

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 – Synthèse

Mars 2019

N° de contrat :
Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *Non renseigné⁽¹⁾*

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



SYNTHESE D'ETUDE

En partenariat avec :



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 CETTE SYNTHÈSE

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 – Synthèse. 36 pages.

Si le rapport est en ligne ajouter : Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr, rubrique Médiathèque (URL)

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

1. Contexte du projet	4
2. Méthodologie mise en place pour la recherche bibliographique	5
3. Principaux résultats obtenus	7
3.1. Etat des lieux des indicateurs ACV d'épuisement des ressources en ACV	7
3.1.1. Principaux types de modélisation des ressources en ACV	7
3.1.2. Principales méthodes disponibles en ACV pour évaluer l'épuisement des ressources	8
3.1.3. Développements méthodologiques en cours	9
3.2. Etat des lieux des indicateurs de criticité des ressources	10
3.2.1. Principe de criticité des ressources	10
3.2.2. Études existantes sur la criticité : du concept à une transposition en ACV	12
3.2.3. Proposition d'améliorations de l'évaluation de la criticité	12
3.3. Lien entre ACV et criticité	14
3.3.1. Les indicateurs ACV comme indicateurs de criticité	14
3.3.2. Les indicateurs de criticité dans la méthode ACV	14
3.4. Implémentation des méthodes de caractérisation traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels ACV	16
4. Mise en œuvre sur des cas applicatifs	18
4.1. Cas de l'indium sur lien ICV/LCIA	18
4.2. Cas du germanium sur lien ICV/LCIA	19
4.3. Cas de la récupération du phosphore issu des boues d'épuration urbaines	22
4.4. Cas des batteries de véhicules électriques	27
5. Conclusions / Perspectives	29
Références bibliographiques	30
Index des tableaux et figures	32
Sigles et acronymes	33

1. Contexte du projet

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 collaboratif 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 la présente synthèse. Le guide de bonnes pratiques sera remis aux membres du réseau EcoSD lors de la présentation des résultats en juin 2019.

2. Méthodologie mise en place pour la recherche bibliographique

Un 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 valorization"]
- 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 ensuite été réalisée 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**.

Afin d'analyser les articles de manière pertinente et identique, des grilles de lectures ont été constituées et 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'ACY ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACY ?	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 ("dépletion")		Criticité	
											ACY	Non ACY	ACY	Non ACY
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) et sont détaillés.				
Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools	Finnveden, G., Arushanyan, 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 ("dépletion") des ressources	oui	non	oui	non	* Mesure de l'utilisation des ressources par l'exergie en ACY ("dépletion") * 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 Energy Demand (CED), 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 montrant que c'est réellement consommé.				

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 Cycle 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 ACY/criticité

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

3. Principaux résultats obtenus

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 :

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

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 le type de réserves étudié (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.

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

MCI_{r,kg} : augmentation marginale du coût d'extraction, en \$/kg²
 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.

Méthode basée sur le surcoût énergétique :

Elle repose sur l'effort fait pour extraire une ressource dans le futur. Ce point dans le futur est une hypothèse de travail, définie par les auteurs de la méthode comme étant le moment où la quantité extraite cumulée de la ressource i aura atteint 5 fois la quantité extraite cumulée avant 1990. Cet effort est estimé par le surcoût énergétique engendré pour l'exploitation de la ressource.

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

ΔE_i : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i

$E_{\text{actuelle } i}$: Énergie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement

$E_{\text{future } i}$: Énergie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir

(Méthode EI99)

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

Méthode basée sur la thermodynamique (exergie et entropie) :

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 (1^{ère} loi de la thermodynamique), l'énergie utile peut être consommée ou transformée en un autre type d'énergie, l'entropie (2^{ème} 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 :

$$E_{\text{ch}} = \sum n_i e_{\text{ch},i}$$

Avec :

n_i , la quantité de matière i (nombre de moles dans la substance) ;

$e_{\text{ch},i}$, 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 développées 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 1 en parallèle des méthodes d'évaluation de la criticité des ressources.

