires de protection	Document de référence
Eco-scarcity	Federal Office for the Environment (FOEN), Switzerland	Air emissions: greenhouse gases, ozone-depleting substances, substances with photochemical ozone creation potential, NOx, NH_3, acidifying substances, particulate matters, CO, Benzene, dioxin and furans, Pb, Cd, Zn Surface water emissions: N, P, organic matter, heavy metal and As, radioactive emissions, AOX, chloroform, PAHs, benzo(a)pyrène, endocrine disruptors Emissions to groundwater: nitrates Emissions to soil : heavy metals, pesticides), resources (energy, land use, freshwater consumption, gravel extraction). Wastes: landfilled, stored underground, radioactive	Pas d'indicateurs endpoint développés	Human health, ecosystems, resources	Frischknecht, R., Steiner, R., Jungbluth, N. 2009: The Ecological Scarcity Method - Eco-Factors 2006: A method for impact assessment in LCA. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), Bern. 190 pages.[55]
LIME et LIME2	LCA National Project of Japan	Ozone layer depletion, global warming, acidification, photochemical oxidant, urban and indoor air pollution, toxic chemicals, biological toxicity, eutrophication, land use, waste, noise, resource consumption (mineral, fossil, living)	Human health, social assets, primary production, biodiversity.	Human beings, the ecosystem	Itsubo, N. and Inaba, A.. LIME2 Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling – Summary, JLCA Newsletter Life-Cycle Assessment Society of Japan N°12, Mars 2012. 21 pages. http://lca-forum.org/english/

[55] https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/wirtschaft-konsum/uw-umwelt-wissen/methode_der_oekologischenknappheitoekofaktoren2006.pdf.download.pdf/the_ecological_scarcitymethodeco-factors2006.pdf

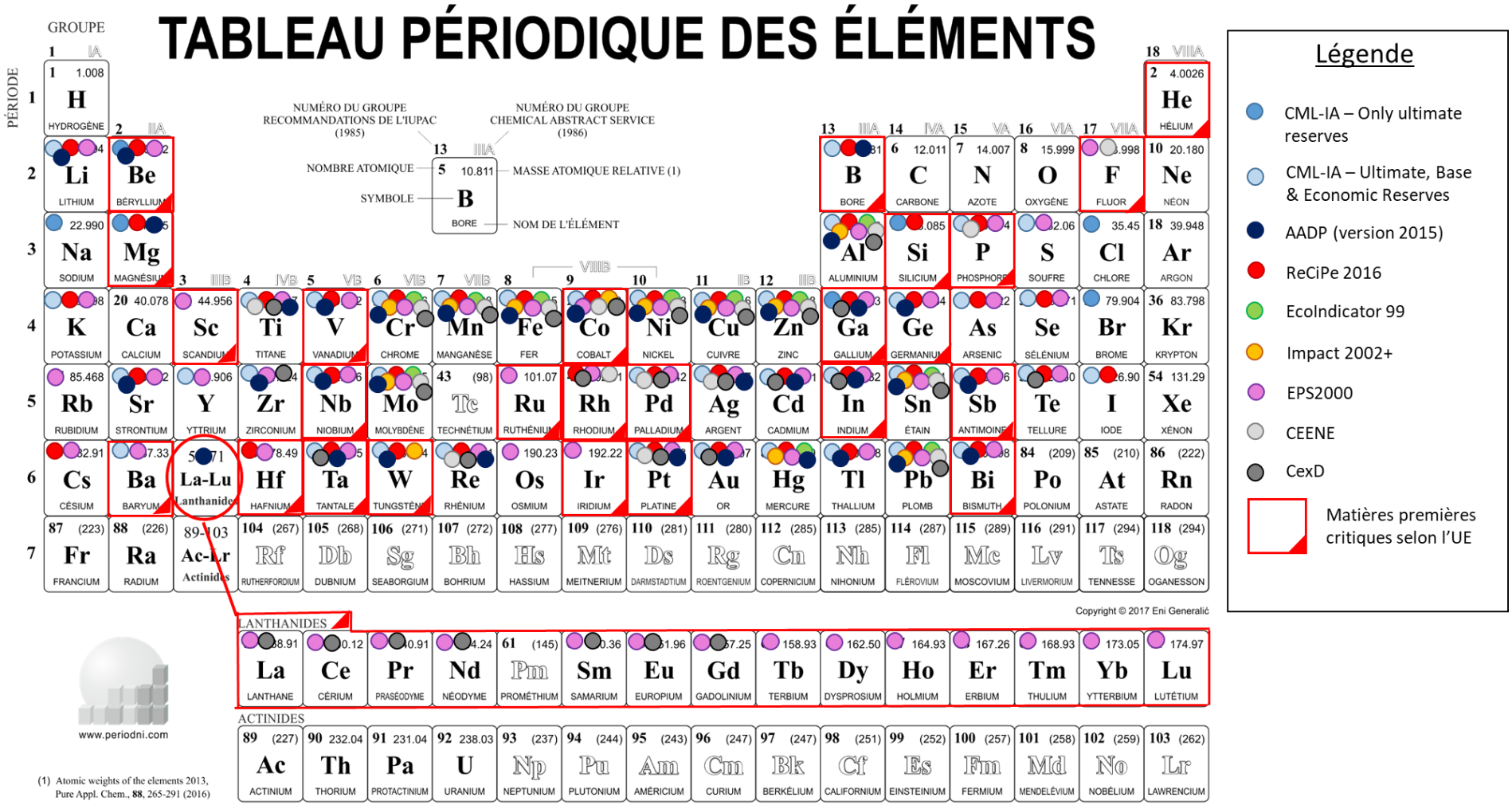
Tableau 12 (suite)

