Périmètre de diffusion : Interne

EXPLORATION ET COMPARAISON SUR DES CAS INDUSTRIELS DES METHODES EXISTANTES D'EVALUATION DE LA CRITICITE DES RESSOURCES EN ANALYSE DU CYCLE DE VIE

PRC17.6 – Rapport final

Mars 2019

N° de contrat :
Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *Non renseigné*

Coordination technique ADEME : *BORTOLI PUIG Hélène* **– Direction\Service :** *ANGERS DECD SPEM*

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

RAPPORT D'ETUDE

En partenariat avec :

Réseau Eco SD
Eco-conception de systèmes durables

REMERCIEMENTS

Les auteurs de l'étude remercient chaleureusement les membres du réseau EcoSD ayant participé au PRC17.6 :

Stéphane Le Pochat (EVEA Conseil)
Pierre Collet (IFPEN)
Guillaume Busato (RTE)
Jade Garcia (ScoreLCA)
Lynda Aissani (Irstea Rennes)
Julio Rivera Garcia (Arcelormittal)
Marilys Pradel (Irstea Clermont-Ferrand)
Alexis Lalevée (Irstea Clermont-Ferrand)
Julien Garcia (Groupe PSA)
Eric Philipot (Orange)
Samuli Vaija (Orange)
Stéphanie Muller (BRGM)
Stéphanie Desrousseaux (CEA)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME. Pradel M., Garcia J., Vaija S., 2019. Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en analyse du cycle de vie – Rapport final. 92 pages.

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais :

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

TABLE DES MATIERES

Résumé 5
1. Contexte du projet PRC17.6 6
2. Organisation du travail et méthodologie mise en place 7
2.1. Organisation du travail au sein du PRC17.6 7
2.2. Méthodologie mise en place pour la réalisation de l'état de l'art 7
2.2.1. Méthode mise en place pour la recherche bibliographique 7
2.2.2. Méthode mise en place pour l'analyse des articles : grille de lecture 9
2.2.3. Constitution de tableaux de synthèse pour chaque grille de lecture 9
3. Principaux résultats obtenus 10
3.1. Etat des lieux des indicateurs ACV d'épuisement des ressources en ACV 10
3.1.1. Principaux types de modélisation des ressources en ACV 10
3.1.2. Principales méthodes disponibles en ACV pour évaluer l'épuisement des ressources 12
3.1.3. Développements méthodologiques en cours 13
3.1.4. Points de vigilance identifiés 14
3.2. Etat des lieux des indicateurs de criticité des ressources 15
3.2.1. Principe de criticité des ressources 15
3.2.2. Méthodes d'évaluation de la criticité des ressources 17
3.2.3. Liste des matériaux considérés comme critiques selon les méthodes appliquées 18
3.2.4. Études existantes sur la criticité : du concept à une transposition en ACV 20
3.2.5. Proposition d'améliorations de l'évaluation de la criticité 21
3.3. Lien entre ACV et criticité 22
3.3.1. Les indicateurs ACV comme indicateurs de criticité 22
3.3.2. Les indicateurs de criticité dans la méthode ACV 23
3.4. Implémentation des méthodes de caractérisation traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels ACV 25
3.5. Mise en œuvre sur des cas applicatifs 27
3.5.1. Cas de l'indium sur lien ICV/LCIA 27
3.5.2. Cas du germanium sur lien ICV/LCIA 28
3.5.3. Cas de la récupération du phosphore issu des boues d'épuration urbaines 31
3.5.4. Cas des batteries de véhicules électriques 36
Conclusions / Perspectives 38
Références bibliographiques 39
Annexe1. Compte-rendus de réunion 42

Annexe 2. Méthodes de caractérisation étudiées 56
Annexe 3. Fiches de criticité des matériaux étudiés 68
Annexe 4. Inventaires des ressources pour la production d'un kg d'acier (selective coating, stainless steel sheet, black chrome) selon les logiciels GaBi et Simapro 74
Annexe5. Comparaison des facteurs de caractérisation CML-IA (réserves ultimes) utilisés par les logiciel GaBi et Simapro 78
Index des tableaux et figures 88
Sigles et acronymes 89

Résumé

Le projet PRC17.6 vise à réaliser un état de l'art et une revue critique des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles minérales et de leur criticité. Cette revue critique devra notamment permettre de proposer des pistes d'amélioration de ces méthodes de caractérisation.

L'objectif de ce rapport final est de présenter l'état des lieux des travaux du projet PRC17.6 au regard des méthodes de caractérisation des ressources en ACV, des méthodes de criticité des ressources et des liens possibles entre ACV et criticité.

Le livrable final, associé à ce rapport, sera réalisé sous la forme d'un guide de bonnes pratiques à destination des membres du Réseau EcoSD sur ce sujet, afin d'aider les praticiens de l'ACV à mieux appréhender la criticité dans leurs analyses. Il sera remis aux membres du réseau EcoSD à l'occasion de la présentation des résultats du PRC17.6 en juin 2019. Ce guide s'appuiera sur plusieurs cas d'études :

- le secteur industriel automobile (batteries lithium-ion contenant de nombreuses matières rares (lithium, cobalt, nickel, néodyme), techniques de réduction catalytique sélective pour réduire les émissions de NOx nécessitant de plus en plus de matières rares (rhodium, palladium, platine)),
- le secteur des télécommunications (sur la base d'analyses du cycle de vie réalisées sur des téléphones portables, tablettes, décodeurs et modem-routeur xDSL),
- la production de fertilisants phosphatés (recyclage du phosphore issu de déchets).

ABSTRACT

The PRC17.6 project aims at achieving a state of the art and a critical review of methods for assessing the depletion of natural mineral resources and their criticality. This critical review should in particular make it possible to propose ways to improve these characterization methods.

The objective of this final report is to present the state of the art of LCA characterization methods used to assess resource depletion and methods used to assess resource criticality as well as possible links between LCA and criticality.

The final deliverable, associated with this report, will be produced in the form of a good practice guide for members of the EcoSD Network, to help LCA practitioners to better understand criticality in their analyzes. It will be given to members of the EcoSD network during the presentation of the PRC17.6 results in June 2019. This guide will be based on several case studies:

- the automotive industry (lithium-ion batteries containing many rare materials (lithium, cobalt, nickel, neodymium), selective catalytic reduction techniques to reduce NOx emissions requiring more rare materials (rhodium, palladium, platinum)),
- the telecommunications sector (on the basis of life cycle analyzes performed on mobile phones, tablets, decoders and xDSL modem-routers),
- the production of phosphate fertilizers (phosphorus recovery from waste).

1. Contexte du projet PRC17.6

La part de produits contenant des éléments à haute technologie n'a cessé d'augmenter dans les échanges commerciaux mondiaux depuis les débuts de la société de consommation. Nécessaire au fonctionnement de ces produits, l'exploitation accrue des ressources minérales exposerait notre système économique aux risques d'une raréfaction des minéraux et, conséquemment, de l'augmentation sévère de leur prix. Par ailleurs, la présence très localisée de certains éléments dans la lithosphère, parfois dans des zones de grande instabilité géopolitique, peut également avoir un impact sur l'approvisionnement de ces matières. Est alors 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 » [1, 2].
En parallèle, la Commission Européenne a adopté en mars 2011 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 [3, 4].

En Analyse du Cycle de Vie (ACV), plusieurs méthodes de caractérisation des impacts permettent d'évaluer l'épuisement des ressources minérales. L'indicateur « Abiotic Depletion Potential » (ADP) de CML 2001 [5] est calculé à partir des réserves ultimes ou des réserves économiquement exploitables (« reserve base » ou « economic reserve », choix discuté dans [6]) et des taux d'extraction des éléments, celui de « Metal Depletion » (MD) de ReCiPe 2008 [7] en prenant en compte le coût marginal que la société doit payer pour l'extraction de la matière. D'autres indicateurs ont été développés en se basant sur les précédents, comme celui de Schneider et al. [8] qui tient compte des stocks de matières « anthropogéniques » dans le calcul de l'ADP. En revanche, la prise en compte des autres facteurs d'augmentation ou de diminution du risque sur la chaîne d'approvisionnement, et donc de la criticité de l'élément, semblent faire peu consensus [9].

Face à ce constant, l'objectif principal de ce projet de recherche est d'effectuer un état de l'art et une revue critique des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles minérales et de leur criticité. Cette revue critique devra notamment permettre de proposer des pistes d'amélioration de ces méthodes de caractérisation.

Le livrable final a été réalisé sous la forme d'un guide de bonnes pratiques à destination des membres du Réseau EcoSD sur ce sujet, afin d'aider les praticiens de l'ACV à mieux appréhender la criticité dans leurs analyses. Pour construire ce guide, plusieurs cas d'études variés ont été utilisés :

- Celui des batteries électriques dans le secteur industriel automobile,
- Dans le secteur des télécommunications, les cas d'études variés ont permis de donner une vue d'ensemble sur les conséquences du choix de la méthode en termes de matières ciblées. L'affichage environnemental pour les téléphones mobiles comprenant un volet sur l'épuisement des ressources naturelles, il a été analysé comment, en fonction de la méthode choisie, la communication envers le consommateur devra être adaptée (prise en compte de l'indium spécifique à ADP reserve base par exemple).
- L'exemple de la production de fertilisants phosphatés a également été utilisé pour identifier les principaux points faibles des méthodes de caractérisation actuelles des impacts d'épuisement des ressources naturelles lors de la réalisation d'ACV comparatives entre produits fertilisants phosphatés issus de ressources renouvelables (déchets organiques notamment) et ceux issus de ressources non renouvelables (roches phosphatées).

Ces cas applicatifs sont repris dans le présent rapport. Le guide de bonnes pratiques sera remis aux membres du réseau EcoSD lors de la présentation des résultats en juin 2019.

2. Organisation du travail et méthodologie mise en place

2.1. Organisation du travail au sein du PRC17.6

Le projet PRC17.6 est porté par Irstea (partenaire institutionnel) et le Groupe PSA et Orange (partenaires industriels). Ce projet s'appuie sur un groupe de travail mobilisant des membres du réseau EcoSD et le travail de deux stagiaires : Alexis Lalevée chez Irstea, financé dans le cadre du PRC et Eric Philipot chez Orange, hors financement du projet.

Afin de suivre le travail confié aux stagiaires, les partenaires ont réalisé régulièrement des réunions de présentation d'avancement des résultats du projet. Deux réunions ont ainsi été conduites les 22 mars et 25 mai 2018. Une réunion à mi-parcours mobilisant des membres du réseau EcoSD a été conduite le 14 juin 2018 afin de présenter et de discuter des premiers résultats obtenus. Deux autres réunions de travail ont également été réalisées pour travailler sur le guide de bonnes pratiques les 17 janvier et 5 avril 2019. Les compte-rendus de ces réunions sont présentés en Annexe 1.

Le projet PRC17.6 a été organisé selon l'échéancier présenté ci-après (Figure 1).

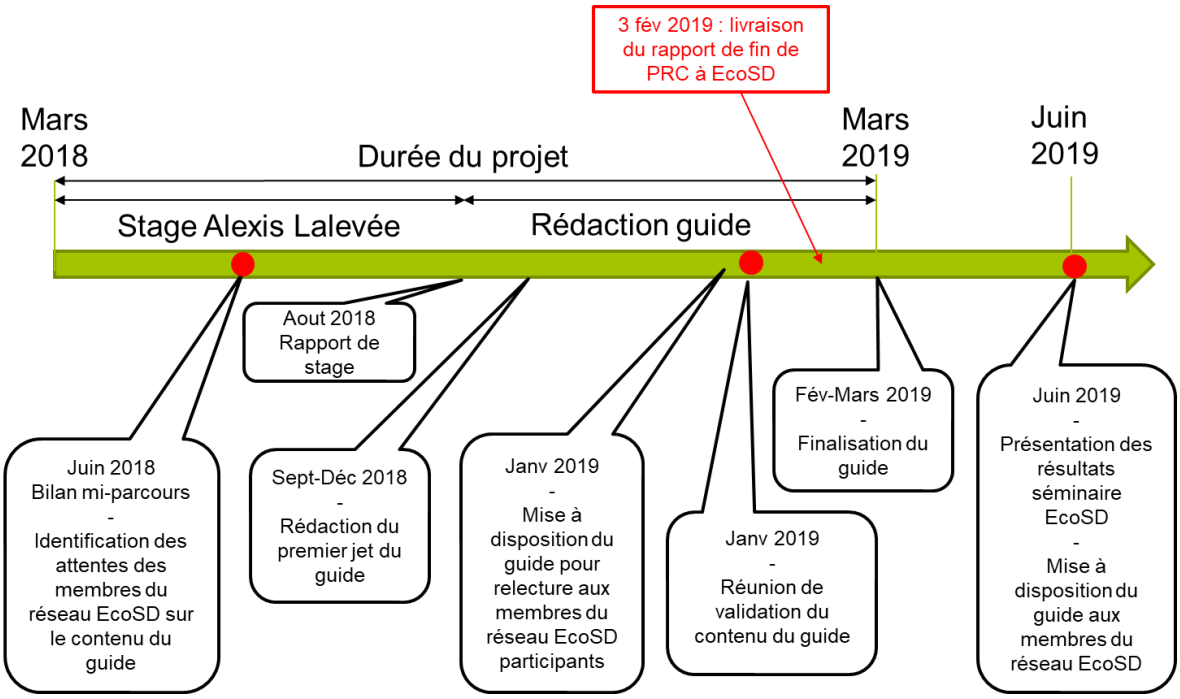


Figure 1. Echéancier du projet PRC17.6

2.2. Méthodologie mise en place pour la réalisation de l'état de l'art

Afin de réaliser l'état de l'art et la revue critique des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles minérales et de leur criticité, une analyse de la littérature scientifique a été menée. Les articles ont été sélectionnés dans le Web Of Science via des requêtes de mots-clés. Des grilles de lecture ont ensuite été produites pour pouvoir analyser chaque article et permettre ainsi de constituer des tableaux de synthèse.

2.2.1. Méthode mise en place pour la recherche bibliographique

Le premier travail a constitué à définir les termes de recherche appropriés pour constituer les requêtes pour la recherche bibliographique. Les requêtes, représentées par le symbole R, ont été constituées à partir des mots-clés suivants :

- ACV (R1) : [LCA OR “Life Cycle Assessment” OR “Life Cycle Analysis” OR “Life Cycle Inventory” OR LCI OR “Abiotic resource depletion” OR “Abiotic Depletion Potential” OR ADP]
- Recyclage (R2) : [Recycling OR Reuse OR “Resource efficiency” OR “Circular economy” OR “waste valori*ation”]
- Criticité (R3) : [“Resource criticality assessment” OR “Criticality resources” OR “Critical raw material assessment” OR “Resource scarcity” OR “Resource security” OR “Resource vulnerability” OR “Material availability” OR Criticity OR Criticality]
- Ressources d’intérêt (R4) : [Lithium OR “Lithium-ion phosphate” OR Cobalt OR Indium OR Phosphorus OR Phosphate OR “Phosphate fertilizer”]

Une recherche d’articles scientifique via Web Of Science a été ensuite réalisé pour chaque requête individuelle. On obtient après affinage 6 446 articles pour la requête ACV (R1), 11 490 articles pour la requête Recyclage (R2), 150 articles pour la requête Criticité (R3) et 31 261 articles pour la requête Ressources d’intérêt (R4).

Afin d’affiner la recherche, les requêtes ont été croisées deux à deux (Tableau 1) puis trois par trois (Tableau 2).

	R1 : ACV	**R2 : Recyclage**	**R3 : Criticité**	**R4 : Ressources**
R1 : ACV		1.279 résultats	33 résultats	194 résultats
R2 : Recyclage			59 résultats	677 résultats
R3 : Criticité				16 résultats
R4 : Ressources				

Tableau 1. Croisement des requêtes deux à deux

Croisement réalisé	**Nombre d’articles obtenus**	**Nombre d’articles gardés**
R1/R2/R3	8 résultats	→ 8 gardés
R1/R2/R4	48 résultats	→ 17 gardés
R1/R3/R4	3 résultats	→ 3 gardés
R2/R3/R4	11 résultats	→ 10 gardés
R1/R2/R3/R4	0 résultat	-

Tableau 2. Croisement des requêtes trois par trois

La synthèse bibliographique a donc été basée sur le nombre total d’articles retenus soit **38 articles**.

2.2.2. Méthode mise en place pour l'analyse des articles : grille de lecture

Afin d'analyser les articles de manière pertinente et identique, des grilles de lectures ont été constituées.

Pour chaque article, un certain nombre de questions ont été traitées pour chaque document :

- Présentation du document (titre, auteurs, date, objectif)
- De quels domaines traite ce document (criticité/ACV/recyclage ou ressources étudiées) ?
- Dans quel objectif est rédigé ce document ?
- Quels sont les points importants dans ce document (résumé) ?

Pour les articles traitant d'ACV/CRITICITE, les questions traitées ont été les suivantes :

- Le terme de criticité est-il clairement formulé ?
- Nombre de ressources évaluées par la méthode
- Nombre de ressources considérées comme critiques (selon l'UE)
- Le calcul de l'impact prend-il en compte des éléments de calcul de la « criticité » (définition UE) ?
- Quels sont les éléments de calcul de l'indicateur ?
- Dans quel objectif est fait cet indicateur ?
- Quel est la pertinence du document ? (Note)

Pour les article traitant d'ACV/RECYCLAGE : les questions traitées ont été les suivantes :

- Comment sont traitées les ressources que nous étudions (lithium, phosphore, cobalt, indium) ?
- Quel type de recyclage est préconisé ?
- Peut-on parler d'un effet « mine urbaine » ?
- Le recyclage est-il intégré dans les méthodes de caractérisation ?
- Les ressources recyclées sont-elles intégrées dans les méthodes de caractérisation ? Quelles sont-elles ?
- Quel est la pertinence du document ? (Note)

2.2.3. Constitution de tableaux de synthèse pour chaque grille de lecture

Des tableaux de synthèse ont ensuite été constitués pour chaque article (exemple présentés dans le Tableau 3 et le Tableau 4).

DOCUMENTS				QUESTIONS							Résumé			
TITRE	AUTEURS	DATE	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("déplétion")		Criticité	
											ACV	Non ACV	ACV	Non ACV
Criticality of material resources in industrial enterprises – structural basics of an operational model	Miehe et al.	2016	Présentation d'un modèle permettant de "quantifier" la criticité des ressources pour les entreprises.	oui	non	non	non	non	* Beaucoup de référence à **l'économie** * Etat de l'art du terme de **criticité** (différentes "définitions") * Pistes d'amélioration : mieux prendre en compte la substitution et la fonctionnalité * certaines ressources deviennent rares et d'autres sont dangereuses (environnement, santé humaine...) * Références à Graedel et al. (2012)	Modèle qui permet de savoir quelles sont les **ressources critiques** d'une **entreprise**, par une méthodologie détaillée (vulnérabilité et risques d'approvisionnement y sont détaillés).			x	
Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools	Finnveden, G., Arusthanyan, Y., Brandão, M.	2016	Illustrer l'utilisation de l'approche thermodynamique dans des études de cas et comparer les résultats avec d'autres approches, contribuant ainsi à la discussion sur la façon de mesurer l'utilisation des ressources.	non, mais il parle de l'utilisation ("depletion")des ressources	oui	non	oui	non	* Mesure de l'utilisation des ressources par l'exergie en ACV ("depletion) * Comparaison avec d'autres méthodes * Calculs : **ADP** *Points forts et perspectives de cette méthode	L'utilisation des ressources abiotiques est très discutée : différentes méthodes : ADP, Cumulative Exergy Demand (CExD). Approches thermodynamiques comparées aux autres approches "classiques". Les données, robustes, permettent un calcul **fiable** et c'est pertinent pour **l'utilisation et l'épuisement des ressources** ; tout en montrantce qui est réellemnet consommé.	x			

Tableau 3. Exemple de tableau de synthèse relatif aux questions génériques

DOCUMENTS			QUESTIONS					
TITRE	AUTEURS	DATE	Le terme de criticité est-il clairement formulé ?	Nombre de ressources évaluées par la méthode	Nombre de ressources considérées comme critiques (selon l'UE)	Le calcul de l'impact prend-il en compte des éléments de calcul de la « criticité » (définition de l'UE) ?	Dans quel objectif est fait cet indicateur ?	Quelle est la pertinence du document ? (Note)
Criticality of material resources in industrial enterprises – structural basics of an operational model	Miehe et al.	2016	oui	Méthode générale (Criticité=Vulnérabilité * Risque d'Approvisionnement)	0	oui	Aider les entreprises à appréhender au mieux leurs ressources critiques	1/4 : apporte peu d'éléments nouveaux ; permet aux entreprises de savoir quelles sont leurs RC.
Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cyclet Assessment and Other Sustainability Assessment Tools	Finnveden, G., Arushanyan, Y., Brandão, M.	2016	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	**Utilisation et épuisement des ressources** : méthode thermodynamique : 4/4
The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change	Northey et al.	2017	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	0/4 : ne répond pas à notre problématique

Tableau 4. Exemple de tableau de synthèse relatif au thème ACV/criticité

Cette étude a permis de mettre en lumière les principaux points traités sur l'épuisement/criticité des ressources.

3. Principaux résultats obtenus

Les résultats rapportés ci-après sont les résultats obtenus dans le cadre du projet PRC17.6. Ils portent sur :

- L'état des lieux sur les indicateurs ACV d'épuisement des ressources en ACV et plus particulièrement sur le bilan des méthodes de caractérisation « épuisement des ressources »
- L'état des lieux sur les indicateurs de criticité des ressources et plus particulièrement sur le bilan des méthodes d'évaluation de la criticité
- Le lien entre ACV et criticité
- L'implémentation des méthodes de caractérisation dans les logiciels ACV GaBi et Simapro
- Les cas applicatifs

3.1. Etat des lieux des indicateurs ACV d'épuisement des ressources en ACV

3.1.1. Principaux types de modélisation des ressources en ACV

Trois principaux types de modélisation ont été identifiés suite à l'analyse des méthodes de caractérisation de l'épuisement des ressources en ACV :

1. Une modélisation basée sur une quantification **physique des ressources.**

Elle 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 ressources ou les réserves disponibles. Le calcul se présente sous la forme suivante :

$$ADPi = \frac{\frac{DRi}{(Ri)^2}}{\frac{DRsb}{(Rsb)^2}}$$

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
DR_{sb} : taux d'extraction de la ressource de référence

(Méthode CML)

Ce type de modélisation est utilisé dans les méthodes CML, AADP. La méthode EDIP se base uniquement sur les réserves. Les facteurs de caractérisation de ces méthodes varient selon quel type de réserves étudiés (ultimes, bases de réserves, économiques).

2. Une modélisation basée sur une approche **économique.**

Ce type de modélisation repose sur l'effort fait pour extraire une ressource dans le futur. En effet, l'utilisation que nous en faisons actuellement implique qu'à l'avenir les ressources seront plus rares et en concentration moindre. Des efforts plus importants seront nécessaires pour extraire la ressource en admettant que les mêmes technologies soient utilisées. Ce type de modélisation est donc basé sur le surcoût engendré pour l'exploitation des ressources.

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

$MCI_{r,kg}$: 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.

(Méthode ReCiPe)

Ce type de modélisation est utilisé par EcoIndicator 99, ReCiPe ou encore ESP2000. Cette dernière se base notamment sur le concept de consentement à payer. Pour ces méthodes, le coût de la substitution de certaines ressources est utilisé afin de donner une bonne visualisation des impacts futurs.

3. Une modélisation basée sur une **approche énergétique**.

Cette modélisation repose sur deux méthodes distinctes : une méthode basée sur le surcoût énergétique engendré pour l'exploitation de la ressource et une méthode basée sur la thermodynamique, ayant pour base la diminution de l'exergie ou l'augmentation de l'entropie.

<u>Méthode basée sur le surcoût énergétique :</u>

Elle repose sur l'effort fait pour extraire une ressource dans le futur. Ce point dans le futur est une hypothèse de travail, définit 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. Cet effort est estimé par le surcoût énergétique engendré pour l'exploitation de la ressource.

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

ΔEi : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i
Eactuellei : Énergie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement
Efuture i : Énergie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir

(Méthode EI99)

Ce type de modélisation est utilisée par la méthode Ecoindicator99 (EI99) et Impact2002+ (FC EI99 ressource i / FC EI99 Fe).