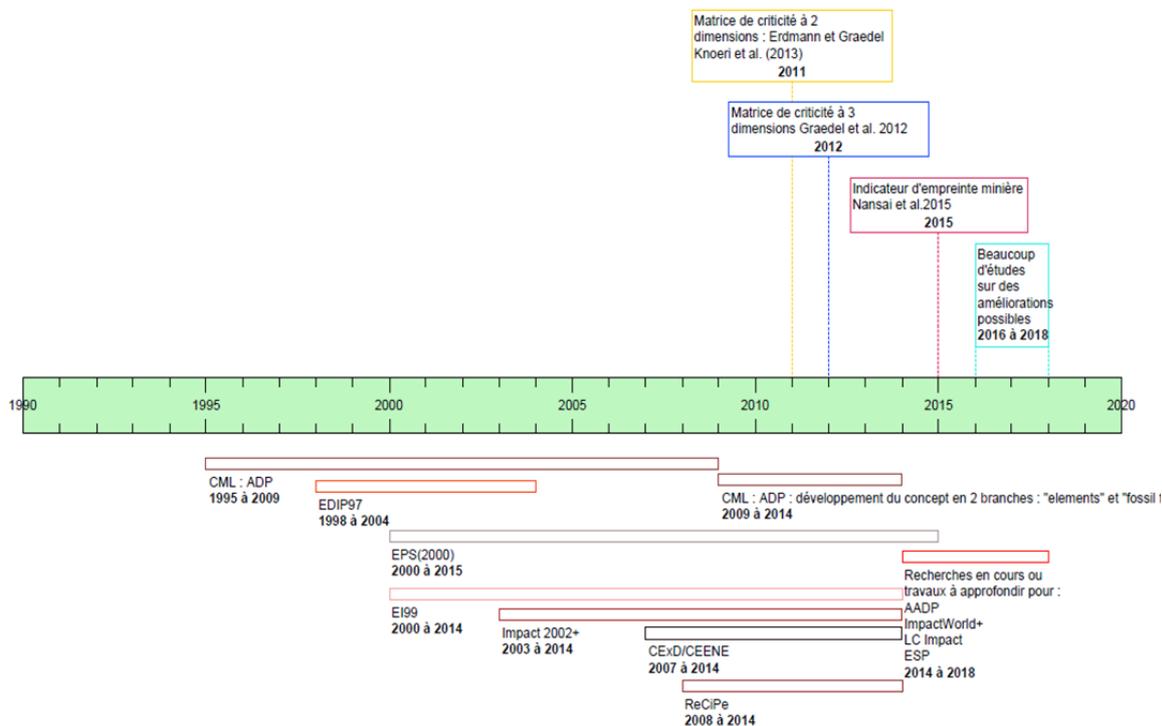


Figure 1. Historique du développement des méthodes de caractérisation en ACV et d'évaluation de la criticité des ressources

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

3.2. 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 entraîné 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).

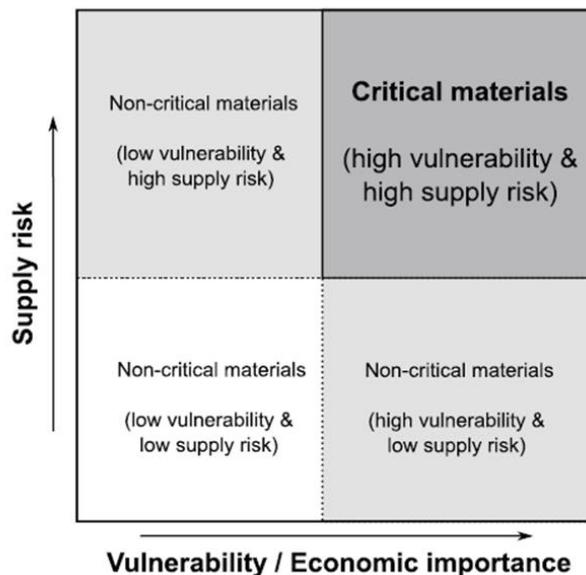


Figure 2. Risque d'approvisionnement en fonction de la vulnérabilité

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 2). Issues directement du concept de matrice de criticité, les éléments faisant consensus dans l'évaluation de la criticité sont les suivants [15] :

- Le risque d'approvisionnement. Il permet d'évaluer le risque de perturbation ou d'interruption dans la fourniture d'un matériau. Les sous-indicateurs utilisés sont :
 - Géologiques ; il s'agit 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 : 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.
 - Géopolitiques ; qui traitent des obstacles pouvant empêcher un approvisionnement « normal » en un matériau. Il s'agit de prendre en compte l'offre offerte par les pays fournisseurs, en considérant une matière ; mais également les politiques de ces pays afin d'évaluer leur stabilité. Pour cela, 2 sous-indicateurs sont utilisés :
 - Le partage de l'offre mondiale (« Global Supply Share ») représentant le degré de « monopole » qu'a 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.
 - La sécurité politique du pays (donné par le Worldwide Governance Indicator). Il s'agit ici d'évaluer si le pays producteur est assujéti aux conflits, par exemple. Beaucoup d'études le préconise 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. Elle évalue l'importance qu'ont les différentes ressources pour un pays, une région, voire un secteur d'activités. Elle est donnée par :
 - L'importance économique. La ressource est évaluée pour une entreprise ou une région géographique, c'est-à-dire que nous prenons en compte 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).
 - La substituabilité, qui correspond à la capacité d'une ressource à être remplacée par une autre. Si une ressource est facilement remplaçable (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. 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 chaînes 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].

3.2.3. 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.

Meilleure prise en compte du recyclage

- 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 paraît presque irréalisable tant le nombre de technologies pour une même fonctionnalité est important. Un des autres constats effectués 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 Eathley (2008) [28], Moss et al. (2013) [29], ou encore la méthode japonaise NEDO. Cependant, ces travaux sont complexes et dépendent d'une technologie qui peut être amenée à évoluer, voire disparaître.