Nom de la méthode	Concepteur	Indicateurs d'impact intermédiaire (midpoint)	Indicateurs d'impact finaux (endpoint)	Aires de protection	Document de référence
IMPACT 2002+	Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Switzerland	Human toxicity, respiratory effects, ionizing radiation, ozone layer depletion, photochemical oxidation, aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, aquatic acidification, aquatic eutrophication, terrestrial nutrification and acidification, land occupation, water turbined, global warming, nonrenewable energy, mineral extraction, water withdrawal, water consumption.	Human health, ecosystem quality, climate change, resources	Human health, ecosystem quality, climate change, resources	O. Jolliet, I. Zabalza, A. Aranda, S. Scarpellini, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer, R. Rosenbaum, IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology, The International Journal of Life Cycle Assessment 8 (6) 324 - 330 (2003). Humbert S., De Schryver, A., Bengoa, X., Margni, M., Jolliet O., 2012. IMPACT 2002+: User Guide Draft for version Q2.21 (version adapted by Quantis). 45 pages. https://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf
LUCAS	CIRAIG	Climate change, ozone depletion, acidification, photochemical smog, aquatic eutrophication, terrestrial eutrophication, ecotoxicity, human toxicity, land-use, resource (mineral and fossil fuel).	En développement	Human health, Eco system quality, and resources	Toffoletto, L., C. Bulle, J. Godin, C. Reid and L. Deschênes, 2007. LUCAS - A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. The International Journal of Life Cycle Assessment 12(2): 93-102. https://link.springer.com/article/10.1065/lca2005.12.242
CED	Ghent University, ETH Zürich, Radboud University Nijmegen, ESU Services	Fossil resources (hard coal, lignite, peat, natural gas, crude oil), nuclear resources, renewable resources (biomass, water, wind, solar energy)	Pas d'indicateurs endpoint développés	Resources	M.A.J. Huijbregts, S. Hellweg, R. Frischknecht, H.W. Hendrik, K. Hungerbhler, A. J. Hendriks, Cumulative Energy Demand as Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production, Environmental Science and Technology 2010, 44, 2189–2196. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es902870s
CExD	ETH Zürich, Radboud University Nijmegen, ecoinvent Center, EMPA	Fossil resources (hard coal, lignite, peat, natural gas, crude oil), nuclear resources, renewable resources (biomass, water, wind, solar energy), non-energetic resources (water, minerals and metals).	Pas d'indicateurs endpoint développés	Resources	M.E. Bosch, S. Hellweg, M.A.J. Huijbregts, R. Frischknecht, Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database, The International Journal of Life Cycle Assessment 12 (3) 181 – 190 (2007). https://link.springer.com/article/10.1065%2Flca2006.11.282

Tableau 12 (suite)

Nom de la méthode	Concepteur	Indicateurs d'impact intermédiaire (midpoint)	Indicateurs d'impact finaux (endpoint)	Aires de protection	Document de référence
CEENE	Ghent University, ETH Zürich, Radboud University Nijmegen	Fossil resources (hard coal, lignite, peat, natural gas, crude oil), nuclear resources, renewable resources (biomass, water, wind, solar energy), non-energetic resources (water, minerals and metals), land use.	Pas d'indicateurs endpoint développés	Resources	J. Dewulf, M.E. Bosch, B. De Meester, G. Van Der vorst, H .Van Langenhove, S. Hellweg, M.A.J. Huijbregts, Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a Comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource Accounting, Environmental Science and Technology, 2007, 41, 8477–8483. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0711415
Economic resource Scarcity Potential	Technical University Berlin, Daimler AG	Reserve availability Recycling Country concentration reserves Country concentration mine production Company concentration mine production Governance stability Socioeconomic stability Demand growth Trade barriers mine production Companion metal fraction	Pas d'indicateurs endpoint développés	Resources, human welfare	Schneider, L., M. Berger, E. Schuler-Hainsch, S. Knofel, K. Ruhland, J. Mosig, V. Bach and M. Finkbeiner (2014). "The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment." International Journal of Life Cycle Assessment 19(3): 601-610. https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-013-0666-1

Annexe 3. Ressources prises en compte par les principales méthodes de caractérisation



Annexe 4. Comparaison des facteurs de caractérisation CML-IA (réserves ultimes) utilisés par les logiciel GaBi® et Simapro®

Tableau 13. Comparaison des facteurs de caractérisation CML-IA (réserves ultimes) utilisés par les logiciel GaBi et Simapro

GaBi			**Simapro**	
Elément ou ressource pour lesquels existe un FC spécifique	Ressources pour lesquelles le FC est dérivé des FC éléments	FC CML-IA (Ultimate reserves)	Elément ou ressource pour lesquels existe un FC spécifique	FC CML-IA (Ultimate reserves)
Aluminium		1.09E-09	Aluminium	1.09E-09
	Bauxite	3.79E-10		
Antimony		1.00E+00	Antimony	1.00E+00
	Antimonite	7.87E-01		
	Stibnite	7.87E-01		
	Antimony - gold - ore (0.09%)	2.93E-02		
Arsenic		2.97E-03	Arsenic	2.97E-03
Barium		6.04E-06	Barium	6.04E-06
	Barite. 15% in crude ore. in ground	3.00E-05		
	Barium sulphate	3.00E-05		
	Heavy spar (BaSO4)	3.00E-05		
Basalt		0.00E+00		
Bentonite		0.00E+00		
Beryllium		1.26E-05	Beryllium	1.26E-05
Bismuth		4.11E-02	Bismuth	4.11E-02
Boron		4.27E-03	Boron	4.27E-03
	Borax	4.92E-04		
	Colemanite ore	6.84E-04		
Bromine		4.39E-03	Bromine	4.39E-03