<u>Méthode basée sur la thermodynamique (exergie et entropie) :</u>

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. Généralement l'énergie « utile », c'est-à-dire l'exergie, représente une fraction seulement de l'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 » [10].

L'exergie peut donc être utilisée comme une mesure de l'épuisement et de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques en ACV et cela pour deux raisons principales :

1. L'exergie peut être considérée comme l'ultime ressource limitante, ceci du fait que chaque ressource matière est associée à un coût énergétique qui peut être limitant si trop élevé. Dans ce contexte, l'exergie permet d'évaluer la qualité de l'énergie et l'exergie chimique des ressources non énergétiques.
2. L'objectif est de savoir ce qui est épuisé ou utilisé lorsque l'on parle d'épuisement ou de consommation des ressources. L'énergie étant conservée lors de toute transformation de la matière (1ère loi de la thermodynamique), l'énergie utile peut être consommée ou transformée en un autre type d'énergie, l'entropie (2ème loi de la thermodynamique). La production d'entropie peut donc s'avérer un bon indicateur pour évaluer la consommation des ressources en lien avec l'ACV.

Pour calculer l'énergie chimique des ressources E_{ch} (sur la base de leur exergie chimique), Finnveden et Östlund (1997) [11] utilisent la formule suivante :

$$E_{ch} = \sum n_i \; e_{ch,I}$$

Avec :
n_i, la quantité de matière i (nombre de moles dans la substance) ;
$e_{ch,i}$, l'exergie chimique molaire de la substance i.

L'exergie chimique est l'exergie stockée dans la substance comme un manque d'exergie de liaison entre les atomes dans une molécule. Ce calcul est réalisé en considérant une température ambiante (21°C) et peut donc changer selon les conditions climatiques et l'altitude. À titre d'exemple, l'exergie nécessaire pour extraire un kilo de phosphore est de 11 MJ. La méthode CexD et CEENE sont basées sur cette approche.

3.1.2. Principales méthodes disponibles en ACV pour évaluer l'épuisement des ressources

Plusieurs méthodes de caractérisation ont été développée au cours des vingt dernières années pour évaluer l'épuisement des ressources minérales naturelles en ACV. Un bref rappel historique du développement de ces méthodes est présenté en Figure 2 en parallèle des méthodes d'évaluation de la criticité des ressources.

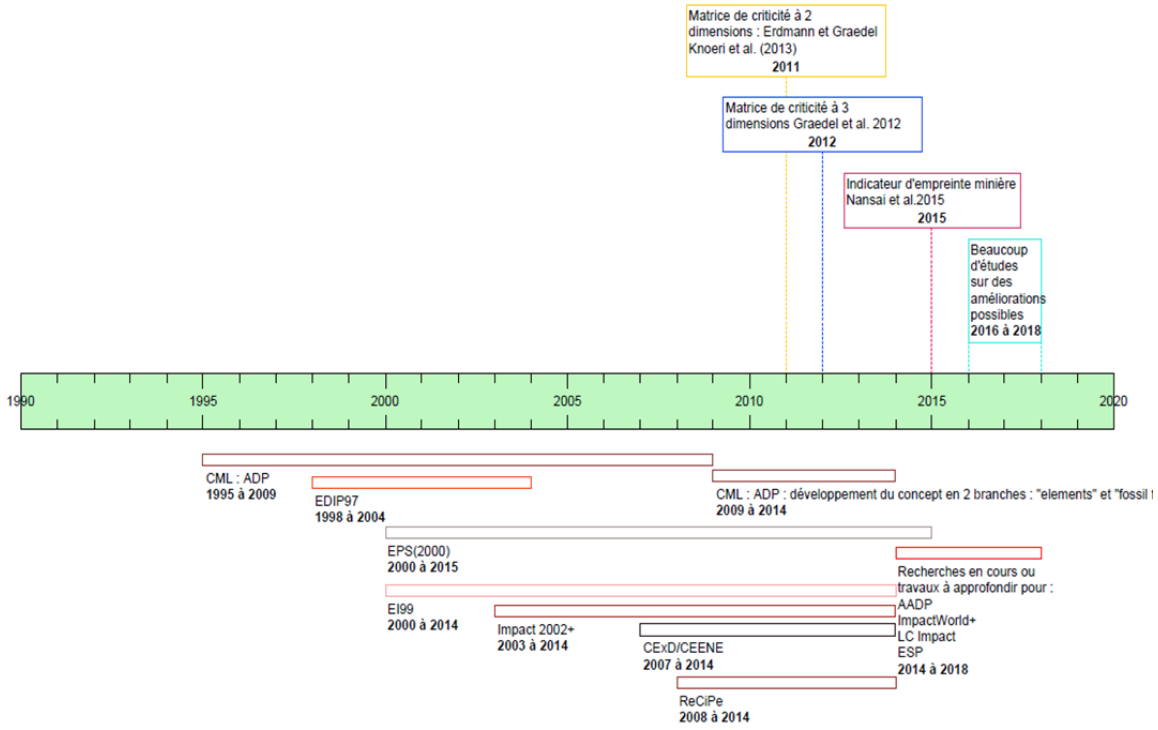


Figure 2. Historique du développement des méthodes de caractérisation en ACV et d'évaluation de la criticité des ressources

En Annexe 2, chacune de ces méthodes est présentée sous la forme d'un tableau comprenant les éléments suivants :

- Nom de l'indicateur
- Nom de la méthode
- Type d'indicateur
- Publications et liens de référence
- Unités
- Ressources couvertes
- Principes et fondements
- Calcul des facteurs de caractérisation
- Sources de données principales
- Représentativité géographique
- Auteurs
- Mises à jour
- Incertitudes
- Limites
- Travaux supplémentaires en cours

3.1.3. Développements méthodologiques en cours

1. AADP - Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential
   - Amélioration de la méthode CML
   - Prise en compte les réserves anthropogéniques : stocks de ressources diffuses présentes dans les « mines urbaines »
   - Meilleure prise en compte non seulement du recyclage mais aussi de la réutilisation et/ou la substitution des ressources minérales
   - Appliquée à seulement 10 ressources minérales

2. LC impact
   - Amélioration de la méthode ReCiPe
   - Postule que l'extraction de matière première est essentielle car le recyclage ne permet pas de couvrir les demandes actuelles.
   - Meilleure couverture des ressources minérales que ReCiPe
   - Prend en compte la rareté de la ressource

3. Global Ressources Indicator
   - Méthode multicritère qui prend en compte la rareté (FC CML), la recyclabilité (tx de dispersion et de recyclage) et la disponibilité géopolitique (index WGI, nb pays, écart type) de la ressource évaluée
   - Prend en compte des éléments évalués dans les indicateurs de criticité
   - Référence : Fe

4. Impact World +
   - Mise à jour des méthodes IMPACT 2002+, LUCAS et EDIP
   - Epuisement des ressources minérales : « material competition scarcity index » (indice de rareté de la concurrence matérielle) = indicateur midpoint
   - Traduit les fonctions de chaque ressource en intégrant au modèle la notion de secteurs et d'existence de technologies de substitution aux ressources pour chaque secteur

5. Economic resource Scarcity potential (ESP)
   - Ajout de critères économiques et sociaux à ceux environnementaux => se rapproche d'une évaluation de la criticité des ressources

Catégorie d'impact	Description	Indicateurs d'impacts utilisés pour le calcul de l'ESP :
Disponibilité des réserves	Temps d'épuisement (technologies actuelles)	Rapport entre extraction et les réserves connues
Recyclage	Taux de recyclage de la ressource	% de nouveau matériau utilisé
Concentration du marché, des activités des mines par pays et par entreprise	Concentration des réserves et de la production dans certains pays et entreprises	Basé sur l'Indice Herfindahl-Hirschman (HHI)
Stabilité de gouvernance	Stabilité des instances dirigeantes (pays producteurs)	Basé sur le World Governance Indicator, WGI (indice de gouvernance mondiale)
Stabilité socioéconomique	Développement humain (pays producteurs)	Basé sur le Human Development Index (Indice de Développement Humain)
Croissance de la demande	Augmentation de la demande	% de croissance annuelle
Barrières commerciales	Matières premières soumises à des contraintes commerciales (taxes, quotas…)	% de la part de la production minière soumis aux contraintes commerciales
Taux de métaux compagnons	Présence de métaux compagnons dans les gisements de minerais	% de la production en tant que métaux compagnons

3.1.4. Points de vigilance identifiés

Un certain nombre de points de vigilance ont été identifiés pour que les praticiens ACV puisse utiliser ces méthodes.

1. Choix des types de réserves et de l'estimation des quantités disponibles pour le calcul des facteurs de caractérisation des méthodes « physiques »
   - Le calcul des facteurs de caractérisation varie selon le type de réserves utilisées (économiques, base de réserve ou ultimes) et la source utilisée pour le taux d'extraction (USGS ou autre).
   - Source des données anciennes : USGS1990, nécessité d'actualisation des FC?

2. Grande variabilité dans le nombre de ressources minérales couvertes par les facteurs de caractérisation des différentes méthodes (Figure 3)

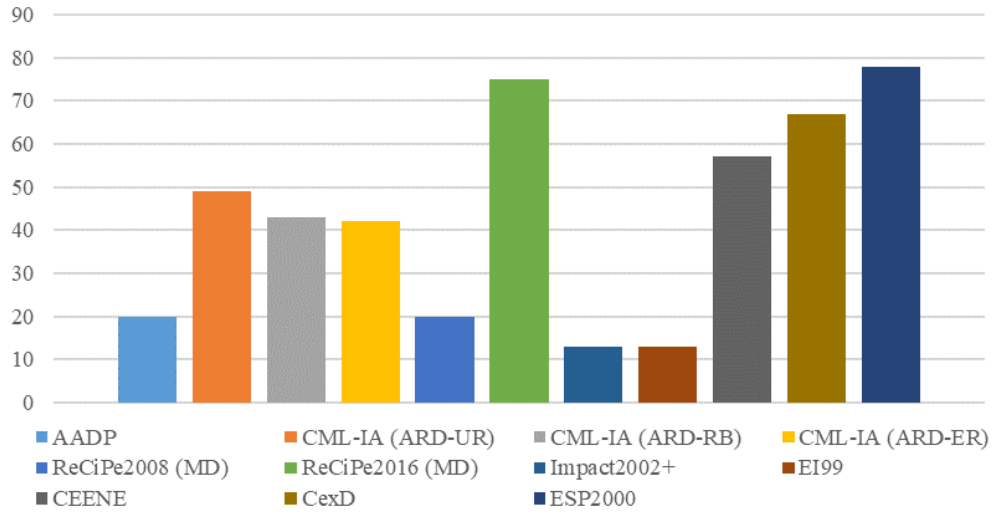


Figure 3. Nombre de ressources minérales évaluées pour chaque méthode de caractérisation ACV

3. Question de l'intégration de la fonctionnalité dans l'évaluation de l'impact des ressources
   - Cas d'Impact World+ : les fonctions apportées par les ressources sont d'intérêt pour les systèmes anthropogéniques et non pas la ressource en tant que telle. Cette méthode distingue les pertes de fonction (épuisement effectif = dissipation dans l'environnement) et du maintien de la fonction mais pour d'autres usages (usage compétitif = recyclage).
   - Quid des ressources/fonctions non substituables?

4. Question de la temporalité de l'épuisement des ressources

3.2. Etat des lieux des indicateurs de criticité des ressources

3.2.1. Principe de criticité des ressources

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) [12].

La notion de criticité est un concept assez récent. Représentée initialement comme une simple matrice, la criticité fait l'objet depuis environ 5 années 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 [13, 14].

En effet, la perspective d'une baisse en approvisionnement des marchés mondiaux en terres rares de la part de la Chine qui produit 95% de ces ressources 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 (épuisement des gisements).

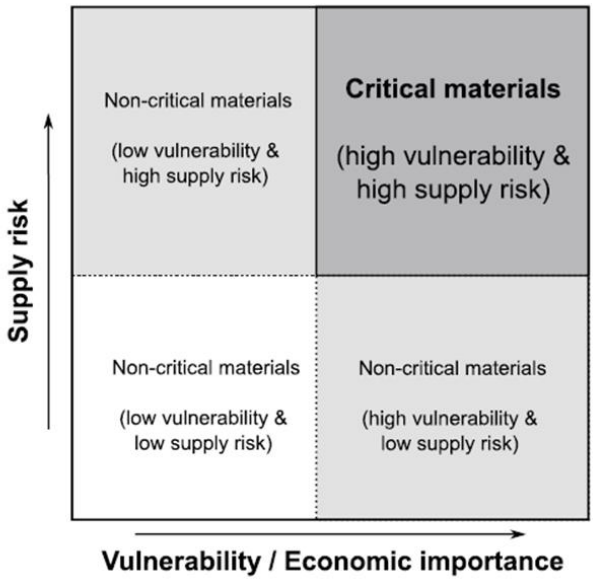


Figure 4. Risque d'approvisionnement en fonction de la vulnérabilité

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 4). Issues directement du concept de matrice de criticité, les éléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité sont les suivants (Figure 5) :

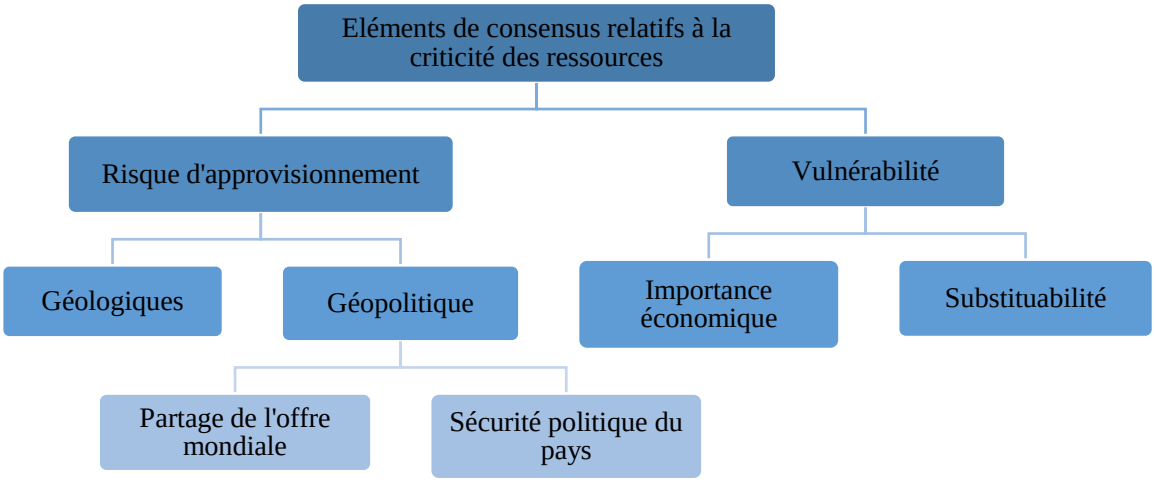


Figure 5. Eléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité (d'après [15])

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.

3.2.2. 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 [30]. 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 6). 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 ». 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.

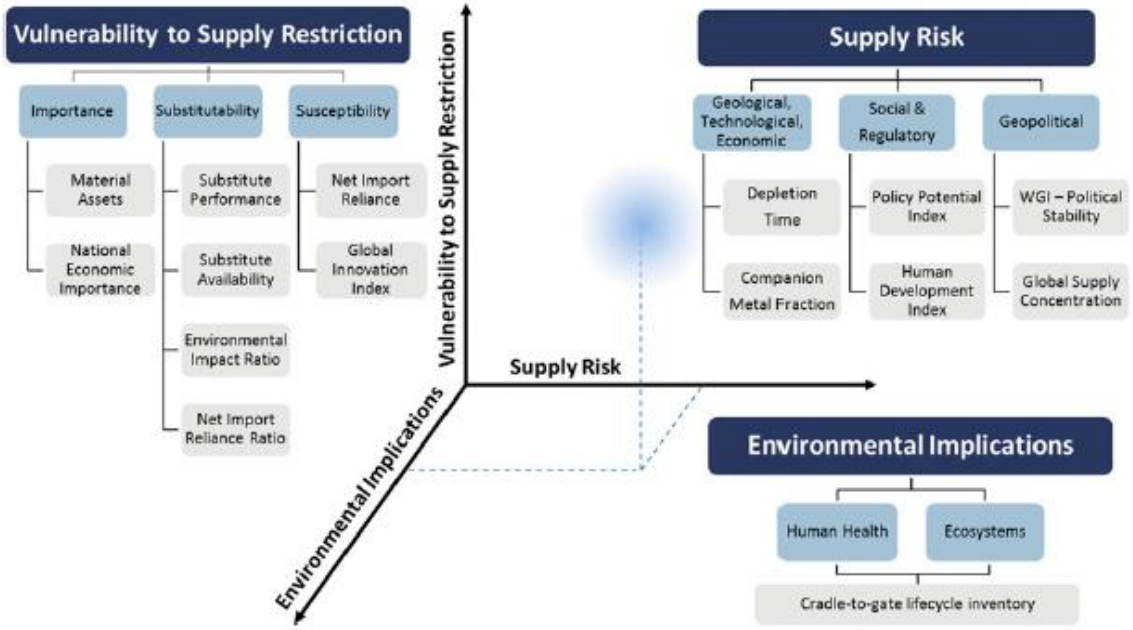


Figure 6. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par Graedel et al. [30,48]

La seconde méthode a été développée par le conseil d'administration du Joint Research Centre (JRC) de la Commission Européenne en étroite collaboration avec le conseil d'administration 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 [49].

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 7).

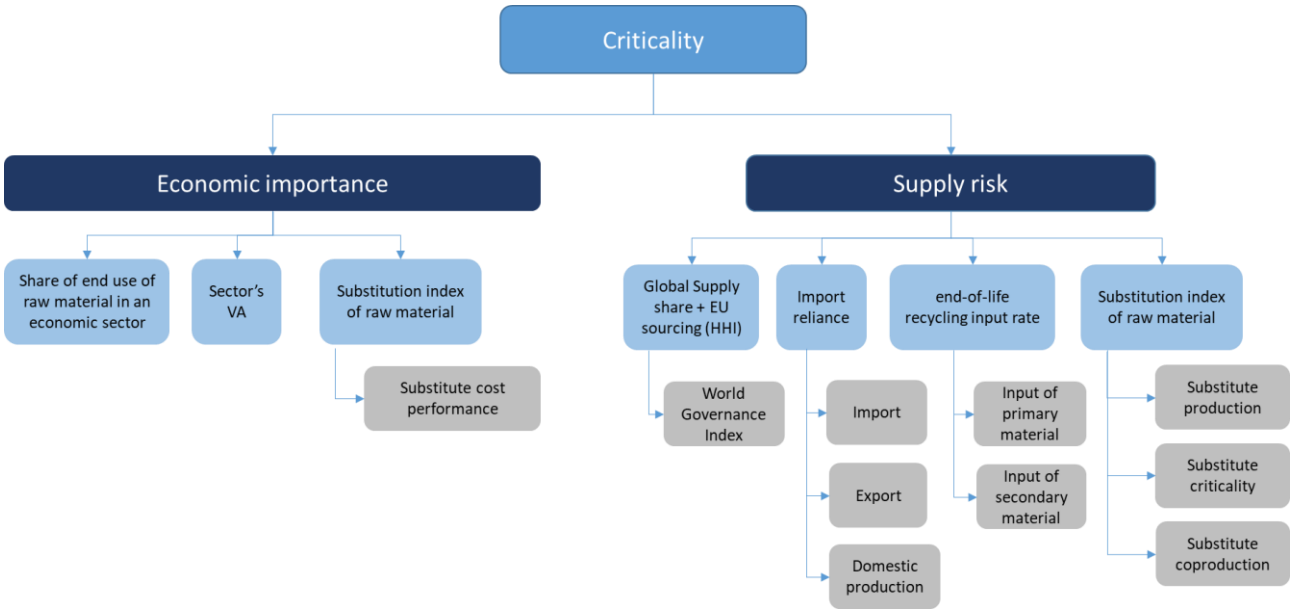


Figure 7. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par la Commission Européenne [50,51]

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".

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

Afin de déterminer les matières premières critiques, la méthode de l'Union 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 8 montre ainsi la répartition des matières premières critiques (points rouges) et celles qui ne sont pas critiques (points bleus).

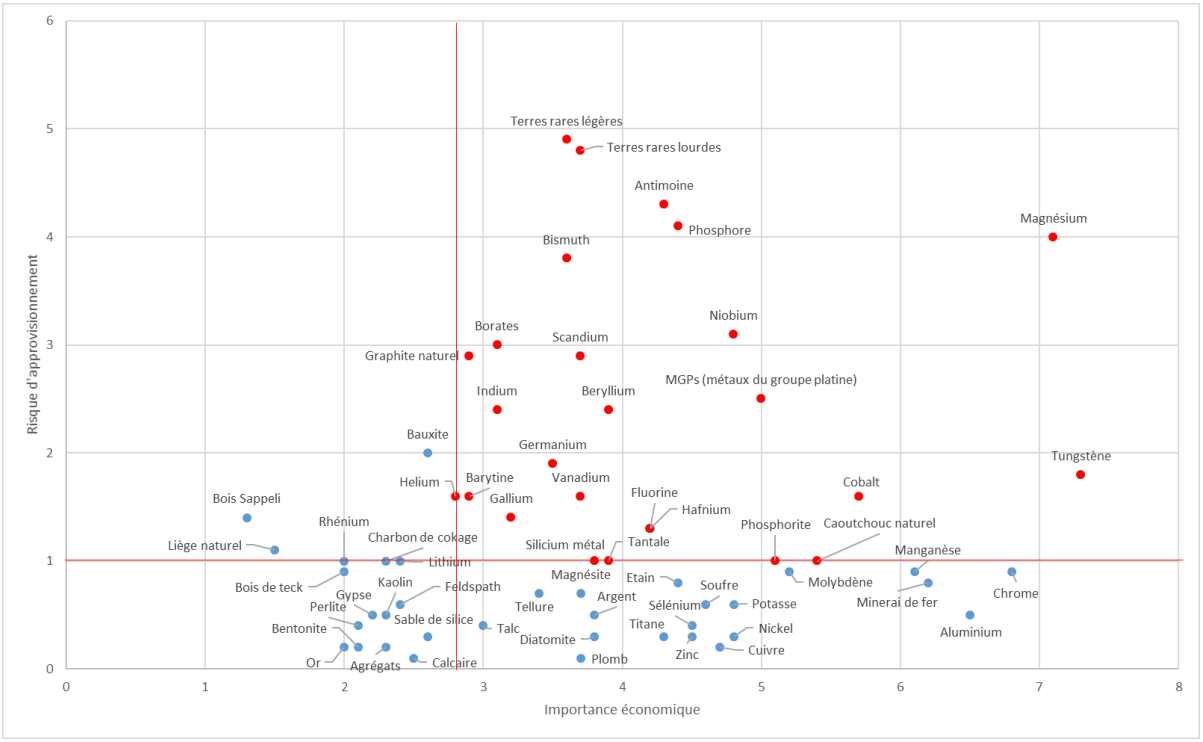


Figure 8. Résultats 2017 de l'évaluation de la criticité au regard de l'importance économique et du risque d'approvisionnement [52]

La Commission Européenne a défini à l'aide de cette méthode 26 matériaux critiques en 2017 ainsi que le principal fournisseur mondial (Tableau 5.).

Tableau 5. 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[1] (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[2]	Chine	E : 95%
Magnésium	Chine	R : 87%	Terres rares légères[3]	Chine	E : 95%
Graphite naturel	Chine	E : 69%			

[1] Les métaux du groupe du platine comprennent l'Iridium, le Palladium, le Platine, le Rhodium et le Ruthénium.
[2] 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.
[3] Les terres rares légères comprennent le Cérium, le Lanthane, le Néodyme, le Praséodyme et le Samarium.

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 rapport. Des fiches de criticité sont présentées en Annexe 3 pour l'indium et le phosphore.

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 9. Ne sont repris dans cette figure que les composantes principales et les matières premières définies comme critiques par l'Union Européenne à titre comparatif.