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 [30])
- En intégrant des indicateurs de criticité dans la méthode ACV (cas de Mancini et al., 2016 [35] et de Sonnemann et al, 2015 [16])

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 Sonnemann 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 Sonnemann 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 (2015), 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 cet article, 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 5 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 défailante (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 6.

Dans le Tableau 6, 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 conclut 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 5. La criticité, un concept multidimensionnel d'après [35]

	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 6. Les différentes approches de la criticité et l'évaluation qui en découle d'après [35]

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 constituant 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.

Cette différenciation se répercute également sur la manière dont sont pris en compte les facteurs de caractérisation. 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 ₂ O ₅) [Non renewable resources]	6.98E-07	FC proportionnel au minerai pur	6.98E-07
Phosphate (P ₂ O 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 7.

	GABI	SIMAPRO
Modélisation ICV	Eléments simples + Ressources minérales	Eléments simples
FC	Eléments simples + ressources minérales FC = \sum FC éléments au prorata de la composition de la ressource <u>Ex</u> : Bauxite : Al ₂ O ₃ à 65.38% d'Al = [FC(Al) * 2 * M(Al) * 0.6538] / M(Al ₂ O ₃)	Eléments simples FC = Elément simples <u>Ex</u> : 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 7. Principes de modélisation des facteurs de caractérisation des méthodes traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels GaBi et Simapro

4. Mise en œuvre sur des cas applicatifs

4.1. 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 3 colonne de gauche).

En 2012, la Commission Européenne lançait un appel à candidature pour tester la méthode « Product Environmental Footprint »¹. Pour les besoins de cette étude, la méthode d'analyse de l'épuisement des ressources préconisée était celle mentionnée dans le guide ILCD², 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 3. La version ultimate reserves (UR) de CML-IA ARD fût aussi testée dans le cadre de cette analyse (cf. Figure 3, deuxième colonne en partant de la droite), avec l'or apparaissant comme contributeur majoritaire.

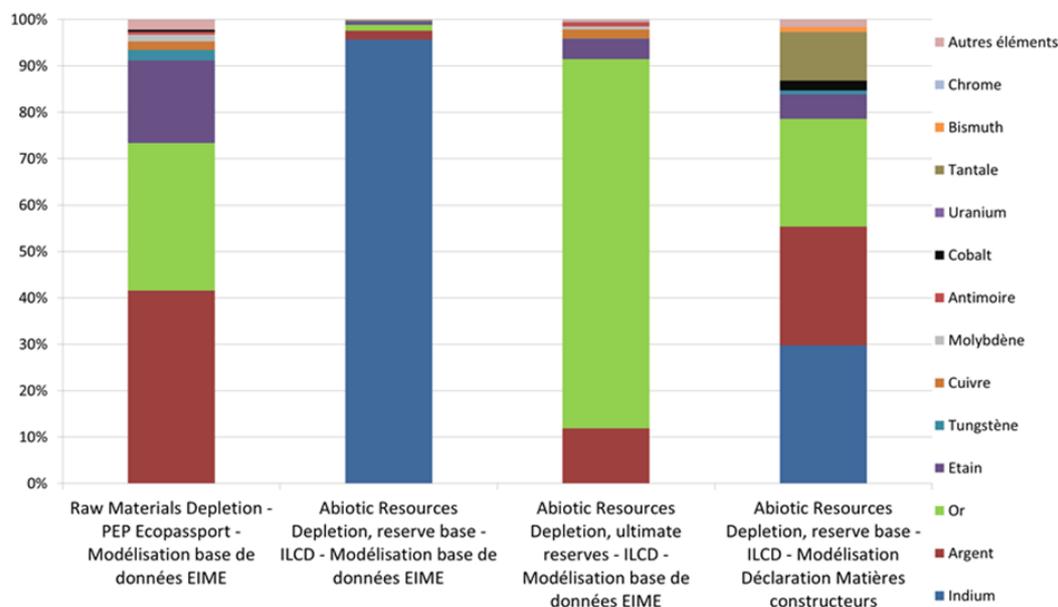


Figure 3. Principaux métaux contribuant à l'impact d'épuisement des ressources naturelles pour un téléphone mobile

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

¹ http://ec.europa.eu/environment/eussd/smcp/dev_methods.htm

² Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (2010), JRC (http://ec.europa.eu/environment/eussd/smcp/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 3 (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).

4.2. 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 4 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.