Cadmium		1.57E-01	Cadmium	1.57E-01
	Cadmium ore	1.57E-03		
Chlorine		2.71E-05	Chlorine	2.71E-05
	Calcium chloride	1.73E-05		
	Carnallite	1.04E-05		
Chromium		4.43E-04	Chromium	4.43E-04
	Chromium ore (39%)	1.73E-04		
	Chromium ore (Cr2O3 30%)	9.09E-05		
	Chromium ore (Cr2O3 40%)	1.21E-04		
Clay		0.00E+00		
Coalbed methane		0.00E+00		
Cobalt		1.57E-05	Cobalt	1.57E-05
	Cobalt ore (0.04%)	6.28E-09		
	Cobalt ore (0.067%)	1.05E-08		
Copper		1.37E-03	Copper	1.37E-03
	Copper - Gold - Ore (1.07% Cu; 0.54 g/t Au)	4.27E-05	Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Gold - Silver - ore (0.51% Cu; 0.6 g/t Au; 1.5 g/t Ag)	4.00E-05	Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Gold - Silver - ore (1.0% Cu; 0.4 g/t Au; 66 g/t Ag)	1.13E-04	Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 4.1E-2% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Gold - Silver - ore (1.1% Cu; 0.01 g/t Au; 2.86 g/t Ag)	1.89E-05	Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Gold - Silver - ore (1.13% Cu; 1.05 g/t Au; 3.72 g/t Ag)	7.45E-05	Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and Ni 0.76% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Gold - Silver - ore (1.16% Cu; 0.002 g/t Au; 1.06 g/t Ag)	1.72E-05	Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Gold - Silver - ore (1.7% Cu; 0.7 g/t Au; 3.5 g/t Ag)	6.38E-05	Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Molybdenum - Gold - Silver - ore (1.13% Cu; 0.02% Mo; 0.01 g/t Au; 2.86 g/t Ag)	2.29E-05	Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.37E-03
	Copper - Silver - ore (3.3% Cu; 5.5 g/t Ag)	5.16E-05	Copper, Cu 0.2%, in mixed ore	1.37E-03
	Copper ore (0.14%)	1.91E-06	Copper, Cu 0.38%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Pb 0.014%, in ore	1.37E-03
	Copper ore (0.2%)	2.73E-06	Copper, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore	1.37E-03
	Copper ore (0.3%)	4.10E-06	Copper, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore	1.37E-03
	Copper ore (1 %)	1.37E-05		

	Copper ore (1.13%)	1.54E-05		
	Copper ore (1.2%)	1.64E-05		
	Copper ore (1.28%)	1.75E-05		
	Copper ore (1.3 %)	1.78E-05		
	Copper ore (2%)	2.73E-05		
	Copper ore (4%)	5.46E-05		
	Copper ore (sulphidic. 1.1%)	1.50E-05		
Diatomite		6.54E-12		
Feldspar		0.00E+00		
Fluorspar		0.00E+00		
Gallium		1.46E-07	Gallium	1.46E-07
Germanium		6.52E-07	Germanium	6.52E-07
Gold		5.20E+01	Gold	5.20E+01
	Gold deposit (1ppm)	5.20E-05	Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 1.8E-4%, in mixed ore	5.20E+01
			Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 4.3E-4%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 4.9E-5%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 5.4E-4%, Ag 1.5E-5%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 6.7E-4%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 6.8E-4%, Ag 1.5E-4%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 7.1E-4%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	5.20E+01
			Gold, Au 9.7E-5%, Ag 7.6E-5%, in ore	5.20E+01
Granite		0.00E+00		
Graphite		0.00E+00		
Indium		6.89E-03	Indium	6.89E-03
Inert rock		0.00E+00		

Iodine		2.50E-02	Iodine	2.50E-02
Iron		5.24E-08	Iron	5.24E-08
	Iron ore (56.86%)	2.98E-08		
	Iron ore (65%)	3.41E-08		
Lead		6.34E-03	Lead	6.34E-03
	Lead ore (5%)	3.17E-04	Lead, Pb 0.014%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, in ore	6.34E-03
	Lead - Zinc - Silver - ore (5.49% Pb; 12.15% Zn; 57.4 gpt Ag)	4.81E-04	Lead, Pb 3.6E-1%, in mixed ore	6.34E-03
	Lead - zinc ore (4.6%-0.6%)	2.95E-04		
Limestone		0.00E+00		
Lithium		1.15E-05	Lithium	1.15E-05
	Lithium ore (3%)	3.44E-07		
	Spodumen	4.32E-07		
Magnesium		2.02E-09	Magnesium	2.02E-09
	Magnesium ore	6.06E-11		
	Chrysotile	5.35E-10		
	Dolomite	2.63E-10		
	Kieserite (25% in ore as mined)	4.47E-05		
	Magnesit (Magnesium carbonate)	5.77E-10		
	Magnesite	5.77E-10		
	Magnesium chloride	1.62E-05		
	Magnesium chloride leach (40%)	6.47E-06		
Manganese		2.54E-06	Manganese	2.54E-06
	Ferro manganese	1.29E-06		
	Manganese ore (43%)	1.09E-06		
	Manganese ore (45%)	1.14E-06		
	Manganese ore (R.O.M.)	1.12E-06		
	Manganese ore	1.12E-06		
Mercury		9.22E-02	Mercury	9.22E-02
	Cinnabar	7.96E-02		