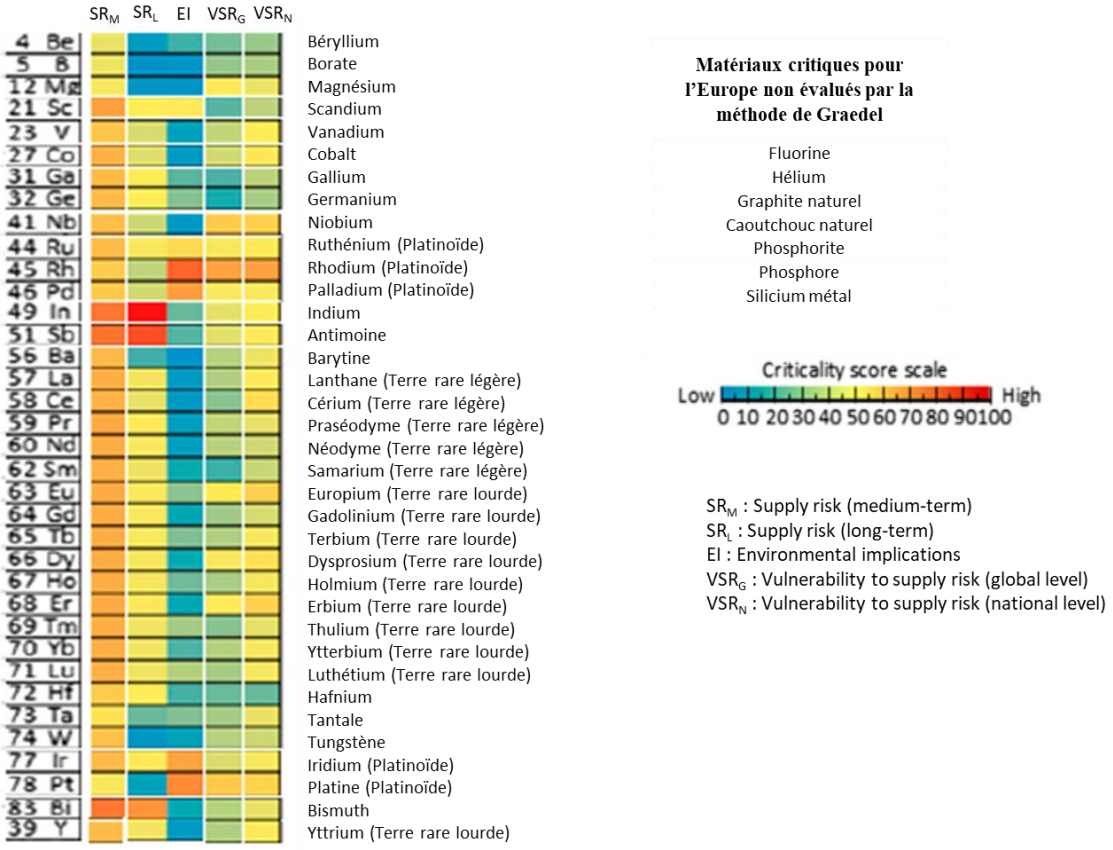


Figure 9. Evaluation des indicateurs de criticité selon [48]

3.2.4. Études existantes sur la criticité : du concept à une transposition en ACV

La criticité est plus ou moins abordée selon la pensée cycle de vie, voire même à travers l'ACV. Deux revues critiques ont été réalisées sur la criticité à l'heure actuelle : celle de Habib and Wenzel (2016) [15] et celle de Sonnemann et al. (2015) [16]. L'analyse de ces deux revues critiques ainsi que des articles scientifiques utilisés pour réaliser ces revues a permis de réaliser une synthèse de la façon dont est appréhendée la criticité dans la littérature scientifique.

L'analyse a montré qu'il existait 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, ou tout du moins mentionnent, les liens entre la criticité des ressources et l'ACV et les intérêts de proposer un indicateur en ACV, voire plus globalement en Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (ADCV, ou LCSA en anglais).

Il ressort des travaux de Sonnemann et al. (2015) des conclusions importantes qui ont été utilisées pour affiner ce travail de synthèse :

- la nature de la modélisation et donc les indicateurs diffèrent suivant ce que le modèle tend à démontrer,
- il peut y avoir une multitude de méthode pour évaluer la criticité comme il en existe pour évaluer l'épuisement des ressources.

Comme pour l'épuisement des ressources en ACV, l'évaluation de la criticité se base par rapport à un matériau de référence. Il peut changer suivant les études qui sont faites. Toutefois, l'évaluation de la criticité doit encore faire l'objet de développement, notamment en ce qui concerne la substitution en étudiant mieux les conséquences qui en découlent (tant environnementale que socio-économiques).

Les principaux éléments apportés par les auteurs étudiés dans les revues critiques de Habib and Wenzel (2016) et de Sonnemann et al. (2015) sont les suivants :

- La substitution est très difficile à évaluer et doit être faite par des experts ; un algorithme mathématique ne suffit pas [17].
- Malgré la difficulté à évaluer la substituabilité d'une ressource, c'est un élément important à prendre en compte vis-à-vis de la criticité [18].
- Des indicateurs statiques ne fournissent qu'une image à un instant t de la situation de criticité d'un matériau. L'utilisation de tels indicateurs statiques est un frein à l'évaluation de la criticité car ils ne permettent pas d'envisager les évolutions futures comme la baisse de certaines réserves, la découverte potentielle d'autres, l'évolution des modes de vie… [19].
- Les indicateurs dynamiques fournissent une tentative de prise en compte de l'évolution possible des indicateurs de criticité [20].
- La méthode ReCiPe est utilisée pour modéliser des chaines de cause à effet débouchant sur des indicateurs de dommages en fonction de la contribution respective des impacts intermédiaires (mid-point) à la détérioration des aires de protection que sont la santé humaine, les ressources naturelles et la qualité des écosystèmes. Les impacts directs de l'utilisation des ressources peuvent être saisis en tant que dimension socio-économique dans l'indicateur de dommage « ressources naturelles [7].

3.2.5. Proposition d'améliorations de l'évaluation de la criticité

Enfin, d'autres articles scientifiques tentent d'appréhender la criticité, à travers certains aspects notamment une meilleure prise en compte du recyclage et de la substitution.

<u>Meilleure prise en compte du recyclage</u>

- L'efficacité voire l'efficience des systèmes de transformation des minéraux en matière utilisable (de l'extraction à l'utilisation) ainsi que l'utilisation dans les différents procédés de fabrication utilisant des ressources pouvant s'avérer critiques est un moyen de contourner le risque de pénurie. Les efforts faits en faveur du recyclage (notamment son efficacité) de ces matériaux est primordial. Une approche « cycle de vie » est importante pour les décideurs [21].

- Bien que la méthode d'évaluation de la criticité soit classique (celle de l'UE), elle souligne et insiste sur le fait que le recyclage représente une solution au problème de criticité. Pour ces auteurs, le recyclage est un des moyens de « contrer » la criticité des ressources [22].

- Le recyclage ou la réutilisation des métaux critiques est complexe : petites quantités, beaucoup d'énergie dépensée, qu'elle soit physique et/ou chimique. Il faut penser à l'écoconception comme une des solutions possibles. Les avantages du recyclage pour l'Europe sont pour ces auteurs une nouvelle vie aux déchets,

une réduction de la dépendance aux REE, peu de risques (environnementaux ou dûs aux mines, radioactivité...). Pour eux, l'accent devrait être mis sur la recherche, sur la mise en place des filières, en ayant un coût acceptable et une volonté globale de la société (volonté politique) [23].

Meilleure prise en compte de la substitution

- La substitution doit être prise en compte comme un élément venant réduire la criticité d'une ressource. Elle doit se baser sur la fonctionnalité du matériau. Il ne faut pas raisonner sur un matériau mais penser « fonction » et, plus globalement, nous pouvons nous poser la question suivante : comment pourrait-on remplir la fonction souhaitée mais par un autre moyen ? [24]

- Il est mis en lumière, grâce à l'étude approfondie du domaine du photovoltaïque, qu'une question majeure reste posée : quelle est l'influence des populations et des économies émergentes sur la rareté (physique) des ressources et sur l'environnement? De plus, les auteurs reviennent sur les soucis liés à la substitution qui restent posés : quels compromis faire, garder les matériaux utiliser et tenter de gérer au mieux les ressources ou plutôt substituer ce qui peut l'être et voir quelles en sont les conséquences ? Ils soulignent également l'importance de faire un indicateur dynamique dans un monde en perpétuel changement. Une fois de plus, d'un point de vue méthodologique, il n'y a pas de grandes avancées mais l'étude permet de se poser des questions importantes [25].

Vers une amélioration des méthodologies évaluant la criticité

- Les 3 facteurs de la criticité pour une entreprise sont le prix, le temps d'approvisionnement (matière et jusqu'au consommateur final) et la technologie. Selon les auteurs, la substitution pourrait être mieux prise en compte que dans les études faites jusqu'alors. Il s'agit là de l'élément central de l'article. Selon les auteurs, la substitution est une manière de détourner le problème d'approvisionnement qui dépend de 2 autres paramètres : le prix (à quel coût se fait cette substitution ?) et la technologie (est-ce faisable technologiquement et avec quelles contraintes ?) [26].

- Dans cet article, les auteurs préconisent d'entreprendre la criticité pour chaque technologie et ainsi créer une nouvelle "méthode" [27]. Le problème soulevé est qu'un matériau peut être utilisé dans beaucoup de technologies différentes. Cela parait presque irréalisable tant le nombre de technologies pour une même fonctionnalité est important. Un des autres constats effectué est que le recyclage des matériaux n'est pas assez étudié dans la littérature scientifique. Peu d'informations sur les méthodes et surtout sur les améliorations envisageables existent ; un état des lieux complet serait souhaitable (quelles méthodes pour quels matériaux et pourquoi ?). Il faudrait également développer le concept « d'indices de criticité développés » dans le but de construire un indicateur technologique spécifique à la suite des travaux effectués par Morley et Eathrley (2008), Moss et al. (2013), ou encore la méthode japonaise NEDO [28, 29]. Cependant, ces travaux sont complexes et dépendent d'une technologie qui peut être amenée à évoluer, voire disparaitre.

3.3. Lien entre ACV et criticité

Au final, suite à cette revue bibliographique, nous avons entrevu deux façons différentes pour coupler ACV et criticité :

- En intégrant des indicateurs ACV comme indicateurs de criticité (cas de Graedel et al, 2012)
- En intégrant des indicateurs de criticité dans la méthode ACV (cas de Mancini et al., 2016 et de Sonneman et al, 2015)

3.3.1. Les indicateurs ACV comme indicateurs de criticité

L'approche proposée par Graedel et al. (2012) [30] est très intéressante pour évaluer la criticité car elle intègre une approche environnementale. Toutefois, selon Sonneman et al (2015), elle n'est pas applicable en tant que telle dans l'ACV. En effet, la pondération de chacune des composantes (la même pour tous) est problématique et reste subjective

et simplifiée. Il est peu probable que, par exemple, l'IDH ait le même poids sur la criticité d'une ressource que l'importance économique [16].

De plus, dans son état actuel, l'ACV ne tient pas compte de l'impact à court terme de l'utilisation des ressources. Cet impact est mieux traité en considérant les potentiels effets politiques et économiques. Selon Sonneman et al (2015), l'épuisement des ressources est un problème à long terme ce qui limite l'usage des indicateurs ACV comme un indicateur d'évaluation de la criticité de la ressource [16].

3.3.2. Les indicateurs de criticité dans la méthode ACV

L'argumentaire pour intégrer les indicateurs de criticité en ACV repose sur le postulat que la criticité doit être vue plus largement que les seuls aspects économiques et sociaux mais dans une évaluation de la durabilité du cycle de vie en combinant une ACV, une ASCV et une ACCV [31]. Contrairement aux modèles environnementaux (ACV), les indicateurs utilisés pour rendre compte de la criticité ont une échelle ordinale. Cette spécificité rend complexe et difficile l'intégration d'un indicateur de criticité en ACV, notamment pour le développement des facteurs de caractérisation car difficile d'établir des chaînes de cause à effet [32].

Selon Schneider et al (2014), l'ACV doit être complétée par une vision économique car elle est incomplète pour évaluer la diminution des ressources et donc la criticité. Selon les auteurs, le principe d'épuisement des ressources peut aussi intervenir dans le processus d'évaluation de leur criticité [33].
Habib et Wenzel (2014) soulignent l'importance d'introduire des éléments dynamiques. En effet, en se basant par exemple sur des MFA dynamiques, il serait envisageable d'avoir des bases de données dynamiques sur lesquelles s'appuieraient les calculs de la criticité dans une ACV [34].

Dans l'article de Mancini et al (2016), les auteurs étudient la possibilité d'intégrer la criticité des ressources en Analyse de Cycle de Vie. Pour les auteurs, cela semble compatible et même souhaitable. En effet, quelques ajustements par rapport à la méthode sont envisageables afin d'arriver à un indicateur exhaustif. Par exemple, le contexte dans lequel l'étude est menée est important. Nous nous plaçons en Europe et nous sommes donc très dépendants en importation de nombreux matériaux. L'avantage de l'approche ACV pour la criticité, est que toutes les phases du cycle de vie sont étudiées. La difficulté d'intégrer la criticité en ACV repose sur la spécificité même de l'ACV d'évaluer des impacts. Les questions qui se posent sont donc les suivantes : Quel impact mettre en place pour rendre compte de la criticité ? Est-ce envisageable ? Il est possible que l'ACV soit trop centrée sur l'environnement et pas assez sur le socio-économique ; il s'agit là d'une des faiblesses relevées par d'autres études et qui constitue un point de départ pour des études à venir [35].

Dans cette étude, seuls les indicateurs du risque d'approvisionnement pour l'Europe sont traités. Les aspects socio-économiques et stratégiques sont pris en compte : le choix d'un indicateur se fait par rapport à ce que l'on veut : optimiser les ressources de matières critiques, mieux traiter les déchets… Dans cet article, se pose également la question de savoir dans quoi peut-on intégrer la criticité, une ACV classique ou plutôt une ACV qui reprend d'autres aspects en compte ; plusieurs chercheurs prônent pour l'Analyse de Durabilité du Cycle de Vie. Le Tableau 6 montre la multi-dimensionnalité de la criticité.

Les auteurs rendent compte du fait qu'il y a 3 façons de voir le problème : on peut envisager (1) l'épuisement des ressources (ADP), (2) la sécurité d'approvisionnement de ces ressources pour le système socio-économique (le risque d'approvisionnement dû à une gouvernance défaillante (SR_{WGI})) et (3) les dommages environnementaux causés par leur extraction (vus ici suivant l'importance de l'impact global). Les différentes variantes qui peuvent être évaluées sont présentées dans le Tableau 7.

Dans le Tableau 7, les auteurs ont comparé les différentes perspectives décrites ci-dessus pour chaque matériau. On peut alors s'apercevoir que le niveau de criticité diffère suivant les approches. En effet, le dégradé allant du vert foncé au rouge en passant par le jaune nous indique le niveau de criticité de chaque ressource. Ces différentes perspectives nous amènent aux conclusions suivantes :

- Les visions et les indicateurs qui en découlent influencent les résultats et ainsi les conclusions de l'étude.
- Bien que souvent négligeables, les évolutions de ces variantes nous amènent à nous poser des questions quant à la fiabilité de nos résultats et ce qu'ils tendent à démontrer.
- Ici, suivant les perspectives, il est difficile de juger de la criticité globale d'un élément donné comme le Cobalt ou l'Indium.

Cette étude conclue que la recherche dans ce domaine tout comme dans celui de la criticité et de tous les éléments qui en font ou pourraient en faire partie, a encore de grandes avancées à faire afin d'arriver à des consensus et des résultats fiables.

		Critical factors	Coverage in LCA indicators	Coverage in criticality methodologies
RESOURCE CRITICALITY	*Environmental dimension*	Concentration of extraction and environmental pressures		in Environmental Implications
		Recyclability	Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential (ELCA) *(partially captured)*	in Supply Risk
		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
		Import-dependency		in Vulnerability to Supply Restrictions
		Lifecycle wide material losses		in Supply Risk
		Concentration of production	set of indicators in SLCA	Herfindahl-Hirschman Index (HHI) in Supply Risk
		Substitutability		in Supply Risk
	Socio-political dimension	Human rights violations / Child labour	set of indicators in SLCA	
		Precarious and dangerous working conditions	set of indicators in SLCA	
		Illicit trade	-	-
		Imbalances of power	-	-
		Governance and institutional setting	set of indicators in SLCA	in Supply Risk: Policy Potential Index / Human Development Index / Worldwide Governance Indicator
		(Potential) resource conflicts and competition between different resource uses	in SLCA	

Tableau 6. La criticité, un concept multidimensionnel (Source : Mancini et al. 2016)

	Perspectives							
	resource depletion		*socio-economic and geo-political concerns*				*socio-economic + depletion*	*Environmental concern*
Resource	**ADPrb**	**ADPult.**	**SR_{WGI}**	**SR_{WGI}^3**	**SR_{WGI}^6**	**SR_{WGI}/P**	**SR_{WGI}/R**	**Env. Rank**
Aluminium	2.53E-05	1.09E-09	0.43	7.95E-02	6.32E-03	1.04E-08	1.54E-11	5.4
Antimony	1.00E+00	1.00E+00	2.54	1.64E+01	2.69E+02	1.69E-05	1.41E-06	5.9
Barytes	n.a.	n.a.	1.74	5.27E+00	2.78E+01	2.18E-07	n.a.	n.a.
Bauxite	n.a.	n.a.	0.57	1.85E-01	3.43E-02	2.77E-09	2.04E-11	n.a.
Bentonite	n.a.	n.a.	0.37	5.07E-02	2.57E-03	2.64E-08	n.a.	n.a.
Beryllium	1.26E-05	1.26E-05	1.45	3.05E+00	9.29E+00	7.51E-03	n.a.	n.a.
Boron/borate	4.27E-03	4.27E-03	0.95	8.57E-01	7.35E-01	2.07E-07	n.a.	3.3
Chromium	1.96E-05	4.43E-04	1.01	1.03E+00	1.06E+00	9.10E-08	2.20E-09	5.9
Clays	n.a.	n.a.	0.27	1.97E-02	3.87E-04	9.35E-09	n.a.	2.6
Cobalt	2.56E-02	1.57E-05	1.63	4.33E+00	1.88E+01	1.50E-05	2.17E-07	5.6
Cooking coal	n.a.	n.a.	1.18	1.64E+00	2.70E+00	1.64E-10	n.a.	2.6
Copper	2.50E-03	1.37E-03	0.22	1.06E-02	1.13E-04	1.38E-08	3.24E-10	5.4
Diatomite	n.a.	n.a.	0.24	1.38E-02	1.91E-04	1.40E-07	n.a.	n.a.
Feldspar	n.a.	n.a.	0.35	4.29E-02	1.84E-03	1.70E-08	n.a.	n.a.
Fluorspar	n.a.	n.a.	1.72	5.09E+00	2.59E+01	2.92E-07	n.a.	3.8
Gallium	6.30E-03	1.46E-07	1.82	6.03E+00	3.63E+01	4.50E-03	n.a.	6.5
Germanium	1.95E+04	6.52E-07	1.94	7.30E+00	5.33E+01	1.63E-02	n.a.	n.a.
Gold	3.60E+01	5.20E+01	0.15	3.38E-03	1.14E-05	5.69E-05	2.88E-06	9.6
Gypsum	n.a.	n.a.	0.47	1.04E-01	1.08E-02	3.35E-09	n.a.	n.a.
Hafnium	n.a.	n.a.	0.43	7.95E-02	6.32E-03	6.72E-03	n.a.	n.a.
Indium	5.55E+02	6.89E-03	1.8	5.83E+00	3.40E+01	2.96E-03	n.a.	7.3

Tableau 7. Les différentes approches de la criticité et l'évaluation qui en découle

3.4. Implémentation des méthodes de caractérisation traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels ACV

Le dernier élément évalué dans ce projet de recherche collaboratif a été d'identifier comment les ressources étaient implémentées dans les logiciels ACV GaBi et Simapro et les implications que cela pouvait avoir lors de la réalisation des ACV.

La première étape de ce travail a consisté à comparer plusieurs procédés de la base de données Ecoinvent afin d'identifier si les inventaires de cycle de vie (ICV) de chaque procédé étaient identiques dans chaque logiciel. Bien qu'identique en termes de données massiques, la dénomination des éléments et ressources constituants ces ICV varient d'un logiciel à l'autre. Ainsi, certaines dénominations différentes coexistent pour une même ressource au sein d'un même inventaire (cas de l'antimoine et de la stibnite par exemple, dénomination différente mais même formule chimique Sb_2S_3). Les deux logiciels se différencient donc essentiellement de par les flux de ressources et d'éléments considérés. Un exemple de comparaison d'inventaire de flux entre GaBi et Simapro est donné en Annexe 4.

Cette différenciation se répercute également sur la manière dont sont pris en compte les facteurs de caractérisation. Un exemple est donné en Annexe 5 pour la version ultimate reserve de CML-IA. Les facteurs de caractérisation dans Simapro sont fournis uniquement pour les éléments simples (i.e. ceux du tableau de classification périodique des éléments). A contrario, les facteurs de caractérisation dans le logiciel GaBi sont fournis pour les éléments simples (identiques généralement à ceux de Simapro) et pour les ressources composées de plusieurs éléments simples.

Exemple du phosphore et ressources associant du phosphore avec la méthode CML, ultimate reserves :

Modélisation des facteurs de caractérisation (FC) dans GaBi :

	FC	Formule utilisée pour le calcul du FC	Valeur en Sb équivalent
Phosphorus [Non renewable elements]	5.52E-06	-	-
Apatite [Non renewable resources]	1.02E-06	$Ca_5(PO_4)_3$	1.06E-06
Phosphorus minerals [Non renewable resources]	5.52E-06	100%	5.52E-06
Phosphorus ore (29% P_2O_5) [Non renewable resources]	6.98E-07	FC proportionnel au minerai pur	6.98E-07
Phosphate (P_2O_5) [Non renewable resources]	2.41E-06		2.41E-06
Phosphate (PO_3) [Non renewable resources]	2.16E-06		2.16E-06
Phosphate ore [Non renewable resources]	2.16E-06	PO_3	2.16E-06

Modélisation des facteurs de caractérisation (FC) dans Simapro :

	FC	Valeur en Sb équivalent
Phosphorus	5.52E-06	-
Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore	5.52E-06	Même facteur de caractérisation quel que soit le % de phosphore contenu dans le minerai

Ces principes de modélisation sont synthétisés dans le Tableau 8.

	GABI	**SIMAPRO**
Modélisation ICV	Eléments simples + Ressources minérales	Eléments simples
FC	Eléments simples + ressources minérales FC = Σ FC éléments au prorata de la composition de la ressource Ex : Bauxite : Al_2O_3 à 65.38% d'Al = [FC(Al) * 2 * M(Al) * 0.6538] / M(Al_2O_3)	Eléments simples FC = Elément simples Ex : FC(Al) mais pas de FC pour les minéraux comportant de l'Al
LCIA	Eléments simples + ressources minérales	Eléments simples
Commentaires	Possibilité de calculer un FC pour chaque ressource inventoriée. Facilité d'interprétation de l'impact AD.	Difficulté d'interprétation car difficile de connaître sur quel type de ressource agir.

Tableau 8. Principes de modélisation des facteurs de caractérisation des méthodes traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels GaBi et Simapro

3.5. Mise en œuvre sur des cas applicatifs

3.5.1. 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 [36, 37]. 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 10 colonne de gauche).

En 2012, la Commission Européenne lançait un appel à candidature pour tester la méthode « Product Environmental Footprint »[4]. Pour les besoins de cette étude, la méthode d'analyse de l'épuisement des ressources préconisée était celle mentionnée dans le guide ILCD[5] , 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 10. La version ultimate reserves (UR) de CML-IA ARD fût aussi testée dans le cadre de cette analyse (cf. Figure 10, deuxième colonne en partant de la droite), avec l'or apparaissant comme contributeur majoritaire.