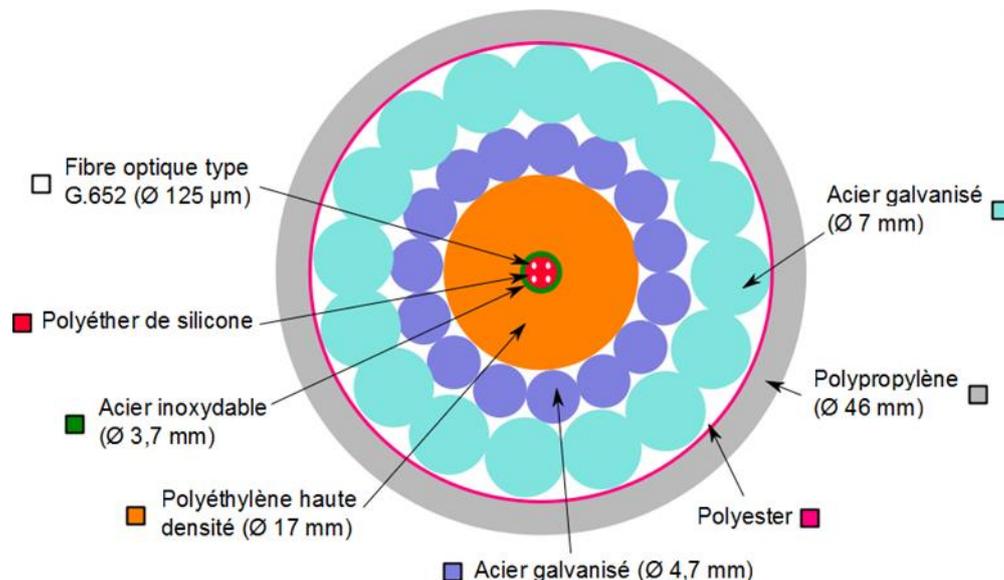


Figure 4. Exemple de section de câble de télécommunication optique sous-marin (source : Orange)

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 5 présente les principaux matériaux contributeurs à cet indicateur.

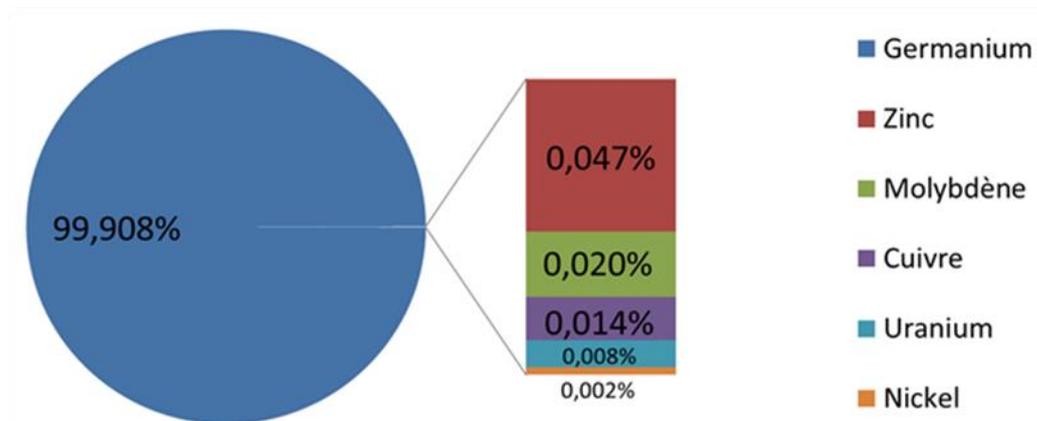


Figure 5. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble

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 7) il est possible de recalculer le facteur de caractérisation noté dans le paragraphe avec l'Équation 1.

Équation 1

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

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 (R_{sb}'), sa production annuelle (DR_{sb}') et la production annuelle de germanium (DR_{ge}') ont été combinées avec les valeurs de réserves de base de germanium (R_{ge}') pour la Chine en 2008 d'après [45]. L'Équation 2 donne le résultat de ce calcul.

Équation 2

$$ARD_{ge'} = \frac{\frac{DR_{ge'}}{(R_{ge'})^2}}{\frac{DR_{sb'}}{(R_{sb'})^2}} = \frac{\frac{105\,000}{(3\,055\,000)^2}}{\frac{165\,000\,000}{(4\,300\,000\,000)^2}} = 1\,260,72 \text{ kg equivalent Sb}$$

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

Équation 3

$$ARD_{ge''} = \frac{\frac{DR_{ge'}}{(R_{ge''})^2}}{\frac{DR_{sb'}}{(R_{sb'})^2}} = \frac{\frac{105\,000}{(38\,000\,000)^2}}{\frac{165\,000\,000}{(4\,300\,000\,000)^2}} = 8,15 \text{ kg equivalent Sb}$$

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 6.