Molybdenum		1.78E-02	Molybdenum	1.78E-02
	Molybdenum ore (0.01%)	1.78E-06	Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore	1.78E-02
	Molybdenum ore (0.1%)	1.78E-05	Molybdenum, 0.014% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.81% in crude ore	1.78E-02
	Molybdenid disulfide (Mo 0.21%)	3.73E-05	Molybdenum, 0.016% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.27% in crude ore	1.78E-02
	Molybdenite (Mo 0.24%)	4.26E-05	Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.22% in crude ore	1.78E-02
			Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore	1.78E-02
			Molybdenum, 0.025% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.39% in crude ore	1.78E-02
			Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 0.41% and Cu 0.36% in crude ore	1.78E-02
Natural Aggregate		0.00E+00		
Natural gas (in MJ)		0.00E+00		
Natural pumice		0.00E+00		
Nepheline		6.71E-09		
Nickel		6.53E-05	Nickel	6.53E-05
	Nickel ore (1.2%)	7.84E-07	Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore	6.53E-05
	Nickel ore (1.5%)	9.79E-07	Nickel, 1.13% in sulfides, 0.76% in crude ore	6.53E-05
	Nickel ore (1.6%)	1.04E-06	Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore	6.53E-05
	Nickel ore (2.0%)	1.31E-06	Nickel, Ni 2.3E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Cu 3.2E+0% in ore	6.53E-05
	Nickel ore (2.7%)	1.76E-06	Nickel, Ni 3.7E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Cu 5.2E-2% in ore	6.53E-05
Niobium		1.93E-05	Niobium	1.93E-05
Olivine		1.74E-08		
Palladium		5.71E-01	Palladium	5.71E-01
	Palladium deposit (7ppm)	3.99E-06	Palladium, Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	5.71E-01
			Palladium, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	5.71E-01
Phosphorus		5.52E-06	Phosphorus	5.52E-06
	Apatite	1.02E-06	Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore	5.52E-06
	Phosphorus minerals	5.52E-06		
	Phosphorus ore (29% P2O5)	6.98E-07		
	Phosphate (P2O5)	2.41E-06		
	Phosphate (PO3)	2.16E-06		

	Phosphate ore	2.16E-06		
Platinum		2.22E+00	Platinum	2.22E+00
	Platin deposit (3ppm)	6.65E-06	Platinum, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	2.22E+00
			Platinum, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	2.22E+00
Potassium		1.60E-08	Potassium	1.60E-08
	Sylvine = chlorure de potassium	1.28E-05		
	Sylvite (25% in Sylvinite) = KCl	3.21E-06		
	Potashsalt. crude (hard salt. 10% K2O)	1.33E-09		
	Potassium chloride	1.28E-05		
Precious metal ore (R.O.M)		5.21E-05		
Pyrite		0.00E+00		
Rhenium		6.03E-01	Rhenium	6.03E-01
Selenium		1.94E-01	Selenium	1.94E-01
	Selenium deposit (0.025)	4.85E-03		
Shale		0.00E+00		
Shale gas		0.00E+00		
Silicon		1.40E-11	Silicon	1.40E-11
	Quartz sand (silica sand; silicon dioxide)	6.54E-12		
	Perlite (Rhyolithe) = silicates	1.44E-10		
	Phonolite = silicates	6.71E-09		
	Specular stone = Mica (silicates)	4.46E-09		
	Talc = silicate de Mg	3.93E-10		
	Steatite. in ground = talc	3.93E-10		
	Albite	4.94E-09		
	Wollastonite = silciate de Ca	3.38E-12		
	Cyanite = silicates de Al	3.67E-10		
	Kaolin ore	2.88E-10		
	Kaolinite (24% in ore as mined)	2.32E-10		
Silver		1.18E+00	Silver	1.18E+00

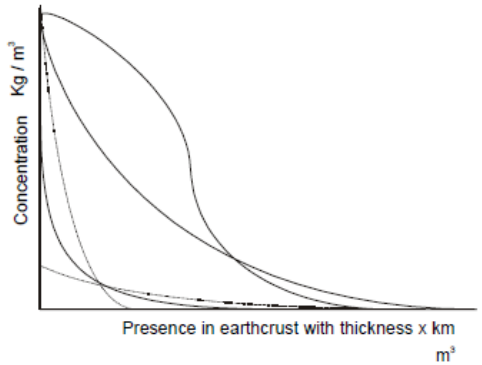
	Silver deposit (20ppm)	2.37E-05	Silver, 0.007% in sulfide, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, In	1.18E+00
			Silver, 3.2ppm in sulfide, Ag 1.2ppm, Cu and Te, in crude ore	1.18E+00
			Silver, Ag 1.5E-4%, Au 6.8E-4%, in ore	1.18E+00
			Silver, Ag 1.5E-5%, Au 5.4E-4%, in ore	1.18E+00
			Silver, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, in ore	1.18E+00
			Silver, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, in ore	1.18E+00
			Silver, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, in ore	1.18E+00
			Silver, Ag 5.4E-3%, in mixed ore	1.18E+00
			Silver, Ag 7.6E-5%, Au 9.7E-5%, in ore	1.18E+00
			Silver, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	1.18E+00
Sodium		5.50E-08	Sodium	5.50E-08
	Sodium carbonate (soda)	2.39E-08		
	Sodium chloride (rock salt)	1.65E-05		
	Sodium nitrate	1.49E-08		
	Sodium sulphate	4.35E-05		
	Ulexite	5.79E-04		
Soil		0.00E+00		
Stone from mountains		0.00E+00		
Strontium		7.07E-07	Strontium	7.07E-07
Sulfur		1.93E-04	Sulfur	1.93E-04
	Sulphur (bonded)	1.93E-04		
	Calcium Sulphate (CaSO4. ore)	4.54E-05		
	Anhydrite (Rock)	4.54E-05		
	Gypsum (natural gypsum)	3.59E-05		
Tantalum		4.06E-05	Tantalum	4.06E-05
Tellurium		4.07E+01	Tellurium	4.07E+01
Thallium		2.43E-05	Thallium	2.43E-05
Tight gas		0.00E+00		
Tin		1.62E-02	Tin	1.62E-02