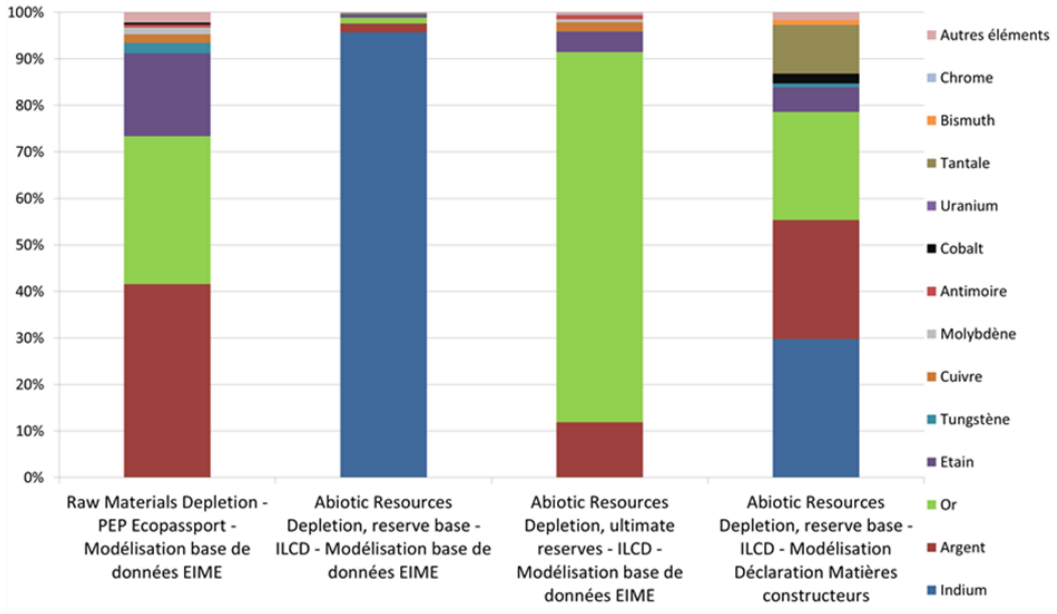


Figure 10. Principaux métaux contribuant à l'impact d'épuisement des ressources naturelles pour un téléphone mobile

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 [39] voir jusqu'à 125 000 tonnes en incluant l'ensemble du minerai de zinc et de cuivre qui pourrait servir de source [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 [41]. Ainsi, même si la production

[4] http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/dev_methods.htm
[5] 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)

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.

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 [42]. Les résultats avec cette modélisation (en utilisant CML-IA ARD dans sa version RB) sont visibles dans la Figure 10 (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).

3.5.2. 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 11 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.

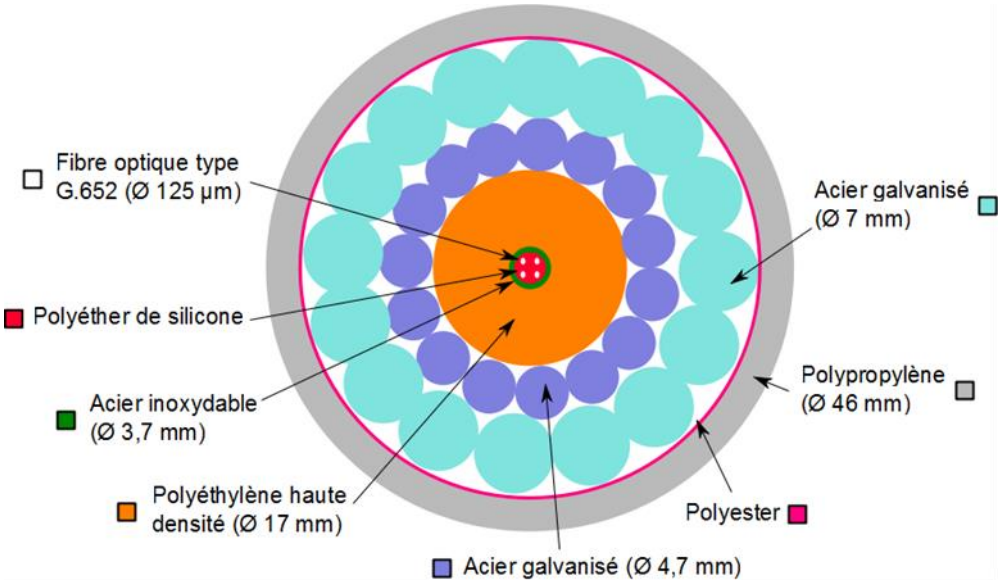


Figure 11. Exemple de section de câble de télécommunication optique sous-marin (source : Orange)

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 12 présente les principaux matériaux contributeurs à cet indicateur.

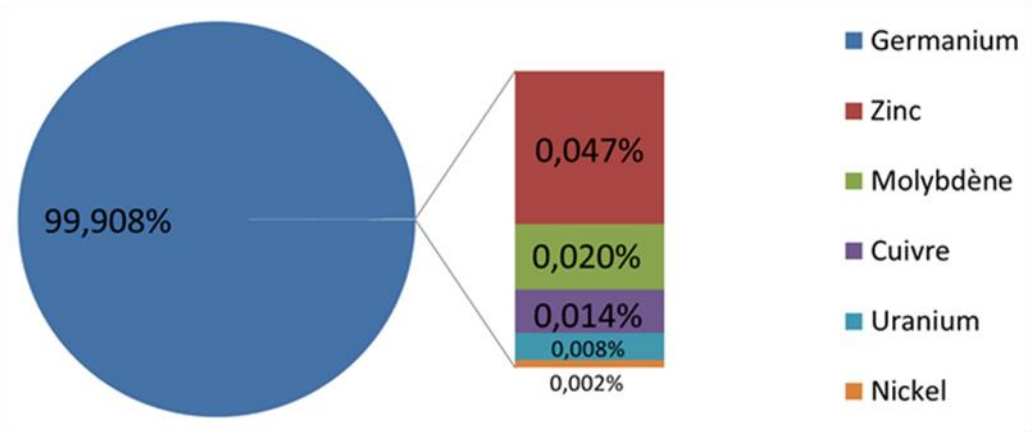


Figure 12. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble

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 de 2018 [43], le germanium est bien noté comme un métal sensible. Cependant, ceci est surtout lié à sa non-substituabilité avec des indices « Economic Importance » et « 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 la méthode CML (page 11) il est possible de recalculer le facteur de caractérisation noté dans le paragraphe avec l'Équation 1.

Équation 1

$$ARDge = \frac{\frac{DRge}{(Rge)^2}}{\frac{DRsb}{(Rsb)^2}} = \frac{\frac{58\,000}{(500\,000)^2}}{\frac{122\,000\,000}{(3\,200\,000\,000)^2}} = 19\,472{,}78 \text{ kg equivalent Sb}$$

La valeur utilisée pour la production annuelle (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 [44].

Afin de vérifier l'évolution du facteur de caractérisation, les valeurs 2008 de l'USGS pour les réserves de base de l'antimoine (Rsb'), sa production annuelle (DRsb') et la production annuelle de germanium (DRge') ont été combinées avec les valeurs de réserves de base de germanium (Rge') pour la Chine en 2008 d'après [45]. L'Équation 2 donne le résultat de ce calcul.

Équation 2

$$ARDge' = \frac{\frac{DRge'}{(Rge')^2}}{\frac{DRsb'}{(Rsb')^2}} = \frac{\frac{105\,000}{(3\,055\,000)^2}}{\frac{165\,000\,000}{(4\,300\,000\,000)^2}} = 1\,260{,}72 \text{ kg equivalent Sb}$$

En considérant le périmètre monde pour les réserves de base de germanium (Rge''), toujours d'après [45], le facteur de caractérisation se calcule selon l'Équation 3.

Équation 3

$$ARDge'' = \frac{\frac{DRge'}{(Rge'')^2}}{\frac{DRsb'}{(Rsb')^2}} = \frac{\frac{105\,000}{(38\,000\,000)^2}}{\frac{165\,000\,000}{(4\,300\,000\,000)^2}} = 8{,}15 \text{ kg equivalent Sb}$$

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 13.

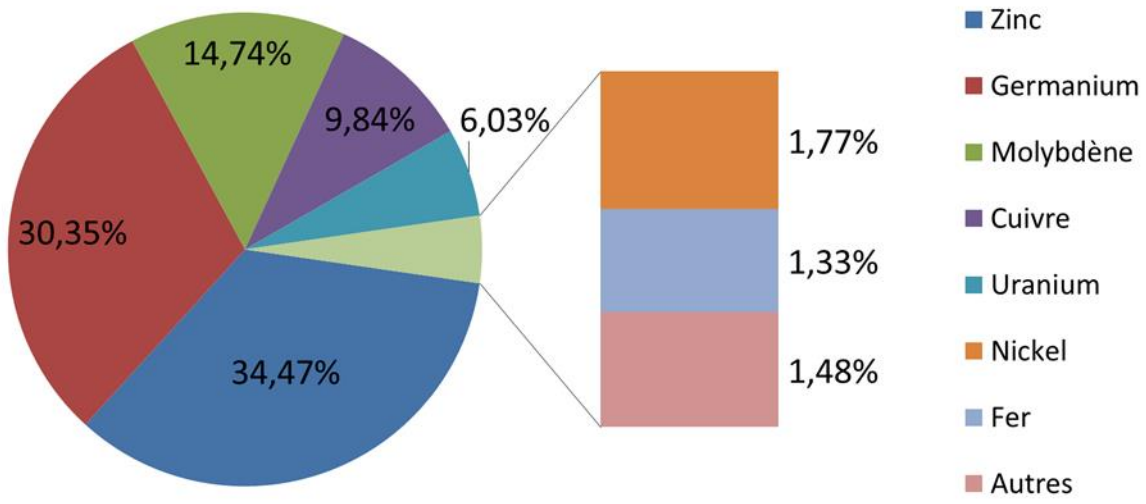


Figure 13. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble après révision de la valeur du facteur de caractérisation du germanium à 8,15

Les illustrations sur le cas de l'indium contenu dans les téléphones portables, comme celui du germanium dans les câbles sous-marins optiques, ont démontré qu'il est important de sélectionner une méthode qui considère le maximum de matériaux contenus 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 10).

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.

3.5.3. 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 [46]. 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 issus d'une source diffuse telle que la boue d'épuration urbaine pouvait constituer une alternative appropriée à la production d'engrais minéraux issus 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 14 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.

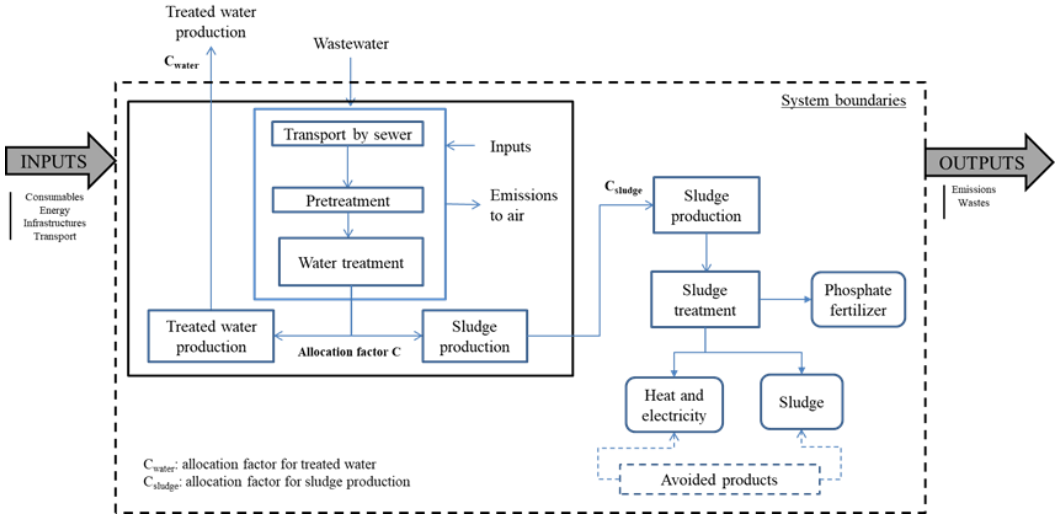


Figure 14. Frontières du système pour l'ACV des produits fertilisants phosphatés boue-sourcés

La boue appauvrie en phosphore subit deux types de valorisation distinctes. 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).

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 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 15).

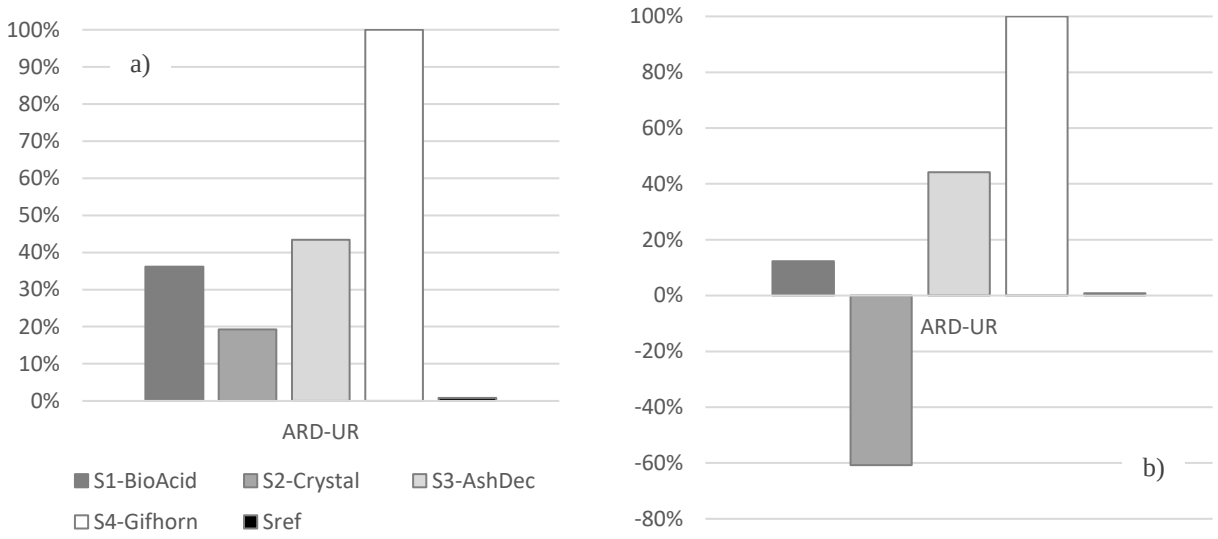


Figure 15. Impacts générés (a) et balance (b) obtenus pour l'impact Abiotic Ressources Depletion (ultimate reserves) pour chaque scenario étudié

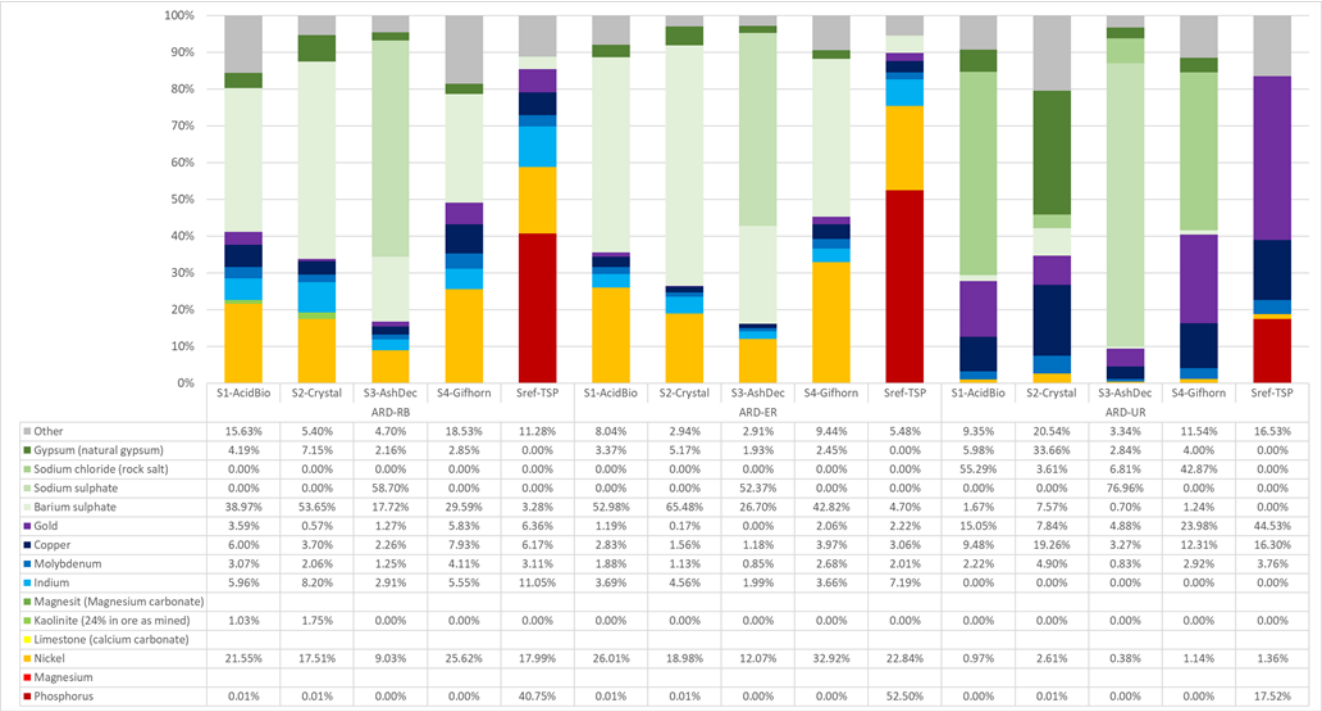
La prise en compte des impacts évités permet une forte réduction des impacts des scénarios S1-AcidBio et S2-Crystal, ce dernier présentant même une balance négative (plus d'impacts évités que d'impacts générés) contrairement aux deux autres scénarios. La boue étant épandue dans les scénarios S1-AcidBio 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 16 et Figure 17.

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 16) 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.

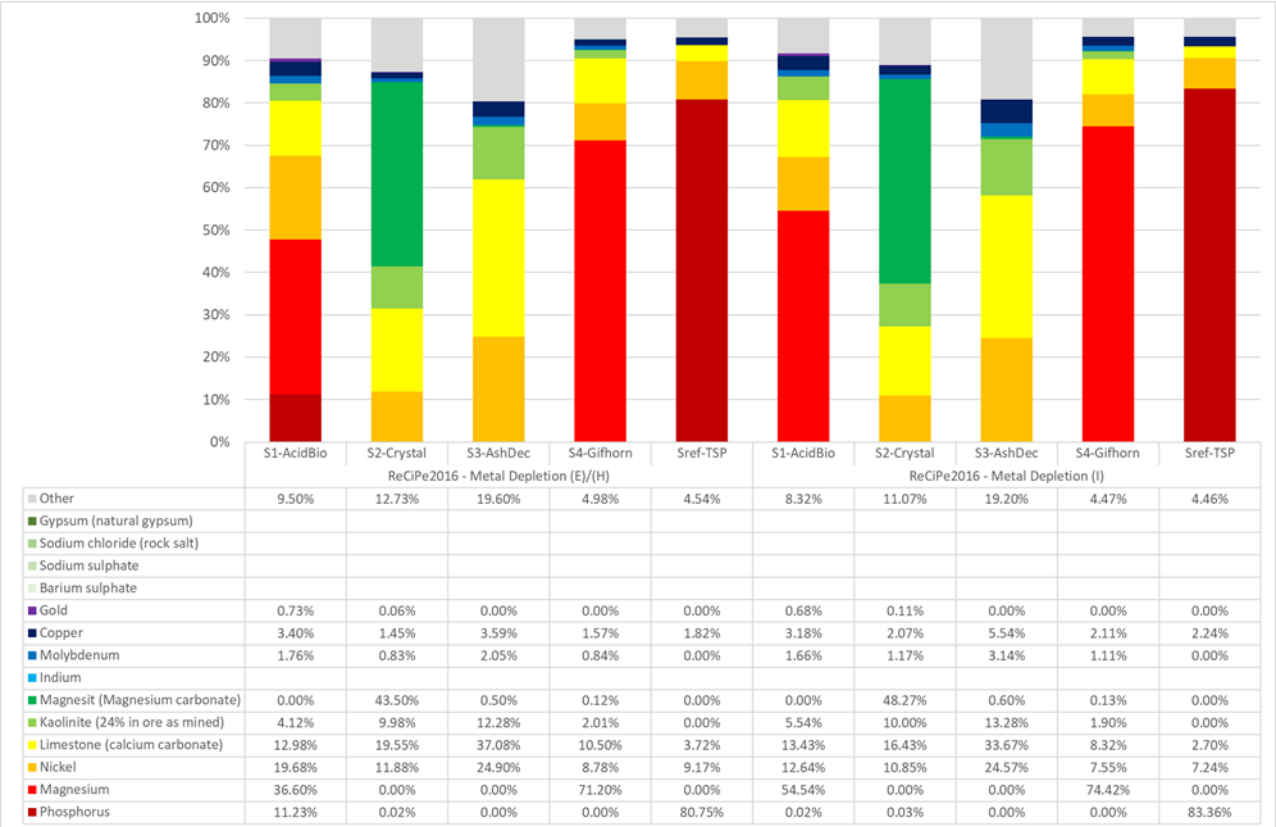
L'utilisation de la version UR modifie cette hiérarchie, l'indium et le nickel disparaissant au profil de l'or, du gypse et du sodium chloride.



	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 16. 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 17). 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 17. 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 implémentées 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.

	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%

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

3.5.4. 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'une électrolyte (liquide ou solide) composée 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 (LiPF6) ;

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 . 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 18 et Figure 19 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.

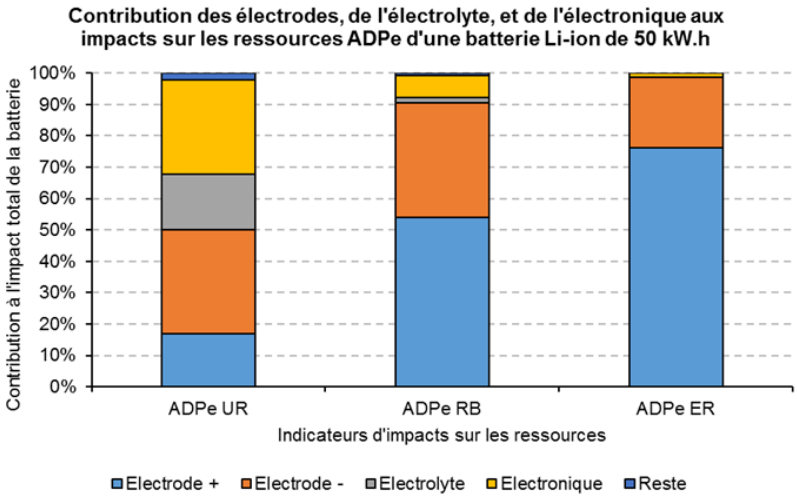


Figure 18. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon les trois versions de calcul de la méthode CML-IA Abiotic Depletion Potential (reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR))

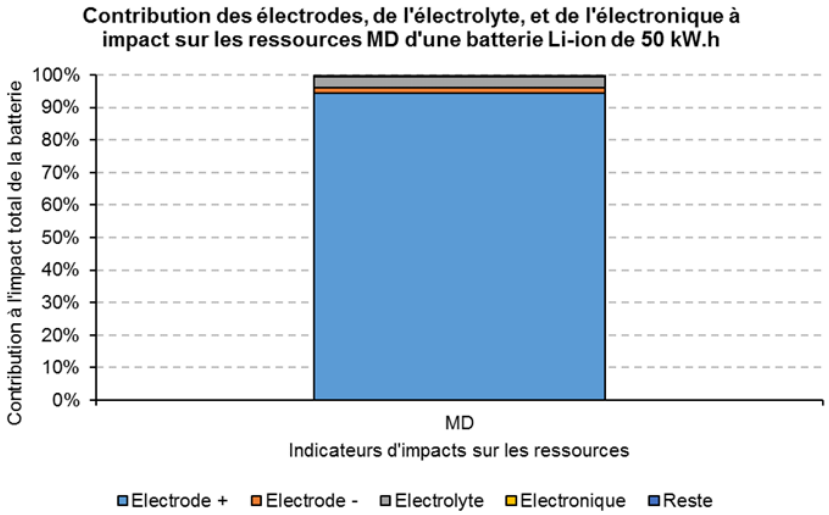


Figure 19. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon la méthode de calcul de l'indicateur MD

Le Tableau 10 contient les principaux flux élémentaires contributeurs à l'impact de la cathode, selon les quatre indicateurs utilisés pour le calcul.