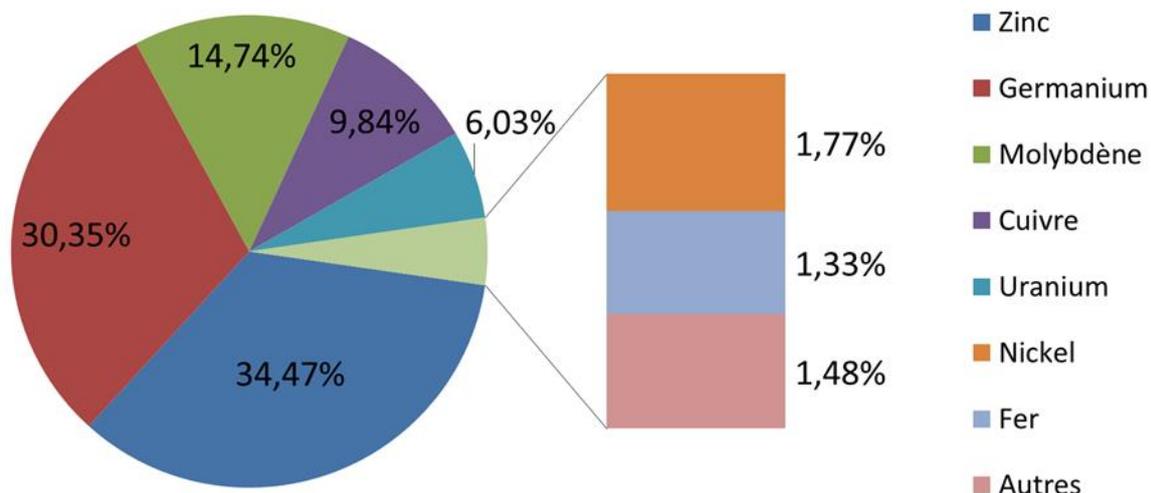


Figure 6. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble après révision de la valeur du facteur de caractérisation du germanium à 8,15

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 $1,66 \cdot 10^{-6}$ pour le fer à $1,95 \cdot 10^{-4}$ pour le germanium, soit un rapport de 1 pour $1,17 \cdot 10^{10}$. 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 3).

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.

4.3. 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 7 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.

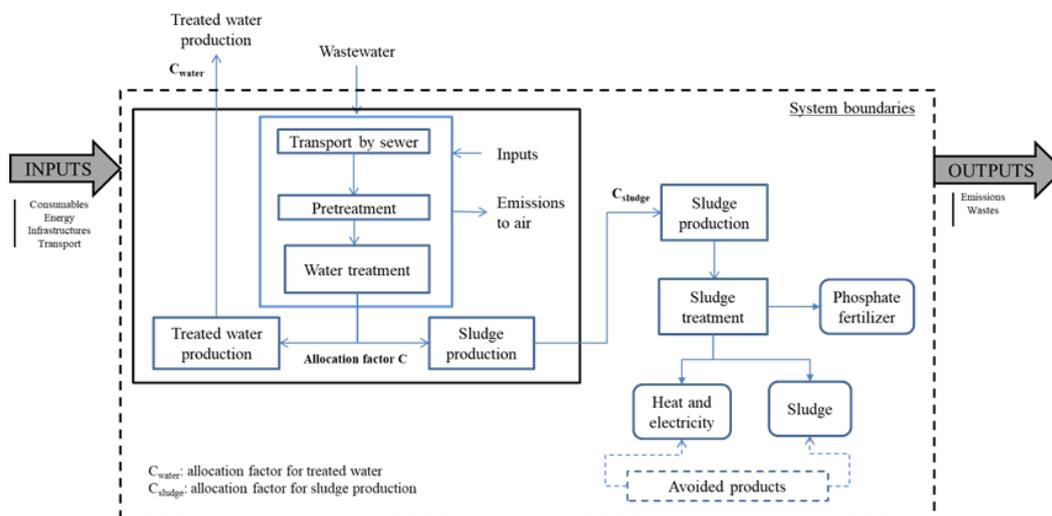


Figure 7. Frontières du système pour l'ACV des produits fertilisants phosphatés boue-sourcés

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 8).