	Tin ore (0.01%)	1.62E-06		
Titanium		2.79E-08	Titanium	2.79E-08
	Titanium dioxide	1.67E-08		
	Titanium ore	3.18E-09		
	Rutile (titanium ore)	1.67E-08		
	TiO2. 95% in rutile. 0.40%	1.67E-08		
	Ilmenite (titanium ore)	2.81E-08		
	TiO2. 54% in ilmenite. 2.6%	1.67E-08		
Tungsten		4.52E-03	Tungsten	4.52E-03
	Tungsten ore (1%)	4.52E-05		
Uranium		1.40E-03	Uranium	1.40E-03
	Uranium free ore	1.13E-03	Uranium, 2291 GJ per kg	1.40E-03
	Uranium natural (in MJ)	2.50E-09	Uranium, 451 GJ per kg	1.40E-03
	Nuclear energy	2.50E-09	Uranium, 560 GJ per kg	1.40E-03
	Uranium oxide (U3O8). 332 GJ per kg. in ore	1.19E-03		
Vanadium		7.70E-07	Vanadium	7.70E-07
	Vanadium ore (ROM)	5.72E-09		
	Vanadium ore (V2O5 0.94%)	4.06E-09		
Vermiculite		1.65E-08		
Yttrium		5.69E-07	Yttrium	5.69E-07
Zinc		5.38E-04	Zinc	5.38E-04
	Zinc - Copper - Lead - Ore (2.11% Zn 0.51% Cu 0.86% Pb)	7.28E-05	Zinc, Zn 3.1%, in mixed ore	5.38E-04
	Zinc - Copper - Lead - Ore (4% Zn 0.09% Cu 0.65% Pb)	6.40E-05	Zinc 9%, Lead 5%, in sulfide	5.38E-04
	Zinc - Copper - Lead - Ore (5.37% Zn 0.22% Cu 0.2% Pb)	4.46E-05		
	Zinc - Copper - Lead - Ore (6.95% Zn 0.13% Cu 2.04% Pb)	1.68E-04		
	Zinc - copper ore (4.07%-2.59%)	5.73E-05		
	Zinc - lead - copper ore (12%-3%-2%)	2.82E-04		
	Zinc - Lead - Silver - Ore (7.5% Zn; 4.0% Pb; 40.8 g/t Ag)	3.42E-04		
	Zinc - Lead - Silver - ore (8.54% Zn; 5.48% Pb; 94 g/t Ag)	5.05E-04		
	Zinc - Lead Ore (21.7%-5.6%)	4.72E-04		

	Zinc - lead ore (4.21%-4.96%)	3.37E-04		
	Zinc - lead ore (R.O.M)	2.03E-04		
	Zinc Ore (12.6% Zn)	6.78E-05		
	Zinc ore (3.98%)	2.14E-05		
	Zinc ore (sulphide. zinc 3.98%)	2.14E-05		
	Zinc ore (4%)	2.15E-05		
	Zinc ore (sulphidic. 4%)	2.15E-05		
	Zinc ore (8%)	4.30E-05		
	Zinc Ore (9.7-14% Zn 3.1-6.5% Pb)	3.68E-04		
	Zinc. Zn 0.63%. Au 9.7E-4%. Ag 9.7E-4%. Cu 0.38%. Pb 0.014%	5.38E-04	Zinc, Zn 0.63%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	5.38E-04
Zirconium		5.44E-06	Zirconium	5.44E-06
	Zirconium dioxide. as baddeleyite. in ground	4.03E-06		
	Zirconium sand	2.71E-06		

Code couleur		Elément non renouvelable
		Ressource non renouvelable
		Ressources modélisées dans Simapro avec un facteur équivalent à l'élément

Annexe 5. Eléments identifiés par les auteurs des méthodes comme contribuant aux incertitudes des facteurs de caractérisation

Méthode de caractérisation – indicateur d'impact	Type de réserves utilisées	Temporalité des données	Sources des données	Nature des incertitudes et méthode de quantification si elles existent
CML-IA – Abiotic Depletion Potential (baseline)	Réserves ultimes	Taux d'extraction : 1999 utilisée comme année de référence Réserves ultimes : Calcul établi en 1995, sur la base de données datant de 1973 à 1990.	Taux d'extraction : données USGS Réserves ultimes : thèse de Guinée (1995). A partir des sources suivantes : Selbin, J. 1973 The origin of the chemical elements, 1 J Chem Educ 50 306-310 Slabaugh, W.H. and T.D. Parsons. 1976 General Chemistry, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York, NY Weaver, B.L. and J. Tarney. 1984 Empirical approach to estimating the composition of the continental crust Nature 310 575-577 Harte, J. 1988 Consider a Spherical Cow University Science Book, Mill Valley, CA Lide, D.R., ed 1990 CRC Handbook of Chemistry and Physics, 71st ed CRC Press, Boston, MA	Quel que soit la réserve utilisée, l'hypothèse est faite que la concentration-distribution-présence en ressources est plus ou moins la même quel que soit la réserve. Or, cela est erroné comme le montre la figure suivante :  Il y a ainsi de fortes incertitudes quant à la taille des réserves utilisées. Les incertitudes concernent également la pertinence de la relation entre l'indicateur ADP et les courbes de concentration-distribution-présence des ressources (quelle réserve est la plus pertinente ? quelle relation existe-t-il entre types de réserves et les courbes de concentration-distribution-présence des ressources ? Est-ce que cette relation est la même pour toutes les réserves ?). Les concepteurs de CML proposent de réaliser une analyse de sensibilité en utilisant les trois types de réserves du fait de ces incertitudes.
CML-IA – Abiotic Depletion Potential (alternative 1)	Bases de reserves	Taux d'extraction et bases de réserves : 1999 utilisée comme année de référence	Taux d'extraction et bases de réserves : données USGS	
CML-IA – Abiotic Depletion Potential (alternative 2)	Réserves économiques	Taux d'extraction et réserves économiques : 1999 utilisée comme année de référence	Taux d'extraction et réserves économiques : données USGS	

Méthode de caractérisation – indicateur d'impact	Type de réserves utilisées	Temporalité des données	Sources des données	Nature des incertitudes et méthode de quantification si elles existent
EDIP 2003 – Abiotic Resource Use	Réserves économiques	Les données utilisées pour la normalisation sont celles de l'année 2004.	La méthode de calcul du FC est basée sur l'équation suivante : $$CF_i = \left[\frac{1}{\left(\frac{\text{Economic reserves}_i}{\text{World pop}_{i,2004}}\right)}\right]$$ Les sources utilisées pour le calcul ne sont pas mentionnées.	Selon Laurent et al. (2011)[56], les références de normalisation pour les catégories d'impact non toxique ont généralement une fiabilité raisonnable du fait d'une expérience considérable en matière de déclaration des inventaires des émissions associées aux niveaux national et européen et des modèles de caractérisation relativement stables.
Eco Indicator 99	Non concerné	Données utilisées pour calculer les corrélations entre quantités exploitées et qualité des gisements datent de 1983 et 1988 mais les données utilisées par ces mêmes auteurs sont sans doute encore plus anciennes.	La méthode est basée sur l'équation : Energie supplémentaire [MJ/tonne métal] = A/g_2 - A/g_1 où A est la quantité d'énergie pour extraire les métaux selon le type de mines exploitée, g1 and g2 sont issus des modèles de Chapman (1983) et de Vries (1988) et correspondent respectivement aux gisements exploités dans le futur (5Q) et au moment présent (Q). Chapman, P.F., Roberts. F., 1983. Metal Resources and Energy, London, 256 pages. De Vries B., 1988. Sustainable resource use, optimal depletion with a geostatistical framework, IVEM report n°. 35, Groningen.	Les incertitudes ne sont pas quantifiées. La nature des incertitudes est cependant associée d'une part à l'estimation des quantités Q et du « point dans le futur » estimé à 5 fois la quantité Q et d'autre part à la détermination du facteur de pente m qui varie selon les sources utilisées (Chapman ou de Vries). NB : Les modèles de Chapman et de Vries exploitent la corrélation entre les quantités cumulées exploitées depuis le début de notre ère (log(Q) en ordonnée) et le développement correspondant des concentrations des gisements exploités (log (g) en abscisse, calculé par un facteur de pente nommé m.

[56] Laurent, A., S. I. Olsen and M. Z. Hauschild (2011). "Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice." The International Journal of Life Cycle Assessment **16**(5): 401-409.

Méthode de caractérisation – indicateur d'impact	Type de réserves utilisées	Temporalité des données	Sources des données	Nature des incertitudes et méthode de quantification si elles existent
ReCiPe 2016 – SOP	Deux types de réserves sont utilisées : Réserves économiques représentant la période de temps la plus courte et utilisé pour la perspective individualiste Réserves ultimes représentant la période de temps la plus longue et utilisés dans les perspectives égalitaire et hiérarchique.	Les facteurs de normalisation sont calculés pour l'année 2012. Les données utilisées pour le calcul du SOP sont basées sur des publications datant de 1993 à 2014.	Le Surplus Ore Potential fait référence à la quantité supplémentaire de minerai exploité par unité supplémentaire de ressource extraite. À cette fin, des courbes cumulées de tonnage-concentration par ressource ont été utilisées à partir d'un ensemble de données globales sur les concentrations des gisements par mine et des statistiques de production. Les sources des données sont les suivantes (Vieira et al., 2017)[57] : Courbes cumulées de tonnage-concentration : Berger (1993), Berger et al. (2009, 2011), Cox et al. (2007), Mosier et al. (2009), Rogers (1996), Singer et al. (1993, 2005, 2009). Ressource cumulée extraite : Kelly et Matos (2014), NEA-IAEA (2014). Réserves économiques : Hall et Coleman (2012), USGS (2014), Van Vuuren et al. (2010). Réserves ultimes : Schneider et al. (2015), UNEP (2011), Van Vuuren et al. (2010). Normalisation (production minière mondiale en 2012) : Hall et Coleman (2012), USGS (2014)	L'utilisation de l'extraction future des métaux dans l'élaboration du SOP à partir des réserves est incertaine, car seuls les gisements connus (économiquement démontrés) ont été pris en compte dans l'estimation des réserves économiques. Cependant, les gisements non découverts constituent une considération importante dans l'évaluation des approvisionnements futurs. Le choix du type de réserve utilisé introduit une incertitude de scénario dans les calculs du SOP. Une analyse de sensibilité a été réalisée en utilisant deux approches différentes d'estimation des réserves (économiques et ultimes). Il a été démontré que les différences entre les SOP dérivés de ces deux approches conduisaient à un classement similaire des ressources (corrélation de rang de 0,98). Les auteurs concluent qu'il est peu probable que le choix du type de réserve influe sur les résultats des calculs de rareté de ressources.

[57] Vieira, M. D. M., T. C. Ponsioen, M. J. Goedkoop and M. A. J. Huijbregts, 2017. Surplus Ore Potential as a Scarcity Indicator for Resource Extraction. Journal of Industrial Ecology 21(2): 381-390.

Méthode de caractérisation – indicateur d'impact	Type de réserves utilisées	Temporalité des données	Sources des données	Nature des incertitudes et méthode de quantification si elles existent
EPS 2000	Les données sont basées sur les « réserves » de chaque élément. Les données sont basées sur l'abondance des métaux dans la croûte terrestre donc ce sont sans doute les réserves ultimes.	Les concentrations en minéraux utilisés par Wedepohl pour calculer la composition de la couche terrestre sont multiples et s'étalent de 1967 à 1992.	La source des données utilisée pour estimer l'abondance des ressources minérales est celle de Wedepohl (1995). Wedepohl, H., 1995. The composition of the continental crust", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 59, No. 7, pp. 1217-1232.[58]	L''incertitude pour la plupart des ressources minérales est décrite avec une distribution log-normale avec un écart-type correspondant à un facteur x, ce facteur étant différent selon les ressources. Al : facteur 2 Ag, As, Bi, Cd, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sn, Zn, Cu : facteur 2.2 Ba, Be, Ce, Co, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, F, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, I, In, Ir, La, Li, Lu, Mn, Mo, Nb, Nd, Os, P, Pd, Pr, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zr : facteur 3
CExD	Non concerné	La base ecoinvent utilisée est la base v1.2 de 2000.	Les calculs de l'exergie pour chaque resource sont basées sur les données ecoinvent et sur Szargut et al. (2005) : Szargut J (2005): Exergy method: Technical and ecological applications. WIT Press, Southampton	La principale source d'incertitude est (souvent inconnue) la composition des ressources minérales telles que les roches ou les gisements.
CEENE	Non concerné	Les rapports ecoinvent utilisés pour le calcul de l'exergie datent de 2006 mais pas d'info sur la temporalité des données utilisées dans ces rapports.	Les calculs de l'exergie pour chaque ressource (appelé facteur X) sont basés sur les rapports ecoinvent complétés avec d'autres données et sur Herman (2006) : Hermann, W. A. 2006. Quantifying global exergy resources. Energy, 31, 1685–1702	La principale source d'incertitude est (souvent inconnue) la composition des ressources minérales telles que les roches ou les gisements.
Economic resource Scarcity Potential	Réserves économiques	Réserves économiques : 2013 utilisée comme année de référence	Réserves économiques : données USGS	Pas d'incertitudes mentionnées mais une sensibilité du calcul agrégé de l'ESP au choix des catégories d'impact et indicateurs ainsi qu'à la définition des seuils.

[58] http://apostilas.cena.usp.br/moodle/pessenda/projes/simposio/artigo7.pdf

<table>
<tr><th>Méthode de caractérisation – indicateur d'impact</th><th>Type de réserves utilisées</th><th>Temporalité des données</th><th>Sources des données</th><th>Nature des incertitudes et méthode de quantification si elles existent</th></tr>
<tr><td>LIME et LIME2 – Resource consumption</td><td>En midpoint, le type de réserve utilisée n'est pas spécifié.</td><td>Les rapports utilisés datent de 1996 et 2001 mais la temporalité des données utilisées dans ces rapports n'est pas connue.</td><td>Le calcul midpoint est basé sur 1/R où R est la quantité de réserve utilisée.

Les données quantitatives (réserves et production des principales ressources) sont tirées de :

Japan Society of Energy and Resources, 1996. Energy and Resources Handbook
Ohmsha Kanamori Hisao, Ara Kenjiro and Moriguchi Shinji,2002. Yuhikaku Dictionary of Economic Terms, 4th edition
Resources Economy Committee of Mining and Materials Processing Institute of Japan (compiled): Mineral Resources Database 2001

Le calcul endpoint est basé sur les éléments suivants :

Table 2.11-4: Category endpoints of resource consumption and objects of calculation of damage functions
<table><tr><th>Area of protection</th><th colspan="2">Category endpoint</th><th colspan="2">Object of calculation of damage functions</th></tr><tr><td>Human health</td><td colspan="2">(Endpoint by substances emitted at the time of resource gathering)</td><td>–</td><td>Assessor's consideration in other impact categories, such as toxic chemicals</td></tr><tr><td rowspan="3">Social assets</td><td>Exhaustible resources</td><td>Disappearance of resource stock</td><td>○</td><td>User cost</td></tr><tr><td colspan="2">(Endpoint by substances emitted at the time of resource gathering)</td><td>–</td><td>Assessor's consideration in other impact categories</td></tr><tr><td rowspan="4">Primary production</td><td rowspan="3">Terrestrial ecosystem</td><td>Decline in NPP during land alteration</td><td rowspan="2">○</td><td rowspan="2">Net primary production of vegetation (Regarding the mining period as the period of maintenance of land use)</td></tr><tr><td>Decline in potential NPP during land use</td></tr><tr><td>Decline in potential NPP during recovery period after land alteration</td><td>○</td><td>Net primary production of vegetation</td></tr><tr><td colspan="2">(Endpoint by substances emitted at the time of resource gathering)</td><td>–</td><td>Assessor's consideration in other impact categories</td></tr><tr><td rowspan="2">Biodiversity</td><td>Terrestrial ecosystem</td><td>Change in composition of plant species</td><td>○</td><td>Extinction risk of vascular plants</td></tr><tr><td colspan="2">(Regarding the mining period as the period of maintenance of land use)</td><td>–</td><td>Assessor's consideration in other impact categories</td></tr></table>With regard to primary production and biodiversity, assessment was made through the impact category of land use (for details, see Table 2.10-3).</td><td>Table 2.11-5: Main causes of uncertainty and policies for uncertainty assessment concerning damage functions of resource consumption (part 1: fossil fuels, metal resources)
<table><tr><th colspan="2">Main possible causes of uncertainty</th><th>Policies for uncertainty assessment</th></tr><tr><td rowspan="2">Area of land use for mining of unit amount of resources (2.11.3 (2) a)</td><td>Grade, hidden flow</td><td>Set up the grade and hidden flow (calculated values) for each mine as a variability distribution by using production volume, etc. for weighting the appearance frequency. If the values for each mine are unclear, set up a lognormal distribution, using the geometric standard deviation as the largest value of the identified metals.</td></tr><tr><td>Mining thickness</td><td>Regarding iron, aluminum, and coal, set up a variability distribution from research materials. Regarding other metals, set a lognormal distribution from the geometric standard deviation of iron.</td></tr><tr><td rowspan="3">Damage function of primary production (amount of damage to primary production per land area) (2.11.3 (3))</td><td>Potential NPP (NPP_p)</td><td>If a mine has been located, refer to the NPP_p of the mesh to which the location belongs. If the location is unknown, use the spatial distribution of the NPP_p of the whole producing country as the uncertainty distribution. After that, create a variability distribution of potential NPP_p of each country or mine from Japan's import rate, etc.</td></tr><tr><td>Number of years of maintenance of land use</td><td>Set up a uniform distribution from the relation between the amount of deposit and the production volume in iron ore mines.</td></tr><tr><td>Recovery time of primary production</td><td>Set up the same uncertainty distribution as that of primary production damage functions of land use in 2.10.3.</td></tr><tr><td rowspan="2">Damage function of extinction risk (amount of damage to extinction risk per land area) (2.11.3 (4))</td><td>Number of endangered species in each country</td><td>Assess variability in each country, using, as the index, the number of endangered species in the IUCN Red List divided by the area of national land and using Japan's import rate as the probability of appearance.</td></tr><tr><td>Application of damage factors to overseas</td><td>Assess the uncertainty of the correction rate for application of the damage factor of domestic stone mining (2.10.3) from the estimated errors in the parameters of the regression equation used for calculation of the correction rate.</td></tr><tr><td rowspan="3">Damage function of social assets (2.11.3 (7))</td><td>Price</td><td rowspan="2">Uncertainty distribution of the values in 2005 calculated from time-series prediction (smoothing) based on past data</td></tr><tr><td>Production volume</td></tr><tr><td>Reserves</td><td>Each year's variability in the difference (ratio) between reassessed reserves in past years calculated backward from the latest estimated reserves and each year's production volume and the reserves in past years specified in statistics for past years. Regarding crude oil, however, set up a probability distribution of estimated ultimate reserves directly.</td></tr></table></td></tr>
</table>

Annexe 6. Pour aller plus loin…

Adibi, N., et al., (2017). "Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study." Journal of Cleaner Production **165**: 1517-1528.

Adibi, N., et al., (2019). "New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in NdFeB permanent magnet case study". International Journal of Life Cycle Assessment **24**: 712-724.

Alvarenga, R. A. F., et al. (2016). "Evaluation of Abiotic Resource LCIA Methods." Resources **5**(1): 21.

De Bruille, V., (2014). "Impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte cycle de vie : une approche fonctionnelle. " PhD Thesis, Université de Montréal, 145 pages.

Dewulf, J., et al. (2015). "Rethinking the Area of Protection "Natural Resources" in Life Cycle Assessment." Environmental Science & Technology **49**(9): 5310-5317.

Gao, F., et al. (2009). "Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China." Science in China Series E-Technological Sciences **52**(1): 215-222.

Geldron, A., (2017). « L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ? » Fiche Technique ADEME, juin 2017, 23 pages.

Gemechu, E. D., et al. (2017). "Geopolitical-related supply risk assessment as a complement to environmental impact assessment: the case of electric vehicles." International Journal of Life Cycle Assessment **22**(1): 31-39.

Hernandez, M., et al. (2017). "Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods." Resources Conservation and Recycling **120**: 119-130.

Klinglmair, M., et al. (2014). "Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues." International Journal of Life Cycle Assessment **19**(3): 580-592.

Licht, C., et al. (2015). "Global Substance Flow Analysis of Gallium, Germanium, and Indium: Quantification of Extraction, Uses, and Dissipative Losses within their Anthropogenic Cycles." Journal of Industrial Ecology **19**(5): 890-903.

Lombardi, L., et al. (2017). "Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA." International Journal of Life Cycle Assessment **22**(12): 1989-2006.

Meinert, L.D., et al. (2016). "Mineral resources: Reserves, peak production and the future". Resources **5**(14). 14 pages.

Oliveira, L., et al. (2015). "Key issues of lithium-ion batteries - from resource depletion to environmental performance indicators." Journal of Cleaner Production **108**: 354-362.

Ortego, A., et al., (2018). "Vehicles and critical raw materials – A sustainability assessment using thermodynamic rarity". Journal of Industrial Ecology **22**(5), pp. 1005-1015.

Reller, A. (2011). "Criticality of metal resources for functional materials used in electronics and microelectronics." Physica Status Solidi-Rapid Research Letters **5**(9): 309-311.

Scholz, R.W., Wellmer, F.-W., (2013). "Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus?" Global Environmental Change 23: 11-27.

Sfez, S., et al., (2017). “Toward a framework for resource efficiency evaluation in industry: recommendations for research and innovation projects”. Resource **6**(5), 23 pages.

Sonderegger, T., et al. (2017). "Towards harmonizing natural resources as an area of protection in life cycle impact assessment. " International Journal of Life Cycle Assessment **22**(12): 1912-1927.

UNEP, (2011). “Recycling rates of metals – A status report”. International Resource Panel, 44 pages.

UNEP, (2016). “Resource efficiency: potential and economic implications”. International Resource Panel, 73 pages.

UNEP, (2019). “Global resources outlook 2019: Natural resources for the future we want”. International Resource Panel, 158 pages.

Van Eygen, E., et al. (2016). "Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium." Resources Conservation and Recycling **107**: 53-64.

Van Oers, L. and J. B. Guinee (2016). "The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future." Resources **5**(1): 16.

Zackrisson, M., et al. (2016). "Life cycle assessment of lithium-air battery cells." Journal of Cleaner Production **135**: 299-311.

Zampori, L., Sala, S., (2017). “Feasibility study to implement resource dissipation in LCA”. JRC technical reports, EUR28994 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 42 pages.