Méthode	Flux élémentaire	Contribution à l'impact de la cathode
ADP-UR	Copper [Non renewable elements]	32%
	Sulphur [Non renewable elements]	18%
	Sodium chloride (rock salt) [Non renewable resources]	12%
	Chromium [Non renewable elements]	11%
	Gold [Non renewable elements]	8%
	Nickel [Non renewable elements]	5%
	Reste	*13%*
ADP-RB	Nickel [Non renewable elements]	31%
	Lithium [Non renewable elements]	31%
	Indium [Non renewable elements]	13%
	Copper [Non renewable elements]	6%
	Cobalt [Non renewable elements]	5%
	Reste	*14%*
ADP-ER	Nickel [Non renewable elements]	42%
	Lithium [Non renewable elements]	33%
	Indium [Non renewable elements]	9%
	Sulphur [Non renewable elements]	3%
	Reste	*13%*
MD	Magnesium [Non renewable elements]	56%
	Lithium chloride solution [Non renewable resources]	34%
	Reste	*10%*

Tableau 10. Liste des principaux flux élémentaires contributeurs par méthode de 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.

Conclusions / Perspectives

Le travail conduit dans ce projet de recherche collaboratif a permis de mettre en évidence les difficultés associées à l'évaluation de l'épuisement des ressources minérales en Analyse du Cycle de Vie. Cette difficulté provient essentiellement de 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**, qui peut être intrinsèque (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) ou fonctionnelle (définie par les fonctions qu'apportent les ressources à l'homme, cette valeur fonctionnelle n'est détruite que lorsque la ressource est dissipée sous forme d'émission diffuse dans l'environnement).
- La **disponibilité de la ressource**, qui peut être quantitative (quantités de réserves de gisements disponibles, qu'ils soient d'origine géologiques (gisements de minerais) ou anthropiques (mines urbaines)) et qualitative (qualité structurelle des stocks de ressources, i.e. la concentration en éléments de ces gisements, déterminée par le contenu exergétique de la ressource ou la concentration en minéraux des gisements).

La question de l'évaluation des ressources en ACV a fait l'objet d'un travail par l'UNEP/SETAC au cours des deux dernières années ayant conduit à des recommandations sur le choix des méthodes en fonction de deux grands groupes de questions à se poser. 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 »).

Le travail sur la criticité des ressources et les liens possibles entre ACV et criticité 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. Parmi les développements méthodologiques récents, on peut noter le constitution d'un indicateur, le Global Resources Indicator (GRI), permettant de proposer des facteurs de caractérisation utilisables en ACV prenant en compte à la fois une dimension environnementale et une dimension socio-économique [47].

Les cas applicatifs ont également permis d'illustrer la difficulté d'évaluer l'épuisement des ressources en ACV au regard du choix des types de réserves prises en compte pour l'évaluation de l'épuisement géologiques des ressources (cas de l'indium et du germanium) et des méthodes de caractérisation choisies (cas du phosphore et des batteries pour véhicules électriques).

Ainsi, afin de limiter les possibles difficultés que peuvent rencontrer les praticiens ACV lors de la prise en compte du critère « ressources » dans leurs ACV, l'ensemble des travaux menés dans le cadre de ce programme de recherche collaboratif sera valorisé sous la forme d'un guide de bonnes pratiques afin d'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.

Références bibliographiques

1. Academies, N.R.C.o.t.N., *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, 2008, The National Economy Press,: Washington, D.C., USA.
2. Barreau, B., G. Hossie, and S. Lutfalla, *Approvisionnements en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ?* , 2013 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*. p. 10.
4. Saveyn, H. and P. Eder, *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals*, in *JRC Scientific and Policy Reports*2014, European Commission. p. 312.
5. van Oers, L., et al., *Abiotic depletion in LCIA: Possible improvements for the assessment of abiotic depletion in LCA*, 2002, Road and Hydraulic Engineering Institute: Amsterdam, The Netherlands.
6. Van Oers, L. and J.B. Guinee, *The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future.* Resources, 2016. **5**(1): p. 16.
7. Goedkoop, M., et al., *ReCiPe 2008: a Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level*, 2013, Report I: Characterisation, first ed. (version 1.08).
8. Schneider, L., M. Berger, and M. Finkbeiner, *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, 2011. **16**(9): p. 929-936.
9. Klinglmair, M., S. Sala, and M. Brandao, *Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues.* International Journal of Life Cycle Assessment, 2014. **19**(3): p. 580-592.
10. Consulting, E., *L'exergie - Concept, enjeux et usages pour l'industrie*, 2013. p. 16.
11. Finnveden, G. and P. Ostlund, *Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications.* Energy, 1997. **22**(9): p. 923-931.
12. Frenzel, M., et al., *Raw material 'criticality'-sense or nonsense?* Journal of Physics D-Applied Physics, 2017. **50**(12).
13. Mancini, L., L. Benini, and S. Sala, *Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe.* International Journal of Life Cycle Assessment, 2016. **23**(3): p. 726-738.
14. 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.
15. 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.
16. Sonnemann, G., et al., *From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment.* Journal of Cleaner Production, 2015. **94**: p. 20-34.
17. Commission, E., *Critical Raw Materials for the EU*, 2010, Report of the Ad-Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials: EU, Brussels, Belgium.
18. Achzet, B. and C. Helbig, *How to evaluate raw material supply risksdan overview.* Resource Policy, 2013. **38**: p. 436-447.
19. Buijs, B., H. Sievers, and L.A. Tercero Espinoza. *Limits to the critical raw materials approach*. 2012.: Proceedings of the ICE e Waste and Resource Management.
20. Knoeri, C., et al., *Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand - With material flow supply modelling approaches.* Science of the Total Environment, 2013. **461**: p. 808-812.
21. Malinauskienė, M., et al., *Integrating resource criticality assessment into evaluation of cleaner production possibilities for increasing resource efficiency.* Clean Technologies and Environmental Policy, 2016. **18**(5): p. 1333-1344.
22. Blengini, G.A., et al., *EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements.* Resources Policy, 2017. **53**: p. 12-19.
23. de Boer, M.A. and K. Lammertsma, *Scarcity of Rare Earth Elements.* Chemsuschem, 2013. **6**(11): p. 2045-2055.
24. Harper, E.M., et al., *Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family.* Journal of Industrial Ecology, 2015. **19**(4): p. 628-644.
25. Goe, M. and G. Gaustad, *Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach.* Applied Energy, 2014. **123**: p. 387-396.

26. Miehe, R., et al., *Criticality of Material Resources in Industrial Enterprises – Structural Basics of an Operational Model.* Procedia CIRP, 2016. **48**: p. 1-9.
27. Simon, B., S. Ziemann, and M. Weil, *Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator.* Metallurgical Research & Technology, 2014. **111**(3): p. 191-200.
28. Morley, N. and D. Eathrley, *Material Security. Ensuring Resource Availability to the UK Economy*, 2008, C-Tech Innovation: Chester, UK.
29. Moss, R.L., et al., *Critical Metals in Strategic Energy Technologies : Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies*, 2011, European Commission Joint Research Centre - Institute for Energy and Transport.
30. Graedel, T.E., et al., *Methodology of Metal Criticality Determination.* Environmental Science & Technology, 2012. **46**(2): p. 1063-1070.
31. Guinee, J.B., et al., *Life Cycle Assessment: past, present, and future.* Environmental Science and Technology, 2011. **45**: p. 90-96.
32. Emanuelsson, A., et al., *Recommended Assessment Framework, Method and Characterisation and Normalisation Factors for Resource Use Impacts: Phase 1. LC-IMPACT*, 2013.
33. Schneider, L., et al., *The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment.* International Journal of Life Cycle Assessment, 2014. **19**(3): p. 601-610.
34. Habib, K. and H. Wenzel, *Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling.* Journal of Cleaner Production, 2014. **84**: p. 348-359.
35. Mancini, L., et al., *Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials.* International Journal of Life Cycle Assessment, 2014. **20**(1): p. 100-116.
36. Anders SG Andrae, Mikko Samuli Vaija. 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; https://doi.org/10.3390/challe5020409
37. Anders SG Andrae, Mikko Samuli Vaija. 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
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)
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)
43. EU Critical Raw Materials list 2018 (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490)
44. Report on critical raw materials for the EU - Critical raw materials profiles (http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11911/attachments/1/translations)
45. 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)
46. 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
47. 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.
48. 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.
49. 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
50. European commission, 2017. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials – Guidelines. 30 pages.
51. 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.
52. European Commission, 2017. Study on the review of the list of Critical Raw Materials – Criticality Assessments, 93 pages.

Annexe1. Compte-rendus de réunion

CR réunion du 22 mars 2018 – Projet EcoSD 17.6

Présents :
Julien Garcia (Groupe PSA), Samuli VAIJA (Orange), Eric PHILIPOT (Orange), Marilys PRADEL (Irstea), Alexis LALEVEE (Irstea)

Ordre du jour :

1) Rappel du contenu du PRC17.6
2) Présentation du stagiaire Alexis Lalevée et de ses objectifs de stage
   a. Aspects méthodologiques de la recherche biblio
   b. Choix des ressources sur lesquelles travailler prioritairement
3) Validation et compléments éventuels de ses objectifs par PSA et Orange et discussion sur l'application aux cas industriels
4) Point sur les deadlines prévues du projet (organisation du bilan à mi-parcours et présentation des résultats au réseau EcoSD)

Relevé de décisions :
Après un rappel des objectifs du projet et du stage d'Alexis Lalevée, la méthode mise en place pour réaliser l'état de l'art et une revue critique des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles minérales et de leur criticité est présentée. Elle se base sur le croisement de différentes requêtes constituées chacune de mots-clés relatifs à l'ACV, à la criticité, à l'épuisement des ressources et aux ressources d'intérêt pour chaque partenaire. Ces requêtes sont présentées en Annexe 1 du document.
Une grille de lecture sera ensuite réalisée pour chaque article scientifique identifié comme pertinent au regard de la thématique étudiée : ACV/criticité, ACV/recyclage. Les questions de la grille de lecture sont présentées en Annexe 2 du document.
Une analyse temporelle des articles sera également réalisée.

Décision 1 : Compléter si besoin les mots-clés et les questions de la grille de lecture

Concernant l'application aux cas industriels, chaque partenaire a identifié les ressources d'intérêt qui lui sont propres :

- Orange : Indium, germanium, cobalt.
- PSA : Cobalt, lithium, néodyme, platinoïdes (palladium, platine, rhodium), phosphore
- Irstea : phosphore

Décision 2 : une nouvelle requête prenant en compte la liste de ces ressources sera utilisée pour compléter les publications à étudier dans l'état de l'art.

Concernant le bilan à mi-parcours visant à échanger sur les premiers résultats du PRC17.6 avec les membres du réseau EcoSD, le format d'une demi-journée (2h présentation + 2h d'échanges) est retenu. Il est également convenu de proposer une présentation de l'état d'avancement du projet de 10-15 min au prochain séminaire de recherche EcoSD le 21 juin 2018.

Décision 3 : Afin de caler la date de cette demi-journée d'échanges, les participants doivent renvoyer leur date de disponibilité à M. Pradel. En fonction de la date retenue, S. Vaija se propose de bloquer une salle à Orange Gardens (93 Chatillon). Une fois la date et le lieu fixés, M. Pradel contactera Nathalie Seguin pour l'organisation de cette demi-journée (invitations…).

Prochain date de réunion :
En visio, **le 24 mai 2018 de 14h à 16h**. Les codes de connexion seront envoyés une semaine avant.

MOTS CLÉS POUR LA NOTION DE CRITICITÉ DES RESSOURCES

1. Premières requêtes utilisées

Ces premières requêtes sont utilisées d'abord telles qu'indiquées ici puis combinées afin de voir la pertinence des résultats. Des modifications sont faites en fonction de cela.

1. ACV :

Requête 1: [LCA OR "Life Cycle Assessment" OR "Life Cycle Analysis" OR "Life Cycle Inventory" OR LCI OR "Abiotic resource depletion" OR "Abiotic Depletion Potential" OR ADP]

Résultats : 87.243 ; prise en compte de tous domaines : biochimie, médecine, qui ne nous intéresse pas. De plus, des termes comme « ADP » ou « LCI » semblent parasiter la recherche ; après recherche individuelle où nous ne retrouvons pas les domaines qui nous intéressent. Après exclusion de certains domaines et des termes parasites, nous trouvons 23.690 résultats. Pour affiner encore, on ne prend alors en compte que les catégories « sciences environnementales », « ingénierie environnementale », « science des technologies soutenables », « études environnementale » ; obtenant ainsi 6.446 qui semblent totalement pertinents (requête #11).

2. RECYCLAGE

Trop large ? : "Circular economy" → 1.800 résultats environ, cela semble plutôt correspondre à ce qui est attendu donc on le garde ; " Waste valorization".
Problème : valorization et valorisation existent → on utilise alors « valori*ation », on retrouve alors 337 résultats. On choisit de faire un premier tri, en éliminant ce qui se rapporte à la chimie. On trouve alors seulement 146 résultats (requête #17)

Le terme « Recovery » (→ récupération) est problématique, cela vient parasiter la recherche avec plus de 600.000 résultats. Le combiner à « waste » donne un nombre de résultats moins conséquent mais n'est tout de même pas pertinent, il sera donc éliminé de la liste des requêtes et Recirculation rate (taux de recyclage) n'a pas de résultat cohérent avec notre sujet.

Requête 2 : [Recycling OR Reuse OR "Resource efficiency" OR "Circular economy" OR #17]

Cette requête nous donne plus de 190.00 résultats, il faut donc faire un peu de tri : nous retirons tout ce qui ne se rapporte pas directement au recyclage de manière global : résultat correspondant : 11.490 (requête #41)

3. CRITICITÉ (= risque d'approvisionnement + importance économique)

Le sigle RCA n'est pas conservé pour la recherche : les résultats sont plutôt dans les thèmes de la musique, de la médecine (…) ou n'est pas le sigle signifiant Resource Criticality Assessment.
« Criticality » et « criticity » ne sont pas remplacés par « critic* », le champ lexical devient trop large et il en résulte plus d'un million de résultats…

Requête 3 : ["Resource criticality assessment" OR "Criticality resources" OR "Critical raw material assessment" OR "Resource scarcity" OR "Resource security" OR "Resource vulnerability" OR "Material availability" OR Criticity OR Criticality]

Avec cette recherche, nous obtenons 20.394 résultats avant tri. Après un tri sur les domaines intéressant, nous n'obtenons plus que 150 résultats (requête #61).

4. RESSOURCES ETUDIÉES

La requête sera affinée en fonction de la réunion du 22 mars. Une première analyse a été réalisée avec les termes suivants :
Automobile : Lithium, Lithium-ion phosphate

Téléphonie : Indium
Fertilisants : Phosphore → phosphorus, Phosphate, Phosphate fertilizers

Ici, nous éliminons les symboles chimiques (In pour l'indium, par exemple) car cela vient parasiter notre recherche, voire empêcher toute recherche, comme pour le phosphore dont le symbole est « P ».

Requête 4: [Lithium OR "Lithium-ion phosphate" OR Indium OR Phosphorus OR Phosphate OR "Phosphate fertilizer"]

Cette recherche nous amène à 738.145 résultats. Cela parait beaucoup mais il est vrai que chacun des éléments est recensé un grand nombre de fois dans la littérature. Nous pouvons cependant exclure certains domaines qui ne nous intéressent pas ici comme la chimie ou le médical. Il reste encore beaucoup de résultats (31.261 (requête #45)) mais nous allons pouvoir les croiser avec ceux d'autres requêtes pour affiner notre recherche ; éliminer trop de résultats ici sous-tendrait une non-prise en compte de certains éléments qui paraissent essentiels comme les composants des batteries (important pour notre étude).

Avec cette première recherche dans Web of Science, nous pouvons croiser les résultats afin de trouver des articles qui complètent parfaitement les conditions d'utilisation dans le cadre de notre étude.

2. Croisement des requêtes deux à deux

	R1 : #11	R2 : #41	R3 : #61	R4 : #45
R1 : #11		1.279 résultats #62	33 résultats #63	194 résultats #64
R2 : #41			59 résultats #65	677 résultats #66
R3 : #61				16 résultats #67
R4 : #45				

3. Croisement de 3 requêtes

R1/R2/R3	10 résultats #68
R1/R2/R4	59 résultats #69
R1/R3/R4	2 résultats #70
R2/R3/R4	9 résultats #71

4. Croisement de toutes les requêtes

En croisant toutes les données, c'est-à-dire ACV, Recyclage, Criticité et Ressources étudiées, nous nous rendons compte qu'il n'y a, à l'heure actuelle, aucun résultat. On peut également remarquer que R3 semble donner des résultats limités, il s'agit de la criticité.

GRILLE DE LECTURE POUR L'ÉTUDE DES DOCUMENTS

Questions à traiter pour chaque document :

- Présentation du document (titre, auteurs, date, objectif)
- De quels domaines traite ce document (criticité/ACV/recyclage ou ressources étudiées) ?
- Dans quel objectif est rédigé ce document ?
- Quels sont les points importants dans ce document (résumé) ?

ACV/CRITICITE :

- Le terme de criticité est-il clairement formulé ?
- Nombre de ressources évaluées par la méthode
- Nombre de ressources considérées comme critiques (selon l'UE)
- Le calcul de l'impact prend-il en compte des éléments de calcul de la « criticité » (définition UE) ?
- Quels sont les éléments de calcul de l'indicateur ?
- Dans quel objectif est fait cet indicateur ?
- Quel est la pertinence du document ? (Note)

ACV/RECYCLAGE :

- Comment sont traitées les ressources que nous étudions (lithium, phosphore, indium) ?
- Quel type de recyclage est préconisé ?
- Peut-on parler d'un effet « mine urbaine » ?
- Le recyclage est-il intégré dans les méthodes de caractérisation ?
- Les ressources recyclées sont-elles intégrées dans les méthodes de caractérisation ? Quelles sont-elles ?
- Quel est la pertinence du document ? (Note)

CR réunion du 24 mai 2018 – Projet EcoSD 17.6

Présents :
Julien Garcia (Groupe PSA), Samuli VAIJA (Orange), Eric PHILIPOT (Orange), Marilys PRADEL (Irstea), Alexis LALEVEE (Irstea)

Ordre du jour :
1) Point sur l'état d'avancement du stage d'Alexis
2) Point sur le stage d'Eric
3) Point sur les inscriptions à la réunion du bilan à mi-parcours du 14 juin
4) Préparation du contenu de la réunion à mi-parcours du 14 juin

Relevé de décisions :
Après un rappel de l'état d'avancement du stage d'Alexis Lalevée et de celui d'Eric Philipot, il a été convenu ce qui suit :

Décision 1 : Contacter les professionnels pour affiner les retours sur l'étude en cours
1) Contacter le BRGM pour confronter les résultats obtenus dans le cadre du projet à leur vision de la méthode européenne d'évaluation de la criticité, notamment sur les questions de recyclage et de substitution.
2) Contacter des professionnels de la fertilisation (UNIFA, entreprises…) pour identifier les orientations du secteur vis-à-vis d'une pénurie de la ressource en phosphore.

Décision 2 : Organisation de la réunion du 14 juin et préparation du ppt pour envoi pour relecture le 8 juin dernier délai.

La présentation reprendra les éléments suivants :
1) Rappel des objectifs du projet
2) Présentation du livrable attendu : livre blanc présentant la position du réseau EcoSD sur la question de l'épuisement et de la criticité des ressources en lien avec la méthode ACV
3) Planning de rédaction du livre blanc avec échéancier
4) Présentation des objectifs de cette première réunion : avoir un retour de la part des membres du réseau sur le travail réalisé (méthodologie, résultats obtenus, interprétation des méthodes) et sur leur positionnement vis-à-vis de la thématique épuisement/criticité des ressources en lien avec la méthode ACV pour dresser un premier panorama de ce que pourrait contenir le livre blanc.
5) Présentation de l'état d'avancement du projet :
    a. Les indicateurs ACV d'épuisement des ressources : méthode mise en place, résultats et illustration avec un cas concret (câble sous-marin – Orange)
    b. Lien entre criticité des ressources et ACV : méthode mise en place, résultats et illustration avec un cas concret (liste des matériaux critiques des cartes réseaux et box – Orange)
6) Discussion sur l'état d'avancement et positionnement des participants à la réunion sur le contenu du livra blanc qui sera proposé aux membres du réseau EcoSD.

Décision 3 : les documents Word produits par Alexis seront envoyés dès finalisation de ces derniers.

Prochain date de réunion :
le 14 juin 2018 de 14h à 18h pour la réunion de mi-parcours

CR Réunion mi-parcours PRC ACV ressources et criticité - 14.06.2018

- **Tour de table**

Jade Garcia (ScoreLCA), Pierre Collet (IFPEN), Eric Philipot (Orange), Samuli Vaija (Orange), Julio Rivera Garcia (Arcelor Mittal), Julien Garcia (PSA), Alexis Lalevée (Irstea), Marilys Pradel (Irstea), Stéphane Le Pochat (Evéa), Lynda Aissani (Irstea)

- **Objectif**

Objectif :

- Etat de l'art et revue critique des méthodes d'évaluation d'épuisement des ressources naturelles minérales et leur criticité ⇒ Livre blanc affirmant position EcoSD pour aider les praticiens à mieux appréhender la criticité dans leur analyse

Moyens :

- 2 stages de 6 mois (1 à Irstea et 1 à Orange)

Echéancier :

- Juin 2018 : bilan mi-parcours
- Sept 2018 : rédaction du 1er jet
- Dec 2018 : mise à disposition pour relecture par les membres du réseau
- Jan 2019 : validation du contenu
- Fev-mars 2019 : finalisation livre blanc

Pourquoi ce mi-parcours ?

- Avis sur la méthodo
- Avis sur les résultats
- Avis sur les perspectives à ce livre blanc

Remarques/questions :

- Comment on s'organise car difficile d'écrire à plusieurs ? Surtout se mettre d'accord sur un plan, relecture, illustrations sous forme d'études de cas
- Livre blanc trop ambitieux car sous-entend un consensus donc plutôt guide de recommandations à destination des membres du réseau EcoSD et montrer les divergences

- **Etat d'avancement du projet**

  - **Méthodologie employée**

Basée sur la recherche bibliographique avec 4 différentes requêtes juste dans titres
Puis croisement des requêtes 3 par 3 car trop d'articles ⇒ 38 articles retenus

Analyse des articles via une grille de lecture (dispo dans rapport de stage Alexis)

  - **Etat des lieux des indicateurs en ACV**

Principaux types de modélisation des ressources en ACV :

- Basée sur une quantification physique des ressources (taux d'épuisement, ratio entre extraction et réserves disponibles). Réserves (ultimes, bases de réserve (potentiel exploitable économiquement raisonnable), économique (exploité ou exploitable))
  Méthodes : CML, AADP, EDIP (réserve uniquement)
- Basée sur une approche économique (effort économique fait pour extraire une ressource dans le futur, le surcoût engendre pour l'exploitation des ressources)
  Méthodes : ReCiPe, EPS2000 (concept Consentement A Payer = coût de la technologie de substitution)
- Basée sur une approche énergétique (effort énergétique fait pour extraire une ressource dans le futur, surcoût énergétique engendré pour l'exploitation des ressources)

Méthodes : Ecoindicator99, Impact2002+, CexD

Développements méthodologiques en cours :

- AADP : Anthropogenic stock extended abiotic depletion potential ⇒ amélioration de la méthode CML
- LC Impact ⇒ amélioration de la méthode ReCiPe
- Global Resources Indicator : criticité CML et risque géopolitique
- ImpactWorld+ : basée sur la fonction ⇒ amélioration des méthodes Impact 2002+, LUCAS, EDIP
- Economic resource scarcity potential (ESP) basée sur différents critères

Points de vigilance :

- Choix des types de réserves et source des données
- Variabilité dans le nombre de ressources prises en compte dans les différentes méthodes
- Intégration de la fonctionnalité plutôt que la ressource telle quelle
- Temporalité

Cas d'application sur la téléphonie mobile :

- Etiquetage environnemental avec indicateur épuisement des ressources naturelles
- Inventaire des métaux dans un gyroscope non cohérent entre BDD EIME et données Orange (trop de métal et pas assez d'epoxy)
- Méthode CML ADP reserve base avec des résultats Indium, argent et or
- Avec résultats issus de CML réserve ultime c'est l'or qui écraserait tout

Cas d'application sur l'opération maintenance d'un câble sous-marin par Orange marine :

- 7 matériaux principaux
- Résultats ACV méthode CML reserve base : Germanium 99,8% de l'impact alors que 0,00045% de la masse ⇒ pb du facteur de caractérisation (75% provient du zinc et 25% du charbon) car en 1990 seulement 10% des mines produisaient du germanium alors que maintenant sans doute plus au regard de la demande

Remarques/questions :

- Mise à jour des facteurs de caractérisation dans CML ? On ne voit pas de variations significatives entre les valeurs actuelles et anciennes
- CML dans logiciel basé sur les réserves ultimes (sauf EIME avec reserve-based)
- Incertitudes ?