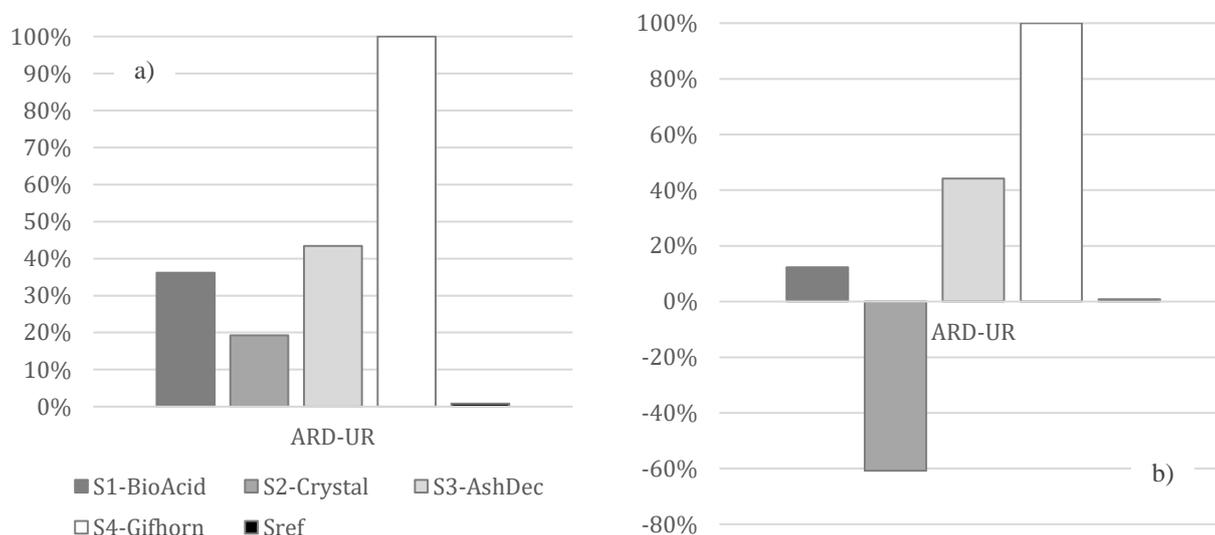


Figure 8. Impacts générés (a) et balance (b) obtenus pour l'impact Abiotic Ressources Depletion (ultimate reserves) pour chaque scénario étudié

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 9 et Figure 10.

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 9) 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 profit de l'or, du gypse et du sodium chloride.

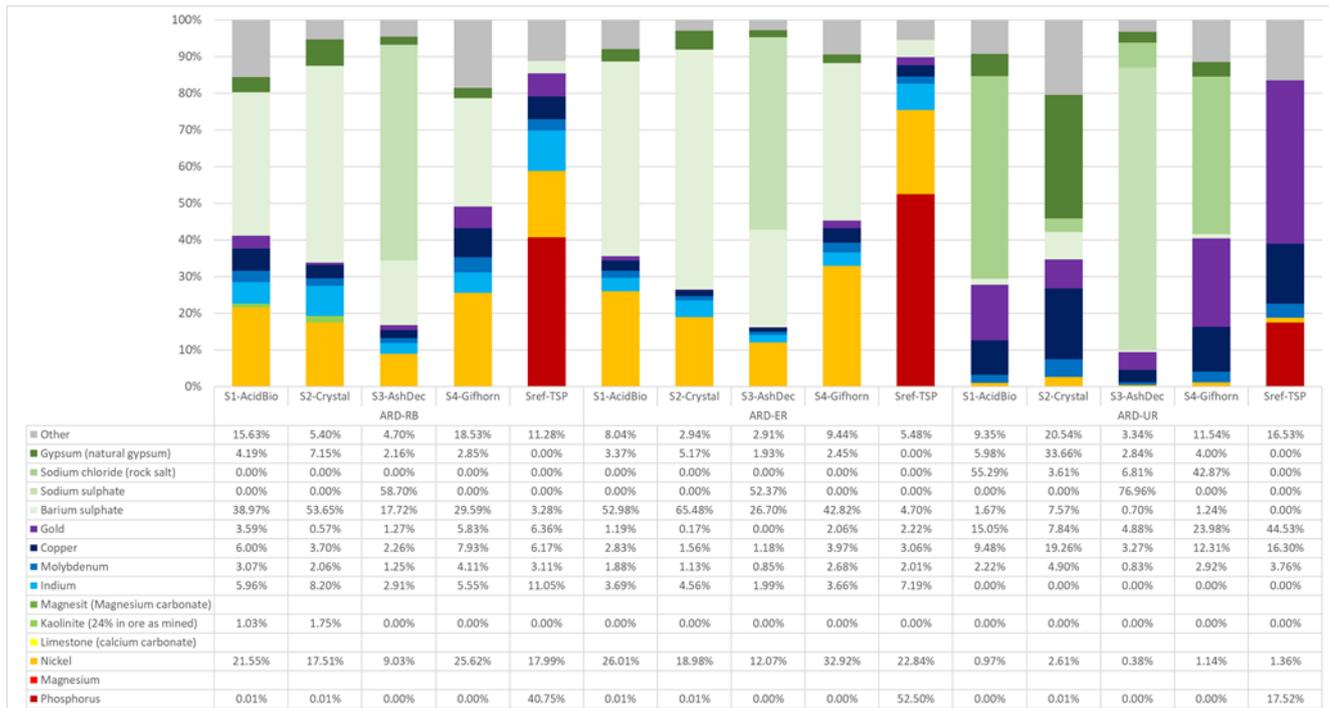


Figure 9. Détail des ressources mobilisées pour les impacts générés avec la méthode CML-IA ARD (version reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR))

Les ressources contributrices aux impacts de l'indicateur MD de la méthode ReCiPe2016 sont différentes (Figure 10). 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.