- **Etat des lieux de indicateurs de criticité**

Définition :

- Criticité ressources = croisement vulnérabilité économique et risque d'approvisionnement

Deux méthodes d'évaluation de la criticité :

- Selon l'UE (2017), méthode basée sur le risque d'approvisionnement et l'importance économique/vulnérabilité
- Selon Graedel (2012), méthode basée sur le risque d'approvisionnement, les implications environnementales, et la « vulnerability to supply restriction »

Eléments de consensus :

- Risques d'approvisionnement (géologiques, géopolitiques)
- Vulnérabilité (importance économique, substituabilité)

Eléments divergents :

- Prise en compte du niveau techno ou demande techno future
- Aspects environnementaux

- Niveau de détail différent pour la matrice de criticité
- Approche statique vs dynamique

Limites :

- Approche empirique
- Difficulté d'évaluation de la substitution
- Statique
- Pondération et subjectivité
- Aspects environnementaux difficiles à prendre en compte

Cas d'étude carte de réseau coeur Orange :

- + de 50 composants différents
- Déclaration matières obtenues auprès du constructeur pour chacun d'entre eux
- Identification de 9 listes de matériaux critiques
- Utilisation de la liste UE
- Allocation des matériaux identifiés dans la carte de réseau coeur en fonction de ces listes : 14 matériaux critiques pour Orange
- Quelles actions à mettre en oeuvre ? Recyclage, substitution mais dépendant de la supply chain

Développements méthodologiques en cours :

- Mieux prendre en compte le recyclage
- Mieux prendre en compte la substitution
- Manque des données sur le recyclage
- Coupler criticité et épuisement

Remarques/question :

- Besoin d'un critère de robustesse (incertitudes) dans l'évaluation globale de la criticité (seulement quelques parties ont une évaluation de l'incertitude)
- Problème de vase communiquant sur la criticité quand il y a substitution : l'utilisation d'une ressource X pour substituer une ressource critique Y peut augmenter le niveau de criticité de ladite ressource X.
- Recyclage promu par l'UE pour diversifier les sources d'approvisionnement (exemple de la Chine et de l'arrêt des exports des terres rares)

- **Lien entre ACV et criticité**

Conclusions état de l'art :

- Peu d'articles qui combinent les 2
- Echelle nationale et secteur d'activité
- Compilation des aspects socio-économiques et environnementaux = bon indicateur ACV
- Problème efficience des filières de recyclage et problème de collecte

- **Discussion**

Questionnements qui ont émergé :

- Doit-on intégrer la criticité des ressources en ACV car il s'agit d'un impact socio-économique ? Question de la pérennité de l'Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie a également été posée.
- Quel lien entre les matériaux critiques et les impacts environnementaux (toxicité,...) liés à leur extraction (à l'instar des terres rares en Chine) ? Est-ce que cela peut être quantifiable dans les ACV portant sur l'extraction des ressources minérales ?
- Normalisation nécessaire ? Possible de le faire sur les limites planétaires
- Besoin de faire des analyses de sensibilité sur les méthodes et de les mettre en convergence

Points qui ont émergé et qui seront développés dans la suite de l'étude :

- Regarder incertitudes qualitatives ou quantitatives associés aux facteurs de caractérisation des méthodes évaluant l'épuisement des ressources.
- Voir s'il y a une évolution des facteurs de caractérisation CML entre les mises à jour successives dans les bases de données ⇒ recalcul des facteurs de caractérisation aves les données réserves ultimes, base de réserve et réserve économiques USGS de 1990 à 2018. Si absence de données, identification des raisons possibles (non mise à jour des réserves…).
- Choix de la méthode de caractérisation en fonction de l'objectif de l'étude est crucial mais sur quelle base élaborer ce choix ? Sur le type de flux ? Quelle méthode couvre quel flux ? ⇒ Besoin d'avoir une cartographique des ressources couvertes par les différentes méthodes (quelque chose de très visuel)

Compte rendu de la réunion du 17 janvier 2019

Liste des présents : Samuli Vaija (Orange), Guillaume Busato (RTE), Jade Garcia (ScoreLCA), Pierre Collet (IFPEN), Stéphanie Desrousseaux (CEA), Julien Garcia (Groupe PSA), Stéphanie Muller (BRGM), Lynda Aissani (Irstea – Rennes), Marilys Pradel (Irstea – Clermont-Ferrand).

Ordre du jour :

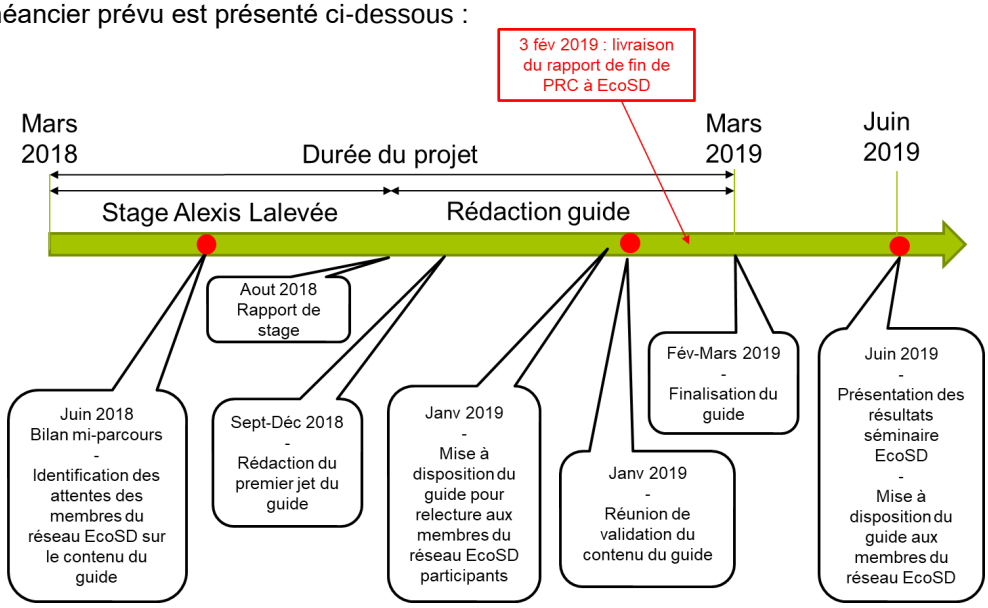
1. Rappel des objectifs du projet, du livrable attendu et de l'échéancier
2. Attentes de la réunion du 17 janvier 2019
3. Présentation du guide de recommandations
4. Discussions sur les recommandations générales proposées et une liste de recommandations par secteur d'activités

Rappel des objectifs du projet, du livrable attendu et de l'échéancier :

L'objectif du projet est d'effectuer un état de l'art et une revue critique des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles minérales et de leur criticité. Le projet est porté par Marilys Pradel (partenaire institutionnel), Julien Garcia et Samuli Vaija (partenaires industriels)

Le livrable attendu est un guide de recommandations affirmant la position du réseau EcoSD sur le sujet afin (i) d'aider les praticiens ACV à mieux appréhender la question des ressources minérales et de la criticité dans leurs analyses, (ii) d'avoir un guide clair et pédagogue.

Un rappel de l'échéancier prévu est présenté ci-dessous :



Attentes de la réunion du 17 janvier 2019 :

Les attentes de la réunion du jour sont les suivantes :

- Avoir un retour sur le contenu du guide
  - Avis sur la structuration du guide
  - Avis sur sa clarté
  - Avis sur sa complétude : est-ce que le guide vous semble complet, y a-t-il des manques? Si oui, lesquels. Y a-t-il des points qui mériteraient d'être approfondis?
- Avoir le point de vue des participants sur les cas applicatifs proposés :
  - Suffisamment explicites?
  - Suffisamment complets pour présenter la problématique de l'évaluation des ressources en ACV
  - Suffisamment pertinents pour le guide ?
- Travailler en commun sur la liste des recommandations proposées :
  - De manière générale et par secteur d'activité

Présentation du guide de recommandations et discussions sur son contenu :

Le guide est constitué de 4 parties :

1. Comment est pris en compte le critère « ressources minérales » en ACV?
2. Comment évaluer la criticité d'une ressource minérale? Lien entre criticité et ACV
3. Recommandations pour la prise en compte du critère « ressources minérales » dans les ACV
4. Illustrations avec des cas d'études des membres EcoSD

De manière générale, le guide est perçu comme clair, structuré et d'un volume correct en nombre de pages. Les discussions ont donc plus porté sur les manques ou les éléments à modifier dans le guide pour le rendre plus pertinent vis-à-vis des attentes des membres du réseau EcoSD.

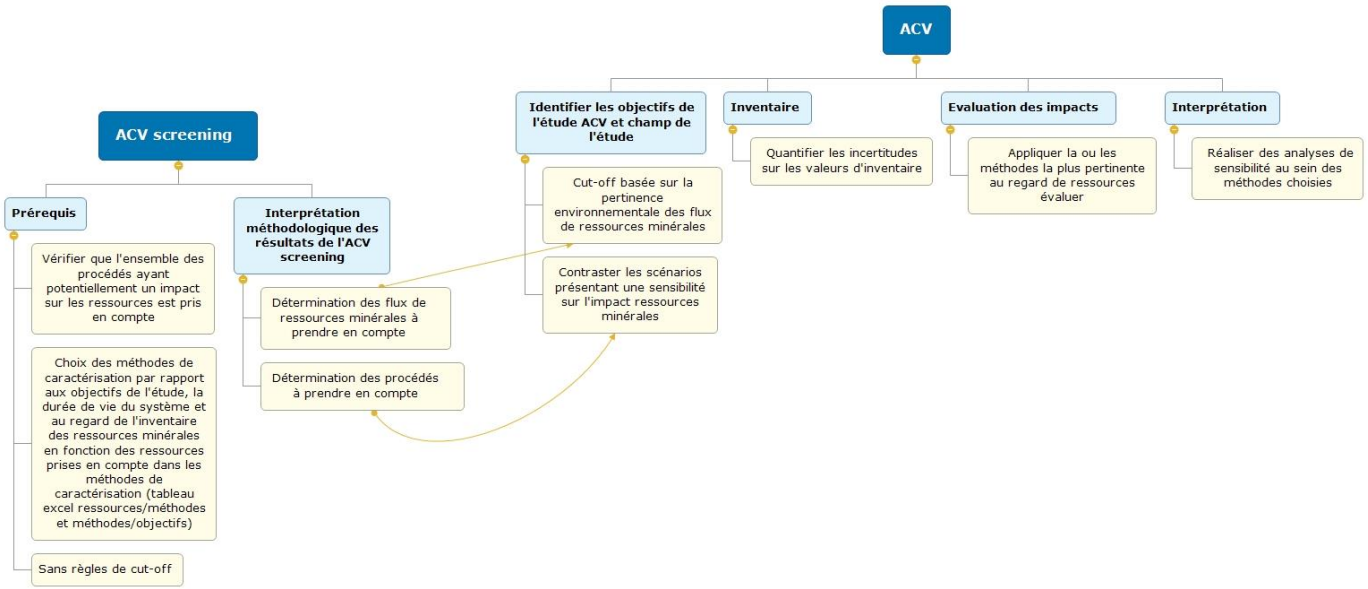
Les principaux points abordés sont résumés dans le tableau suivant :

Elément du guide	Questionnement	Modification proposée
Titre	La partie recommandation ne représente qu'un faible nombre de pages par rapport au volume du rapport. Le titre est plus ambitieux que le contenu ne le laisse présager initialement.	Modification du titre. Le terme « guide de recommandations » sera remplacé par « guide de bonnes pratiques », plus adéquat avec le contenu du rapport.
Partie 1. Méthodes de caractérisation	Le guide s'adresse plus spécifiquement à des spécialistes de l'ACV. A ce titre, la définition des méthodes de caractérisation et les différentes méthodes existantes ne sont pas détaillées dans le guide.	Porter en annexe la définition de ce qu'est une méthode de caractérisation et des principes inhérents au calcul des facteurs de caractérisation (FC). Cette annexe présentera également un listing des méthodes existantes avec leurs caractéristiques. Une représentation visuelle des ressources prises en compte par les méthodes sous forme de tableau de Mendeleïev « cliquable » pourra être proposé.
	Les définitions relatives aux réserves et aux ressources ne sont pas suffisamment claires. L'intégration des stocks anthropogéniques dans les réserves ultimes peut également porter à confusion.	A partir des travaux du JRC (ILCD Handbook) et de publications scientifiques ciblées (Drielsma et al., 2016) statuer sur une définition fixe des termes utilisés dans le document (réserves, ressources…). Présenter en annexe les différentes définitions selon les sources et la justification du choix des termes utilisées dans le document.
	De nombreuses interrogations persistent sur la robustesse des méthodes de caractérisation du fait des incertitudes relatives à la constitution des FC, de la temporalité des données utilisées pour le calcul de ces derniers, des méthodes de calcul elles-mêmes.	Inclure en fin de partie 1 des éléments sur les développements scientifiques actuels des méthodes de caractérisation (avancées de l'UNEP sur la prise en compte de la notion de dissipation…) et ce qu'il serait nécessaire de faire pour pouvoir améliorer la robustesse des méthodes (avoir des incertitudes pour chaque FC…). En annexe, proposer un listing de l'ensemble des éléments identifiés comme contribuant aux incertitudes des FC.
Partie 2. Criticité	La partie sur la criticité est bien construite mais il manque des éléments permettant la mise en œuvre concrète sur des cas applicatifs : dans quel cas faut-il regarder la criticité ? Quel peut être l'impact de la mise en œuvre d'indicateur de criticité et quelles conséquences cela peut-il avoir en terme de développement stratégique pour les entreprises ? Le problème de la criticité est multiple, la criticité pouvant s'évaluer à un niveau sectoriel ou national avec de grandes variabilités temporelles. Cela questionne en retour la fiabilité des résultats obtenus par ces indicateurs de criticité.	Il s'agit là essentiellement d'un problème de manque de méthode pour appliquer le concept de criticité. Les indicateurs de criticité sont en effet calculés pour connaître le niveau de criticité d'une matière première mais ne sont pas utilisables tels quels pour orienter les choix stratégiques des entreprises. Eric Philippot (stagiaire Orange 2018) a développé une méthode permettant d'établir un score unique de criticité à partir des résultats des indicateurs de criticité et ACV. La méthode est pour le moment classée confidentielle par Orange. Des éléments pourront être apportés dans le cas où la RSE d'Orange donnerai son aval pour la publication de ces travaux.

(Suite)

Elément du guide	Questionnement	Modification proposée
Partie 3. Points de vigilance et bonnes pratiques	En lien avec la question des incertitudes, il manque des mises en garde sur la problématique de la temporalité des données utilisées pour le calcul des facteurs de caractérisation (données mobilisées datant de plus de 20 ans et non mises à jour).	Expliciter le propos en expliquant quelles sont les données utilisées, leur provenance, leur temporalité et illustrer cela avec le graphique sur l'évolution des FC pour 4 éléments (Co, In, P, Li).
	La question de la robustesse des méthodes pose des problèmes d'utilisation des ACV dans un but d'aide à la décision. Les fortes incertitudes ne permettent pas 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.	Rajouter un point de vigilance à ce sujet dans le rapport.
	Bien que ne faisant pas l'objet de l'étude, la question des ressources énergétiques est posée, notamment lorsque les méthodes de caractérisation combinent FC ressources énergétiques et FC ressources minérales (par exemple les méthodes CED, CEENE). La difficulté est de savoir s'il faut privilégier des méthodes de caractérisation proposant un indicateur d'impact combinant ces deux types de FC ou des méthodes proposant des indicateurs d'impact pour chaque ressource.	Mettre un avertissement sur les méthodes présentant un indicateur d'impact commun et bien spécifier noir sur blanc que l'étude ne porte que sur les ressources minérales. Renvoyer vers l'étude ScoreLCA pour les ressources énergétiques.
4. Cas applicatifs	La présence de certains tableaux ne facilitent pas la lecture.	Mettre le tableau 5 et le tableau 6 sous forme d'histogramme de couleur.
	La notion d'impact évité n'est pas forcément claire pour les non spécialistes de l'ACV.	Mettre une définition ou expliciter la notion d'impacts évités.

Discussion sur les bonnes pratiques en ACV pour une meilleure prise en compte du critère « ressources minérales » :
Les discussions sur les bonnes pratiques se sont traduites par la construction d'un arbre décisionnel présenté ci-après.



Afin de faciliter le déroulé d'une ACV selon ces bonnes pratiques, il a été suggéré de fournir plusieurs documents à destination des praticiens ACV :

- Un tableau combinant les éléments et les méthodes mobilisant ces éléments,
- Un tableau présentant l'adéquation entre les méthodes de caractérisation et les objectifs de l'étude,
- Dans la mesure de la faisabilité technique, un tableau de Mendeleïev interactif disponible en ligne présentant pour chaque élément les facteurs de caractérisation de chaque méthode ACV sur le marché.

Les aspects valorisation ont également été abordés en fin de réunion.

Prochaine réunion :
La prochaine réunion a été fixée au **5 avril 2019 de 10h à 16h à RTE** (7c place du dôme – Immeuble Window – La Défense). L'ordre du jour de la réunion sera de poursuivre les discussions sur la constitution de l'arbre de décision et sur les bonnes pratiques.

Annexe 2. Méthodes de caractérisation étudiées

- **La méthode ReCiPe : Mineral Depletion Potential**

Le postulat de base pour cette catégorie d'impact est que l'extraction d'un minerai a pour conséquence de diminuer la teneur de ce dernier. Par conséquent, il va falloir fournir des efforts supplémentaires, à l'avenir, pour pouvoir exploiter ces minerais moins concentrés. Pour quantifier ces « efforts », les auteurs font le choix d'évaluer les coûts supplémentaires d'extraction.

NOM	**Mineral Depletion Potential**	
MÉTHODE	ReCiPe	
TYPE D'INDICATEUR	Endpoint – catégorie 4	Midpoint « fictif » (cela signifie qu'il a été créé ultérieurement et n'entre pas directement dans la chaîne de cause à effet)
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Goedkoop2008] ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises 41ublicatio category indicators at the midpoint and the endpoint level First edition (revised) http://www.lcia-recipe.net/	
UNITÉS	$	kg de fer équivalent
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales (20 ressources considérées)	
PRINCIPES ET FONDEMENTS	La méthode repose sur le principe que la consommation de ressources actuelles va imposer l'exploitation de minerais de moins en moins concentrés d'une part et l'exploitation d'énergies fossiles dont la valeur n'aura de cesse que d'augmenter d'autre part ; ainsi que l'exploitation d'énergies fossiles non conventionnelles, ce qui entraînera à l'avenir une augmentation du coût d'extraction des ressources. L'approche se base sur les gisements de minerais (et non des substances individuelles), c'est-à-dire que les coproduits sont également considérés.	
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	Les facteurs de caractérisation correspondent à la valeur actualisée de l'augmentation du coût de l'extraction future (on admet que les quantités seront identiques) : Valeur actuelle des surcoûts = $\sum_{t=1}^{T} MCI_{r,kg} * P_{r,t} * \frac{1}{(1+d)^t}$ Avec : $MCI_{,r,kg}$, l'augmentation marginale du coût d'extraction, en $/kg^2 ;	Pour exprimer des indicateurs midpoint, les termes non spécifiques à chaque ressource sont retirés de l'expression de définition des indicateurs endpoint. (Ce choix est fait de manière à répondre à la recommandation de la SETAC d'avoir un coefficient de transformation de midpoint en endpoint indépendant de la ressource considérée [Jolliet2004]). On obtient ainsi :

	$P_{r,t}$, Consommation annuelle à l'année t, en kg ; d le taux d'actualisation ; T : nombre d'années considérées. Si on détaille : - **Augmentation marginale du coût d'extraction (MCI) :** L'augmentation marginale du coût d'extraction ($MCI_{r,kg}$) d'une ressource *r (en kg)* s'exprime de la manière suivante : $MCI_{r,kg} = \frac{\Delta Coût}{\Delta Production}$; exprimée en \$/kg^2 Avec : ΔCoût : Augmentation du coût d'extraction de la ressource, engendrée par l'extraction de la quantité ΔProduction (\$/kg) ; ΔProduction : Quantité extraite, en kg ; La valeur monétaire retenue comme référence ici est la valeur du dollar pour l'année 2000. - **Taux d'extraction (Pr,t) :** Il correspond à la quantité de ressource r extraite à l'année t. - **Actualisation des coûts futurs :** Les principes économiques stipulent que la valeur d'une dépense ou d'un gain, aujourd'hui, est différente de celle d'une dépense ou d'un gain à l'avenir. Pour intégrer cet effet, les économistes utilisent l'actualisation. Elle se traduit par : $\sum_{t=1}^{T} \frac{1}{(1+d)^t}$ Avec : d : taux d'actualisation (%) T : nombre d'années considérées	$CF_{r,kg,mid} = - \frac{Mr}{Cr^2} * V_r^2 * P_{kg}$ Avec : P_{kg} : la quantité de ressource produite $M_r/(C_r)^2$: coefficient de la pente représentant l'augmentation du coup marginal de la ressource V_r : Valeur de la ressource Ces facteurs mid-point, exprimés en 1/(\$.an), sont ensuite rapportés à une substance de référence (le fer), pour donner les facteurs proposés par la méthode, en kg de Fer_{eq}
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	- Évaluation des gisements : Singer et al. (1997) de l'USGS (environ 3000 mines répertoriées selon 50 types de minerais) - Données de coûts : CostMine, World Mine Cost Data Exchange	
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité monde : les facteurs de caractérisation sont basés sur des données mondiales.	
AUTEURS	6 auteurs principaux parmi 4 organismes : Mark Goedkoop, Reinout Heijungs, Mark Huijbregts, An De Schryver, Jaap Struijs, Rosalie van Zelm	

MISES À JOUR	ReCiPe fait l'objet d'une mise à jour relativement fréquente du tableur de facteurs de caractérisation pour l'intégration de nouveaux facteurs, la mise à jour de facteurs existants ou la correction d'erreurs. On peut toutefois noter qu'une seule correction à ce jour (en juillet 2012) a concerné les indicateurs « ressource ».	
INCERTITUDES	Elles correspondent à différentes visions des impacts de la société sur l'environnement (comme par exemple différents horizons temporels pour la prise en compte du réchauffement climatique) et de la capacité de la société à s'adapter aux conséquences des impacts, à partir desquelles des scénarios de projection plus ou moins conservateurs sont définis.	
LIMITES	Le nombre de ressources couvertes par l'indicateur est assez faible (20). En ce qui concerne les quantités annuelles extraites dans le futur, les auteurs ne réalisent pas de projection mais utilisent pour chaque ressource les valeurs disponibles les plus récentes.	Le nombre de ressources couvertes par l'indicateur est assez faible (20). L'indicateur midpoint a été développé a posteriori. On peut le considérer comme un indicateur midpoint fictif, car il n'est pas en lien avec le mécanisme environnemental évalué par le facteur endpoint. De ce fait, il est conseillé de privilégier l'indicateur end-point.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Le projet « LC-Impact » vise à développer une nouvelle méthode de caractérisation. L'indicateur ressources est en cours de développement par M. Goedkoop, auteur de la méthode ReCiPe ainsi que M. Vieira	

- **La méthode EDIP (97) : Resource consumption**

La méthode s'intéresse aux réserves disponibles par personne d'un point de vue économiquement exploitables.

NOM	**Resource consumption**
MÉTHODE	EDIP97
TYPE D'INDICATEUR	Midpoint – catégorie 2 = indicateur prenant en compte la rareté de la ressource
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Hauschild1998] Environmental Assessment of Products. Volume 2: Scientific Background (Ouvrage payant – 220€). http://www.springer.com/engineering/mechanical+engineering/book/978-0-412-80810-4
UNITÉS	person reserve
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales et fossiles (32 ressources minérales considérées)
PRINCIPES ET FONDEMENTS	Les facteurs de caractérisation décrivent la fraction de réserve de ressource disponible par personne (au niveau mondial). La méthode considère les réserves économiques évaluées en 2004.
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	Les facteurs de caractérisation tiennent compte des réserves économiques uniquement (le taux d'extraction n'est pas inclus). [ILCD2011] L'indicateur d'impact pour la catégorie Consommation des ressources correspond aux quantités de consommation de ressources inventoriées et pour cela aucun calcul additionnel n'est nécessaire (https://www.record-net.org/storage/etudes/04-1012-1A/rapport/Rapport_record04-1012_1A.pdf) : $I_c = \sum_i^n CF_{c,i} * m_i$ Avec I_c : impact relatif à la catégorie d'impact c issu de l'émission de n substances pour un cycle de vie donné (kg) m_i : masse de substance i inventoriée dans le processus (kg) $CF_{c,i}$: facteur de caractérisation de l'impact c relatif à la substance i (sans unité).
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	Pour les ressources minérales : [USGS2005]
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité mondiale : Les facteurs de caractérisation sont basés sur des données mondiales.
AUTEURS	3 auteurs principaux : R. Nedermark, H. Wenzel, N. Caspersen (Pour le chapitre « Resource consumption as a criterion in the environmental assessment of products ») M. Hauschild et H. Wenzel pour la coordination de l'ouvrage.
MISES À JOUR	La méthode date de 1997. Les facteurs ont été mis à jour en 2004. On peut mentionner que la méthode EDIP a fait l'objet d'une mise à jour méthodologique en 2003, mais celle-ci n'a pas concerné l'indicateur ressources. La version en date est « EDIP97 (2004 update) »
INCERTITUDES	Le JRC mentionne d'importantes incertitudes liées au calcul des réserves économiques [ILCD2011].
LIMITES	La méthode tient compte des réserves uniquement, et pas du taux d'extraction.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	ImpactWorld+

- **La méthode EcoIndicator : Damages Resources**

La méthode vise à modéliser la dégradation à long terme de la qualité des ressources disponibles dans l'environnement. Les auteurs partent des principes suivants :

- l'extraction d'une ressource diminue la qualité moyenne du stock restant,
- la baisse de la qualité d'une ressource augmente les efforts nécessaires à l'extraction de la ressource restante,
- le libre marché fait que les acteurs économiques s'orientent d'abord vers la ressource présentant la meilleure qualité.
- Pour les ressources minérales, la baisse de qualité correspond à une baisse de concentration des minerais.

NOM	**Damages Resources**
MÉTHODE	EcoIndicator99
TYPE D'INDICATEUR	Endpoint – catégorie 4 = indicateur de dommage, couvrant l'ensemble du mécanisme environnemental, de l'effet aux conséquences
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Goodkoep2000] The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report, 22 June 2001, Third version, Pré Consultants http://www.pre-sustainability.com/reports
UNITÉS	MJ
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales et fossiles (12 ressources minérales considérées).
PRINCIPES ET FONDEMENTS : ils sont identiques à ceux de **ReCiPe**	La méthode repose sur le même principe que ReCiPe : la consommation des ressources actuelles va imposer l'exploitation de minerais de moins en moins concentrés d'une part et l'exploitation d'énergies fossiles non-conventionnelles d'autre part, ce qui entraînera à l'avenir une augmentation de la consommation d'énergie nécessaire à l'extraction des ressources.
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	Pour les minéraux, les facteurs de caractérisation correspondent aux surplus d'énergie qui seront nécessaires à l'extraction des ressources dans le futur, comme exprimé dans l'équation suivante : $\Delta E_i = E_{future\ i} - E_{actuelle\ i}$ Avec : - ΔEi : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i - $E_{actuellei}$: Énergie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement - $E_{future\ i}$: Énergie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir. Ce point dans le futur est une hypothèse de travail, définit 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.
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	[Chapman1983] et [DeVries1988] pour les surplus d'énergie des ressources minérales
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité mondiale : les surplus d'énergie sont définis pour chaque ressource à l'échelle mondiale.

AUTEURS	2 auteurs principaux : Mark Goedkoop, Renilde Spriensma
MISES À JOUR	Méthode de 1999. Mise à jour relativement fréquente de l'implémentation au sein de SimaPro pour intégration de nouveaux facteurs, mise à jour de facteurs existants ou correction d'erreurs.
INCERTITUDES	Les auteurs indiquent des incertitudes « considérables » pour les minéraux.
LIMITES	- Les publications utilisées pour l'identification des surplus d'énergie pour les ressources minérales ([Chapman1983] et [DeVries1988]) ne citent pas clairement leurs sources. Par ailleurs, les valeurs varient d'une source à l'autre. - Les facteurs de caractérisation sont calculés à partir de scénarios futurs et reposent donc sur de nombreuses hypothèses. - Le nombre de ressources minérales prises en compte dans l'indicateur est très faible (12).
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Le projet LC-Impact vise à développer une nouvelle méthode de caractérisation. L'indicateur ressources est développé par M. Goedkoop, auteur de la méthode EI99.

- **La méthode Impact2002+ : Mineral Extraction**

Pour cette méthode, nous ne verrons ici que l'impact midpoint « mineral extraction ». En effet, l'impact final « resources » est la somme de deux impact midpoint (dont celui mentionné auparavant) ; additionné avec l'impact orienté énergie.

NOM	**Mineral extraction**
MÉTHODE	Impact2002+
TYPE D'INDICATEUR	Midpoint « fictif »
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Jolliet2003] IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology Int J LCA 8 (6) 324 – 330 (2003) [Humber2011] IMPACT 2002+: User Guide – Draft for version 2.1 – IMPACT Modeling Team, 2003-2011 http://www.impactmodeling.org/
UNITÉS	kg fer équivalent
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales (13 ressources considérées)
PRINCIPES ET FONDEMENTS	Cette méthode combine les principes de deux méthodes existantes (EI99 et CED) pour évaluer l'épuisement des ressources minérales d'une part et des ressources énergétiques non-renouvelables d'autre part. Elle propose ensuite une agrégation pour définir un indicateur *endpoint* couvrant l'ensemble des ressources non-renouvelables.
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	Les facteurs de caractérisation de la méthode EI99 sont utilisés. Ils sont rapportés à une substance de référence (le fer) : $CF_i^{2002+} = \frac{CF_i^{EI99}}{CF_{fer}^{EI99}}$ Avec : CF_i^{2002+} : facteur de caractérisation de la ressource i selon Impact2002+ CF_i^{EI99} : facteur de caractérisation de la ressource i selon EI99

	CF_{fer} ^{EI99} : facteur de caractérisation du fer selon EI99
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	EcoIndicator99 [Goedkoop2000]
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Pour les ressources minérales : représentativité mondiale (cf. EI99).
AUTEURS	7 auteurs principaux de l'EPFL : Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, Ralph Rosenbaum
MISES À JOUR	La version en date est la v2.1 CF 3a (2011)
INCERTITUDES	Les auteurs indiquent une incertitude « medium » [Humber2011] p20
LIMITES	La méthode se base sur un indicateur endpoint (EI99) pour en faire un indicateur midpoint « fictif ». Les limites sont les mêmes que celles associées à EI99. De plus, il y a une limite temporelle : la variation d'énergie est basée sur le fait que la quantité extraite doit atteint le quintuple de la quantité extraite en 1990. Or, le taux d'extraction étant différent entre la substance et la substance de référence, on compare des quantités extraites à des pas de temps pouvant varier fortement.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Impact World + (voir ci-dessous)

- **La méthode EPS (2000) : Abiotic stock resources**

Peu utilisée en France, cette méthode a été actualisée en 2015 après plus de 10 années sans nouveauté. Elle repose sur le principe que le consommateur dispose d'un consentement à payer pour chaque produit.

NOM	**Abiotic stock resources**
MÉTHODE	Environmental Priority Strategies (EPS)
TYPE D'INDICATEUR	Endpoint – catégorie 4 = indicateur de dommage, couvrant l'ensemble du mécanisme environnemental, de l'effet aux conséquences
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Steen1999] A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/AboutDatabase_2.htm
UNITÉS	ELU (Environmental Load Units)
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales et fossiles (78 ressources minérales considérées)
PRINCIPES ET FONDEMENTS	L'indicateur se base sur le concept de « consentement à payer » (Willingness to Pay (WTP)) pour quantifier un dommage environnemental. Dans la perspective d'une société future plus peuplée, l'auteur fait l'hypothèse que les ressources actuelles devront être produites autrement ou remplacées par d'autres ressources.

CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	L'auteur identifie des ressources alternatives ou des procédés alternatifs à la production de ressources actuelles. La ressource actuelle est alors remplacée par une ressource ou un procédé alternatif : Métaux issus de minerais → Ressources provenant de « minerais fictifs » dont la teneur est la teneur moyenne dans la croûte terrestre, puis transformation de ce minerai en métal. Les facteurs de caractérisation sont calculés de la manière suivante : - Pour chaque ressource, la WTP du procédé alternatif est estimée, en incluant le coût actuel de ce procédé et les externalités des émissions polluantes associées. - Le WTP d'une version optimisée du procédé est estimée, afin de tenir compte des progrès technologiques qui pourront être réalisés. - Cette dernière valeur (WTP du procédé alternatif optimisé) est le facteur de caractérisation de la ressource actuelle correspondante.
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	Sources diverses en fonction des procédés alternatifs
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité mondiale : Les facteurs découlent de l'évaluation du traitement de minerais fictifs correspondant aux teneurs moyennes mondiales.
AUTEURS	1 auteur principal, de la Chalmers University : B. Steen
MISES À JOUR	Méthode créée entre 1990 et 1999. Mise à jour jusqu'en 2000. Grosse mise à jour en 2015 de la méthode entière
INCERTITUDES	La méthode quantifie les incertitudes pour chaque facteur de caractérisation. La méthode se base sur des scénarios à très long-termes qui sont emprunts d'incertitudes très fortes.
LIMITES	La méthode considère une ressource alternative unique pour chaque ressource évaluée. Elle considère ainsi soit les mines d'argent, soit les mines d'aluminium soit l'arsenic ou le zirconium contenu dans un minerai. La substitution par des éléments étudiés (par équivalence) permet d'avoir des calculs sûrs. Par ailleurs, le fait que la méthode se base sur des scénarios à très long termes réduit son potentiel d'acceptation. En particulier, le choix de considérer qu'à l'avenir, les métaux seront extraits à partir de roche « moyenne » est sujet à discussion.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	ImpactWorld+

- **Les méthodes Cumulative Exergy Demand (CexD) et Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE), ainsi que leur indicateur éponyme :**

L'indicateur repose sur la quantification de l'exergie extraite de l'environnement par les produits ou services. Rappelons que l'exergie est une grandeur permettant de quantifier le travail maximal que peut fournir un système lorsqu'il est en équilibre thermodynamique avec son environnement. À la différence de l'énergie, qui est toujours conservée (1ère loi de la thermodynamique), l'exergie est consommée dans les processus réels en même temps que l'entropie est produite (2ème loi de la thermodynamique). Ainsi, l'exergie permet de rendre compte de la disponibilité/qualité de l'énergie.

NOM	**Cumulative Exergy Demand (CexD)**	**Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)**
MÉTHODE	Aucune	
TYPE D'INDICATEUR	Indicateurs de flux - catégorie 1 = indicateurs reposant sur une propriété inhérente de la ressource	
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Bösch2007] Applying Cumulative Energy Demand (CexD) Indicators to the 61ublicati Database http://link.springer.com/content/pdf/ 10.1065%2Flca2006.11.282	[DeWulf2007] Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environnement (CEENE): a comprehensive Life Cycle Assessment method for resource accounting. http://pubs.acs.org/doi/full/ 10.1021/es0711415
UNITÉS	MJ-équivalent	
RESSOURCES COUVERTES	79 ressources couvertes comprenant 67 ressources minérales, 6 ressources fossiles et 6 ressources renouvelables. Pour certaines ressources minérales, il peut y avoir plusieurs facteurs de caractérisation en fonction de la concentration dans le minerai.	64 ressources couvertes comprenant 57 ressources minérales, 4 ressources fossiles et 3 ressources renouvelables.
PRINCIPES ET FONDEMENTS	L'exergie est une grandeur quantifiant la disponibilité de l'énergie d'un système. Les principes de thermodynamique permettent d'affirmer que l'exergie d'un produit sortant d'un procédé est forcément plus faible que l'exergie des ressources initiales. Ceci s'applique aux ressources énergétiques comme matérielles. Les auteurs proposent donc d'utiliser la destruction d'exergie (inhérente à toute transformation) comme une mesure de la consommation de ressources. L'indicateur est une comptabilisation, pour un système donné, de l'exergie totale extraite.	La CEENE est une évolution de la CexD qui repose sur le même principe mais propose des nouveaux facteurs de caractérisation pour les minéraux, propose une nouvelle approche pour les métaux, l'énergie nucléaire et la biomasse et prend en plus en compte l'occupation des sols (land use).
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	Les facteurs de caractérisation correspondent à l'exergie spécifique de chaque ressource. Il s'agit de la dégradation de la disponibilité de l'énergie, quantifiable par la destruction d'exergie, qui intervient dans les procédés physico-chimiques en général, que ce soit dans les écosystèmes naturels (production de biomasse par exemple) ou dans les « écosystèmes » industriels (production, consommation,). Pour calculer l'exergie d'un système, on a :	

	CexD = $\sum_i m_i * Ex_{(ch),i} + \sum_j n_j * r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$ Avec : CexD = Demande Exergétique Cumulée par unité de produit ou de procédé (MJ-eq) m_i= masse de la ressource i (kg) $Ex_{(ch),i}$ = exergie par kg de ressource i (MJ-eq/kg) n_j= quantité d'énergie de la source d'énergie j (MJ) $r_{ex-e\ (kpnrt),j}$ = ratio d'exergie à énergie pour la source d'énergie j (Mj-eq/MJ) ch = chimique ; k = cinétique ; p = potentielle ; n = nucléaire ; r = radioactive ; t = exergie thermique Différence avec la méthode CEENE : Dans la méthode CexD, l'exergie des métaux est calculée à partir de la quantité totale de minerai qui est utilisée ; tandis que la méthode CEENE ne considère que la partie du minerai qui contient des minéraux, car les résidus miniers ne sont souvent pas altérés (i.e. il n'y a pas de destruction de leur exergie) lors de cette opération. Les auteurs de la méthode CEENE indiquent que cette évolution n'entraine pas de différences majeures entre les deux méthodes. Cependant, nous sommes en droit de nous poser la question suivante : dans certains cas, un faible pourcentage de minéraux vraiment utilisables est extrait pour une part de roche inerte très important ; cela n'influence-t-il pas les résultats ?	
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	[Szargut1988] et [Szargut2005] pour les premières valeurs d'exergie pour certaines ressources [Bösch2007] pour les valeurs complémentaires d'éxergie par type de ressources.	[Szargut1988] [Szargut2005] [Bösch2007]
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Non-applicable : les facteurs correspondent à une grandeur intrinsèque aux ressources pour laquelle il n'y a pas de variabilité géographique.	
AUTEURS	4 auteurs principaux parmi 3 organismes : M.E. Bösch, S. Hellweg, M.A.J Huijbregts, R. Frischknecht	7 auteurs principaux parmi 3 organismes : J. Dewulf, M.E. Bösch, B. De Meester, G. Van der Vorst, H. Van Langenhove, S. Hellweg, M.A.J Huijbregts
MISES À JOUR	Méthode créée en 2007.	Méthode créée en 2007. Mise à jour : CexD
INCERTITUDES	Compte tenu du fait que la méthode est uniquement basée sur des grandeurs thermodynamiques, les incertitudes sont relativement faibles. La principale source d'incertitude concerne essentiellement les ressources minérales, pour lesquelles les compositions, et donc les exergies, ne sont pas toujours connues avec précision (voir le paragraphe consacré à l'exergie).	
LIMITES	Ces indicateurs quantifient l'extraction des ressources selon une grandeur intrinsèque à chaque ressource. Ils ne tiennent pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'extraction des ressources. En ce sens, ils ne traduisent pas réellement le dommage causé.	
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Aucun identifié	

- **Méthodes en cours de développement :**
- **AADP ; Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential**

Cette approche, qui prend en compte les réserves anthropogéniques, est très intéressante pour l'étude des matériaux critiques. En effet, depuis quelques années, nous en utilisons quotidiennement de plus en plus sous différentes formes. C'est pourquoi nous sommes sans le savoir en train de créer de véritables mines urbaines du fait de l'existence dans nos maisons de ressources ayant un potentiel économique et écologique non négligeable. En les recyclant, ces matériaux pourraient être réutilisés et ainsi ralentir l'effet de pénurie de certaines ressources. Il reste cependant un obstacle majeur à prendre en considération : le gain économique n'est pas (encore) suffisamment élevé, ou moins important que la vente de matériau vierge. C'est pourquoi les politiques publiques ont un rôle à jouer (inciter le recyclage) (Schneider et al. 2015).

La méthode AADP (Schneider et al. 2011) considère les stocks anthropiques de la manière suivante : les données peuvent, théoriquement, provenir d'analyse des flux (MFA en anglais). Cependant, comme ce type de données est difficile à exploiter, Schneider estime le stock anthropogénique comme suit : il s'agit de comptabiliser les taux d'extraction annuelle de chaque ressource depuis 1900 (c'est à dire depuis les premières données exploitables). Il est fait l'hypothèse 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 dissolu du cuivre représentait moins de 1% du stock anthropogénique du cuivre. Cela en fait des données sûres si nous considérons que le recensement des matières extraites est exact.

Basé sur le modèle ADP, il s'agit de faire 2 modifications successives. Les « ressources », comme définies par Schneider 2011 (voir ci-dessus) sont utilisées à la place des « réserves ultimes » :

$$ADP_{i,\ resources} = \frac{extraction\ rate\ i}{(resources\ i)^2} * \frac{(resources\ antimony)^2}{extraction\ rate\ antimony}$$

Puis, le stock anthropique d'une matière première tel qu'il est défini ci-dessus est ajouté à la ressource :

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

On peut s'apercevoir de l'importance de cet indicateur comme aide à la prise de décision par exemple en matière de politique publique. Nous pouvons remarquer que 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, après analyse approfondie de cet indicateur et s'il est adressé à des instances décisionnaires. Notons que la prise en compte du stock anthropogénique permet d'évaluer la disponibilité des ressources pour les générations futures de façon plus juste puisque ce stock va s'accroître. L'inconvénient de cette méthode est qu'il est obligatoire de déterminer les facteurs de caractérisation pour de nombreuses ressources. De plus, il existe également des problématiques méthodologiques à résoudre pour définir la manière de comptabiliser le stock anthropogénique pour certaines ressources. Ces considérations font qu'une telle approche ne pourra pas être implémentée à court terme dans les pratiques ACV.

- **Projet « LC-IMPACT » ; Surplus Ore Potential (SOP)**

Le projet LC-Impact a pour but de fournir une méthodologie générale d'évaluation de l'impact du cycle de vie pour les trois principaux domaines de protection. Ici, nous nous intéresserons uniquement à la rareté des ressources (minérales). Les données sont issues du site dédié au projet (http://www.lc-impact.eu/resources-mineral-resource-scarcity) et des publications de Vieira et al. (2013) et Vieira et al. (2012). Elle se base sur un constat simple : l'extraction de matière première est essentielle car le recyclage ne permet pas de couvrir les demandes actuelles.
Le modèle est donné par :

$$CF_{\ end,\ x} = \frac{\int_{CME}^{MME}(\Delta OP_x)dCME}{R_x} = \frac{\int_{CME}^{MME}(\Delta OP_x)dCME}{MME_x - CME_x}$$

Avec :

- CFend,*x* (kgore/kg*x*) : le potentiel moyen de minerai excédentaire du minerai x, OPx est la teneur en minéral produite par quantité de minerais x extraite
- (kg de minéral / kg de minerai x), et Rx (kg x) est la réserve actuelle du minerai x, définie comme la différence entre la quantité maximale à extraire de ce minerai
- (MMEx) et la quantité actuelle de minerai x extrait (CMEx).

- **Une approche multi-critère : le Global Resource Indicator**

Les travaux d'Adibi et al. (2017) reflètent l'importance d'une méthode multicritère comme le Global Resource Indicator (GRI) qui reprend 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, basée sur les facteurs de caractérisation de CML. Effectivement, c'est l'ADP qui est utilisé pour « quantifier » la rareté ici : $ADP_i = \frac{Ext_i}{Res_i^2} * \frac{Res_Fe_i^2}{Ext_Fe_i}$. Pour une ressource i, on a : ADP en kg Fe-eq, Ext, taux d'extraction annuel de i, Res², la réserve au carré de ce même élément, Res-Fe², taux d'extraction annuel du fer, Ext-Fe, la réserve au carré du fer
- y est la recyclabilité ou le facteur de qualité qui dépend des taux de dispersion et de recyclage ($F_{dispersion}$ et $F_{recycling}$)
- z est la disponibilité géopolitique, qui dépend de l'index WGI, le nombre de pays et le standard de déviation (F_{WGI}, $F_{countries}$ et $F_{deviation}$).

En développant un peu :

$$GRI_{Fe\text{-}eq} = \frac{F_{CML-Fe-eq}^{normalized}}{(1-F_{dispersion})*10*F_{recycling}*\sqrt[3]{F_{WGI}*F_{deviation}*F_{coutries}}} * \frac{F_{recycling}^{Fe}*10*\sqrt[3]{F_{WGI}^{Fe}*F_{deviation}^{Fe}}*F_{countries}^{Fe}*(1-F_{dispersion}^{Fe})}{1}$$

Notons que le fer est choisi comme substance équivalente pour plusieurs raisons : non seulement c'est un métal courant qui possède de solides données accessibles ; mais il s'agit également d'un matériau plus facile à manipuler (mathématiquement) que l'antimoine utilisé dans CML. Ces travaux démontrent l'importance de la recherche sur la substitution de matériaux qui changent fortement les résultats. Nous ne développerons pas plus ici cette méthode qui est encore à l'état de recherche.

- **ImpactWorld+ :**

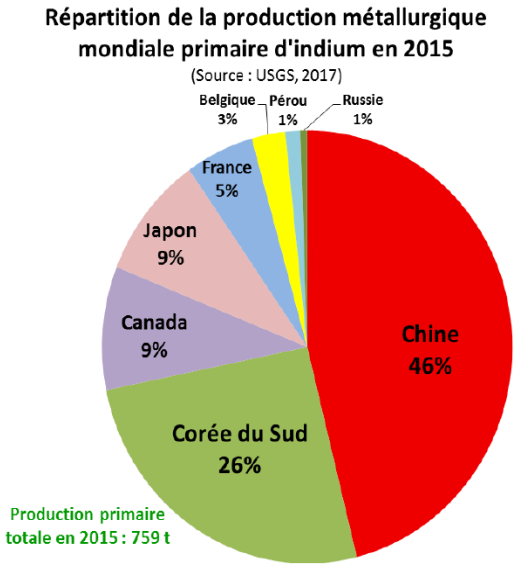
Il s'agit de la mise à jour et la « fusion » de 3 méthodes : IMPACT 2002+, LUCAS et EDIP. Il fournit des facteurs de caractérisation cohérents pour tous les impacts régionalisés. Il s'agit d'une amélioration non négligeable de ces 3 modèles (voir le site officiel pour tout renseignement : http://www.impactworldplus.org/en/presentation.php).