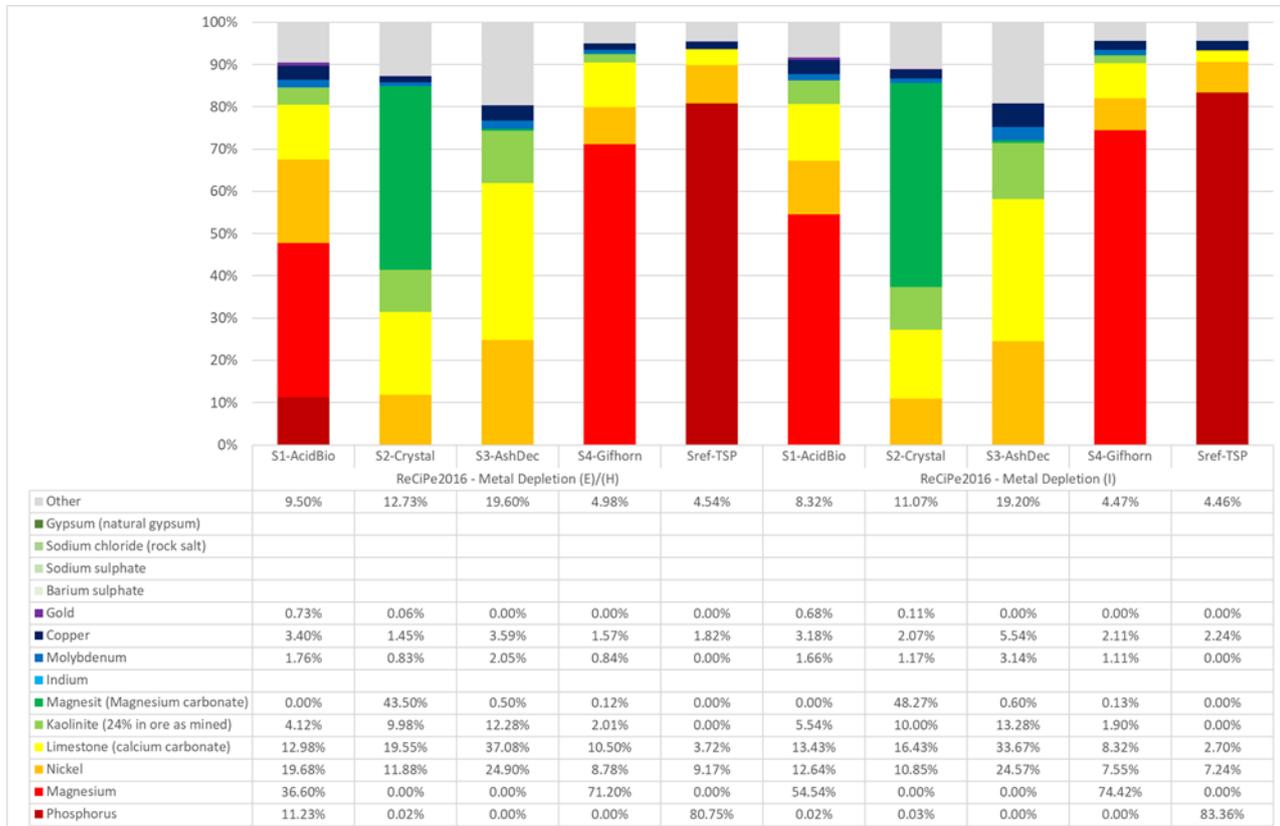


Figure 10. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode ReCiPe2016 (version Egalitarian (E), Hierarchist (H) et Individualist (I))

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 8.

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

4.4. 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 11 et Figure 12 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.

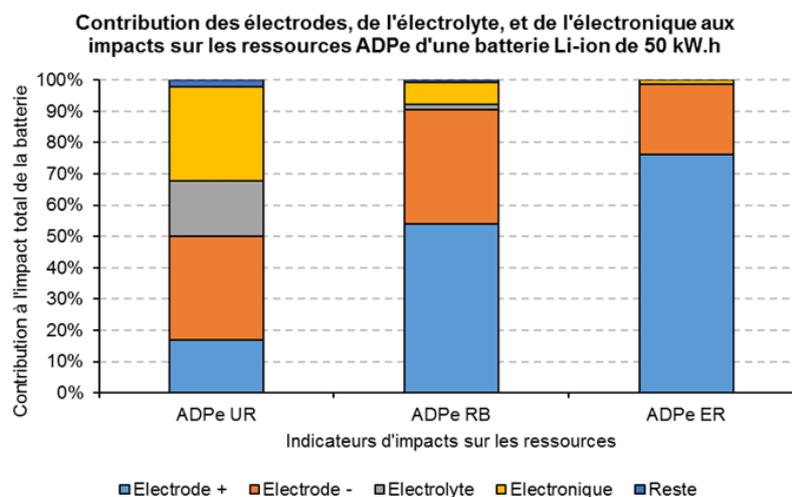


Figure 11. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon les trois versions de calcul de la méthode CML-IA Abiotic Depletion Potential (reserve base (RB), economic reserve (ER) et ultimate reserve (UR))

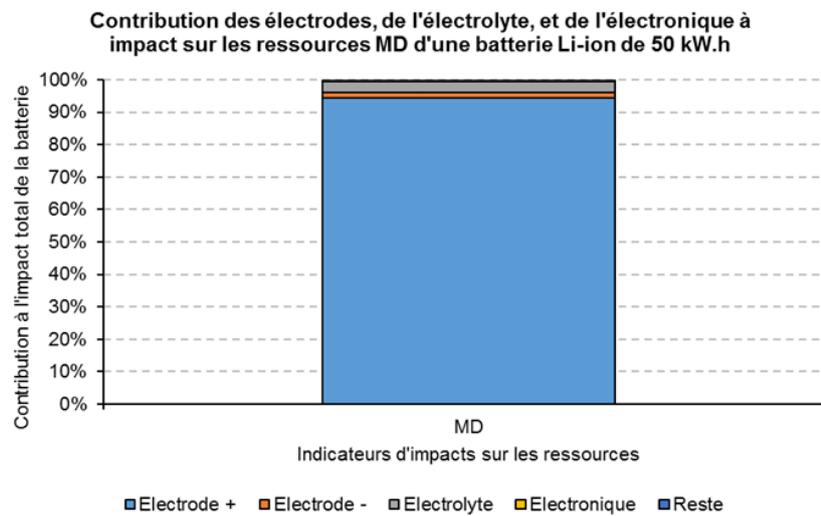


Figure 12. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon la méthode de calcul de l'indicateur MD

Le Tableau 9 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%
	<i>Reste</i>	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%
	<i>Reste</i>	14%
ADP-ER	Nickel [Non renewable elements]	42%
	Lithium [Non renewable elements]	33%
	Indium [Non renewable elements]	9%
	Sulphur [Non renewable elements]	3%
	<i>Reste</i>	13%
MD	Magnesium [Non renewable elements]	56%
	Lithium chloride solution [Non renewable resources]	34%
	<i>Reste</i>	10%

Tableau 9. 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.

5. 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 risks dan 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. Mieke, 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. Eathley, *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_métaux_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.

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1. Croisement des requêtes deux à deux	5
Tableau 2. Croisement des requêtes trois par trois	5
Tableau 3. Exemple de tableau de synthèse relatif aux questions génériques	6
Tableau 4. Exemple de tableau de synthèse relatif au thème ACV/criticité	6
Tableau 5. La criticité, un concept multidimensionnel d'après [35].....	15
Tableau 6. Les différentes approches de la criticité et l'évaluation qui en découle d'après [35]	16
Tableau 7. Principes de modélisation des facteurs de caractérisation des méthodes traitant de l'épuisement des ressources dans les logiciels GaBi et Simapro	17
Tableau 8. Détail des ressources dont l'épuisement est potentiellement évité pour chaque scénario et méthode de caractérisation utilisée	26
Tableau 9. Liste des principaux flux élémentaires contributeurs par méthode de calcul.....	28

Figures

Figure 1. Historique du développement des méthodes de caractérisation en ACV et d'évaluation de la criticité des ressources	9
Figure 2. Risque d'approvisionnement en fonction de la vulnérabilité	11
Figure 3. Principaux métaux contribuant à l'impact d'épuisement des ressources naturelles pour un téléphone mobile 18	
Figure 4. Exemple de section de câble de télécommunication optique sous-marin (source : Orange).....	19
Figure 5. Principaux matériaux contributeurs à l'impact Abiotic Resources Depletion pour la fabrication du câble	20
Figure 6. 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.....	21
Figure 7. Frontières du système pour l'ACV des produits fertilisants phosphatés boue-sourcés.....	22
Figure 8. Impacts générés (a) et balance (b) obtenus pour l'impact Abiotic Ressources Depletion (ultimate reserves) pour chaque scénario étudié	23
Figure 9. 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)).....	24
Figure 10. Détail des ressources mobilisés pour les impacts générés avec la méthode ReCiPe2016 (version Egalitarian (E), Hierarchist (H) et Individualist (I))	25
Figure 11. 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)).....	27
Figure 12. Contribution des principaux éléments d'une batterie Lithium-ion selon la méthode de calcul de l'indicateur MD	28

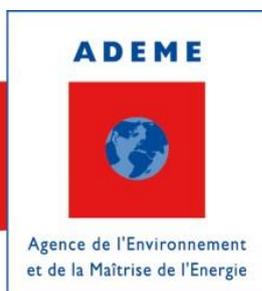
Sigles et acronymes

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
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
ASCV	Analyse Sociale du Cycle de Vie
BRGM	Bureau de Recherche Géologiques et Minières
CEA	Centre de l'Energie Atomiques
EcoSD	Ecoconception de Systèmes Durables
ER	Economic reserves
ESP	Economic resource Scarcity Potential
EVEA	Evaluation Et Accompagnement
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
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
UF	Unité Fonctionnelle
UNEP	United Nations Environment Program
UR	Ultimate Reserves

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

www.ademe.fr