Annexe 3. Fiches de criticité des matériaux étudiés

1. L'Indium

1.1. Domaines d'utilisation en Europe :

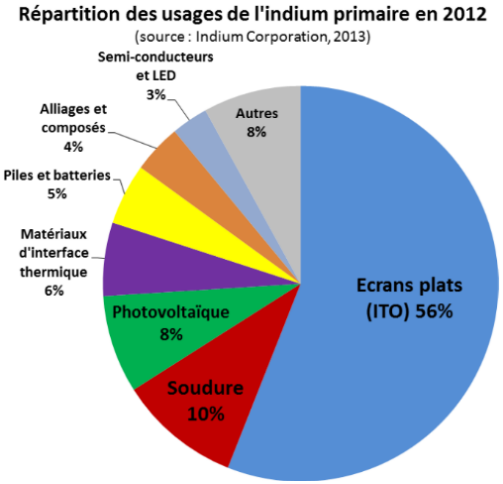
- L'indium (In) est un élément classé parmi les métaux pauvres ; cela rend compte du fait que les propriétés métalliques de ces éléments sont les moins marquées de l'ensemble des métaux. Il appartient au groupe du bore dont les propriétés sont similaires. Son numéro atomique est 49, suivant le tableau de Mendeleïev. La particularité l'indium est que c'est un sous-produit de plusieurs éléments : le zinc principalement, pour 95% ; le cuivre, le plomb et l'étain pour moins de 5%. Cela signifie qu'il est complètement dépendant de la production d'un métal hôte. Il est d'autant plus sensible de traiter ce type d'élément car un changement de l'offre ou de la demande du zinc, par exemple peut faire varier énormément le cours et les approvisionnements du cobalt. Les écrans plats (ITO pour LCD, plasma, OLED) représentent 56 % des utilisations actuelles.
- La soudure représente 10 % des domaines d'utilisation.
- Le photovoltaïque dit « en couche mince », c'est-à-dire que lors de la fabrication des panneaux solaires, les couches photovoltaïques actives sont appliquées directement sur une vitre ou une plaque métallique dans le cadre d'un processus intégré. L'épaisseur de la couche n'est que d'environ 0,002 millimètres (Source : http://www.phoenixsolar-group.com). Il s'agit de 8 % de l'emploi effectué pour l'indium.
- Les matériaux d'interface thermique pour 6 %.
- Les piles et les batteries : 5 % de l'indium est utilisé ainsi.
- Pour des alliages et des composés : 4%.
- Pour de l'alliages et la fabrication de composés : cela représente 3 % des emplois du cobalt.



1.2. Les pays producteurs et les réserves mondiales :
1.3.

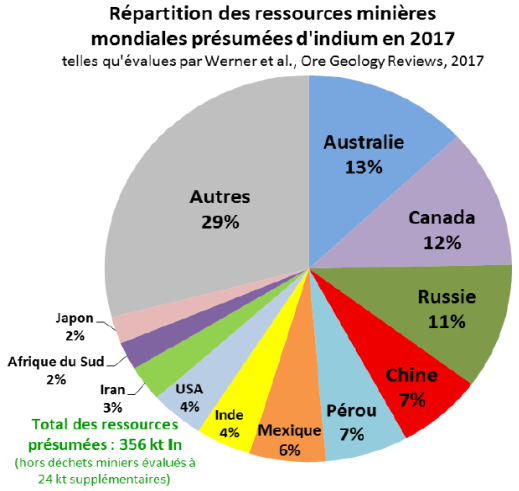
Nous parlons ici des pays producteurs où sont extraits les minéraux en question et nous pas de leur raffinement car les pays sont différents :

- Chine : 46 % ;
- Corée du Sud : 26 % ;
- Canada : 9 %;
- Japon : 9 % ;
- France : 5 % ;
- Belgique : 3 % ;
- Pérou : 1 % ;
- Russie : 1 %.



-Les principales réserves mondiales sont très dispersées :

- Australie : 13 % ;
- Canada : 12 % ;
- Russie : 11 % ;
- Chine : 7 % ;
- Pérou : 7 % ;
- Mexique 6 % ;
- Autres pays : 29 %



1.4. Le recyclage :

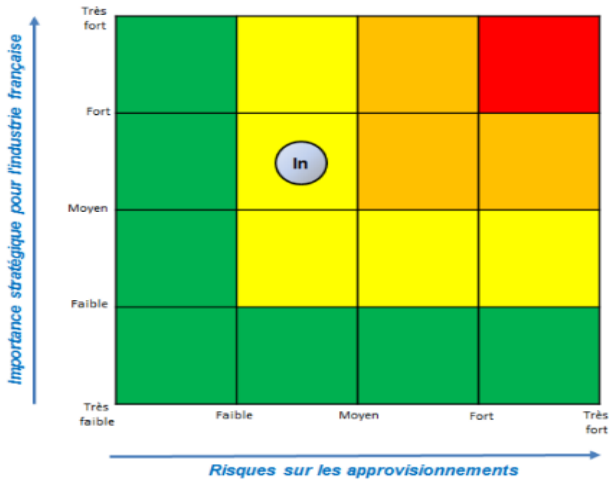
- L'essentiel du recyclage est réalisé en boucle courte des chutes de fabrication ("new scraps"). Durant le processus de pulvérisation de couches minces, seulement 30% d'indium est déposé avec succès sur la cible. Il est donc théoriquement possible de recycler jusqu'à 70% d'indium, mais des pertes sont inévitables.
- Il n'y a quasiment aucun recyclage des déchets en fin de vie ("old scrap)" (teneurs en indium dans les DEEE et les panneaux photovoltaïques très faibles et récupération non économique).

1.5. La substitution :

- Les substitutions dépendent de l'usage :
  - Pour les écrans plats, d'autres conducteurs transparents comme l'oxydes de zinc ou d'étain plus ou moins dopés qui sont moins chers mais aussi moins performants), des nano-tubes de carbone et nano-argent qui sont quant à eux plus chers ; et des conducteurs transparents organiques comme le PEDOT
  - Pour les soudures : l'alliages bismuth-étain ou des alliages à base de plomb ; mais la tendance est davantage inverse, puisque l'on cherche à substituer le plomb par d'autres métaux pour des raisons de réglementations environnementales
  - Pour les cellules solaires (CIGS), on remplace la technologie par d'autres cellules (cellules CdTe) ou des cellules de silicium amorphe.

1.6. Sa criticité :

- Ce graphique est un résumé de la fiche entière du BRGM. Il reprend de manière synthétique les éléments énoncés et cela permet une approche très visuelle, c'est pourquoi nous choisissons cette méthode pour rendre compte de la criticité de l'indium.



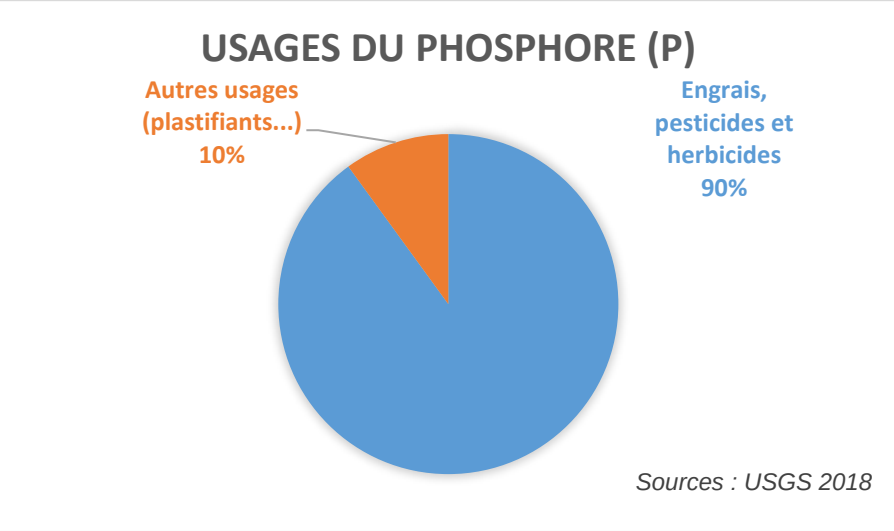
Sources : BRGM 2017

2. Le Phosphore

Le phosphore (P) est un élément chimique du groupe des pnictogènes. Il s'agit d'un élément indispensable à la vie et très consommé. C'est un élément nutritif essentiel des plantes. Sa déficience limite sévèrement les rendements des cultures. Par conséquent, des apports substantiels en phosphate sont nécessaires pour la croissance optimale des plantes et la production adéquate de nourriture et de fibre pouvant être utilisée par la suite (Source : FAO : http://www.fao.org/docrep/007/y5053f/y5053f01.htm#TopOfPage). Son numéro atomique est 15, suivant le tableau de Mendeleïev.

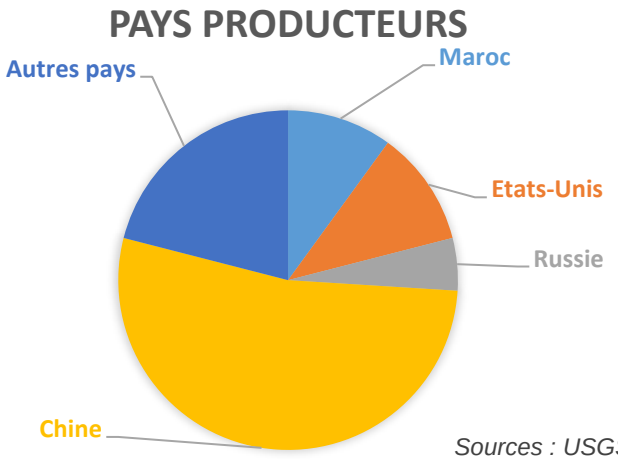
2.1. Domaines d'utilisation en Europe :

- Les engrais représentent environ 90 % des usages du phosphore en Europe. Cela est donc très conséquent et est essentiel pour pouvoir nourrir les êtres humains directement (plantes) ou indirectement (plantes consommées par du bétail).
- On retrouve le phosphore dans quelques applications industrielles : plastifiants, dispositifs pyrotechniques, allumettes, obus incendiaires… pour environ 10 % des utilisations du phosphore.
- Une représentation graphique permet de se rendre plus facilement compte des usages :



2.2. Les pays producteurs et les réserves mondiales :

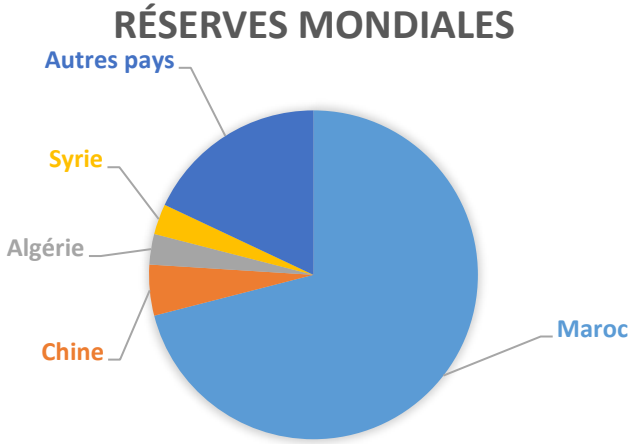
Nous parlons ici des pays producteurs où sont extraits les minéraux en question et nous pas de leur raffinement car les pays peuvent différer :
Chine : 53 % ;
Russie : 5 % ;
Maroc : 10 % ;
États-Unis 11 % ;
Autres pays producteurs : 21 %.



Sources : USGS 2018

Les principales réserves mondiales sont détenues par

- Maroc et l'Ouest du Sahara : 71 % ;
- Chine : 5 % ;
- Algérie : 3 % ;
- Syrie : 3 % ;
- Autres pays : 18 %



Sources : USGS 2018

2.3. Le recyclage :

• Le recyclage est complexe pour le phosphore, actuellement. Il fait l'objet de recherches afin d'optimiser les coûts (environnementaux et financiers) ; il faut en effet progresser dans ce domaine en traitant plus complètement les eaux usées domestiques car il faut extraire/reconcentrer le P et en disposer sous une forme disponible pour les plantes. L'épandages des boues, par exemple, est problématique car considérées comme des déchets et ce statut empêche entre-autre son utilisation libre.

• Après un entretien auprès de M. Eveillard, Directeur Agriculture, Environnement et Statistiques de l'Union des industries de la fertilisation (UNIFA) ; nous avons pu nous rendre compte qu'en France, actuellement, le recyclage du P issu des effluents organiques représentent plus de 50% du P apporté aux terres cultivées et prairies en France, selon l'Observatoire national de la fertilisation minérale et organique, sur une étude de 2010 à 2016. De plus, « les réserves de phosphates minéraux ont fait l'objet d'une nouvelle évaluation en 2014 par l'International Fertilizer Development Centre (IFDC). Cette étude porte à 300 ans la durée d'exploitation possible des réserves actuelles (de futures explorations pourraient révéler de nouveaux gisements) ; depuis les années 2010, l'Arabie Saoudite est un nouveau producteur parmi les dix mondiaux et projette déjà l'ouverture d'une 2ème mine », selon M. Eveillard. Cela sous-entend qu'il n'y a pas de risque de pénurie géologique à court ou moyen terme pour le phosphore.

2.4. La substitution :

• La substitution de cet élément vital est impossible. D'autres engrais, par exemple, ne peuvent apporter les nutriments essentiels à la plante pour remplacer le phosphore.

2.5. Sa criticité :

• Contrairement à certains matériaux « métalliques », le phosphore ne dispose pas, à l'heure actuelle, d'une fiche de criticité qui lui est dédiée. Nous savons qu'il est une ressource critique de par son classement par l'Union Européenne et nous pouvons voir sur les nombreux graphiques ci-dessus que nous sommes totalement dépendants de l'importation, notamment à des fins de fertilisation des sols. Il est regrettable que cet élément ne soit pas étudié aussi rigoureusement par le BRGM que d'autres car il parait presque indispensable de le faire ; mais il est possible que sa fiche soit actuellement en cours de réalisation, le travail sur ces fiches étant relativement complexe et d'actualité (en effet, de nombreuses fiches ont été publiées que très récemment comme celle du cobalt (janvier 2018), de l'indium (septembre 2017) ou encore du platine (janvier 2018).

Annexe 4. Inventaires des ressources pour la production d'un kg d'acier (selective coating, stainless steel sheet, black chrome) selon les logiciels GaBi et Simapro

Ressources dans GaBi	Valeur (en kg)	Ressources dans Simapro	Valeur (en kg)
Aluminium	7.99E-04	Aluminium	7.99E-04
		Anhydrite	1.81E-08
Antimonite	6.62E-12	Stibnite	6.62E-12
Barium sulphate	4.97E-04	Barite	4.97E-04
Basalt	1.69E-03	Basalt	1.69E-03
Bentonite	1.90E-04	Clay, bentonite	1.90E-04
Borax	7.14E-08	Borax	7.14E-08
Bromine	6.83E-10	Bromine	6.83E-10
Cadmium ore	4.91E-08	Cadmium	4.91E-08
Limestone (calcium carbonate)	1.30E-01	Calcite	1.30E-01
Carbon dioxide	2.96E-02	Carbon dioxide, in air	2.96E-02
Carbon, in organic matter, in soil	1.14E-07	Carbon, organic, in soil or biomass stock	1.14E-07
Chromium	2.94E-02	Chromium	2.94E-02
Chrysotile	2.93E-06	Chrysotile	2.93E-06
Cinnabar	2.69E-07	Cinnabar	2.69E-07
Clay	4.09E-02	Clay	4.09E-02
Coal, brown, in ground	1.17E-01	Coal, brown	1.17E-01
Coal, hard, unspecified, in ground	8.94E-02	Coal, hard	8.94E-02
Cobalt	4.28E-10	Cobalt	4.28E-10
Colemanite ore	1.83E-06	Colemanite	1.83E-06
Copper	3.26E-04	Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore	2.15E-05
		Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.17E-04
		Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore	3.12E-05
		Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1.56E-04
		SOMME	3.26E-04
Crude oil ecoinvent	3.55E-02	Oil, crude	3.55E-02
Diatomite	6.37E-11	Diatomite	6.37E-11
Dolomite	2.17E-04	Dolomite	2.17E-04
Feldspar (aluminium silicates)	1.37E-10	Feldspar	1.37E-10
Fluorine	1.11E-06	Fluorine	7.68E-07
		Fluorine, 4.5% in apatite, 3% in crude ore	3.47E-07
		SOMME	1.11E-06
Fluorspar (calcium fluoride; fluorite)	4.52E-05	Fluorspar	4.52E-05

Ressources dans GaBi	Valeur (en kg)	Ressources dans Simapro	Valeur (en kg)
Gallium	5.37E-12	Gallium	5.37E-12
Gold	1.56E-08	Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore	8.65E-10
		Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore	1.59E-09
		Gold	1.90E-09
		Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore	2.90E-09
		Gold, Au 4.3E-4%, in ore	7.19E-10
		Gold, Au 4.9E-5%, in ore	1.72E-09
		Gold, Au 6.7E-4%, in ore	2.67E-09
		Gold, Au 7.1E-4%, in ore	3.01E-09
		Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	1.80E-10
		SOMME	1.56E-08
Granite	8.72E-13	Granite	8.72E-13
Natural Aggregate	2.36E-01	Gravel	2.36E-01
Gypsum (natural gypsum)	6.27E-08	Gypsum	4.46E-08
Indium	1.08E-09	Indium	1.08E-09
Iodine	1.54E-10	Iodine	1.54E-10
Iron	8.47E-03	Iron	8.47E-03
Kaolinite (24% in ore as mined)	3.20E-06	Kaolinite	3.20E-06
Kieserite (25% in ore as mined)	2.22E-08	Kieserite	2.22E-08
Lead	8.28E-06	Lead	8.28E-06
Lithium	2.87E-12	Lithium	2.87E-12
Magnesit (Magnesium carbonate)	1.27E-04	Magnesite	1.27E-04
Magnesium	1.48E-08	Magnesium	1.48E-08
Manganese	2.64E-05	Manganese	2.64E-05
Metamorphic stone, containing graphite	1.12E-06	Metamorphous rock, graphite containing	1.12E-06
Molybdenum	5.68E-06	Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore	2.89E-06
		Molybdenum, 0.014% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.81% in crude ore	4.09E-07
		Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore	2.92E-07
		Molybdenum, 0.025% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.39% in crude ore	1.50E-06
		Molybdenum	5.84E-07
		SOMME	5.68E-06
Nickel	5.49E-04	Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore	4.56E-07
		Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore	5.49E-04
		SOMME	5.49E-04
Olivine	6.57E-09	Olivine	6.57E-09

Ressources dans GaBi	Valeur (en kg)	Ressources dans Simapro	Valeur (en kg)
Palladium	7.47E-10	Palladium, Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	2.20E-10
		Palladium, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	5.28E-10
		SOMME	7.47E-10
Peat ecoinvent	5.44E-06	Peat	5.44E-06
Phosphorus	4.50E-06	Phosphorus	1.43E-06
		Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore	3.07E-06
		SOMME	4.50E-06
Platinum	7.25E-11	Platinum, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	1.58E-11
		Platinum, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	5.67E-11
		SOMME	7.25E-11
Rhenium	2.03E-12	Rhenium	2.03E-12
Rhodium	1.14E-11	Rhodium, Rh 2.0E-5%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore	2.76E-12
		Rhodium, Rh 2.4E-5%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore	8.64E-12
		SOMME	1.14E-11
Sand	1.64E-06	Sand	1.64E-06
Slate	5.12E-08	Shale	5.12E-08
Silver	4.28E-08	Silver, 0.007% in sulfide, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, In	1.97E-08
		Silver, 3.2ppm in sulfide, Ag 1.2ppm, Cu and Te, in crude ore	1.40E-08
		Silver, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, in ore	1.30E-09
		Silver, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, in ore	2.96E-09
		Silver, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, in ore	2.90E-09
		Silver, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	1.91E-09
		SOMME	4.28E-08
Sodium chloride (rock salt)	1.52E-01	Sodium chloride	1.52E-01
Sodium nitrate	1.44E-12	Sodium nitrate	1.44E-12
Sodium sulphate	1.89E-02	Sodium sulfate	1.89E-02
Sulphur	5.39E-07	Sulfur	5.39E-07
Sylvite (25% in Sylvinite)	1.49E-06	Potassium chloride	1.49E-06
Talc	7.13E-07	Talc	7.13E-07
Tantalum	1.54E-08	Tantalum	1.54E-08
Tellurium	2.11E-09	Tellurium	2.11E-09
Tin	7.92E-07	Tin	7.92E-07

Ressources dans GaBi	Valeur (en kg)	Ressources dans Simapro	Valeur (en kg)
Titanium dioxide	2.97E-05	TiO2, 54% in ilmenite, 2.6% in crude ore	2.97E-05
		TiO2, 95% in rutile, 0.40% in crude ore	1.09E-10
		SOMME	2.97E-05
Ulexite	9.50E-08	Ulexite	9.50E-08
Uranium, in ground	1.94E-05	Uranium	1.94E-05
Vermiculite	9.30E-08	Vermiculite	9.30E-08
Zinc	8.54E-04	Zinc	8.54E-04
Zirconium	2.08E-08	Zirconium	2.08E-08

Annexe5. 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

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1. Croisement des requêtes deux à deux 8
Tableau 2. Croisement des requêtes trois par trois 8
Tableau 3. Exemple de tableau de synthèse relatif aux questions génériques 9
Tableau 4. Exemple de tableau de synthèse relatif au thème ACV/criticité 10
Tableau 5. Ressources identifiées comme critiques par la Commission Européenne 19
Tableau 6. La criticité, un concept multidimensionnel (Source : Mancini et al. 2016) 24
Tableau 7. Les différentes approches de la criticité et l'évaluation qui en découle 25
Tableau 8. Principes de modélisation des facteurs de caractérisation des méthodes traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels GaBi et Simapro 26
Tableau 9. Détail des ressources dont l'épuisement est potentiellement évité pour chaque scénario et méthode de caractérisation utilisée 35
Tableau 10. Liste des principaux flux élémentaires contributeurs par méthode de calcul 37

Figures

Figure 1. Echéancier du projet PRC17.6 7
Figure 2. Historique du développement des méthodes de caractérisation en ACV et d'évaluation de la criticité des ressources 12
Figure 3. Nombre de ressources minérales évaluées pour chaque méthode de caractérisation ACV 14
Figure 4. Risque d'approvisionnement en fonction de la vulnérabilité 15
Figure 5. Eléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité (d'après [15]) 16
Figure 6. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par Graedel et al. [30,48] 17
Figure 7. Méthode d'évaluation de la criticité au niveau national proposée par la Commission Européenne [50,51] 18
Figure 8. Résultats 2017 de l'évaluation de la criticité au regard de l'importance économique et du risque d'approvisionnement [52] 19
Figure 9. Evaluation des indicateurs de criticité selon [48] 20
Figure 10. Principaux métaux contribuant à l'impact d'épuisement des ressources naturelles pour un téléphone mobile 27
Figure 11. Exemple de section de câble de télécommunication optique sous-marin (source : Orange) 28
Figure 12. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble 29
Figure 13. 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 30
Figure 14. Frontières du système pour l'ACV des produits fertilisants phosphatés boue-sourcés 31
Figure 15. Impacts générés (a) et balance (b) obtenus pour l'impact Abiotic Ressources Depletion (ultimate reserves) pour chaque scenario étudié 32
Figure 16. 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)) 33
Figure 17. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode ReCiPe2016 (version Egalitarian (E), Hierarchist (H) et Individualist (I)) 34
Figure 18. 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)) 36
Figure 19. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon la méthode de calcul de l'indicateur MD 37

Sigles et acronymes

AADP	Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential
ACCV	Analyse du Coût du Cycle de Vie
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADCV	Analyse de Durabilité du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADP	Abiotic Depletion Potential
ASCV	Analyse Sociale du Cycle de Vie
BRGM	Bureau de Recherche Géologiques et Minières
CEA	Centre de l'Energie Atomiques
CML	Centre for Environmental Studies, Leiden, Netherlands
EcoSD	Ecoconception de Systèmes Durables
ER	Economic reserves
ESP	Economic resource Scarcity Potential
EVEA	Evaluation Et Accompagnement
FC	Facteur de Caractérisation
GRI	Global Resource Indicator
GWI	Worldwide Governance Indicator
HHI	Herfindahl Hirschman Index
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
IDH	Indice de Développement Humain
Irstea	Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
ITO	Indium-Tin Oxide
JRC	Joint Research Centre
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
MD	Metal Depletion
MFA	Material Flow Analysis
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
PIB	Produit Intérieur Brut
PSA	Peugeot Société Anonyme
RB	Reserves Base
RTE	Réseau de Transport d'Electricité
SETAC	Society of Environmental Toxicology And Chemistry
TSP	Triple Super Phosphate
UE	Union Européenne
UF	Unité Fonctionnelle
UNEP	United Nations Environment Program
UR	Ultimate Reserves
USGS	United States Geological Survey
WGI	World Governance Indicator

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. The Agency provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work ADEME helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

ADEME is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Education, Higher Education and Research.

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr