



**HAL**  
open science

# Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en Analyse du Cycle de Vie

Alexis Lalevée

► **To cite this version:**

Alexis Lalevée. Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en Analyse du Cycle de Vie. Sciences de l'environnement. 2018. hal-04687540

**HAL Id: hal-04687540**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04687540v1>**

Submitted on 4 Sep 2024

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

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

Public Domain

# Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en Analyse du Cycle de Vie

LALEVÉE Alexis

Master IMEDD

Responsable pédagogique UTT :  
Mme Tatiana Reyes-Carrillo

Semestre : Automne 2018

## Résumé :

Ce stage s'est déroulé à l'Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) sur le site de recherche et d'expérimentation du centre de Clermont-Ferrand (Montoldre, Allier).

L'épuisement des ressources minérales est un enjeu majeur d'autant plus que certaines d'entre elles sont considérées comme critiques. L'objectif de mon stage est de rendre compte des différentes méthodes utilisées pour mesurer l'épuisement des ressources et de faire une synthèse de la prise en compte de la criticité des ressources dans la littérature scientifique, à travers notamment de l'Analyse du Cycle de Vie. Une application à des cas industriels est faite pour le phosphore (agriculture), l'indium (téléphonie) et le cobalt (automobile).

Les premiers résultats de ce travail montrent une grande hétérogénéité des méthodes, la nécessité de développer un indicateur fiable pour évaluer la criticité des ressources et que le recyclage peut apporter pour partie une solution à ce problème conséquent.

**Entreprise :** IRSTEA

**Lieu :** Montoldre (03)

**Responsable :** Marilyns Pradel

## Mots clés

- Recherche appliquée, développement
- Services non marchands (fonction publique)
- Environnement
- Analyse du Cycle de Vie

## Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Marilys Pradel, ingénieure de recherche en évaluation environnementale du centre de recherche de l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) de Clermont-Ferrand, site de Montoldre pour m'avoir permis d'effectuer ce stage. Par son enthousiasme, sa rigueur et son implication, elle a su m'encourager à mener à bien mon premier travail de recherche. Je la remercie pour sa patience et pour le temps qu'elle a su me consacrer ; ainsi que pour la confiance qu'elle a su m'accorder et l'autonomie que j'ai pu avoir lors de ce stage.

Je tiens également à remercier le directeur de l'Unité de Recherche « Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes », Monsieur Jean-Pierre Chanut ainsi que le directeur régional du centre Irstea de Clermont-Ferrand, Monsieur Emmanuel Hugo, sans qui ce stage n'aurait pas été possible.

Tous mes remerciements vont à l'ensemble du personnel du site Irstea de Montoldre. Son accueil fut chaleureux et m'a permis de me sentir très vite à l'aise dans mon environnement de travail mais aussi dans une région qui était pour moi inconnue jusque-là.

Je tenais à souligner également l'importance du réseau EcoSD qui m'a permis d'avoir un sujet de stage particulièrement intéressant et tout spécialement Julien Garcia (Groupe PSA) et Samuli Vaija (Orange) ainsi que son stagiaire, Eric Philipot, pour la qualité des échanges que nous avons pu avoir.

J'aimerais remercier ma professeur d'écoconception et tutrice lors de ce stage, Madame Tatiana Reyes-Carrillo, qui a su répondre à mes interrogations lorsque j'en avais ainsi que Madame Sabrina Dermine-Brullot qui m'a conseillé comme il se doit lors de la recherche de stage.

Enfin, je tenais à remercier l'ensemble des professeurs et intervenants que j'ai rencontrés durant ces deux années de master et qui sont le socle des connaissances que j'ai aujourd'hui et qui ont su me donner envie de continuer mon parcours vers une thèse.

## Table des matières

Remerciements .....	2
Table des figures.....	4
Table des tableaux.....	4
Glossaire .....	4
Introduction.....	5
1. Irstea : un institut de recherche en environnement et agriculture .....	6
1.1. Le fonctionnement de l’institut.....	6
1.2. De l’Unité de Recherche TSCF à la problématique de criticité des ressources.....	6
2. Pourquoi prendre en compte la criticité des ressources en ACV ?.....	8
2.1. Un contexte de recherche important.....	8
2.2. Problématique traitée dans le stage .....	9
3. Comment aborder la criticité des ressources en ACV ? .....	11
3.1. Qu’entend-on par « criticité des ressources » ? .....	11
3.2. Méthode de travail mise en place.....	12
3.2.1. Détermination des mots clés et requêtes pour l’analyse bibliographique .....	12
3.2.2. Croisement des requêtes pour affiner les résultats de l’analyse bibliographique.....	14
3.2.3. Établissement d’un corpus complémentaire.....	15
3.2.4. Établissement de grilles de lectures pour l’analyse bibliographique .....	15
4. Principaux résultats obtenus.....	17
4.1. L’épuisement des ressources en ACV.....	17
4.1.1. Étude des méthodes de caractérisation de l’épuisement des ressources .....	17
4.1.2. Résultats de l’étude des méthodes de caractérisation de l’épuisement des ressources en ACV .....	22
4.1.3. Quelles améliorations pour ces méthodes de caractérisation ? .....	23
4.2. La criticité des ressources en ACV .....	24
4.2.1. Tableau récapitulatif sur la criticité des ressources .....	24
4.2.2. Limites des méthodes évaluant la criticité des ressources et recommandations.....	30
4.2.3. Difficultés rencontrées pour apporter des solutions à la prise en compte de la criticité des ressources en ACV .....	32
4.3. Étude des différentes ressources d’intérêt : les fiches de criticité des matériaux .....	33
Conclusion .....	37
Bibliographie.....	39
Annexes .....	42

## Table des figures

Figure 1 : Matrice représentant les facteurs de l'évaluation de la criticité. ....	11
Figure 2 : Illustration des différents niveaux de réserves dans l'environnement selon Van Oers, 2002, par (Deloitte 2013) .....	22
Figure 3 : La criticité : différences et points communs entre 2 méthodes d'évaluation .....	24
Figure 4 : Usage du cobalt dans le monde .....	34
Figure 5 : Répartition de la production mondiale du cobalt. ....	34
Figure 6 : Répartition des réserves mondiales de cobalt. ....	35
Figure 7 : Représentation de la criticité du cobalt .....	35
Figure 8 : Diagramme de Sankey du cobalt.....	76

## Table des tableaux

Tableau 1 : Ressources identifiées comme critiques par l'UE.....	12
Tableau 2 : Tableau de croisement des requêtes deux à deux .....	14
Tableau 3 : Tableau de croisement des requêtes trois à trois .....	15
Tableau 4 : Exemple de fiche récapitulative des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources.....	20
Tableau 5 : La criticité : différentes variantes et travaux existants.....	26
Tableau 6 : Tableau général d'étude des publications.....	43
Tableau 7 : Tableau d'étude de la criticité .....	52
Tableau 8 : Tableau d'étude du recyclage.....	55

## Glossaire

AADP: Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential

ADCV: Analyse de Durabilité du Cycle de Vie

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

ADP : Abiotic Depletion Potential

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

EcoSD : Écoconception de Systèmes Durables

GRI : Global Resource Indicator

ILCD : International Reference Life Cycle Data System

Irstea : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

PRT PEE : Plateau de Recherche Technologique Pôle Épandage Environnement

UE : Union Européenne

UR : Unité de Recherche

## Introduction

Une des questions que l'on pourrait me poser est : pourquoi avoir choisi de faire un stage dans la recherche ? Il est vrai que continuer après un master ne convient pas à tout le monde mais mon envie de connaître véritablement le monde de la recherche m'a « poussé » à effectuer ce stage et ainsi me rendre compte si je devais, ou non, continuer par la suite.

Une autre question qui pourrait être posée est : pourquoi l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies de l'Environnement et de l'Agriculture (Irstea) ? Après des recherches sur des sujets de stage qui m'intéressaient, j'ai choisi ce sujet proposé par IRSTEA en collaboration avec Orange et le groupe PSA pour son sujet, la criticité des ressources – qui me semblait intéressante – mais aussi comme un défi car l'Analyse du Cycle de Vie, bien que dans mes compétences, ne semblait pas être mon domaine de prédilection, qui aurait plutôt été l'écologie industrielle. Ce qui m'a fait choisir ce sujet est l'approche « agriculture » que peut avoir l'institut de recherche. Bien que je ne le mentionnerai que très rapidement durant ce rapport, j'ai pu acquérir certaines bases qui me semblent indispensables pour travailler dans l'environnement mais aussi au quotidien, notamment à travers mes recherches sur le phosphore (P) et à travers des discussions avec certains de mes collègues.

Pour conclure cette introduction, je tenais à souligner qu'à l'heure du rendu de ce rapport, il me reste encore 6 semaines de stage et que, par conséquent, il ne pourra pas être exhaustif ; bien que la majorité de la méthodologie y soit présente et une partie des résultats.

Nous ferons dans un premier temps la découverte d'Irstea, son fonctionnement et les projets de recherche qui y sont menés, et nous ferons le lien avec mon stage. Par la suite, nous verrons dans quel contexte s'inscrit mon stage et les missions qui m'ont été confiées. Dans une troisième partie, nous verrons le travail que j'ai réalisé et les compétences que j'ai pu mettre en œuvre. Avant de conclure, nous pourrons relater les (premiers) résultats obtenus et voir en quoi mon travail peut être utile aux chercheurs et aux travaux de recherche.

# 1. Irstea : un institut de recherche en environnement et agriculture

## 1.1. Le fonctionnement de l'institut<sup>1</sup>

Irstea a le statut d'établissement public à caractère scientifique et technologique. Cet institut compte 3 départements de recherche, eaux, écotechnologies et territoires. L'établissement travaille depuis plus de 30 ans sur les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés (sécheresse, crues, inondations), l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaines. Avec près de 1500 collaborateurs (dont 1100 chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants) répartis dans 19 unités de recherche dans 9 centres, Irstea a pour ambition d'être un des leaders européens de la recherche pour l'environnement et la référence scientifique pour l'appui aux politiques publiques. Irstea vise à étendre son modèle de recherche en le mettant au service des politiques européennes.

Chaque unité de recherche (UR) est sous la responsabilité fonctionnelle du chef du département auquel il se rattache et sous la responsabilité hiérarchique du directeur du centre régional. Ces UR sont les lieux de gestion des compétences ainsi que des pôles relationnels locaux. Chacune d'entre-elle est constituée d'équipes clairement identifiées. Chacune de ces équipes assure une mise en œuvre totale ou partielle d'un thème de recherche. Nous allons détailler ci-dessous l'UR TSCF (Technologies et Systèmes d'Information pour les Agrosystèmes) dans laquelle j'ai pu être intégré puis l'équipe de recherche PRT PEE (Plateau de Recherche Technologique Pôle Épandage Environnement) au sein de laquelle j'ai effectué mon stage.

## 1.2. De l'Unité de Recherche TSCF<sup>2</sup> à la problématique de criticité des ressources

L'Unité de Recherche fait partie du département « Écotechnologie » d'Irstea. Elle est composée de 3 équipes, qui rassemblent 60 agents, et implantée sur 2 sites : le pôle scientifique et universitaire des Cézeaux, à Aubière (63), et le site de recherche et d'expérimentation de Montoldre (03), lieu de mon stage.

Grâce à ses travaux de recherche technologique, l'UR ambitionne d'apporter des réponses concrètes aux besoins d'une agriculture productive écologiquement responsable et de la gestion de l'environnement. Pour cela, elle mobilise les sciences pour l'ingénieur et les sciences et technologies de l'information et de la communication pour conduire des recherches sur les méthodes et outils pour une ingénierie des systèmes agro-environnementaux. Une partie des activités de l'UR cherche donc à évaluer la durabilité environnementale des systèmes technologiques au moyen de l'Analyse du Cycle de Vie. L'objectif est de pouvoir développer à moyen terme des méthodes permettant de déterminer de manière pertinente l'impact environnemental de ces systèmes technologiques sur l'ensemble de leur cycle de vie (produits déchet-sourcés, technologie d'épandage et robotique agricole) et d'améliorer la méthode d'Analyse du Cycle de Vie pour répondre à ces enjeux.

---

<sup>1</sup> D'après les sites : <http://www.irstea.fr/linstitut/chiffres-cles> et <http://www.irstea.fr/linstitut/positionnement>

<sup>2</sup> D'après le site d'Irstea : <http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/tscf>

L'ACV<sup>3</sup> permet de modéliser les flux environnementaux (flux de matières et d'énergie, émissions) en termes d'impacts environnementaux potentiels à l'aide de modèles mathématiques décrivant les mécanismes qui ont lieu une fois la substance émise, appelés chaînes de causalité. L'ACV est un outil d'analyse multicritère des impacts environnementaux. L'ACV adopte une approche normalisée ISO 14000 (série des normes ISO 14040), avec une méthodologie bien définie comprenant des étapes obligatoires :

- **Étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude**  
Phase 1. Objectifs et champs de l'étude  
Phase 2. Fonction du produit et unité fonctionnelle  
Phase 3. Frontières du système
- **Étape 2 : Inventaire des données sur le cycle de vie**  
Collecte de données
- **Étape 3. Modélisation des impacts environnementaux générés sur l'ensemble du cycle de vie**  
Les méthodes dites "orientées problème" (mid-point)  
Les méthodes dites "orientée dommage" (end-point)  
Phase 1. Caractérisation  
Phase 2. Normalisation  
Phase 3. Pondération
- **Étape 4. Interprétation des résultats et définition des axes d'améliorations prioritaires**  
Cette étape est la plus complexe car l'analyse d'une ACV demande des connaissances et une expertise approfondie.

En ACV, lors de l'étape de caractérisation, les impacts environnementaux orientés « problème » (mid-point) sont calculés de la manière suivante :

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

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

Selon les méthodes de caractérisation, les facteurs de caractérisation peuvent différer selon la modélisation mathématique utilisée par les concepteurs et les modalités de construction des chaînes de causalité. Ce volet ACV est transversal aux activités de recherches et permet de répondre à des problématiques sociétales fortes, notamment celle liée au développement de solutions durables pour pallier à l'épuisement des ressources naturelles. La méthode ACV a aussi ses limites : comment caractériser les impacts d'épuisement des ressources ? Pour assurer le développement de solutions technologiques durables, quelles sont les ressources dont nous avons un besoin vital ?

Ces questionnements sont à l'origine de la problématique étudiée dans le cadre de mon stage.

---

<sup>3</sup> La source utilisée pour décrire les différentes étapes de l'ACV est le site de l'association Orée : <http://ecoconception.oree.org/acv.html>



## 2. Pourquoi prendre en compte la criticité des ressources en ACV ?

### 2.1. Un contexte de recherche important

L'équipe de recherche « Plateau de Recherche Technologique Pôle Épandage Environnement » (PRT PEE) mène des activités de recherche et développement dans les domaines de la fertilisation organique et minérale, de l'efficacité des pneumatiques et des liaisons tracteur/sol ainsi que des études environnementales en lien avec ces thèmes (ACV).

Elle a pour but de permettre les développements et de caractériser les performances des dispositifs technologiques en relation avec différents acteurs de la recherche et de l'industrie. Ses axes de recherche sont l'amélioration des appareils de fertilisation qui jouent un rôle majeur dans la chaîne de production agricole et le respect de l'environnement en lien avec la fertilisation des cultures. L'enjeu de la fertilisation est double : produire des fertilisants respectueux de l'environnement et réduire les pollutions d'origine diffuses.

Ainsi, l'utilisation de fertilisants déchets-sourcés pourrait permettre de répondre aux besoins en phosphore des cultures tout en évitant l'épuisement des ressources naturelles de phosphore. Dans ce cadre, l'équipe s'est intéressée à l'évaluation des impacts environnementaux de la production de fertilisants phosphatés à partir des boues d'épuration urbaines. Cette question du recyclage du phosphore à partir des boues d'épuration urbaine a été étudiée dans le cadre de la thèse de mon maître de stage, Marily Pradel, qui a pu rendre compte que même si le procédé de récupération permettait de préserver la ressource minérale en phosphore, la balance restait défavorable aux produits boue-sourcés (rendements parfois limités de récupération du phosphore, faible concentration en phosphore des boues, utilisation importante d'énergie et de réactifs lors de la fabrication de ces produits).

Un des verrous scientifiques identifié dans sa thèse porte sur la nécessité d'une évaluation robuste de l'impact sur l'épuisement des ressources. L'intérêt principal de la production de produits déchets-sourcés réside en effet dans la possibilité de concentrer une ressource présente sous forme diffuse dans l'anthroposphère. Or, les traitements mis en place pour récupérer cette ressource sont caractérisés par des rendements parfois faibles mobilisant eux-mêmes d'autres ressources. L'ACV est une méthode pertinente pour évaluer la contribution des systèmes étudiés à l'épuisement des ressources à partir du moment où les méthodes de caractérisation de cet impact sont robustes. La méthode de caractérisation de l'impact doit être fiable (incertitudes faibles ou du moins évaluées), homogène (la méthode doit être robuste de la même manière quelle que soit la ressource évaluée) et complètes (un grand nombre de ressources doivent être considérées dans la méthode).

Une première analyse des méthodes existantes sur la caractérisation de l'épuisement des ressources réalisée durant sa thèse a montré une grande variabilité dans la manière de calculer l'impact. Afin d'approfondir cette première analyse, elle a décidé de répondre à l'appel à projet de recherche collaboratif (PRC) du réseau EcoSD sur le sujet.

## 2.2. Problématique traitée dans le stage

Irstea est un des membres fondateurs, en 2012<sup>4</sup>, du réseau EcoSD (Écoconception de Systèmes Durables). Il s'agit d'une association qui tente d'intensifier et encourager les échanges entre les différents chercheurs, entre les industriels et entre chercheurs et industriels. Cela permet de créer des liens et ainsi diffuser facilement des connaissances dans le domaine de l'écoconception ; tant en France qu'à l'étranger, à travers la reconnaissance de l'expertise de ce réseau. Ces échanges sont soutenus par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et font partie des enjeux abordés par la loi de transition énergétique.

Dans ce contexte global, le projet PRC déposé par Marilyns Pradel auprès du réseau EcoSD vise à réaliser un état de l'art et une revue critique des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources naturelles minérales et de leur criticité. Cette revue critique devrait notamment permettre de proposer des pistes d'amélioration de ces méthodes de caractérisation. Ce projet est réalisé en partenariat avec Groupe PSA et Orange et vise à répondre aux questionnements que se posent ces organismes sur les criticités du phosphore (Irstea), du cobalt et de l'indium (Orange, PSA). Ces matériaux sont importants pour chacun d'eux :

- Le phosphore est utilisé principalement comme fertilisant ; il permet aux plantes une croissance régulière ; et ce sont les seuls êtres vivants à être capable de le synthétiser. C'est un élément vital à tout être vivant et non substituable.
- L'indium est utilisé dans les écrans, de téléphone ou de télévision. C'est un élément très conducteur d'électricité et qui a la particularité d'être tactile.
- Le cobalt est utilisé majoritairement pour la fabrication des batteries, dotant notamment les véhicules électriques, qui sont amenés à se développer.

Mon stage s'inscrit pleinement dans le cadre de ce projet PRC et porte sur l'« Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en Analyse du Cycle de Vie ». Bien que le titre du stage puisse paraître, au premier abord, un peu difficile à appréhender, le sujet d'« Exploration et comparaison sur des cas industriels des méthodes existantes d'évaluation de la criticité des ressources en Analyse du Cycle de Vie » est très intéressant. Non seulement il répond à des enjeux réels mais il est d'actualité puisqu'il n'est étudié que depuis très peu de temps par les chercheurs (environ 5 années). Le sujet de départ s'articulait autour de la notion de criticité et sa prise en compte en ACV, à travers des ressources « de références » ci-dessus. Nous y avons intégré la prise en compte de l'économie circulaire et notamment le recyclage afin de voir en quoi cela pouvait jouer un rôle dans la prise en compte de la criticité. Il s'agit de la « modification » du sujet de départ, qui est importante car conditionne les recherches faites et présentées par la suite.

---

<sup>4</sup> D'après les statuts constitutifs de l'association loi 1901. D'autres acteurs comme l'Université de Technologie de Troyes ou encore AgroParisTech en font partie.

Mon rôle dans le cadre du stage a été de :

- Réaliser un état des lieux de la notion de criticité des ressources et de la façon dont cette criticité est appréhendée par la méthode d'Analyse du Cycle de Vie.
- Réaliser l'état des lieux des méthodes de caractérisation en Analyse du Cycle de Vie portant sur l'épuisement des ressources naturelles et de l'analyse de la construction de ces méthodes :
  - Identification des méthodes de caractérisation existant sur l'épuisement des ressources naturelles,
  - Analyse de la construction de l'indicateur de catégories d'impact,
  - Identification des forces et des faiblesses de chaque méthode de caractérisation.
- Appliquer les différentes méthodes de caractérisation sur trois cas applicatifs mobilisant des ressources rares :
  - le secteur industriel de l'automobile (mobilisant le cobalt, le néodyme, le phosphore, et, la famille des platinoïdes (le rhodium, le palladium et le platine) (suivant l'avancement du projet))
  - la téléphonie (mobilisant de l'indium, le germanium voire le cobalt (suivant l'avancement du projet)),
  - les fertilisants (mobilisant du phosphore).
- Participer à la rédaction d'un guide de recommandations, afin d'aider les praticiens de l'ACV à mieux appréhender la criticité dans leurs analyses.

Notons qu'à l'heure de rendre ce rapport, des discussions quant à la forme de la partie « application des méthodes » ainsi que sur la part de participation au guide sont encore en cours de réflexion. Cependant, il se dessine que mon rapport sera repris pour servir de support à la rédaction du rapport final de projet demandé par l'ADEME et que mes travaux seront complétés au cours de rencontres ultérieures avec les membres du réseau EcoSD. Il est possible également que les recherches menées (décrites ci-après) soient reprises et valorisées dans un article de review (le journal restant à déterminer).

La question traitée durant tout mon stage a été de savoir comment était prise en compte la criticité des ressources en ACV et détaillé dans la suite du rapport.

### 3. Comment aborder la criticité des ressources en ACV ?

Mon travail a principalement consisté à identifier ce que l'on entendait par « criticité des ressources », comment l'épuisement des ressources était évalué en ACV puis comment était évaluée la criticité des ressources avant de faire le lien entre ACV et criticité. C'est le déroulement que nous suivrons afin de rendre compte du travail effectué puis les discussions qui y sont associées. Mais avant de voir ceci, nous allons définir ce qu'est la criticité des ressources.

#### 3.1. Qu'entend-on par « criticité des ressources » ?

Mon tout premier travail a été de définir la notion de criticité des ressources. Suivant le pays, les continents, cette définition et les ressources concernées varient ; c'est pourquoi nous avons choisi de nous placer dans le cas de la France. La criticité est ainsi définie, par l'Union Européenne (UE), comme la vulnérabilité d'un consommateur donné vis-à-vis de la perturbation ou de l'interruption des approvisionnements, 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), d'après Frenzel et al. (2017).

Cela peut se traduire schématiquement par la matrice donnée grâce à la Figure 1.

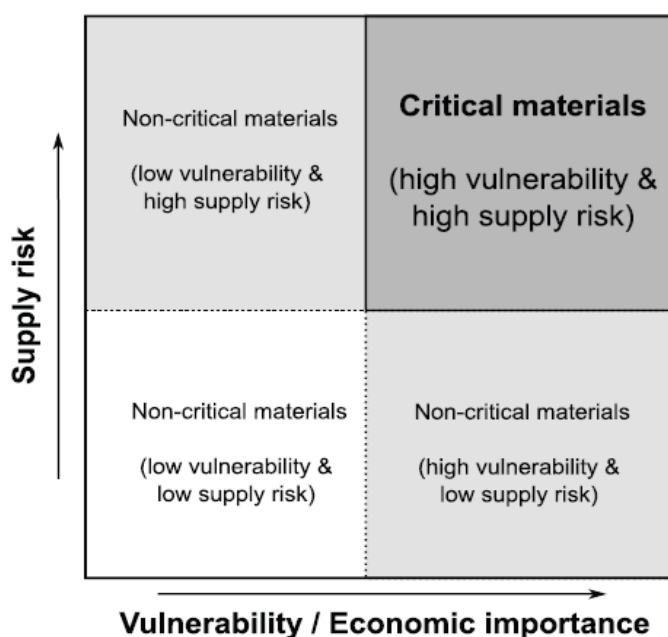


Figure 1 : Matrice représentant les facteurs de l'évaluation de la criticité<sup>5</sup>.

La criticité repose donc sur une évaluation du risque d'approvisionnement couplé à une évaluation du risque de la vulnérabilité pour un pays. Il s'agit d'une méthode relativement simple en apparence mais qui s'avère finalement plus ardue. Nous verrons par la suite que l'adaptation d'une telle évaluation en ACV est (très) compliqué.

<sup>5</sup> Tableau issu de Frenzel, M., J. Kullik, M. A. Reuter & J. Gutzmer (2017) Raw material 'criticality'-sense or nonsense? *Journal of Physics D-Applied Physics*, 50.

Grâce à sa méthode d'évaluation de la criticité, l'UE a défini 27 matériaux critiques en 2017 (Tableau 1) :

Tableau 1 : Ressources identifiées comme critiques par l'UE<sup>6</sup>.

Antimoine	Borate	Gallium	Terres rares lourdes	Graphite naturel	Phosphate rock	Tantale
Barytine	<b>Cobalt</b>	Germanium	<b>Indium</b>	Caoutchouc naturel	<b>Phosphore</b>	Tungstène
Béryllium	Coke de chauffe	Hafnium	Terres rares légères	Niobium	Scandium	Vanadium
Bismuth	Fluorspar (= fluorine)	Hélium	Magnésium	Platinoïdes	Silice métal	

Nous pouvons ici repérer facilement les 3 matériaux principaux qui nous intéressent lors de notre étude. Cette liste de matériaux à tendance à s'allonger au cours du temps (ils n'étaient que 14 en 2011 et 20 en 2014, d'après le site de l'UE qui y est dédié<sup>7</sup>).

### 3.2. Méthode de travail mise en place

Mon travail s'est effectué en trois étapes importantes. Dans un premier temps, j'ai analysé comment étaient traitées actuellement les ressources en ACV, puis j'ai analysé dans quelle mesure la criticité des ressources était prise en compte. Dans un troisième temps, en recoupant les deux premières analyses, je me suis intéressé aux ressources d'intérêt, à travers des « fiches de criticité » notamment puis d'application plus concrète sur les méthodes existantes d'évaluation de l'épuisement des ressources (à travers les facteurs de caractérisation en ACV).

Ma démarche méthodologique est basée sur une analyse de la littérature scientifique principalement. Nous allons donc ici nous intéresser dans un premier temps à comment cette recherche a pu être menée. Par la suite, nous verrons les moyens mis en place afin d'analyser les articles les plus intéressants.

#### 3.2.1. Détermination des mots clés et requêtes pour l'analyse bibliographique

La méthode que j'ai utilisée est plutôt classique pour de la recherche bibliographique. D'abord, il a fallu déterminer des mots clés en lien avec le sujet de recherche. Pour chaque terme d'intérêt, plusieurs mots ont été assemblés ou regroupés afin de former une requête qui soit exploitable. Après avoir vu que le nombre de résultats pour chaque terme était important, il a été décidé de faire un recoupement des termes. En effet, cela limite le nombre de résultats obtenus et permet de trouver des publications plus intéressantes. Les différents états de l'art ont été menés en parallèle, pour l'épuisement des ressources mais aussi pour

<sup>6</sup> D'après la Commission Européenne. Document téléchargeable : European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU), Brussels, 13.9.2017.

<sup>7</sup> L'Europe est dotée d'un site qui rend compte de l'évaluation des ressources critiques et des causes pour lesquelles elles y sont : [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en)

l'évaluation de la criticité des ressources. La recherche a été faite sur Web Of Science avec les requêtes suivantes :

- Pour l'Analyse du Cycle de Vie (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

Résultats : 87.243 articles recensés; prise en compte de tous domaines : biochimie, médecine, qui ne nous intéressent pas. De plus, des termes comme « ADP » ou « LCI » semblent parasiter notre recherche. Après exclusion de ces domaines et termes parasites nous trouvons : 23.690 résultats. Pour affiner encore ces résultats, nous ne prenons alors en compte que les catégories « sciences environnementales », « ingénierie environnementale », « science des technologies soutenables », « études environnementale » ; obtenant ainsi **6.446** publications qui semblent vraiment pertinentes.

- Pour le recyclage (R2) :

Problème après recherche individuelle des termes :

- "Circular economy" → 1.800 résultats environ, cela semble plutôt correspondre à ce qui est attendu donc on le garde ; "Waste valorization".
- « valorisation » et « valorization » existent ; il est donc décidé d'utiliser « valori\*ation ». Nous retrouvons alors 337 résultats. Grâce à un premier tri, en éliminant ce qui se rapporte à la chimie, nous obtenons « seulement » 146 résultats.

« Recovery » (« récupération ») est problématique, cela vient parasiter la recherche avec plus de 600.000 résultats. Le combiner à « waste » donne un nombre de résultats moins conséquent mais n'est tout de même pas pertinent, il sera donc éliminé de la liste des requêtes et « Recirculation rate » (taux de recyclage) n'a pas de résultat cohérent avec notre sujet. Nous avons donc : Recycling OR Reuse OR "Resource efficiency" OR "Circular economy" OR « waste valori\*ation »

Cette requête nous donne plus de 190.00 résultats, il faut donc faire un peu de tri : nous retirons tout ce qui ne se rapporte pas directement au recyclage : résultats correspondants : **11.490** articles.

- Pour la criticité (R3) :

« RCA » n'est pas conservé pour la recherche : les résultats sont plutôt dans les thèmes de la musique, de la médecine (...) ou n'est pas le sigle signifiant « Resource Criticality Assessment ».

« Criticality » et « criticism » ne sont pas remplacés par « critic\* », le champ lexical devient trop large et il en résulte plus d'un million de résultats... Nous avons alors "Resource

criticality assessment” OR “Criticality resources” OR “Critical raw material assessment” OR “Resource scarcity” OR “Resource security” OR “Resource vulnerability” OR “Material availability” OR Criticity OR Criticality

Avec cette recherche, nous obtenons 20.394 résultats avant tri. Après un tri sur les domaines intéressants, nous n’obtenons plus que **150** résultats.

- Pour les ressources étudiées (R4) :

Automobile : Lithium, Lithium-ion phosphate

Téléphonie : Indium

Fertilisants : Phosphore → phosphorus, Phosphate, Phosphate fertilizers

Nous n’avons pas tenu compte des symboles chimiques (In pour l’indium, par exemple) car cela vient parasiter notre recherche, voire empêcher toute recherche, comme pour le phosphore dont le symbole est « P ». La requête utilisée est la suivante : Lithium OR “Lithium-ion phosphate” OR Indium OR Phosphorus OR Phosphate OR “Phosphate fertilizer”.

Cette recherche nous amène à 738.145 résultats. Cela paraît beaucoup mais il est vrai que chacun des éléments est recensé un grand nombre de fois dans la littérature. Nous pouvons cependant exclure certains domaines qui ne nous intéressent pas ici comme la chimie ou le médical. Il reste encore beaucoup de résultats (31.261) mais nous allons pouvoir les croiser avec ceux d’autres requêtes pour affiner notre recherche ; éliminer trop de résultats ici sous-tendrait une non-prise en compte de certains éléments qui paraissent essentiels comme les composants des batteries (important pour notre étude). Avec cette première recherche dans Web of Science, nous pouvons croiser les résultats afin de trouver des articles qui se complètent et entrent dans le cadre de notre étude.

3.2.2. Croisement des requêtes pour affiner les résultats de l’analyse bibliographique

Afin d’affiner le nombre d’articles constituant le corpus d’article à étudier, nous avons croiser les requêtes deux à deux puis trois par trois. Les résultats sont donnés respectivement dans le Tableau 2 et le Tableau 3.

Tableau 2 : Tableau de croisement des requêtes deux à deux

X	R1	R2	R3	R4
R1	X	1.279	33	194
R2	X	X	59	677
R3	X	X	X	16
R4	X	X	X	X

Tableau 3 : Tableau de croisement des requêtes trois à trois

R1/R2/R3	10 résultats
R1/R2/R4	59 résultats
R1/R3/R4	2 résultats
R2/R3/R4	9 résultats

En croisant toutes les données, c'est-à-dire ACV, Recyclage, Criticité et Ressources que l'on étudie, nous nous rendons compte qu'il n'y a aucun résultat. On peut également remarquer que la requête R3 portant sur la criticité semble donner des résultats limités. Cela n'est en rien étonnant du fait qu'il s'agit d'une thématique de recherche récente.

Notons que ces étapes ont été effectuées avant la réunion du 23/03/18 avec les partenaires sur le projet EcoSD, Orange et PSA. Quelques ajustements ont été faits, notamment en terme de ressources les plus intéressantes pour ces entreprises. Il a donc été décidé de se concentrer, dans l'ordre, sur :

- Automobile : **Cobalt** – Néodyme – Platinoïdes – Phosphore – Lithium (qui n'est pas une ressource considérée comme critique)
- Téléphonie : **Indium** – Germanium – Cobalt
- Pour les fertilisants, nous restons sur le **Phosphore**.

Cela ne change pas ni la méthodologie ni les résultats. Nous avons finalement identifié **38 publications intéressantes**. Ce sont les publications qui nous serviront de « base » pour notre étude ; nous allons voir ci-après la méthode choisie afin d'identifier en quoi elles peuvent nous apporter des enseignements.

### 3.2.3. Établissement d'un corpus complémentaire

Une analyse complémentaire de la bibliographie a été réalisée sur de la littérature grise en mobilisant des ressources existantes, notamment afin d'étudier les méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources et/ou de la criticité. Certains tableaux présentés dans les résultats ont été repris d'études existantes mais complétés/adaptés à notre étude et nous ont permis d'accélérer le processus d'analyse des documents. Les ressources d'intérêt étudiées (cobalt, indium et phosphore) ont fait l'objet de recherches plus poussées (BRGM) et seront par la suite exploitées à travers des applications. Au final, l'ensemble des articles a été centralisé dans l'outil de gestion bibliographique EndNote.

### 3.2.4. Établissement de grilles de lectures pour l'analyse bibliographique

Enfin, après avoir identifié les publications les plus intéressantes, nous les avons étudiées grâce à la détermination de grilles de lecture permettant de répondre à un certain nombre de questions. Pour pouvoir être efficace et avoir des points de comparaison des différents textes, l'utilisation de grilles de lectures permet de faire une lecture « intelligente » de ces textes.

Les grilles de lectures ont été constituées (voir Annexe 1) selon les grands domaines des articles à savoir « ACV-criticité » et « ACV-recyclage ». Par la suite, suivant le « grand domaine » auquel il se rapportait, nous avons procédé à une étude plus poussée.



### Grille de lecture pour l'analyse des 38 publications « de base » (Tableau 6) :

Lorsqu'on parle des 38 publications de base, il s'agit de celles gardées après la phase de recherche bibliographique. Celles-ci se sont vues attribuées un numéro dans EndNote afin de faire un repérage rapide et gagner en efficacité ; chaque document est donc repris à travers ce numéro, son titre, les auteurs et l'année de publication. Ces publications ont été évaluées à travers les réponses apportées aux questions suivantes :

- Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?
- Le document parle-t-il de l'ACV ?
- Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?
- Le document parle-t-il de recyclage ?
- Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?
- Quelles sont ses spécificités (points clés) ?
- Résumé du document
- Résumé visuel : est-il orienté ACV ou non ACV et par rapport aux ressources ou par rapport à la criticité ?

### Grille de lecture pour l'analyse individuelle de chacun des articles :

Pour chaque document, des questions plus orientées nous ont permis de nous concentrer sur le sujet principal. Cela nous a permis de rendre compte des points de vigilance méthodologiques par exemple.

#### - **ACV et criticité :**

- 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 » ?
- Dans quel objectif est fait cet indicateur ?
- Quel est la pertinence du document ? (Note)

Pour cette partie, le but est principalement de voir quelles sont les bases communes à toutes les méthodes d'évaluation de la criticité et de voir ce qui est fait ou ce qui est envisageable en ACV.

#### - **ACV et recyclage :**

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

Ici, nous cherchons à savoir si le recyclage est vu comme un outil permettant de réduire les effets de la criticité sur les matériaux et comment cela est pris en compte.

## 4. Principaux résultats obtenus

### 4.1. L'épuisement des ressources en ACV

#### 4.1.1. Étude des méthodes de caractérisation de l'épuisement des ressources

L'épuisement des ressources a été étudiée un peu différemment de l'évaluation de la criticité des ressources. En effet, lors de l'étude il s'est avéré qu'un document était particulièrement adapté à l'étude des facteurs de caractérisation de l'épuisement des ressources en ACV. L'inventaire mené par Deloitte (2013) est plutôt complet et avait déjà été réutilisé.

Nous avons pu nous rendre compte qu'il existait trois principaux types de modélisation 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 :

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

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

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

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

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

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

$MCI_{r,kg}$  : augmentation marginale du coût d'extraction, en \$/kg<sup>2</sup>  
 $P_{r,t}$  : 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 de 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, définit par les auteurs de la méthode comme étant le moment où la quantité extraite cumulée de la ressource  $i$  aura atteint 5 fois la quantité extraite cumulée avant 1990. Cet effort est estimé par le surcoût énergétique engendré pour l'exploitation de la ressource.

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

$\Delta E_i$  : 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 utilisée 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<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique), l'énergie utile peut être consommée ou transformée en un autre type d'énergie, l'entropie (2<sup>ème</sup> 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 and Ostlund 1997) utilisent la formule suivante :

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

Avec :

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

$e_{ch,i}$ , l'exergie chimique molaire de la substance  $i$ .

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

Nous prendrons ici un exemple de tableau qui a été fait pour une méthode bien connue des praticiens de l'ACV. Il s'agit de la méthode CML et plus précisément de l'impact « Abiotic Depletion Potential » (ADP) qui est recommandé par l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) (Tableau 4). Ce document de référence pour les praticiens ACV a pour but de déterminer quelle méthode est, actuellement, la plus robuste et donc la plus apte à rendre compte de l'épuisement des ressources en ACV<sup>8</sup>. Notons que l'ensemble des fiches réalisées sont consultables dans l'Annexe 2.

---

<sup>8</sup> D'après l'évaluation faite pour la Commission Européenne ; suite à quoi des recommandations ont été faites : <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf>

Tableau 4 : Exemple de fiche récapitulative des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources

NOM	ADP	ADP <sub>elements</sub>
MÉTHODE	CML2002, v. 1.0 à 3.5	CML2002, v. 3.6 et suite
TYPE D'INDICATEUR	Midpoint – catégorie 2 = indicateur prenant en compte la rareté de la ressource	
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Guinée 2002] Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards [VanOers2002] Abiotic resource depletion in LCA <a href="http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html">http://cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html</a>	
UNITÉS	kg antimoine équivalent	
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales et fossiles ( <b>49</b> ressources minérales considérées)	Ici, les 3 variantes sont possibles : CML-er (réserves économiques) <b>CML-rb</b> (base de réserve) CML-ar (réserves ultimes) (Peters et al.2016)  Ressources minérales : 49 (réserves ultimes), 43 (base de réserves), 42 (réserves économiques)  Il s'agit de variantes qui donnent des FC différents.
PRINCIPES ET FONDEMENTS	La méthode tient compte du <b>taux d'extraction</b> et du <b>stock disponible</b> . Les réserves <b>ultimes</b> sont considérées.	Il résulte de la recommandation de [VanOers2002] de considérer l'extraction des ressources minérales et fossiles comme contribuant à des problèmes environnementaux différents, et donc de les évaluer séparément.
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	Les facteurs de caractérisation de l'ADP sont calculés en rapportant l'appauvrissement de chaque substance à celui d'une substance de référence (l'antimoine). Le FC s'exprime donc de la manière suivante : $ADP_i = \frac{DR_i}{\frac{(R_i)^2}{DR_{sb}}}$ Avec :  ADP <sub>i</sub> facteurs de caractérisation d'épuisement potentiel d'une ressource i ; R <sub>i</sub> réserve ultime de la ressource i (kg) ; DR <sub>i</sub> taux d'extraction de la ressource i (kg.an <sup>-1</sup> ) ; R <sub>ref</sub> réserve ultime de la ressource de référence (antimoine) (kg) ; DR <sub>ref</sub> taux d'extraction de la ressource de référence (antimoine) (kg.an <sup>-1</sup> ).	Il est analogue à celui des anciennes versions mais ne couvre pas les ressources fossiles.  Le calcul des FC est réalisé selon les niveaux de réserve suivants : Réserve ultimes (par défaut, comme dans Simapro par exemple, où le test a été effectué), réserves économiques et base de réserves. Les 3 sont applicables, ce qui donne des FC différents. Pour mieux comprendre à quoi correspondent ces « réserves », il faut se référer au paragraphe éponyme.

NOM	ADP	ADP <sup>elements</sup>
MÉTHODE	CML2002, v. 1.0 à 3.5	CML2002, v. 3.6 et suite
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	Réserves ultimes : [Guinée 1995], sur la base de la concentration des éléments dans la croûte terrestre Ressources et taux d'extraction : USGS, année de référence 1999	
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité Monde : Les facteurs de caractérisation sont basés sur des réserves mondiales.	
AUTEURS	12 auteurs principaux parmi 4 organismes : J.B. Guinée, M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. Wegener Sleswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin, M.A.J Huijbregts	4 auteurs, dont 3 ayant participé à la publication originale de CML : L. van Oers, A. de Koning, J.B. Guinée, G. Huppes
MISES À JOUR	La méthode CML reçoit une mise à jour relativement fréquente du tableur de facteurs de caractérisation pour l'intégration de nouveaux facteurs, la mise à jour de facteurs existants ou la correction d'erreurs.	
INCERTITUDES	Les auteurs mentionnent l'existence d' « incertitudes considérables concernant l'ampleur des réserves actuelles » [Guinee2002]	[VanOers2002] mentionne l'existence d' « importantes incertitudes concernant la taille des réserves ultimes extractibles ». « La quantité d'éléments diffus qui deviendra disponible est hautement incertaine, du fait que les développements techniques et économiques qui auront lieu à l'avenir sont incertains. »
LIMITES	Les facteurs de caractérisation recommandés par les auteurs de CML sont calculés sur la base des réserves ultimes. Cependant, de nombreux auteurs ([Brentrup2002], [VanOers2002], [Schneider2011]) considèrent qu'un élément présent dans l'environnement sous une forme trop peu concentrée ou trop inaccessible ne sera jamais exploité, et qu'il ne peut donc être considéré comme une ressource. [VanOers2002] propose des jeux de facteurs se basant sur la base de réserve et les réserves économiques.	Notons qu'ici, la méthode précédente a été scindée en deux : ADP <sup>elements</sup> et ADP <sup>fossil fuels</sup> ; cela permet une précision supplémentaire. Nous ne nous intéressons qu'à ADP <sup>elements</sup> . Les facteurs de caractérisation ADP <sup>elements</sup> sont par défaut basés sur les réserves ultimes mais peuvent être disponibles au niveau « bases de réserves » et réserves économiques. Ces réserves ne prennent cependant pas en compte les réserves non-diffuses présentes dans la technosphère. Or ces réserves devraient être incluses dans la mesure où les fonctions des ressources utilisées ne sont pas perdues.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	AADP : Anthropogenic stock extended abiotic depletion potential" [Schneider2011] ; prise en compte des stocks anthropiques.	

Notons que l'ensemble de ce rapport a été utilisé afin de communiquer avec nos partenaires du réseau EcoSD.

#### 4.1.2. Résultats de l'étude des méthodes de caractérisation de l'épuisement des ressources en ACV

Les constats sur l'épuisement des ressources sont que les méthodes existent pour la plupart depuis un certain temps (CML, ReCiPe...) et sont mises à jour régulièrement. Elles ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. L'analyse poussée de ces méthodes a mis en exergue des questions relatives aux sources des données utilisées (i.e. les réserves mobilisées) et donc à la fiabilité des résultats. En effet, différents types de réserves ont été établies et, suivant les méthodes, nous sommes amenés à utiliser l'une ou l'autre. Ce choix est arbitraire bien que par défaut les méthodes soient basées sur les réserves ultimes.

Pour mieux comprendre la différence, nous allons expliciter ce que sont ces réserves :

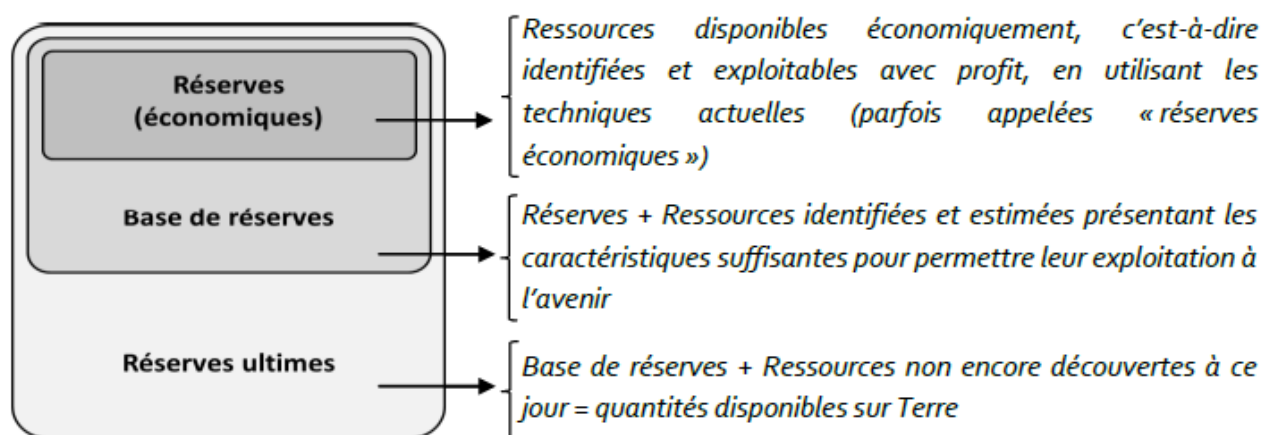


Figure 2 : Illustration des différents niveaux de réserves dans l'environnement selon Van Oers, 2002, par (Deloitte 2013)

Il est important de savoir quelle base est utilisée dans les calculs des indicateurs d'impact car la certitude des données utilisées en dépend. Il s'agit là de la principale limite pour le calcul de cette catégorie d'impact.

- Estimation de la base de réserves :  
Ce sont les réserves qui répondent aux exigences physiques et chimiques minimales liées à la pratique minière actuelle. Elle peut englober la partie des ressources qui ont un potentiel raisonnable de devenir économiquement disponible à l'avenir<sup>9</sup>.
- Estimation des réserves (économiques) :  
Il s'agit de la part de la base de réserve naturelle qui peut être exploitée de manière viable. Elles sont estimées pour chaque ressource (suivant les méthodes d'extraction, par exemple)<sup>10</sup>.
- Estimation des réserves ultimes :  
Les réserves ultimes représentent ce qui serait idéalement exploitable, c'est-à-dire l'ensemble des quantités de matériaux disponibles dans la croûte terrestre. Bien que cela représente le meilleur des cas envisageables, exploiter l'intégralité de la croûte terrestre

<sup>9</sup> Source : Département de l'Intérieur- Bureau des Mines, États-Unis, 1993

<sup>10</sup> Source : Département de l'Intérieur- Bureau des Mines, États-Unis, 1993

est quasiment impossible. La méthode d'estimation des réserves ultimes consiste à déterminer le pourcentage de chaque élément que l'on choisit de prendre en compte dans la croûte terrestre continentale. Grâce à une épaisseur que l'on estime exploitable (nombre de kilomètres exploitable variant selon les techniques (max 4 km), les matériels utilisés, les pays, les roches traversées...), rapporté au volume de la Terre qui a un rayon de 6371 km ( $4/3\pi r^3$ ) et à l'occupation des continents (40%), nous pouvons disposer d'un calcul estimé des réserves ultimes. Les données obtenues sont très théoriques et il faut être prudent lors de leur utilisation car de grosses incertitudes sur les approximations sont faites.

Nous pouvons nous apercevoir que cela semble le facteur limitant à une bonne prise en compte de l'épuisement des ressources. De plus, il semble que les stocks existants dans la technosphère ne soient pas inclus dans ces méthodes. Or, dans un contexte où les villes deviennent de véritables mines urbaines, cette inclusion mériterait d'être étudiée.

Notons enfin que les données en elles-mêmes posent problème. Bien que les taux d'extraction fassent régulièrement l'objet de mises à jour (bien qu'il soit difficile de connaître la source des données utilisées), les autres données (réserves ultimes et autres) restent basées sur les données de 1990. Cela sous-entendrait que les réserves exploitables seraient les mêmes aujourd'hui qu'en 1990, cela mérite que l'on réactualise ces données afin de savoir si ces réserves sont toujours les mêmes ou non.

#### 4.1.3. Quelles améliorations pour ces méthodes de caractérisation ?

Pour gagner en fiabilité, les méthodes de caractérisation des ressources devraient revêtir un aspect dynamique. Effectivement, non seulement cela permettrait d'avoir des données à jour (ou tout du moins qui le seraient plus qu'actuellement), mais cela permettrait également de prendre des décisions stratégiques en terme d'approvisionnement qui soient efficientes. Nous avons pu nous rendre compte que les stocks anthropogéniques font l'objet d'un travail de recherche. Nommée « Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential » (Schneider, Berger and Finkbeiner, 2011a), cette approche tend à prendre en compte ces stocks qui peuvent s'avérer très importants pour certains matériaux. Un dernier point est que des recherches effectuées tentent d'ouvrir cet indicateur d'épuisement des ressources en prenant en compte des aspects socio-économiques ; c'est le cas du Global Resource Indicator (GRI), issu des travaux menés par Adibi et al. (2017) et qui se veut multicritère. Il s'agit là d'une ouverture intéressante ; puisqu'on se rapprocherait alors de critères d'évaluation tels qu'ils pourraient être fait pour la criticité des ressources.

De plus, en commençant à étudier les ressources pour des applications (travail non relaté ici car en cours d'exécution), on se rend compte qu'il semble y avoir des différences entre les données réelles prises et les sources indiquées dans la méthode.



## 4.2. La criticité des ressources en ACV

L'étude de la criticité est celle qui a été la plus longue : il s'agit d'un sujet très récent, peu traité par les scientifiques et qui ne l'est pas ou que très peu en ACV. Les résultats présentés ci-après font suite à l'analyse des grilles de lecture présentés dans la partie précédente.

Les deux tableaux d'analyse poussée ont été mis en Annexe 1 ; le Tableau 7 étant consacré à la criticité, et, le Tableau 8, au recyclage. Le tableau récapitulatif des méthodes et les variantes possibles d'évaluation de la criticité est consultable dans la partie « 4.2.1. Tableau récapitulatif sur la criticité des ressources », Tableau 5.

### 4.2.1. Tableau récapitulatif sur la criticité des ressources

Il a été choisi d'insérer ici le tableau de la prise en compte de la criticité, et non en annexe, car il s'agit du cœur de mon travail. Bien qu'il occupe une taille importante, il est essentiel et nous allons dans cette première partie l'expliquer ; la deuxième partie étant le tableau en lui-même.

L'analyse de deux revues critiques, celle de Habib and Wenzel (2014) et celle de Sonnemann et al. (2015), 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. La Figure 3 résume les différentes approches de la criticité par le monde scientifique. Nous pouvons remarquer qu'il existe différentes variantes et cela nous a permis de déterminer des points d'amélioration possible. C'est ce que nous relaterons dans la partie « conclusion » qui suit.

Nous pouvons remarquer qu'il y a une méthode « de base », celle de l'UE, qui reprend les indicateurs « risque d'approvisionnement » et « importance économique » et que Graedel et al. (2012) en intègre un troisième, l'environnement (Figure 3).

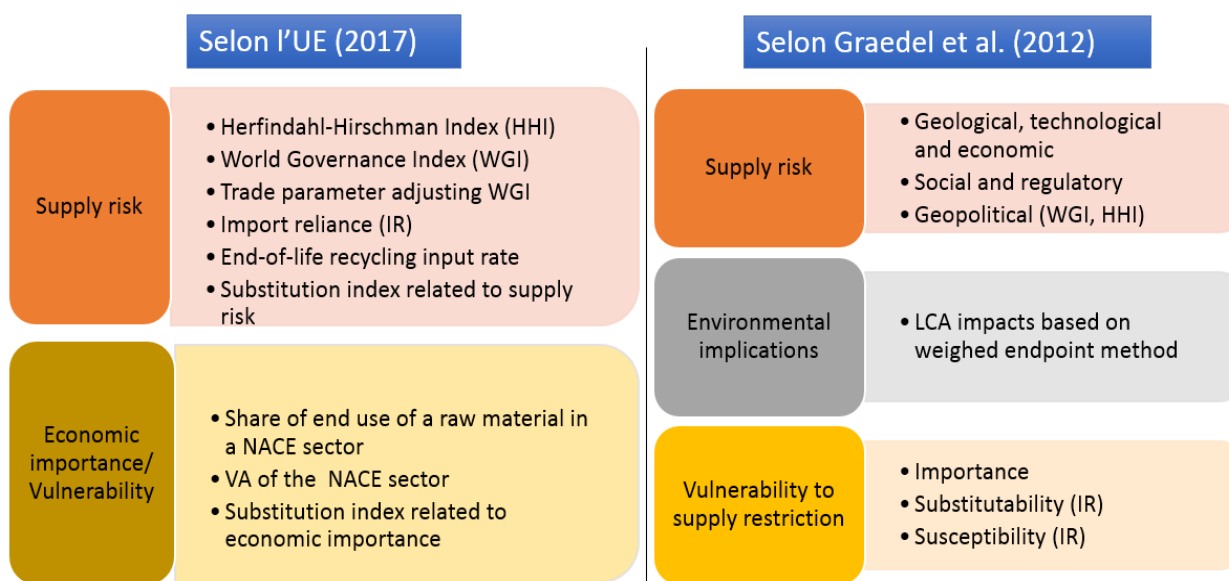


Figure 3 : La criticité : différences et points communs entre 2 méthodes d'évaluation

Notons que la partie en couleur jaune dans le Tableau 5 correspond aux publications étudiées par Sonnemann et al. (2015) et qu'en bleu, ce sont celles qui n'y figuraient pas. Ce tableau, bien qu'inspiré par l'auteur cité précédemment, a été revu et complété au besoin, afin d'avoir une comparaison des méthodes d'évaluation.

Enfin, il est important de relater le fait que, comme pour l'étude de l'épuisement des ressources, ces recherches ont fait l'objet d'une synthèse qui a également été transmise aux autres membres du projet. Elle relate chaque étape de recherche et de réflexion concernant la criticité des ressources.

Tableau 5 : La criticité : différentes variantes et travaux existants

METHODES	Zone géographique	Horizon de temps (en années)	Concepts	Indicateurs de criticité									Hypothèses		Analyse		
				Risque d'approvisionnement					Importance / vulnérabilité								
				Disponibilité géographique		Disponibilité géopolitique		Risque environnemental	Commentaires	Importance économique	Substituabilité	Commentaires	Recyclage	Future demande	Points forts	Points faibles	Commentaires
				Disponibilité géologique	Risque associé à la co-production	Risque politique	Offre mondiale										
(Graedel et al. 2012)	Mondial, national et au niveau de l'entreprise	1-100	La criticité a 3 dimensions : risque d'approvisionnement, vulnérabilité et restrictions environnementales	On voit ici le temps d'épuisement total d'une ressource et le pourcentage de filon brut d'un minerai rapporté au nombre de différents métaux extraits. Les réserves posent problème : peu fiables (voir méthode CML)		WGI : risque dû à l'instabilité politique et aux actions politiques (classique)	HHI utilisé (classique)	La dimension environnementale apporte le côté "dommages" dus aux extractions et à l'énergie dépensée pour de tels process. Difficile de la prendre en compte (régional et mondiale en même temps!)	Il s'intéresse à l'abondance de la ressource, dans la croûte terrestre aussi bien que dans la sphère économique, technologique, géopolitique et la disponibilité sociale. 3 composantes principal ; (1) géologique, technologique et économique, (2) social et réglementaire et (3) géopolitique. Chaque composante a un certain nombre d'indicateurs et le "score final" est considéré en pondérant les indicateurs. Utilisation des facteurs communs qui sont améliorés	Mieux considérer la fonction et non le matériau en lui-même	L'introduction de la fonctionnalité, du recyclage, de la substitution des ressources et de l'adaptation de l'utilisateur à l'épuisement se fait par l'introduction d'un facteur de concurrence, tel que proposé par Boulay et al. (2011)	La vulnérabilité à la restriction de l'offre comporte également 3 composantes : l'importance, la substituabilité et la capacité d'innover. Chacune d'entre-elle à des indicateurs.	Le recyclage pourrait être une des manières de pallier le manque de ressources vierges.		Bonne prise en compte des facteurs communs avec des capacités à innover qui sont pris en compte. Questionnement pour aller plus loin : recyclage, substitution. Notons qu'un aspect social se dégage ici : cela permet de montrer l'influence qu'à la population (risque d'approvisionnement)	Aucune estimation de la future demande et réponses à ces demandes : évaluation des stocks anthropiques?	Méthode d'évaluation de la criticité la plus complète et la plus détaillée et qui s'inscrit dans un processus de développement vers une prise en compte en ACV.
Commission Européenne (2010 à aujourd'hui)	Régional (EUROPE)	10	Matrice de criticité avec 2 dimensions : risque d'approvisionnement et importance économique			x	x	Ici, on fait référence à la prise en compte des référentiels (ISO) mais aussi à la substituabilité et au recyclage, de manière "classique".	On estime ici que l'approvisionnement est surtout lié à des problèmes géopolitiques et que géologiquement, il n'y a que des risques limités. L'environnement est donné secondairement par d'autres indicateurs	Pour la Commission Européenne, le calcul est basé sur l'importance du matériau en question sur ses performances des substituants dans ses mêmes applications	Ici son pris en compte la substitution et les solutions actuels ; le futur (évolution) n'apparaît pas.	(idem)		La disponibilité physique n'est pas prise en compte. C'est pourtant la base du travail	Les méthodes "traditionnelles" sont utilisées		
National Research Council (2008)	National	10	Matrice de criticité avec 2 dimensions : risque d'approvisionnement et importance du risque de restriction	x	x	x	x	Exploitation des mines prise en compte	Le risque d'approvisionnement s'intéresse surtout à la vulnérabilité : dans quelle mesure la restriction d'une ressource x aurait une répercussion sur d'autres et comment cela serait-il répercuté sur le consommateur final ?	x	x	Méthode "classique"	(idem)	x	Exploitation des mines prise en compte pour évaluer la partie "environnement"	Méthodes canadienne assez classique qui ne sera pas détaillée ici.	

METHODES  ETUDES	Zone géographique	Horizon de temps (en années)	Concepts	Indicateurs de criticité									Hypothèses		Analyse				
				Risque d'approvisionnement					Importance / vulnérabilité										
				Disponibilité géographique		Disponibilité géopolitique		Risque environnemental	Commentaires			Commentaires	Recyclage	Future demande	Points forts	Points faibles	Commentaires		
				Disponibilité géologique	Risque associé à la co-production	Risque politique	Offre mondiale			Importance économique	Substituabilité								
U.S. Department of Energy (Bauer et al. (2010))	Mondial, technologies propres	0-15	Matrice de criticité avec 2 dimensions : risque d'approvisionnement et importance des énergies propres	x	x	x	x			Méthode "classique"	x	x	Méthode "classique"	(idem)	x			Méthodes américaines assez classique qui ne seront pas détaillées ici.	
U.S. Department of Energy (Bauer et al. (2011))	Mondial, technologies propres	0-15	Matrice de criticité avec 2 dimensions : risque d'approvisionnement et importance des énergies propres	x	x	x	x			Méthode "classique"	x	x	Méthode "classique"	(idem)	x				
Duclos et al. (2010)	Au niveau de l'entreprise (General Electric)	Aucune donnée	Matrice de criticité avec 2 dimensions : risque d'approvisionnement et de fluctuation des prix et impacts sur General Electric	x	x	x	x			Méthode "classique"	x	x	Méthode "classique"	(idem)	x			Méthode appliquée e à une entreprise : meilleur manière d'anticiper des pénuries	
Oeko Institute (Buchert et al. (2009))	Mondial, technologies propres	De 5 ans à l'année 2050	Priorisation des ressources critiques (risque approvisionnement, hausse rapide de la demande, restrictions de recyclage, classées suivant leur importance)					Seul la disponibilité géologique est prise en compte. Le classement est fait suivant un principe : à moins c'est disponible à plus c'est critique.			Méthode "classique" mais avec moins de facteurs	L'importance pour le pays est vu économiquement, suivant les importations		Méthode "classique" mais avec moins de facteurs	(idem)	x		Basée sur peu d'éléments (comparaison des matériaux : bonne idée?)	Prévisions pour le futur difficile à évaluer.
British Geological Survey (2012)	Mondial	2012	Indice du risque d'approvisionnement	x		x	x					x		(idem)				Méthode classique	
Oakdene Hollins (Kara et al. (2012))	Mondial	Long terme	Matrice de criticité	x		x	x		x		x	x		(idem)				Méthode classique	
Moss et al. (2011)	Régional (EUROPE), Technologies stratégiques	2010-2030	Risque de restriction de l'approvisionnement	x	x	x	x				x	x			x			Méthode globalement classique	

METHODES  ETUDES	Zone géographique	Horizon de temps (en années)	Concepts	Indicateurs de criticité									Hypothèses		Analyse		
				Risque d'approvisionnement					Importance / vulnérabilité								
				Disponibilité géographique		Disponibilité géopolitique		Risque environnemental	Commentaires	Importance économique	Substituabilité	Commentaires	Recyclage	Future demande	Points forts	Points faibles	Commentaires
				Disponibilité géologique	Risque associé à la co-production	Risque politique	Offre mondiale										
Nieto et al. (2013)	National et au niveau de l'entreprise (pétrole)	Aucune donnée	Matrice de criticité	x			x	x			x			x			Méthode globalement classique mais avec prise en compte de moins d'éléments
Goe et Gaustad (2014)	National et dans le photovoltaïque	sur une période de 20 ans	Approche multimétrique : tentative d'indicateurs dynamiques	x		x	x	"énergie sauvée" utilisée ainsi que l'énergie grise (tout au long du cycle de vie d'un produit)	Méthode classique sauf pour la prise en compte de l'environnement	x		x	Méthode "classique"	(idem)		Déclinaison de l'aspect "environnement"	
Roelich et al. (2014)	National (UK) et systèmes bas carbone (électricité)	2012 à 2050	Criticité matérielle dynamique	x	x		x	x	Les risques politiques sont exclus, cependant il s'agit d'un élément dynamique				La vulnérabilité n'est pas prise en compte		x	Méthode qui intègre le "dynamique" : intéressante mais est-ce bien fait?	Méthode qui tente d'inclure des éléments dynamiques. Mais il y a des manques importants (recyclage, politique...)
Zepf et al., 2014	Mondial	À long terme	3 scores pour chaque indicateur (haut/moyen/bas)	ratio réserves/production (classique)	production simple ou co-production		x	Toxicité	Méthode "classique", la toxicité est pris en compte			x		(idem)	Déclinaison de l'aspect "environnement" avec la toxicité	Ne prend pas en compte certains éléments qui paraissent importants (risques politiques par exemple)	Méthode plutôt classique mais qui prend en compte la toxicité des éléments.
AEA Technology, 2010	National (UK)	Court (0-5 ans) , Moyen (5-20) et Long (supérieur à 20 ans)	Score de chaque indicateur (haut-bas-moyen-pas d'informations)	x		x	x			WTP (consommateur) fluctuation des prix		alternatives existantes?		(idem)			

METHODES  ETUDES	Zone géographique	Horizon de temps (en années)	Concepts	Indicateurs de criticité									Hypothèses		Analyse			
				Risque d'approvisionnement					Importance / vulnérabilité									
				Disponibilité géographique		Disponibilité géopolitique		Risque environnemental	Commentaires	Importance économique		Substituabilité	Commentaires	Recyclage	Future demande	Points forts	Points faibles	Commentaires
				Disponibilité géologique	Risque associé à la co-production	Risque politique	Offre mondiale			Importance économique								
BGS, 2012	Mondial	Année 2011	Risque de restriction de l'approvisionnement	x		x	x					x		(idem)		Certains critères "manquent" pour une analyse complète de la situation	Méthode centrée risque d'approvisionnement, notamment risque géopolitique	
DOE, 2011	Mondial	Court terme : 2011-2015 (4ans) et moyen terme : 2015-2020 (15 ans)	Matrice de criticité	x		Politiques et facteurs sociaux prise en compte	Dépendance aux autres marchés (internationaux) ET diversité des producteurs (nombreux?)		ATTENTION : Prise en compte de la demande en énergie propre (spécifique!)		Limites liées à la substitution prise en compte				Les technologies propres du futur sont prises en compte			
Erdmann et al., 2011	National (Allemagne)	Court terme : -5 ans, moyen terme : 5-10 ans et long terme : 10-20 ans [à partir de 2008]	Matrice de criticité	x	x	Risques liés aux changements politiques	Risques pour importation mondiale et pour le pays pris en compte ; Concentration prise en compte (classique : pays/ entreprises)				x	x		(idem)	Les demandes technologiques du futur sont prises en compte		Indicateur qui prend en compte l'offre et la demande (pays-mondial)	
Nuss et al., 2014; Nassar et al., 2012;	Mondial et Entreprise	Court terme : 0-5 ans (entreprise), moyen terme : 5-10 ans (national) et long terme : 10-100 ans (global)	Matrice de criticité	x	x	x	x	x			x	x		(idem)	x		Peu de différences avec (Graedel et al. 2012), même méthode mais moins bien détaillé dans les explications	

Pour résumer notre analyse de la littérature scientifique, nous pouvons dire que :

- Peu d'articles traitent conjointement de la criticité des ressources et de l'ACV. Cela démontre qu'il s'agit là d'un domaine relativement nouveau à traiter, et qui provient directement de l'utilisation des ressources puisque beaucoup commencent à s'y intéresser. Il s'agirait alors d'un approfondissement voire une ouverture (socio-économique) de l'indicateur existant en ACV (épuisement des ressources) vers un indicateur « épuisement des ressources » utilisable pour évaluer la criticité.
- Les études sont menées majoritairement au niveau national. Peut-être vaudrait-il mieux traiter la criticité par secteur d'activité que plus globalement (niveau national voire mondial) : les fonctions pourraient alors être plus à même d'être travaillées (par substitution voire en changeant de stratégie et en adoptant un autre moyen), tandis que travailler globalement n'amène pas forcément à agir sur les secteurs clés pour une ressource.
- Une compilation des aspects vus auparavant pourrait conduire à faire un indicateur exhaustif, voire exploitable en ACV. En effet, les articles que nous venons d'évoquer apportent des éléments nouveaux qui permettent l'amélioration de la prise en compte de l'ACV, par le biais d'indicateurs nouveaux ou revus afin qu'ils soient exploitables.
- Le problème des filières de recyclage peut être réglé de la manière suivante : si une ressource est importante pour un état, le gouvernement ne peut-il pas développer (selon des modalités à définir) une filière de recyclage efficace afin de permettre, par exemple, l'indépendance du pays en une ressource critique ? Des incitations (politiques) pourraient venir renforcer cela : augmentation des taxes à l'enfouissement ou à l'incinération, par exemple, et/ou un allègement des coûts pour le recyclage.

#### 4.2.2. Limites des méthodes évaluant la criticité des ressources et recommandations

Un certain nombre de limites ont été identifiées et ont permis d'évaluer quelles difficultés étaient rencontrées pour évaluer la criticité des ressources. Celles-ci seront présentées dans la partie 4.2.3 (« Difficultés rencontrées pour apporter des solutions à la prise en compte de la criticité des ressources en ACV »). Comme toute méthode d'évaluation, la construction d'une méthode d'évaluation de la criticité des ressources se doit d'être complète et scientifiquement solide. Cela nécessite qu'un consensus existe, or ce n'est actuellement pas le cas. L'analyse de la littérature nous a cependant fourni un certain nombre de clés pour construire un indicateur qui fasse consensus et d'adapter ce dernier au domaine de l'Analyse du Cycle de Vie.

#### **Recommandations pour pouvoir avoir un indicateur « criticité des ressources » :**

- Disposer d'une composante environnementale qui fasse consensus : la méthode doit être globale et compréhensible, avec des indicateurs pouvant être communs à toutes les ressources.
- Prendre en compte l'aspect socio-économique de la criticité : il s'agit là d'un enjeu majeur car les 3 sphères du Développement Durable ne peuvent être dissociées (économie, environnement et société). La réflexion doit être poussée sur la pertinence d'un indicateur ACV ou beaucoup plus large dans une ADCV avec prise en compte par exemple des stocks anthropogéniques.
- Harmoniser les indicateurs du risque d'approvisionnement et de vulnérabilité afin qu'une méthode qui fasse consensus émerge. Beaucoup d'indicateurs différents sont utilisés et devraient être comparés et analysés en profondeur.
- Renforcer les connaissances sur la substituabilité afin d'obtenir un indicateur sûr pouvant faire consensus. La recherche doit s'intéresser non seulement à ce qui est quantifiable physiquement (une masse x de la matière a pouvant remplacée une masse y de la matière b) mais aussi aux effets que cela entraîne dans le cycle de vie des produits : en terme d'extraction, de recyclage, d'impact social, économique et environnemental....
- Traiter la criticité à plusieurs niveaux : mondial, régional et/ou continental, local ou au niveau de l'entreprise et/ou d'une filière donnée. Il faut développer une méthode s'adaptant à plusieurs échelles ou bien en développer une par échelle car ces dernières présentent chacune un intérêt selon les objectifs fixés (positionnement d'une stratégie politique d'un pays par rapport aux matériaux stratégiques, politique interne d'une entreprise sur le risque d'approvisionnement en matériaux critiques...). Des recherches doivent être effectuées afin de savoir ce qui est envisageable.
- Proposer une approche dynamique du calcul des indicateurs de criticité.

- Réévaluer la priorisation des études sur les matériaux critiques. Certains matériaux sont beaucoup plus traités que d'autres, or stratégiquement on peut se questionner s'il s'est un bon choix. En effet, à titre d'exemple, le phosphore est une source indispensable à l'agriculture mais n'est pas étudié dans les analyses de la criticité.

### **Recommandations pour pouvoir intégrer un indicateur criticité en ACV :**

- Proposer une méthodologie d'évaluation de la criticité qui fasse consensus, basée sur les recherches faites sur l'épuisement des ressources historiquement traitées en ACV (AADP...)
- Adapter les indicateurs de criticité à l'ACV afin qu'un calcul de l'impact soit envisageable. Se baser sur le travail effectué par Graedel et al. (2012) semble être une bonne idée puisqu'il semble que c'est ce qui est le plus fiable et le mieux construit méthodologiquement (car proche de l'ACV).
- Assurer une ouverture de la méthode sur les aspects socio-économiques car non seulement ils influencent l'aspect environnemental mais ils y participent aussi (modes de consommation, recyclage...).
- Mieux prendre en compte le recyclage pour les filières spécifiques comme dans les technologies de production d'électricité bas carbone.
- Adapter l'ACV aux différentes échelles de la criticité.
- Adapter l'ACV pour qu'elle puisse prendre en compte la criticité comme indicateur dynamique. Cela entraîne une incertitude haute qui peut être traitée grâce à des fourchettes de résultats suivant ces incertitudes. Bien que cela permettrait de montrer les processus réels qui découlent de la criticité, cela devra s'accompagner de nombreuses explications afin que des instances dirigeantes puissent la prendre en compte pour des décisions politiques ou économiques.
- Améliorer la recherche sur les matériaux critiques et le recyclage. La plupart des matériaux critiques ne sont pas recyclés. Outre le manque de filière adéquate et le coût exorbitant que cela pourrait entraîner, le vrai problème reste la concentration et la quantité de matériau utilisé. En effet, si ces matériaux étaient purs ou en plus forte concentration, le problème de la récupération ne se poserait pas. C'est le cas, par exemple, du cobalt contenu dans les batteries de véhicules électriques ou le recyclage est quasiment intégral alors que le gallium en fin de vie est recyclé à environ 1% car il est contenu dans des composants électroniques en majorité, donc en quantité négligeable par élément. À cela nous pouvons ajouter que le recyclage peut être compliqué à mettre en place lorsque les éléments à recycler sont difficilement dissociables des autres éléments d'un composant.



- Améliorer la recherche sur les matériaux critiques et la substitution. Le problème de la plupart des matériaux critiques est qu'ils sont peu facilement substituables. En effet, les propriétés physico-chimiques sont particulières et sont remplaçables, par exemple, au prix d'une quantité beaucoup plus importante d'une autre matière. C'est pourquoi cela entraîne des difficultés : quels sont les effets de la substitution ? Existe-t-il un phénomène d'effet rebond ? Est-ce que cette substitution n'est pas pire, au final, que l'utilisation d'une ressource critique ? Voilà une des réponses qu'il faudrait apporter, à fonction équivalente.

De plus, certaines questions restent poser : l'ACV en elle-même répond-elle vraiment à une évaluation de la criticité des ressources ou une analyse complétée par des aspects socio-économiques, qui revêtent une importance capitale pour l'évaluation de la criticité, serait-elle mieux adaptée comme l'Analyse de Durabilité du Cycle de Vie (ADCV) ?. Les chercheurs en ACV mais aussi en étude des ressources seront amenés à se pencher sur cette question de criticité, dans les domaines industriels mais aussi agricoles, pour les prises de décisions tant politiques que stratégiques en entreprise.

#### 4.2.3. Difficultés rencontrées pour apporter des solutions à la prise en compte de la criticité des ressources en ACV

La prise en compte de la criticité des ressources en ACV est actuellement difficile. Tout d'abord, il n'existe pas d'indicateur (hors ACV) qui soit fiable et qui fasse consensus. Une des premières solutions à apporter serait donc de déterminer quelles sont les composantes essentielles et quels sont les indicateurs pour en rendre compte (la dimension environnementale qui est prise en compte par Graedel et al. (2012) et ne l'est pas par l'Union Européenne par exemple).

Les aspects socio-économiques sont importants pour l'évaluation de la criticité des ressources. Comme le souligne Sonnemann et al. (2015), il serait peut-être donc préférable d'utiliser l'approche « cycle de vie » pas sous la forme de l'outil ACV classique mais plutôt via l'Analyse de Durabilité du Cycle de Vie (ADCV) qui semblerait plus adaptée.

La substitution des ressources pose des problèmes conséquents, notamment sur les éventuels effets rebonds qui pourraient intervenir, que ce soit dans le domaine environnemental ou socio-économique. Elle n'est pas prise en compte actuellement, et il semble être compliqué d'en faire état en ACV.

Le recyclage est une solution à court terme puisqu'il permet de réduire la dépendance aux approvisionnements. Il n'est pas relaté dans les méthodes de manière adéquate. Les filières sont en général à mettre en place suivant des stratégies et des coûts associés à déterminer ; les politiques publiques pouvant inciter au recyclage (taxation forte pour les « déchets » non recyclés ou baisse des charges liées aux filières de recyclage). Le véritable enjeu est celui du gaspillage (que ce soit dans les mines ou les étapes de transformation des matériaux), puisqu'il n'aurait qu'un coût supplémentaire marginal. En effet, le gaspillage peut être évité en optimisant les machines (coût amorti par la non-utilisation de matière) ou par

des pratiques plus adaptés : il s'agit de (re)penser aux actions de transformation et de recycler tout ce qui peut l'être.

Que ce soit la criticité ou la criticité vue à travers l'approche « cycle de vie », il reste encore beaucoup de travail pour créer un indicateur qui soit fiable. Les chercheurs ont un rôle important sur un sujet qui est d'actualité ; une prise en compte de la criticité des ressources pourrait améliorer grandement les prises de décisions des entreprises et/ou des politiques publiques.

#### 4.3. Étude des différentes ressources d'intérêt : les fiches de criticité des matériaux

Pour rendre compte de la criticité des matériaux que nous étudions, il a été choisi de faire une « fiche de criticité » pour chacun. Directement inspiré du travail effectué par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), elles ont pour but de faciliter la compréhension des causes de criticité de ladite ressource. Cela permet également de préparer la phase suivante de travail ; c'est-à-dire l'application sur des cas industriels. De plus, ce travail de recherche sur les ressources permet de mieux appréhender la constitution des fiches de criticité pour chaque matériau. Par exemple, le phosphore n'est pas recensé par le BRGM car il n'appartient pas à la famille de matériaux métalliques. Cependant, il semble que son étude serait intéressante étant donné qu'il s'agit d'un élément essentiel à la vie. Nous allons ici présenter une des fiches effectuées, les autres étant consultables (indium et phosphore) en Annexe 3. Prenons l'exemple du cobalt, qui est le matériau dont les données sont les plus complètes et les plus précises :

- **Le Cobalt<sup>11</sup> :**

Le cobalt (Co) est un élément classé parmi les métaux de transition. Selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée, il s'agit d'« un élément chimique dont les atomes ont une sous-couche électronique *d* incomplète, ou qui peuvent former des cations dont la sous-couche électronique *d* est incomplète ». Il appartient au groupe du fer dont les propriétés sont similaires. Son numéro atomique est 27, suivant le tableau de Mendeleïev.

La particularité du Cobalt est qu'il s'agit d'un sous-produit du cuivre ; cela signifie qu'il est complètement dépendant de la production du métal hôte. Il est d'autant plus sensible de traiter ce type d'élément car un changement de l'offre ou de la demande du cuivre peut faire varier énormément le cours et les approvisionnements du cobalt.

---

<sup>11</sup> Pour toute cette section consacrée au cobalt, les images et les textes proviennent, sauf indication contraire, des fiches de criticité faites par le BRGM et consultables à l'adresse suivante (attention, seules 24 existent lors de la rédaction de ce rapport) : <http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite>

❖ Domaines d'utilisation en Europe (Figure 4) :

- Les batteries rechargeables (Li-ion, Ni-MH et Ni-Cd) ; les appareils électriques et électroniques et les véhicules électriques (dont les batteries) représentent 50 % des utilisations actuelles.
- Les superalliages (combinaison avec d'autres éléments afin d'obtenir une haute résistance à la pression et aux hautes températures) représentent 18 % des domaines d'utilisation.
- Un catalyseur permet d'accélérer une réaction, chimique par exemple. Il s'agit de 5 % de l'emploi effectué pour le cobalt (par exemple sous la forme d'hydrocarbonyle de cobalt).
- D'autres alliages sont faits et cela représente 4 % des emplois du cobalt.

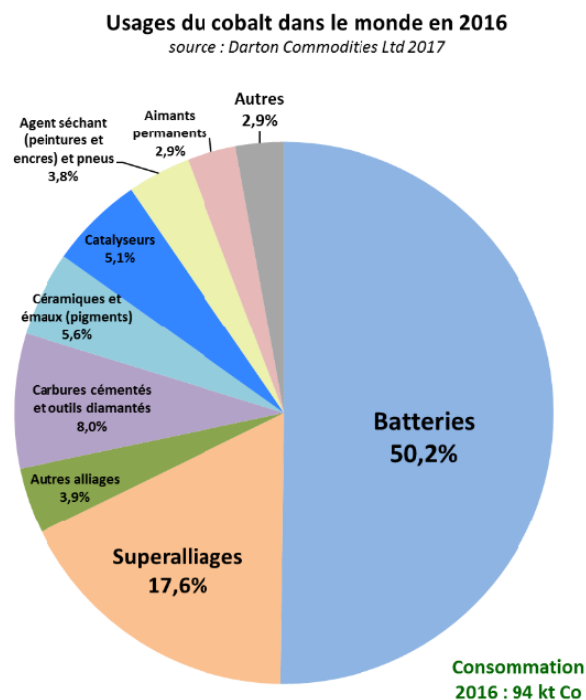


Figure 4 : Usage du cobalt dans le monde

❖ Les pays producteurs et les réserves mondiales :

Les pays producteurs sont ceux dont sont extraits les minéraux en question et non pas ceux procédant à leur raffinage. Il s'agit de :

- République Démocratique Congo : 64,7 %
- Cuba : 5,2 % ;
- Russie : 5,1 % ;
- Philippines : 4,3 % ;
- Australie : 3,8 % ;
- Canada : 2,9 % ;
- Madagascar : 2,9 % ;
- Nouvelle-Calédonie : 2,9%.

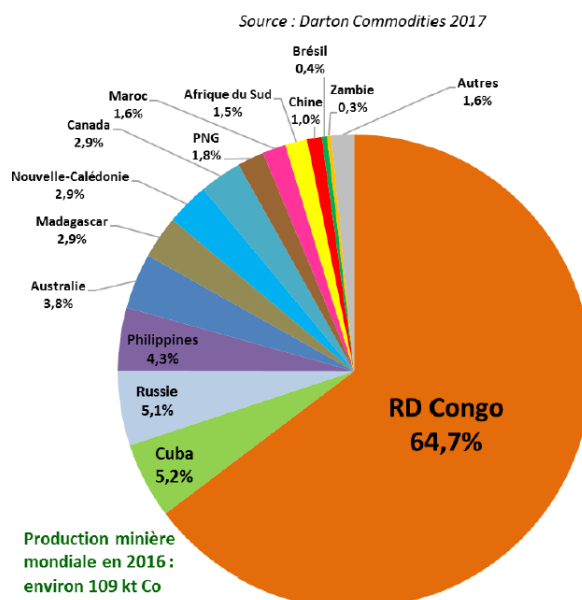


Figure 5 : Répartition de la production mondiale du cobalt.

Les principales réserves mondiales sont détenues par :

- République Démocratique du Congo : 48,6 % ;
- Australie : 14,3 % ;
- Cuba : 7,1 % ;
- Philippines : 4,1% ;
- Canada : 3,9 % ;
- Zambie : 3,9 %.

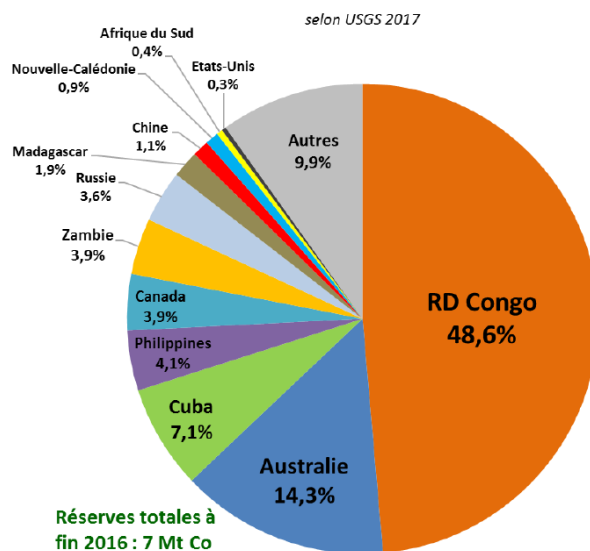


Figure 6 : Répartition des réserves mondiales de cobalt.

- Le recyclage et la substitution : Son recyclage en fin de vie est de 68 % environ. Le contenu des approvisionnements en cobalt secondaire est d'environ 32 %. Cela fait du cobalt un des éléments critique les plus recyclés. Les substitutions sont possibles mais avec des performances amoindries (superalliages, carbures cémentés, pigments), ou cobalt substituable par des éléments non moins critiques (néodyme pour les aimants permanents). Dans les batteries, la part du cobalt devrait diminuer au fil du temps au profit de celle du nickel.
- Sa criticité : Ce graphique est un résumé de la fiche entière du BRGM. Il reprend de manière synthétique les éléments énoncés et cela permet une approche très visuelle, c'est pourquoi nous choisissons cette méthode pour rendre compte de la criticité du cobalt.

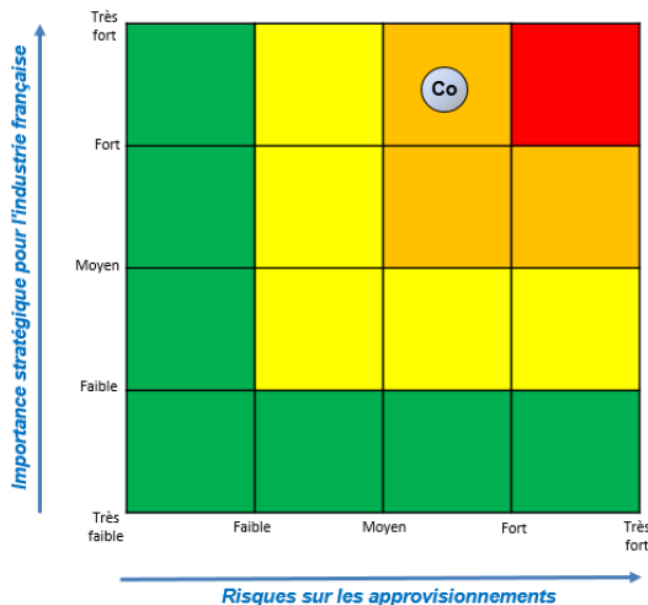


Figure 7 : Représentation de la criticité du cobalt

Notons qu'une représentation d'une analyse des flux, tirée de la publication de Bio by Deloitte (2015) a été ajoutée afin de mieux visualiser quels sont les principaux points clés afin d'améliorer la circularité des flux de chacune des matières étudiées. À travers le diagramme de Sankey simplifié du cobalt (voir Annexe 4), sur lequel nous pouvons voir que le recyclage représente 20 % des flux d'entrée de la matière pour l'Europe ; il s'agit donc d'une manière de s'approvisionner non négligeable. L'enfouissement représente environ 27 % de la fin de vie de la matière ; le stock dormant quant à lui environ 7 %. Nous pouvons voir ici qu'en mobilisant plus efficacement le recyclage, nous arriverions à réduire notre dépendance aux importations de cobalt.

## Conclusion

Nous venons de voir le travail effectué durant mon stage, le contexte et les perspectives à venir. Nous pouvons affirmer que l'épuisement des ressources et plus particulièrement la criticité des ressources est un sujet vaste, important, qui va demander des recherches approfondies. Pour cela, mon travail a permis de souligner les manques dans les méthodes existantes et les points de vigilance à avoir pour les travaux futurs. Notre étude va permettre dans les semaines à venir de rédiger un guide de recommandations qui aura pour finalité de donner une ligne directrice à tous les praticiens de l'ACV, membres du réseau EcoSD. Au-delà des membres du réseau, cette étude peut intéresser tous les chercheurs en ACV et ceux travaillant sur les ressources. Cette étude vient « compléter » les méthodes existantes sur l'épuisement des ressources tout en répondant aux besoins d'industriels comme Orange mais aussi d'institutions comme Irstea ou le BRGM qui se préoccupent de ces thématiques d'épuisement des ressources. Tous les secteurs peuvent être concernés mais il se dégage de cette étude que les systèmes de production d'énergie bas-carbone ainsi que les technologies associées (batteries par exemple) soient les plus concernées ; sans parler du phosphore qui, quant à lui, devrait être mieux pris en compte du fait de son caractère vital.

Il n'est plus à démontrer que nous vivons sur une planète avec des ressources finies. Cela sous-entend que sans une certaine dose de sobriété et de bon sens de notre part, nous ne pourrions pas laisser aux générations la chance de vivre comme elles le souhaitent. Plus généralement, il est primordial de moins consommer, de mieux consommer et enfin de réutiliser et recycler tout matériau que nous utilisons. Ce n'est qu'avec un changement des méthodes de production et des mentalités que nous parviendrons à un développement qui soit soutenable. Les chercheurs ont encore beaucoup de travail afin d'y parvenir, dans des domaines très variés.

### Point de vue personnel sur mon stage :

Au cours de mon stage, j'ai pu acquérir des notions d'un domaine qui me tenait particulièrement à cœur et c'est une des raisons pour lesquelles j'ai choisi ce stage : il s'agit de l'agronomie. En effet, de par les activités du site, j'ai pu voir ce qui se fait sur les fertilisants, les recherches faites pour lutter contre l'utilisation des pesticides (désherbage robotisé) ou encore des bases sur l'irrigation...

Par ce stage de recherche, j'ai également voulu conforter l'avis que j'avais pour mon projet professionnel et voilà chose faite. J'ai pu apprendre beaucoup, de méthodologie de recherche et de manière de travailler ; mais aussi des notions du domaine agronomique auquel je tiens. Je pense qu'un développement soutenable est possible et qu'agronomie, environnement et énergies sont suffisamment liés pour être traités ensemble. C'est vers quoi je tendrai à travailler si j'ai la chance de pouvoir continuer à construire mon projet professionnel, en faisant une thèse.

J'ai pu voir, au travers des travaux de valorisation réalisés, qu'il s'agissait d'un aspect important pour un (futur) chercheur. Les travaux ont ainsi servi lors de réunions avec les partenaires, à travers des présentations orales (à Paris le 14 juin par exemple où se déroulait une réunion pour faire un point d'avancement sur le projet) ou encore écrites, pour communiquer avec les partenaires privilégiés (Orange et le groupe PSA). Ce rapport servira notamment à l'élaboration du guide de recommandations qui montrera la position du réseau EcoSD au sujet de la criticité des ressources ; voire à la publication d'un article de review. Bien que mentionné assez rapidement, cet aspect valorisation n'est pas négligeable et a été amenée à m'occuper durant un certain nombre d'heures.

## Bibliographie

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.

Alvarenga, R. A. F., I. D. Lins & J. A. D. Neto (2016) Evaluation of Abiotic Resource LCIA Methods. *Resources*, 5, 21.

Blengini, G. A., P. Nuss, J. Dewulf, V. Nita, L. T. Peiro, B. Vidal-Legaz, C. Latunussa, L. Mancini, D. Blagoeva, D. Pennington, M. Pellegrini, A. Van Maercke, S. Solar, M. Grohol & C. Ciupagea (2017) EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements. *Resources Policy*, 53, 12-19.

Daw, G. (2017) Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality. *Resources Policy*, 53, 173-189.

de Boer, M. A. & K. Lammertsma (2013) Scarcity of Rare Earth Elements. *Chemosuschem*, 6, 2045-2055.

Deloitte, B. b. (2013) INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE. Prepared for Score LCA. Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials. Prepared for the European Commission

Dewulf, J., L. Benini, L. Mancini, S. Sala, G. A. Blengini, F. Ardente, M. Recchioni, J. Maes, R. Pant & D. Pennington (2015) Rethinking the Area of Protection "Natural Resources" in Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 49, 5310-5317.

European-Commission, J. R. C. o. t. (2013) Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Scientific and Policy Report.

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

Frenzel, M., J. Kullik, M. A. Reuter & J. Gutzmer (2017) Raw material 'criticality'-sense or nonsense? *Journal of Physics D-Applied Physics*, 50.

Gao, F., Z. R. Nie, Z. H. Wang, X. Z. Gong & T. Y. Zuo (2009) Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 52, 215-222.

Goe, M. & G. Gaustad (2014) Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach. *Applied Energy*, 123, 387-396.

Graedel, T. E., J. Allwood, J. P. Birat, M. Buchert, C. Hagelueken, B. K. Reck, S. F. Sibley & G. Sonnemann (2011) What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15, 355-366.

Graedel, T. E., R. Barr, C. Chandler, T. Chase, J. Choi, L. Christoffersen, E. Friedlander, C. Henly, C. Jun, N. T. Nassar, D. Schechner, S. Warren, M. Y. Yang & C. Zhu (2012) Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology*, 46, 1063-1070.

Graedel, T. E., E. M. Harper, N. T. Nassar, P. Nuss & B. K. Reck (2015) Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 4257-4262.

Habib, K. & H. Wenzel (2014) Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. *Journal of Cleaner Production*, 84, 348-359.



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

Harper, E. M., G. Kavlak, L. Burmeister, M. J. Eckelman, S. Erbis, V. S. Espinoza, P. Nuss & T. E. Graedel (2015) Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family. *Journal of Industrial Ecology*, 19, 628-644.

Hatayama, H. & K. Tahara (2015) Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. *Materials Transactions*, 56, 229-235.

Hernandez, M., M. Messagie, M. De Gennaro & J. Van Mierlo (2017) Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods. *Resources Conservation and Recycling*, 120, 119-130.

Klinglmair, M., S. Sala & M. Brandao (2014) Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 580-592.

Knoeri, C., P. A. Waeger, A. Stamp, H. J. Althaus & M. Weil (2013) Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand - With material flow supply modelling approaches. *Science of the Total Environment*, 461, 808-812.

Malinauskienė, M., I. Kliopova, M. Slavickaitė & J. K. Staniškis (2016) Integrating resource criticality assessment into evaluation of cleaner production possibilities for increasing resource efficiency. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18, 1333-1344.

Mancini, L., L. Benini & S. Sala (2016) Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 726-738.

Mancini, L., S. Sala, M. Recchioni, L. Benini, M. Goralczyk & D. Pennington (2014) Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 100-116.

Miehe, R., R. Schneider, F. Baaij & T. Bauernhansl (2016) Criticality of Material Resources in Industrial Enterprises – Structural Basics of an Operational Model. *Procedia CIRP*, 48, 1-9.

Northey, S. A., G. M. Mudd, T. T. Werner, S. M. Jowitt, N. Haque, M. Yellishetty & Z. H. Weng (2017) The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 44, 109-124.

Peters, J. F. & M. Weil (2016) A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries. *Resources-Basel*, 5.

Road-and-Hydraulic-Engineering-Institute (2002) Abiotic resource depletion in LCA.

Rorbech, J. T., C. Vadenbo, S. Hellweg & T. F. Astrup (2014) Impact Assessment of Abiotic Resources in LCA: Quantitative Comparison of Selected Characterization Models. *Environmental Science & Technology*, 48, 11072-11081.

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

Schneider, L., M. Berger & M. Finkbeiner (2011b) The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 929-936.

Schneider, L., M. Berger & M. Finkbeiner (2015) Abiotic resource depletion in LCA-background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 709-721.

Schneider, L., M. Berger, E. Schuler-Hainsch, S. Knofel, K. Ruhland, J. Mosig, V. Bach & M. Finkbeiner (2014) The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 601-610.

Simon, B., S. Ziemann & M. Weil (2014) Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator. *Metallurgical Research & Technology*, 111, 191-200.

Sonnemann, G., E. D. Gemechu, N. Adibi, V. De Bruille & C. Bulle (2015) From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 94, 20-34.

UNEP (2011) Recycling rates of metals - A Status Report. *Journal of Industrial Ecology*.

Vieira, M. & M. A. J. Huijbregts (2016) Mineral resource scarcity. LC Impact method.

Vieira, M. D. M., M. J. Goedkoop, P. Storm & M. A. J. Huijbregts (2012) Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper. *Environmental Science & Technology*, 46, 12772-12778.

Yellishetty, M., G. M. Mudd & P. G. Ranjith (2011) The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? *Journal of Cleaner Production*, 19, 78-90.

## Annexes

### **ANNEXE 1 : Tableaux d'analyse des différentes publications**

Tableau 6 : Tableau général d'étude des publications

Tableau 7 : Tableau d'étude de la criticité

Tableau 8 : Tableau d'étude du recyclage

Tableau 6 : Tableau général d'étude des publications

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")		Criticité	
											ACV	Non ACV	ACV	Non ACV
1	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 * État de l'art du terme de <b>criticité</b> (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 <b>ressources critiques</b> d'une <b>entreprise</b> , par une méthodologie détaillée (vulnérabilité et risques d'approvisionnement y sont détaillés).				x
2	Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools	(Finnveden and Ostlund 1997)	Illustrer l'utilisation de l'approche thermodynamique dans des études de cas et comparer les résultats avec d'autres approches, contribuant ainsi à la discussion sur la façon de mesurer l'utilisation des ressources.	non, mais il parle de l'utilisation ("depletion") des ressources	oui	non	oui	non	* Mesure de l'utilisation des ressources par l'exergie en ACV ("depletion") * Comparaison avec d'autres méthodes * Calculs : <b>ADP</b> * Points forts et perspectives de cette méthode	L'utilisation des ressources abiotiques est très discutée : différentes méthodes : ADP, Cumulative Exergy Demand (CExD). Approches thermodynamiques comparées aux autres approches "classiques". Les données, robustes, permettent un calcul <b>fiable</b> et c'est pertinent pour <b>l'utilisation et l'épuisement des ressources</b> ; tout en montrant ce qui est réellement consommé.	x			
3	The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change	(Northey et al. 2017)	Corrélation entre métaux basiques (cuivre, zinc...) et criticité de l'eau	oui	non	non	non	non	* Cas d'étude : ressource en eau et impact sur la production des métaux	Étude sur les approvisionnements en eau par rapports aux exploitations minières. NE REpond PAS à notre problématique (même par la méthode)			NA	
4	Integrating resource criticality assessment into evaluation of cleaner production possibilities for increasing resource efficiency	(Malinauskienė et al. 2016)	Démontrer l'intérêt à utiliser la criticité des ressources pour augmenter l'efficacité d'utilisations de celles-ci.	oui	non	non	oui	non	* Pendant les phases de préparation du matériau, beaucoup de <b>pertes</b> (découpe (épaisseur) (beaucoup ici), chutes, pièces non conformes...) * -55% de déchet et -20% de matériau utilisé * <b>recyclage, ressources et criticité!</b> * prise en compte de la criticité afin d'améliorer les process de transformation des matériaux	D'un point de vue "preneur de décisions", une approche cycle de vie avec prise en compte du <b>recyclage</b> doit être faite afin d'avoir une <b>moins forte dépendance</b> aux matériaux (critiques ou non). L' <b>efficacité</b> accrue des systèmes de transformation des matériaux "diminuerait" la criticité tout comme un recyclage accru				x
5	From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment	(Sonnemann et al. 2015)	Démontrer pourquoi il est important d'intégrer la criticité des ressources en ACV qui s'intègre elle-même dans un ASCV, et comment cela pourrait être fait	oui	oui	oui	non mais références à d'autres auteurs et aux stocks anthropiques	oui, dans le tableau résumant les différentes façons d'appréhender la criticité des ressources (table 1)	* <b>Méthodes existantes</b> (en ACV ou non) sur la criticité * Importance du côté économique et social * ACV ET ASCV ! * Facteurs de caractérisation	Une <b>revue</b> de tout ce qui est entrepris en relation avec le terme de criticité est réalisée avec de nombreuses références à d'autres articles ; il y a un aperçu complet des méthodes développées et/ou à développer par la suite. Un document reprenant chaque explication est envisageable pour ce document, ce qui permettra de mieux appréhender les études faites (voir onglet <b>Sonnemann</b> )	x	x	x	x

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")	Criticité
6	The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment	(Schneider et al. 2014)	Développer un nouveau modèle pour l'étude des ressources, traitant de l'économie (négligée auparavant), afin de compléter les modèles d'ACV existants.	oui, et de la dépletion des ressources également	oui	oui	oui, très brièvement	Cobalt (+terres rares + PGM)	<p>* Mentionné par SONNEMANN</p> <p>* Nouvelles catégories d'impact et nouveau modèles de caractérisation</p> <p>* Est-ce que les calculs de criticité (UE) sont fiables/prennent en compte tous les aspects?</p>	L'ACV doit être complétée par une vision économique car l'ACV est incomplète pour évaluer la diminution des ressources et donc la criticité. D'ailleurs, il faut se poser la question si cette "criticité" est évaluée de manière complète (par la Commission Européenne notamment)	x	x
7	Abiotic resource depletion in LCA— background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model	(Schneider, Berger and Finkbeiner 2015)	Nouvelle méthode discutée avec mise à jour des facteurs de caractérisation : l'"anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP)". (ADP avec facteur anthropique)	non, mais il parle de l'utilisation ("depletion")des ressources	oui	non	oui, très brièvement	le cobalt est mentionné dans l'étude (exemple)	<p>* ADP très bien expliqué (facteurs de caractérisation...)</p> <p>* Les réserves sont estimées : RIEN de sûr!</p> <p>* Réserves dépendent de la définition qu'on en fait ET n'est pas une donnée fiable ; on ne sait pas. Les technologies changent et les estimations aussi : comment prévoir ?</p> <p>*AADP</p>	Les stocks anthropiques doivent être pris en compte et les différentes méthodes font référence aux méthodes utilisées pour l'ADP. Le recyclage est un point essentiel pour diminuer la pression exercée sur les ressources premières ("démontabilité"). Différents calculs sont comparés mais il existe un fort doute sur les niveaux de stocks de matériaux (données très approximatives). Des recherches nécessaires. (tableau avec la méthode résumée ?)	x	
8	The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterization to model the depletion of abiotic resources	(Schneider, Berger and Finkbeiner 2011b)	Prendre en compte les ressources anthropiques afin de mieux gérer l'utilisation des ressources : création de l'AADP (nouveaux facteurs de caractérisation par exemple)	non, pas directement, mais il parle de l'utilisation ("depletion")des ressources	oui, nouveau modèle de caractérisation	non	non	le cobalt est mentionné dans l'étude (en exemple avec d'autres)	<p>* substitution des "ultimes réserves (ADP) par des ressources et ajout du stock anthropique dans les stocks lithosphériques.</p> <p>* besoin de plus de recherche pour mieux prendre en compte les stocks anthropiques</p> <p>* accumulation des stocks dans les sociétés doivent être prises en compte (réutilisation et recyclage!)</p> <p>*le stock anthropique doit être pris en compte car peut être une vraie source de matériaux.</p> <p>* utilisation de MFA pour caractériser les flux anthro</p> <p>* prise en compte depuis 1900 : avant, négligeable (extractions).</p> <p>* Un MFA de chaque matériau devrait être effectué pour une mise à jour correcte des flux</p> <p>* modèle de caractérisation ADP puis AADP explicité (moyen)</p>	Étude de quelque matériaux (dont le COBALT) en AADP comparé à l'ADP. Différences et explicitation (VOIR TABLEAU ?) Des études supplémentaires sont nécessaires.	x	
9	Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues	(Klinglmair, Sala and Brandao 2014)	Donner les éléments clés afin de développer des méthodes d'évaluation des ressources en ACV.	oui	oui	oui, brièvement	oui, très brièvement	Indium et Cobalt sont évoqués brièvement (comparaison de méthodes)	<p>* Améliorer les taux de recyclage afin d'e gérer les ressources efficacement</p> <p>* Référence à Schneider et al. 2011 et à Vieira et al. 2012 (méthodes)</p> <p>* stock anthropogénique : problème de qualité (par rapport aux matières extraites) ?</p> <p>* combinaison de plusieurs méthodes de calcul pour fiabilité?</p>	Plusieurs méthode d'évaluer l'impact "ressource depletion" sont comparées. Chacune possède des points + et des points - : peut-on imaginer d'en combiner plusieurs? Recherche à mener ; manque harmonisation des méthodes : il est difficile de s'y retrouver et de savoir laquelle est la mieux.	x	

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")	Criticité
10	Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective - using the case of direct-drive wind turbines	(Habib and Wenzel 2016)	Revue sur les méthodologies d'évaluation des ressources critiques : monter que des éléments dynamiques seraient souhaitables (et comment le faire) et remise en cause de l'aspect vulnérabilité telle qu'elle est étudiée à travers l'exemple des éoliennes	oui	non	non	oui, en annexe (à trouver...)	Néodyme bien traité dans le cadre d'une éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>* On se place dans un contexte énergétique : un domaine spécifique permet d'approfondir les recherches.</li> <li>* la vue <b>statique</b> donne des données <b>erronées</b> : l'estimation des réserves est changeante et les ressources peuvent "se déplacer" géographiquement.</li> <li>* Différence des sous-indicateurs évoquée</li> <li>* la vue dynamique permettrait de prendre des décisions pour éviter cette criticité, à long terme</li> <li>* la vulnérabilité est vue de manière trop générale : il faut substituer non pas un élément par un autre mais plutôt une technologie par une autre (→ fonctions!)</li> <li>* contourner la vulnérabilité par le design</li> <li>* cas traité : le NEODYME (<b>recyclage</b>)</li> <li>* Ce type d'approche est intéressant pour les nouvelles technologies car cela permet de se projeter</li> </ul>	Étude de cas de l'éolienne, avec l'exemple, entre-autre du néodyme : scénarios afin d'anticiper la criticité du future et aide à la prise de décisions. Privilégier des approches de ce type pour traiter de la criticité semble être une bonne idée mais peut être longue à être mise en place. Une vision dynamique semble souhaitable. (VOIR TABLEAU HABIB-2016)		x
11	Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper	(Vieira et al. 2012)	L'objectif de cet article est de développer une méthode d'évaluation de l'impact du cycle de vie qui traite de l'importance relative de l'utilisation des ressources (métalliques) dans les produits.	non, de la rareté (scarcity) des métaux	oui (ADP et AADP)	non	non	non, il parle des mines en général	<ul style="list-style-type: none"> <li>* extrait en haute concentration puis dissipé (produits et déchets)</li> <li>* beaucoup de calculs <b>EST-CE PERTINENT?</b></li> <li>* S'applique à une extraction minière, peu d'intérêt pour notre étude</li> </ul>	FC et nouvelle méthode pour la rareté d'un élément (métallique) extrait d'une mine ; peu intéressant pour notre étude. On apprend ce que l'on pouvait penser : on s'intéresse à des gisements de plus en plus petit...	x	
12	Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling	(Habib and Wenzel 2014)	Étudier les risques de contraintes d'approvisionnement en considérant une hausse de la demande	non, de la depletion des ressources	non	non	oui, brièvement	Néodyme (Nd)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Appliqué aux énergies renouvelables</li> <li>* <b>recyclage</b> : solution à <b>long terme</b></li> <li>* Utilisation dans les moyens de production d'énergies renouvelables</li> <li>* gros risque d'approvisionnement : la Chine fournit la quasi-totalité des terres rares !</li> <li>* taux de recyclage des terres rares : moins de 1%</li> <li>* <b>Éoliennes à aimants permanents</b></li> <li>* Différents scénarios présentés</li> <li>* Pour éviter les pénuries, pourquoi ne pas ouvrir des mines (Europe? Amérique du Nord?)</li> </ul>	Étude des terres rares appliquées dans le domaine de la production d'énergie propre : le recyclage semble être un moyen de diminuer les risques de pénurie.	x	
13	Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator	(Simon, Ziemann and Weil 2014)	Développer une méthode afin de rendre compte de la criticité (spécifique) des matériaux utilisés pour les batteries. (Lithium-ion)	oui, dans un cas d'étude (batteries)	non	non	oui, très brièvement	Oui le cobalt est étudié dans un cas d'étude (comme matériau secondaire)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* voir la criticité pour <b>chaque technologie</b> : nouvelle « méthode » PROBLEME: un matériau est utilisé dans <b>beaucoup de technologies !</b></li> <li>* Le Lithium, au vue de ses futures utilisations (véhicules électriques) pourrait rapidement devenir une ressource majeure critique (augmentation de l'utilisation)</li> <li>* le <b>recyclage</b> des matériaux n'est <b>pas assez étudié</b> (littérature)</li> <li>* <b>3 méthodes d'évaluation</b> : matrice de criticité, indices de criticité et quantification des futures demandes d'approvisionnement</li> <li>* <b>4 études</b> avec le <b>concept</b> d'indices de criticité développés dans le but de développer un indicateur technologique spécifique : Morley and Eatherley /NEDO/ the IW Consult study / Moss et al.</li> </ul>	Cas d'étude portant sur les batteries (au Lithium). Une étude pour chaque technologie est envisageable, de la criticité, afin de prendre des décisions. Cependant, il faut encore faire des études car compliqué à mettre en place. Idée à développer.		x
14	Criticality of metals and metalloids	(Graedel et al. 2015)	Caractériser la criticité de 62 "métaux" grâce à la matrice 3D (risque appro, vulnérabilité et implications environnementales)	oui	non	non	oui, très brièvement mais surtout de substitution	Indium et Cobalt (+ Germanium et Néodyme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 2008 pour avoir des informations complètes (→2015)</li> <li>* étude de 62 éléments dont ceux qui nous intéressent (sauf le phosphore)</li> <li>* Notion complexe</li> </ul>	Document d'étude de certains matériaux critiques, pouvant aider à la prise de décision ; nous n'y apprenons de nouvelles choses d'un point de vue méthodo.		x

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")		Criticité	
15	Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy	(Hatayama and Tahara 2015)	Analyse de la criticité de 22 métaux en 2012 pour "aide à la prise de décisions (stratégies politiques, économiques...)" pour le Japon : New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)	oui	non	non	oui	Cobalt, Indium, (+ Néodyme (Nd), et Platine (Pt))	* Lieu : JAPON * Prise en compte de 5 catégories de risque : le risque d'approvisionnement, le risque sur les prix, le risque sur la demande, le risque de restriction du recyclage et le risque potentiel * méthode d'évaluation "NEDO"	Évaluation des matières critiques pour le Japon, qui est très dépendant de ses importations. Mise en place d'une évaluation avec 5 critères, plus complète que d'autres méthodes et prenant en compte le recyclage (à adapter pour l'ACV?)	x			
16	EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements	(Blengini et al. 2017)	Voir quels sont les éléments spécifiques de la méthodologie pour évaluer la criticité, pour l'Union Européenne	oui	non	non	oui	oui indium et cobalt directement puisqu'il fait référence aux matériaux critiques selon l'UE	* <b>Supply Risk (SR)</b> et Economic Importance (EI) sont détaillés : le recyclage y est inclus ("réduit les risques"); <b>SI : substitution index -&gt; recyclage (détaillé) MAIS</b> est aussi prise en compte en <b>économie!</b> * <b>recherche</b> solutions substituabilité et de production soutenable à l'horizon <b>2020</b> * ce qui peut influencer la criticité devrait être pris en compte : recyclage. ATTENTION : méthodologie basée sur un instant donné, un passé récent. * prendre en compte plusieurs étapes de la chaîne d'approvisionnement est plus juste (ex : extraction du minerais et raffinage) * adapter la méthode : différencier les pays d'approvisionnement permet d'être plus précis. * les méthodologies appliquées sont améliorées petit à petit * étude sur le recyclage : EOL-RIR	Mise à jour des critères d'évaluation des matériaux critiques pour l'UE ; la prise en compte du recyclage y est introduit. Notons que l'UE tient à avoir des indicateurs fiables afin d'aider à la prise de décisions (économiques, par exemple)				x
17	Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality	(Daw 2017)	Appliquer l'étude de criticité (EC) au LITHIUM en France (tiré de la Commission Européenne)	oui	non	non	oui (document annexe)	non, cas d'étude : le Lithium	* La criticité vu au travers des siècles (revue de la pensée) * basé sur EC 2014, centré sur la France avec introduction d'indicateur le <b>TIM (international transformation of materials)</b> (effets extérieurs de l'importation : transformations...) * lithium appliqué en France MAIS faisable pour tout autre élément * voir la criticité à travers la valeur ajoutée : plus elle est haute, moins le risque de non approvisionnement est important * annexe : substitution et recyclage	Amélioration de la méthode (ajouts d'indicateurs) par rapport à l'EC afin d'évaluer la criticité des ressources, appliqué au Lithium en France. Méthode applicable à d'autres éléments.				x
18	A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries	(Peters and Weil 2016)	Comparer les différents résultats obtenus avec l'analyse de batteries à l'aide de plusieurs méthodes de calcul d'impacts.	non	oui	non	oui, très brièvement	Indium et Cobalt y sont discutés (peu)	* Exemple appliqué aux batteries * dépletion indirecte due à la co-extraction * <b>RDP : Resource Depletion Potential</b> * Différents calculs d' <b>IMPACTS (ADP, CML...)</b> et <b>FACTEURS DE CARACTERISATION</b> * Problème: double-comptage des impacts (co-prod.) * chaque méthode appliquée donne des résultats très différents, cela dépend du <b>CONTEXTE</b> * éliminer des batteries certaines substances (cobalt) peut être une solution * la <b>fin de vie</b> (batteries) doit être plus étudiée. * beaucoup d' <b>incertitudes</b> dans ces études * le <b>recyclage</b> peut être efficace afin de limiter la dépletion des ressources	Les méthodes de calcul d'impacts sont discutées sur le cas des batteries au Lithium. Il est intéressant de voir cet <b>état de l'art</b> des méthodes utilisées pour mesurer la <b>déplétion des ressources</b> .	x			

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")	Criticité
19	Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials	(Mancini et al. 2014)	Explorer le potentiel de l'ACV afin de convenir d'une méthode d'évaluation des ressources critiques	oui	oui	oui	oui, très brièvement (intérêt pour diminuer criticité + substitution)	non	<ul style="list-style-type: none"> <li>* ATTENTION au contexte (entreprise? Pays?) →EUROPE</li> <li>* ACV : aide à analyser l'utilisation des RC dans TOUTES les phases du cycle de vie.</li> <li>* développement de produits, plus intéressants (santé, environnement) et une meilleure relation aux ressources</li> <li>* LCA : trop centré environnement?</li> <li>* méthode de l'UE et de Graedel (2012) détaillées</li> <li>* PROBLEME : le faible taux d'utilisation dans un produit pourrait ne pas mettre en av. certains aspects comme criti.</li> <li>* la criticité pourrait être évoquée dans la définition du but de l'étude en ACV, par exemple</li> <li>* ILCD mentionné : CRMs listés comme flux élémentaires</li> <li>* Quel impact prendre pour la criticité (et qui soit adapté?)</li> <li>* Actuellement, "resources depletion" utilisé : bonne prise en compte environnementale ? Socio-économique? des doutes subsistent</li> <li>* Impacts directs sur les écosystèmes pas pris en compte</li> <li>* Reprend Vieira et al. 2013 et Schneider et al. 2011.</li> <li>* Beaucoup de questions en suspens</li> <li>* Possibilité d'y inclure une dimension socio-économique (Schneider et al. (2013), qui reprend rapport 'UNEP 2011.</li> <li>* Une analyse des flux de chaque matière étudiée est importante (savoir d'où ça vient et en quelle qté)</li> <li>* Il faut revoir l'indicateur "resources depletion" pour qu'il soit utilisable plus facilement</li> <li>* l'ACV et les ressources critiques peuvent facilement s'associer et donner des indications (décideurs) quant à l'avenir d'une ressource</li> <li>* Tableau reprenant le nombre de ressources évaluées dans chaque méthode</li> </ul>	L'ACV est un bon outil pour aider à prendre en compte la criticité. Pourquoi ne pas revoir ce qui se rapporte aux ressources ("resource depletion") en prenant en compte ce critère de criticité? Il ne faut pas oublier de prendre en compte les nouveaux éléments : les stocks anthropiques, le recyclage, la substituabilité.		x
20	Scarcity of Rare Earth Elements	(de Boer and Lammertsma 2013)	Étude de la rareté des terres rares	oui, de la rareté des ressources (terres rares)	non	non	oui	Non (mais terres rares : NEODYME)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* terres rares : concentration faible</li> <li>* Néodyme : risque à long terme (appro)</li> <li>* Indium : à court terme</li> <li>* enjeu majeur pour notre société (bas carbone) : énergie "verte"</li> <li>* radioactivité dû aux mines de terres rares</li> <li>* secteurs les plus consommateurs de REE est détaillé</li> <li>* recyclage complexe : petites quantités, beaucoup énergie (physique et/ou chimique déployée, peu de cas concrets de recyclage : aimants)</li> <li>* recycler ce qui en vaut la peine taux élevé de terres rares : voitures, éoliennes, métallurgie... (2007 : 4 X plus de néodyme utilisé issu du recyclage que de l'extraction)</li> <li>* penser à l'écoconception : solution?</li> <li>* avoir des procédés efficaces : pertes élevées durant la transformation (20 % sur certaines étapes)</li> <li>* avantages Europe : gros consommateur : nouvelle vie aux déchets ; réduction de la dépendance aux REE ; peu de risques (environnementaux ou dues aux mines, radioactivité...). Mais il faut encore : de la recherche pour pouvoir le faire, des filières, un cout acceptable (volonté politique?)</li> <li>* améliorer les performances (ex : aimants) permettrait d'utiliser moins de matière</li> <li>* En Europe : réutiliser et recycler, trouver des alternatives</li> </ul>	Étude des terres rares et de leur rareté ; explication des facteurs pouvant limiter leur rareté.	x	x



Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")	Criticité
21	Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study	(Adibi et al. 2017)	Compléter les méthodologies de caractérisation des impacts en ACV à l'aide de nouveaux facteurs de caractérisation.	non, MAIS il parle de l'utilisation des ressources : GRI	oui	non	oui, il le développe plutôt bien, comme nouvel indicateur (mais pas de substitution)	Cobalt étudié (néodyme) mais exemple présenté en détail : néodyme (éolien)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* ADP comparé aux nouvelles méthodes de caractérisation</li> <li>* étude pouvant être utilisé en approche "ACV" ou "économie circulaire"</li> <li>* le recyclage doit être inclus dans les études donc des stocks anthropogéniques</li> <li>* Mancini 2016 : incertain car basé sur socio-éco. ; il faut chercher un moyen d'être plus fiable</li> <li>* même si des CF sont applicables ils ne sont pas identiques ex : énergie renouvelable et non renouvelable</li> <li>* Le "Global Resource Indicator" est beaucoup plus complet et peut s'intégrer ou bien compléter une ACV</li> <li>* référence à Graedel et al. 2012 qui est ici repris et appliqué entre-autre à l'<b>indium</b> et le <b>germanium</b> (métaux "spéciaux")</li> <li>* <b>Ge et In</b> sont des métaux compagnons</li> <li>* <b>In</b> : Panneaux Solaires : de + en + utilisés</li> <li>* PPU (pourcentage de la Population qui l'Utilise") de Graedel est remplacé par Materials assets (MA).</li> <li>* les quantités de métaux produites influencent les indicateurs</li> <li>* L'indium est l'élément compagnon de plusieurs autres, une allocation est donc faite.</li> <li>* la <b>substitution</b> est faite par rapport à des <b>fonctions</b></li> <li>* des exemples données : Ge et In</li> </ul>	Présentation d'un nouvel indicateur d'impact : le GRI, basé sur la criticité mais avec une dimension de recyclage. La substitution n'est pas incluse et doit faire l'objet d'approfondissements.	x	
22	Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family	(Harper et al. 2015)	Appliquer et améliorer la méthodologie développée par Graedel et al. 2012 aux métaux des familles du zinc, du plomb et de l'étain	oui	oui mais très peu (environnement)	non	non, mais il parle de SUBSTITUTION	l'Indium est étudié (+Germanium)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* le choix d'un indicateur se fait par rapport à ce que l'on veut : optimiser les CRm, mieux traiter les déchets</li> <li>* Dans quoi intégrer la criticité ? LCA ou SLCA ; plusieurs prônent pour le LCSA</li> <li>* référence à de nombreux auteurs et les grandes lignes de leur méthode (Mancini, Schneider, Sonnemann...)</li> <li>* <b>NOUVELLE METHODE (CF)</b></li> <li>* Peut être intégré en ACV facilement</li> <li>* 54 matériaux inclus</li> <li>* <b>HISTOIRE</b> de la criticité retracée (<b>frise</b>)</li> <li>* <b>définition</b> de la criticité <b>dépend</b> de l'<b>utilisateur</b> ; de ce qu'il veut faire...</li> <li>* substitution incertaine</li> <li>* <b>Facteurs de caractérisation</b> discutés</li> <li>* L'ACV est un bon moyen de faire apparaître des dimensions géopolitiques et économiques quant à l'utilisation des ressources (<b>SR wgi</b> retravaillé).</li> <li>* 2 graphiques intéressants</li> </ul>	Étude de cas de l'Indium (+Ge) en 2008. Intéressant de voir ce qui est dit de la <b>substitution</b> .	x	x
23	Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe	(Mancini, Benini and Sala 2016)	Intégrer les ressources critiques dans l'ACV (aspects socio-économiques et stratégiques)	oui	oui	oui	non, mais de substitution	oui, toutes les ressources sont étudiées	<ul style="list-style-type: none"> <li>* le choix d'un indicateur se fait par rapport à ce que l'on veut : optimiser les CRm, mieux traiter les déchets</li> <li>* Dans quoi intégrer la criticité ? LCA ou SLCA ; plusieurs prônent pour le LCSA</li> <li>* référence à de nombreux auteurs et les grandes lignes de leur méthode (Mancini, Schneider, Sonnemann...)</li> <li>* <b>NOUVELLE METHODE (CF)</b></li> <li>* Peut être intégré en ACV facilement</li> <li>* 54 matériaux inclus</li> <li>* <b>HISTOIRE</b> de la criticité retracée (<b>frise</b>)</li> <li>* <b>définition</b> de la criticité <b>dépend</b> de l'<b>utilisateur</b> ; de ce qu'il veut faire...</li> <li>* substitution incertaine</li> <li>* <b>Facteurs de caractérisation</b> discutés</li> <li>* L'ACV est un bon moyen de faire apparaître des dimensions géopolitiques et économiques quant à l'utilisation des ressources (<b>SR wgi</b> retravaillé).</li> <li>* 2 graphiques intéressants</li> </ul>	L'utilisation des ressources est travaillée afin d'intégrer la criticité et notamment le côté socio-économique en ACV. Facteurs de caractérisation nouveaux.	x	x
24	What DoWe Know About Metal Recycling Rates?	(Graedel et al. 2011)	Présenter les taux de recyclage de 60 métaux	non, pas directement	non	non	oui	Indium et Cobalt y sont référencés (+ Germanium et Néodyme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* peu de prise en compte des <b>pertes</b> dans les tx recy.</li> <li>* <b>revue</b> de la littérature scientifique sur le recyclage</li> <li>* les informations sont assez <b>anciennes</b> (2000-2005) et avec une <b>qualité</b> plus ou moins bonne, suivant régions...</li> <li>* <b>première approche</b> nécessitant plus de recherche (recyclage, process...)</li> <li>* la recyclable est principalement due à la <b>quantité</b> d'un matériau dans un produit ainsi que la complexité des mélanges dans lesquelles il intervient (design pour le désassemblage?). Manque de valeur des produits recyclés, infrastructures inappropriées, effet de mine urbaine et mauvais tri associé (ex : téléphones) et une technologie inadaptée de recyclage et pq publiques ?</li> <li>* la <b>sensibilisation</b> aux enjeux sont importants (PP).</li> </ul>	Le recyclage est vu selon 3 facteurs : économique (valable?), technologique (process?) et sociétal (dans les meurs?) Les acteurs politiques ont un rôle de prévention et d'information/sensibilisation. La recherche doit continuer (technique ET design (pour désassemblage))	NA	

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")	Criticité
25	Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach	(Goe and Gaustad 2014)	Étude de cas des panneaux photovoltaïques avec une approche multicritère	oui	non	non	oui, tout comme la substitution	oui il se réfère à l'Indium (+Germanium)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* détail des <b>INDICATEURS ; PV</b> (voir calcul)</li> <li>* <b>recyclage</b> peut être vu comme une énergie "sauvée"</li> <li>* domaines d'utilisation</li> <li>* solutions mises en place (gouvernements) : taxes...</li> <li>* certaines données peu sûres et difficiles à trouver (indus...)</li> <li>* In et Ge pourraient manquer dans les 20 ans (2013)</li> <li>* recyclage pourrait éviter une sur pollution (PV)</li> <li>* les résultats dépendent beaucoup des indicateurs choisis donc des attentes de l'auteur de l'étude</li> <li>* beaucoup de pays prennent des décisions radicales pour assurer la continuité des approvisionnements en matériaux critiques</li> <li>* une des questions posée (recherche à faire) est quelle est l'influence des populations et des économies émergentes sur la rareté (physique) et l'environnement ?</li> <li>* les soucis liés à la substitution restent posés : quels compromis ?</li> </ul>	Étude de 17 matériaux présents dans les PV. Approches avec une vision multiple.		x
26	Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches	(Knoeri et al. 2013)	Intégrer des éléments dynamiques : interactions entre offre et demande.	oui	non (évoqué rapidement)	non	oui, pour les flux de matière	non, cas général	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Les méthodes sont statiques : à un moment donné pour une ressource donnée.</li> <li>* MFA</li> <li>* Essayer de prendre en compte les décisions de substitution</li> <li>* Matrice de criticité expliquée</li> <li>* Problème rencontré : des données limitées</li> <li>* La criticité n'est pas constante (marchés, substitutions...) hors, les décideurs se basent sur du statique pour prévoir à long terme...</li> <li>* ce "dynamisme" non pris en compte est dû principalement à la substitution de certains matériaux (décisions au niveau international)</li> <li>* Les décisions "individuelles" et leur report sur le marché devrait être pris en compte.</li> <li>* Beaucoup de méthodes oublient les problèmes environnementaux dans leur étude de la criticité</li> <li>* Graedel et al. 2012 référence l'importance environnemental et dit que la pression sur les écosystèmes diffère suivant les demandes approvisionnement (substitution joue un vrai rôle)</li> <li>* Nouvelles approches nécessaires mais <b>DYNAMIQUES</b></li> <li>* Éléments de recherche pour le futur : dynamique : réel intérêt</li> <li>* modèle et ses résultats dépendent de l'approche et du périmètre</li> <li>* <b>"Agent-based model and dynamic material flow model"</b> : prendre en compte les décisions industrielles et leurs répercussions et les interactions sur les stocks et les flux de matériaux</li> </ul>	Approche de la criticité par des éléments dynamiques. Approche qui s'intéresse aux flux et à la demande	x	
27	Recycling rates of metals - A Status Report	(UNEP 2011)	État des lieux sur le recyclage des métaux	non (certains le sont)	non	non	oui, des métaux	Indium et Cobalt (+Ge + Nd)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* taux de recyclage de <b>60 métaux</b> (Co et In)</li> <li>* Référence pour le taux de recyclage</li> <li>* état de l'art de l'utilisation des matériaux</li> <li>* Problème : on ne sait pas comment sont recyclés les métaux, il n'y a <b>rien de "technique"</b></li> <li>* En résumé : seulement le <b>Cobalt</b> est recyclé</li> <li>* recyclage mécanique et/ou chimique</li> </ul>	Ce rapport de l'UNEP présente la méthodologie, les tenants et les aboutissants du recyclage des métaux. Le taux estimé reste une véritable référence.	NA	

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")	Criticité
28	Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector -	(European-Commission 2013)	Identifier les métaux qui pourraient connaître un risque de restriction d'approvisionnement pour les technologies bas-carbone en Europe.	oui, indirectement	quelques références en rapport avec l'ACV, négligeable	non	oui, il n'entre pas dans les détails techniques	Il étudie toutes les ressources étudiées sauf le <b>PHOSPHORE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Approche bottom-up</li> <li>* Les matériaux les plus critiques sont ceux qui sont le moins recyclés... (Nd)</li> <li>* des recommandations pour limiter les risques sont donnés (table 2)</li> <li>* technologies étudiées une par une : nucléaire, éolien...</li> <li>* calculs pour estimer la composition de chaque technologie</li> <li>* ATTENTION : praseodymium et neodymium (didymium) sont traités ensemble, ils sont (souvent) utilisés en mélange.</li> <li>* Étude approfondie des métaux (pour le secteur)</li> <li>* Utiliser les ressources européennes? Haut risque : environnement...</li> <li>* Info sur comment garder les propriétés des matériaux (vierge et recyclé...) mais pas les techniques de recyclage.</li> <li>* ce qui est difficile : les <b>quantités</b>, les <b>technologies</b>, <b>coûts</b></li> <li>* <b>Substitution</b> à voir au <b>cas par cas</b> et attention aux <b>effets</b> (plus d'autres matières et les <b>conséquences?</b>)</li> <li>* pistes de recherche</li> </ul>	Appliquée aux énergies bas-carbone, cette étude dresse un bilan : les métaux critiques sont indispensables car peu de substitution "efficace" n'est envisageable. Étude des principaux matériaux appliquée à chacun des éléments.	x	
29	Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials - Final Report	(Deloitte 2015)	Présentation du projet visant à répondre aux besoins d'information sur les flux non énergétiques et d'analyser les flux de matière	oui	oui, les bases de données sont utilisées	non	oui	Elles sont toutes étudiées en détail dans un MFA	Pour restreindre la criticité il faut : 1: <b>recycler</b> et 2 : <b>substituer</b>	Étude de certains matériaux en Europe (dont Co, Ge, In, Nd, et les roches phosphatées) (MFA), basé sur des données d'ACV (en partie).	NA	
30	Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods	(Hernandez et al. 2017)	Faire une étude complète du cycle de vie centré sur l'impact "épuiement des ressources" dans les véhicules électriques	oui	oui	oui	oui, il a un effet très positif	L'Indium est mentionné	<ul style="list-style-type: none"> <li>* étude sur les véhicules électriques</li> <li>* <b>Beaucoup</b> de <b>CF</b> pour l'<b>épuiement des ressources</b> : une pour chaque <b>méthode</b> de caractérisation d'impact! Il est difficile de savoir laquelle est la mieux</li> <li>* Toutes les méthodes ont leurs avantages et désavantages mais <b>AUCUNE</b> ne s'applique <b>partout</b></li> <li>* l'impact "déplétion" est complexe ; il dépend de l'approche utilisée</li> <li>* la substitution et les technologies futures sont difficiles à anticiper</li> <li>* Fin de vie : basée sur EcoInvent 2,2</li> <li>* Faire un design permettant de faciliter le démontage (recyclage) est une des meilleures solutions</li> <li>* 7 méthodes de calcul d'impact comparées</li> <li>* <b>tableau récapitulatif</b> intéressant</li> </ul>	Étude de cas sur l'épuisement des ressources dans des véhicules électriques : comparaison de plusieurs méthodes	x	
31	The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?	(Yellishetty, Mudd and Ranjith 2011)	Montrer pourquoi la baisse des ressources peut être utile en ACV et comment, d'un point de vue local ou plus global, cela peut conduire à des inégalités (sociales, économiques et environnementales)	non	oui	non	oui, très peu : intérêt à le faire mieux	Cobalt et phosphore mentionnés	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Étude de cas : déplétion des ressources abiotiques appliquée au cas de l'acier</li> <li>* Plusieurs <b>calculs ADP</b> présentés (table 1) !</li> <li>* problème des mines urbaines : combien de temps un matériau y reste ?</li> <li>* il faut encore faire de la recherche pour rendre le recyclage plus performant</li> </ul>	Étude de cas sur l'épuisement des ressources dans le domaine de l'acier (mines)	x	

Attribution d'un numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	OBJECTIF	Le document traite-t-il de la criticité des ressources ?	Le document parle-t-il de l'ACV ?	Le document parle-t-il de la criticité des ressources en ACV ?	Le document parle-t-il de recyclage ?	Le document fait-il référence aux ressources étudiées (Indium/Phosphate/Cobalt) ? Si oui, laquelle (ou lesquelles) et comment ?	Quelles sont ses spécificités? (points clés)	Résumé du document	Ressources ("depletion")		Criticité
32	Evaluation of Abiotic Resource LCIA Methods	(Alvarenga, Lins and Neto 2016).	Les études sur les ressources sont nombreuses ; le but est de faire des recommandations	non	oui	non	non	non	* 19 méthodes évaluées * exemple de la production d'éthylène * étude et recommandations données	Comparaison de 19 méthodes puis application à un cas	x		
33	Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China	(Gao et al. 2009)	Adapter l'ADP au cas chinois	non	oui	non	non	Les résultats pour le phosphore sont donnés	* Adaptation du modèle CML	Adaptation au modèle chinois du modèle employé par CML	x		
34	Abiotic resource depletion in LCA	(Road-and-Hydraulic-Engineering-Institute 2002)	Améliorer la méthode existante "de base"	non	oui	non	oui, brièvement : cela peut "réduire" la baisse des ressources	Oui, leur ADP est présenté	* ADP y est discuté * Facteurs de Caractérisation (CF)		x		
35	Impact Assessment of Abiotic Resources in LCA: Quantitative Comparison of Selected Characterization Models	(Rorbeck et al. 2014)	Faire une évaluation systématique des méthodes existantes d'évaluation des ressources afin de l'appliquer en ACV	Non, cela n'entre pas dans le champ de cette étude	oui	non	non	non, il parle des méthodes en elle-même	* discussion sur plusieurs types d'indicateurs * 11 modèles de caractérisation étudiés	Étude des différentes méthodes utilisées en ACV	x		
36	Rethinking the Area of Protection "Natural Resources" in Life Cycle Assessment	(Dewulf et al. 2015)	Améliorer l'AoP "natural resources"	mentionné brièvement	oui	oui	non	non	* centré LCIA * Quelques recommandations	Étude des Aires de Protection (AoP)	NA		
37	INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE	(Deloitte 2013)	Faire un état de l'art des indicateurs d'épuisement des ressources ; identifier les bonnes pratiques d'utilisation de ces indicateurs et identifier les lacunes de ces indicateurs ACV et les pistes de développement à court ou moyen terme.	oui	oui	oui	oui	Toutes les ressources critiques sont mentionnées	* chaque indicateur discuté : ADP, AADP... * rapprochement avec la criticité	Étude des indicateurs d'épuisement des ressources	x		x
38	Mineral resource scarcity	(Vieira and Huijbregts 2016)	Méthode permettant d'évaluer la rareté des ressources	non	oui	non	non	non	Nouvel indicateur d'impact	Méthode permettant d'évaluer la rareté des ressources		x	

Tableau 7 : Tableau d'étude de la criticité

Numéro EndNote	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 ?	Quel est la pertinence du document ? (Note)
1	Criticality of material resources in industrial enterprises – structural basics of an operational model	Miehe et al.	2016	oui	Méthode générale (Criticité=Vulnérabilité * Risque 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.
2	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	<b>Utilisation et épuisement des ressources</b> : méthode thermodynamique : 4/4
3	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
4	Integrating resource criticality assessment into evaluation of cleaner production possibilities for increasing resource efficiency	Malinauskiene et al.	2016	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : La criticité est évaluée de manière classique (risque d'approvisionnement et vulnérabilité) et ne sert qu'à envisager d'autres aspects (efficience)
5	From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment	Sonnemann et al.	2015	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	Aucune note envisageable : article de review très pertinent (voir documents onglet "Sonnemann")
6	The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment	Schneider et al.	2014	oui	17 dont 1 qui nous intéresse (Cobalt mais en plus : Terres rares et PGM)	4	Non : nouvel méthode (qui est comparée à celle de l'UE)	Comparaison avec méthodes existantes pour améliorations	3/4 (manque d'exemples concrets)
7	Abiotic resource depletion in LCA—background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model	Schneider, L., Berger, M., Finkbeiner, M.	2015	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	Vision anthropisée des stocks et recyclage : 4/4 (méthode)
8	The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources	Schneider, L., Berger, M., Finkbeiner, M.	2011	non	7	1	Non, il reprend la déplétion des ressources	Prise en compte des stocks anthropiques	2/4 : il faudrait aussi prendre le recyclage / réutilisation en compte !
9	Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues	Klinglmair, M., Sala, S., Brandão, S.	2013	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : comparaison des méthodes : peu d'intérêt pour nous
10	Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective using the case of direct-drive wind turbines	Habib, K., Wenzel, H.	2015	oui	0, méthode déjà vue (classique), traitement d'un cas particulier	Terres rares : 1	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : le document traite du néodyme dans un cas particulier. Peut permettre de penser autrement la criticité mais la traite de manière classique
11	Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper	Vieira et al.	2012	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	0/4 : aucun intérêt à étudier ce document dans nos recherches (malgré un titre accrocheur)
12	Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling	Habib, K., Wenzel, H.	2014	oui, mentionné (terres rares)	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : Peu d'intérêt : étude de cas avec des scénarios.
13	Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator	Simon, B., Ziemann, S., and Weil, M.	2014	oui	6	1	oui	Prise en compte de la criticité dans un secteur particulier	2/4 : le document traite d'un cas particulier : les <b>batteries</b> et dedans se trouve le Cobalt. Méthode intéressante mais à compléter(application à chaque technologie : complexe)

Numéro EndNote	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 ?	Quel est la pertinence du document ? (Note)
14	Criticality of metals and metalloids	Graedel et al.	2015	oui	62	32 (pas PHOSPHORE)	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : application de la méthode d'évaluation de la <b>CRITICITE</b> déjà vue auparavant, application sur des métaux et quelques références à la substituabilité
15	Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy	Hatayama, H., Tahara, K.	2014	oui	22	8 dont Cobalt, Indium (+ Néodyme (Nd), et Platine (Pt))	oui	Aide à la prise de décision (stratégie au Japon)	1/4 :cas japonais
16	EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements	Blengini et al.	2017	oui	27 (celles désignées comme critiques par l'UE)	27	oui	Mise à jour des évaluation de la criticité (UE)	3/4 : ce document reprend bien la méthodologie et explique les mises à jour ; un effort est porté sur le recyclage même s'il est expliqué rapidement
17	Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality	Georges Daw	2017	oui	1	0 (Lithium)	oui (et les "améliore")	Améliorer et appliquer l'évaluation de la criticité (UE) en France pour le Lithium	2/4 : intéressant mais peu d'éléments qui diffèrent d'autres documents déjà étudiés...
18	A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries	Peters, J. F., Weil, M.	2016	non, on parle de déplétion des ressources	1	0 (Lithium)	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : étude qui a un intérêt pour les méthodes présentées.
19	Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials	Mancini et al.	2014	oui	Méthode générale qui est discutée	Tableau reprenant le nombre depuis plusieurs méthodes d'impact	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : propose des pistes d'amélioration de l'indicateur de criticité mais aussi de la déplétion des ressources (qui sont liés).
20	Scarcity of Rare Earth Elements	de Boer, M. A., Lammertsma, K.	2013	non, on parle de la rareté de ces éléments	17	toutes (terres rares)	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : on appréhende mieux le recyclage grâce à cela, en apprenant que les quantités sont très faible et que les filières n'existent pas (même si, sur la criticité, on n'y apprend rien de non su auparavant
21	Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study	Adibi et al.	2017	non, on parle de la rareté de ces éléments	Nombreux exemples utilisés, se référer à toutes les ressources (minérales, bois, sable...)	5 (terres rares, cobalt et néodyme)	Non, la criticité n'est pas prise en compte mais une analogie peut être faite	Nouvel indicateur permettant de mieux rendre compte de l'utilisation des ressources (en ACV ou non) ; la déplétion mais aussi la criticité y sont prises en compte	4/4 : document qui traite du recyclage (enfin!). Il reprend un indicateur plus global que ceux existant (recyclage) il ne manque plus qu'à y inclure la substituabilité
22	Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family	Harper et al.	2015	oui	6	2	oui	Étude de certains métaux	2/4 : intéressant pour l'Indium et la substitution (+Ge)
23	Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe	Mancini, L., Benini, L., Sala, S.	2016 (2018? ??????)	oui	50	21 (tous)	oui, il le fait varier	Meilleur prise en compte des aspects socio-économiques en ACV	4/4 : document très intéressant qui passe en revue et fait une analyse critique de certains facteurs de caractérisation "de base" (risque approvisionnement)
24	What Do We Know About Metal Recycling Rates?	Graedel et al.	2011	non	PAS de criticité (60 : recyclage)	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 pour le recyclage : étude assez complète et pistes d'amélioration
25	Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach	Goe et Gaustad	2014	oui	17	3 (dont In (+Ge))	oui	Améliorer les méthodes existantes avec une approche dynamique	3/4 : intérêts et éléments pour une approche DYNAMIQUE de la criticité. Il faudrait plus de recherches.
26	Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches	Knoeri et al.	2013	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : intérêts et éléments pour une approche <b>DYNAMIQUE</b> de la criticité. Il faudrait plus d'approfondissements;
27	Recycling rates of metals - A Status Report	UNEP	2011	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : Le <b>taux de recyclage</b> est important pour savoir si la criticité peut être atténuée par cette méthode ; des données plus récentes seraient appréciables
28	Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector	JRC - EC : Moss et al.	2013	non	Issue de l'application de la méthode : 0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : Le document est pertinent par rapport aux ressources en elle-même : recyclage, utilisation...

Numéro EndNote	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 ?	Quel est la pertinence du document ? (Note)
29	Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials - Final Report	BIO by Deloitte pour l'EC	2015	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : Étude intéressante pour certains éléments étudiés en détail en Europe
30	Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods	Hernandez et al.	2017	non ("resource depletion")	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : intéressant pour les CF et les méthodes.
31	The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?	Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P.G.	2010	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : Peu d'intérêt, étude centrée sur l'acier... (épuisement des ressources)
32	Evaluation of Abiotic Resource LCIA Methods	Alvarenga, R. A. F., Oliveira Lins, I., de Almeida Neto, J. A.	2016	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : Liste des <b>méthodes d'ACV intéressante et exploitable</b>
33	Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China	Feng et al.	2009	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : Adaptation à un pays d'un modèle très utilisé (ressources) ; <b>peu d'intérêt</b>
34	Abiotic resource depletion in LCA	Road and Hydraulic Engineering Institute	2002	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	2/4 : Peu donner des précisions sur l'ADP
35	Impact Assessment of Abiotic Resources in LCA: Quantitative Comparison of Selected Characterization Models	Rørbech et al.	2014	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : comparaisons de plusieurs méthodes, étude intéressantes pour voir les forces et faiblesses de chacune.
36	Rethinking the Area of Protection "Natural Resources" in Life Cycle Assessment	Dewulf et al.	2015	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	1/4 : Peu d'intérêt, étude centrée sur les AoP
37	INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE	BIO Intelligence Service	2013	oui	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : Étude qui montre les rapprochement et points forts et faibles entre ACV et criticité
38	Mineral resource scarcity	Vieira et Huijbregts	2013	non	0	0	Pas de calcul	Il n'y en a pas	3/4 : nouvelle méthode d'évaluation des ressources

**Tableau 8 : Tableau d'étude du recyclage**

Numéro EndNote	DOCUMENTS			QUESTIONS				
	TITRE	AUTEURS	DATE	Comment sont traitées les ressources que nous étudions (cobalt, phosphore, indium) ?	Quel type de recyclage est préconisé ?	Peut-on parler d'un effet « mine urbaine » ?	Le recyclage est-il intégré dans les méthodes de caractérisation ?	Les ressources recyclées sont-elles intégrées dans les méthodes de caractérisation ? Et quelles sont-elles ?
1	Criticality of material resources in industrial enterprises – structural basics of an operational model	Miehe et al.	2016	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
2	Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools	Finnveden, G., Arushanyan, Y., Brandão, M.	2016	Elles ne le sont pas	Aucune donnée	Oui, les utilisations font qu'il y a beaucoup de matériaux "dormants" (ordinateur...)	oui un taux de recyclage est appliqué	Le recyclage permet de "sauver" des ressources (démarche plutôt classique)
3	The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change	Northey et al.	2017	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
4	Integrating resource criticality assessment into evaluation of cleaner production possibilities for increasing resource efficiency	Malinauskien et al.	2016	Aucune donnée	Il faut valoriser TOUT ce qui peut l'être (résidus issus de la transformation)	non, nous sommes à l'échelle de l'entreprise	Aucune donnée	Aucune donnée
5	From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment	Sonnemann, G.	2015	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
6	The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment	Schneider et al.	2014	Il faut adapter les données s'il y a réutilisation de ressources	Aucune donnée	Aucune donnée	non	non
7	Abiotic resource depletion in LCA— background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model	Schneider, L., Berger, M., Finkbeiner, M.	2015	Il est juste mentionné l'intérêt à recycler (stocks anthropiques hauts)	Aucune donnée	Oui, l'homme possède une part non négligeable de ressource déjà exploitée	NON, cela doit être effectué dans des RECHERCHES supplémentaires	non
8	The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterization to model the depletion of abiotic resources	Schneider, L., Berger, M., Finkbeiner, M.	2011	Il est juste mentionné l'intérêt à recycler (stocks anthropiques hauts)	Aucune donnée	Oui, l'homme possède une part non négligeable de ressource déjà exploitée	non	non
9	Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues	Klinglmair, M., Sala, S., Brandão, S.	2013	Elles ne le sont pas particulièrement	Aucune donnée	Oui, l'homme possède une part non négligeable de ressource déjà exploitée	Aucune donnée	Aucune donnée
10	Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective e using the case of direct-drive wind turbines	Habib, K., Wenzel, H.	2015	Étude de cas : néodyme	Aucune dans le document, mais fait référence à d'autres pour la fin de vie.	non	Aucune donnée	Aucune donnée
11	Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper	Vieira et al.	2012	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
12	Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling	Habib, K., Wenzel, H.	2014	Il est juste mentionné l'intérêt à recycler et que cela réduit l'effet de la criticité	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
13	Criticality of metals for electrochemical energy storage systems – Development towards a technology specific indicator	Simon, B., Ziemann, S., and Weil, M.	2014	Étude de cas : cobalt dans batteries	Aucune donnée	peut-être oui, application aux batteries	Aucune donnée	Aucune donnée
14	Criticality of metals and metalloids	Graedel et al.	2015	Il est juste mentionné l'intérêt à recycler et à l'intégrer dans la criticité (+substitution)	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
15	Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy	Hatayama, H., Tahara, K.	2014	Score attribué suivant une étude sur le recyclage (0-1-2)	Aucune préconisation	Aucune donnée	oui, dans la méthode d'évaluation de la criticité	Le taux de recyclage de chaque matière est évalué (note)



Numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	DATE	Comment sont traitées les ressources que nous étudions (cobalt, phosphore, indium) ?	Quel type de recyclage est préconisé ?	Peut-on parler d'un effet « mine urbaine » ?	Le recyclage est-il intégré dans les méthodes de caractérisation ?	Les ressources recyclées sont-elles intégrées dans les méthodes de caractérisation ? Et quelles sont-elles ?
16	EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements	Blenginia et al.	2017	Une étude supplémentaire est mentionnée afin de compléter ces propos UNEP (2011) voire substitution : EC 2014	Aucune préconisation	peut-être oui, le recyclage permettrait de réduire le risque de pénurie de certaines matières	Le recyclage est intégré dans la méthode d'évaluation de la criticité	Voir document annexe pour le traitement du recyclage (EOL-RIR)
17	Security of mineral resources: A new framework for quantitative assessment of criticality	Georges Daw	2017	Une étude supplémentaire est mentionnée afin de compléter ces propos UNEP (2011) voire substitution : EC 2014	Aucune préconisation	peut-être oui, le recyclage permettrait de réduire le risque de pénurie de certaines matières	Le recyclage est intégré dans la méthode d'évaluation de la criticité	Voir document annexe pour le traitement du recyclage (UNEP (2011))
18	A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries	Peters, J. F., Weil, M.	2016	Il est juste mentionné le grand intérêt à recycler	Aucune préconisation	peut-être oui, application aux batteries	Aucune donnée	Aucune donnée
19	Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials	Mancini et al.	2014	Une étude supplémentaire est mentionnée afin de compléter ces propos UNEP (2011) voire substitution : EC 2014	Aucune préconisation	peut-être oui, le recyclage permettrait de réduire le risque de pénurie de certaines matières	Aucune donnée	Aucune donnée
20	Scarcity of Rare Earth Elements	de Boer, M. A., Lammertsma, K.	2013	Les filières de recyclage n'existent (terres rares) pas ou pour des choses spécifiques (aimants d'éoliennes, néodyme)	Il faut recycler tout ce qu'il est possible de recycler	oui	Aucune donnée	Aucune donnée
21	Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study	Adibi et al.	2017	1% des terres rares sont recyclées en Europe : pas de filière et faible pourcentage par produit.	Il faut recycler tout ce qu'il est possible de recycler et s'efforcer de le faire en Europe : baisse de la dépendance aux autres pays, intérêt économique et social... et environnemental	oui	oui le recyclage y est pris en compte mais pas la substitution (complexe)	Elles le sont avec des pourcentages statistiques
22	Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family	Harper et al.	2015	Indium (+Ge) : substitution (suivant les fonctions !)	Aucune préconisation	Aucune donnée (sûrement oui)	non mais l'effet "métaux compagnons" y est développé	non
23	Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe	Mancini, L., Benini, L., Sala, S.	2016	La substitution est évoquée	Aucune préconisation	Aucune donnée	Le taux de recyclage est pris en compte dans le calcul (UNEP 2011)	Elles le sont toutes grâce à la prise en compte du taux de recyclage
24	What Do We Know About Metal Recycling Rates?	Graedel et al.	2011	Cobalt et indium traités : respectivement fort et faible taux de recyclage	Faire de l'écoconception afin de séparer les matériaux ; éviter les pertes	oui	Aucune donnée	Aucune donnée
25	Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach	Goe et Gaustad	2014	les taux de recyclage (In et Ge) sont pris en compte ainsi que les données de la base EcoInvent	Aucune donnée	oui, les différents stocks sont importants	oui, grâce au taux de recyclage (donné)	oui, grâce au taux de recyclage (donné)
26	Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches	Knoeri et al.	2013	Aucune donnée	<b>Le recyclage n'est que EVOQUE dans le MFA</b>	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
27	Recycling rates of metals - A Status Report	UNEP	2011	Le taux de recyclage sont mentionnés, il n'y a pas d'éléments <b>techniques</b>	Aucune donnée	peut-être oui, pour certains métaux	Aucune donnée	Aucune donnée
28	Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector - Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector	JRC - EC : Moss et al.	2013	Elles sont traitées dans le cadre des technologies bas-carbone : utilisation, recyclage, recommandations...	Aucune préconisation	oui pour les systèmes de stockage d'énergie (batteries)	Aucune donnée	Aucune donnée
29	Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials	BIO by Deloitte pour l'EC	2015	Le taux de recyclage est utilisé)	Aucune préconisation	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée

Numéro EndNote	TITRE	AUTEURS	DATE	Comment sont traitées les ressources que nous étudions (cobalt, phosphore, indium) ?	Quel type de recyclage est préconisé ?	Peut-on parler d'un effet « mine urbaine » ?	Le recyclage est-il intégré dans les méthodes de caractérisation ?	Les ressources recyclées sont-elles intégrées dans les méthodes de caractérisation ? Et quelles sont-elles ?
30	Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods	Hernandez et al.	2017	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
31	The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?	Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P.G.	2010	Aucune donnée	Il faut continuer à faire de la recherche pour améliorer le recyclage	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
32	Evaluation of Abiotic Resource LCIA Methods	Alvarenga, R. A. F., Oliveira Lins, L., de Almeida Neto, J. A.	2016	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
33	Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China	Feng et al.	2009	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
34	Abiotic resource depletion in LCA	Road and Hydraulic Engineering Institute	2002	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
35	Impact Assessment of Abiotic Resources in LCA: Quantitative Comparison of Selected Characterization Models	Rørbech et al.	2014	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
36	Rethinking the Area of Protection "Natural Resources" in Life Cycle Assessment	Dewulf et al.	2015	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée
37	INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE	BIO Intelligence Service	2013	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Le recyclage est pris par défaut en compte dans certaines méthodes ACV (fin de vie)	Aucune donnée
38	Mineral resource scarcity	Vieira et Huijbregts	2013	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée	Aucune donnée

## ANNEXE 2 : Fiches récapitulatives sur l'évaluation des ressources (hors ADP qui est dans le corps du texte)

### - La méthode ReCiPe : Mineral Depletion Potential

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

Nous allons récapituler les informations importantes dans un tableau :

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

	<p><b>- Augmentation marginale du coût d'extraction (MCI) :</b> L'augmentation marginale du coût d'extraction (<math>MCI_{r,kg}</math>) d'une ressource <math>r</math> (en kg) s'exprime de la manière suivante : <math display="block">MCI_{r,kg} = \frac{\Delta Coût}{\Delta Production}</math>; exprimée en \$/kg<sup>2</sup></p> <p>Avec : ΔCoût : Augmentation du coût d'extraction de la ressource, engendrée par l'extraction de la quantité ΔProduction (\$/kg) ; ΔProduction : Quantité extraite, en kg ;</p> <p>La valeur monétaire retenue comme référence ici est la valeur du dollar pour l'année 2000.</p> <p><b>- Taux d'extraction (Pr,t) :</b> Il correspond à la quantité de ressource r extraite à l'année t.</p> <p><b>- Actualisation des coûts futurs :</b> Les principes économiques stipulent que la valeur d'une dépense ou d'un gain, aujourd'hui, est différente de celle d'une dépense ou d'un gain à l'avenir. Pour intégrer cet effet, les économistes utilisent l'actualisation. Elle se traduit par :</p> $\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+d)^t}$ <p>Avec : d : taux d'actualisation (%) T : nombre d'années considérées</p>	<p><math>P_{kg}</math> : la quantité de ressource produite</p> <p><math>M_r/(C_r)^2</math> : coefficient de la pente représentant l'augmentation du coup marginal de la ressource</p> <p><math>V_r</math> : Valeur de la ressource</p> <p>Ces facteurs mid-point, exprimés en 1/(\$.an), sont ensuite rapportés à une substance de référence (le fer), pour donner les facteurs proposés par la méthode, en kg de <math>Fe_{eq}</math></p>
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	- Évaluation des gisements : Singer et al. (1997) de l'USGS (environ 3000 mines répertoriées selon 50 types de minerais) - Données de coûts : CostMine, World Mine Cost Data Exchange	
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité monde : les facteurs de caractérisation sont basés sur des données mondiales.	
AUTEURS	6 auteurs principaux parmi 4 organismes : Mark Goedkoop, Reinout Heijungs, Mark Huijbregts, An De Schryver, Jaap Struijs, Rosalie van Zelm	
MISES À JOUR	ReCiPe fait l'objet d'une mise à jour relativement fréquente du tableur de facteurs de caractérisation pour l'intégration de nouveaux facteurs, la mise à jour de facteurs existants ou la correction d'erreurs. On peut toutefois noter qu'une seule correction à ce jour (en juillet 2012) a concerné les indicateurs « ressource ».	
INCERTITUDES	Elles correspondent à différentes visions des impacts de la société sur l'environnement (comme par exemple différents horizons temporels pour la prise en compte du réchauffement climatique) et de la capacité de la société à s'adapter aux conséquences des impacts, à partir desquelles des scénarios de projection plus ou moins conservateurs sont définis.	
LIMITES	Le nombre de ressources couvertes par l'indicateur est assez faible (20).  En ce qui concerne les quantités annuelles extraites dans le futur, les auteurs ne réalisent pas de projection mais utilisent pour chaque ressource les valeurs disponibles les plus récentes.	Le nombre de ressources couvertes par l'indicateur est assez faible (20). L'indicateur midpoint a été développé a posteriori. On peut le considérer comme un indicateur midpoint fictif, car il n'est pas en lien avec le mécanisme environnemental évalué par le facteur endpoint. De ce fait, il est conseillé de privilégier l'indicateur end-point.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Le projet « LC-Impact » vise à développer une nouvelle méthode de caractérisation. L'indicateur ressources est en cours de développement par M. Goedkoop, auteur de la méthode ReCiPe ainsi que M. Vieira	

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

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

Nous allons récapituler les informations importantes dans un tableau :

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

- **La méthode EcoIndicator : Damages Resources**

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

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

Nous allons récapituler les informations importantes dans un tableau :

NOM	Damages Resources
MÉTHODE	EcoIndicator99
TYPE D'INDICATEUR	Endpoint – catégorie 4 = indicateur de dommage, couvrant l'ensemble du mécanisme environnemental, de l'effet aux conséquences
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Goodkoop2000] The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report, 22 June 2001, Third version, Pré Consultants <a href="http://www.pre-sustainability.com/reports">http://www.pre-sustainability.com/reports</a>
UNITÉS	MJ
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales et fossiles (12 ressources minérales considérées).
PRINCIPES ET FONDEMENTS : ils sont identiques à ceux de <b>ReCiPe</b>	La méthode repose sur le même principe que ReCiPe : la consommation des ressources actuelles va imposer l'exploitation de minerais de moins en moins concentrés d'une part et l'exploitation d'énergies fossiles non-conventionnelles d'autre part, ce qui entraînera à l'avenir une augmentation de la consommation d'énergie nécessaire à l'extraction des ressources.
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	<p>Pour les minéraux, les facteurs de caractérisation correspondent aux surplus d'énergie qui seront nécessaires à l'extraction des ressources dans le futur, comme exprimé dans l'équation suivante :</p> $\Delta E_i = E_{\text{future } i} - E_{\text{actuelle } i}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Delta E_i</math> : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i</li> <li>- <math>E_{\text{actuelle } i}</math> : Énergie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement</li> <li>- <math>E_{\text{future } i}</math> : Énergie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir. Ce point dans le futur est une hypothèse de travail, défini 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.</li> </ul>
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	[Chapman1983] et [DeVries1988] pour les surplus d'énergie des ressources minérales

REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité mondiale : les surplus d'énergie sont définis pour chaque ressource à l'échelle mondiale.
AUTEURS	2 auteurs principaux : Mark Goedkoop, Renilde Spriensma
MISES À JOUR	Méthode de 1999. Mise à jour relativement fréquente de l'implémentation au sein de SimaPro pour intégration de nouveaux facteurs, mise à jour de facteurs existants ou correction d'erreurs.
INCERTITUDES	Les auteurs indiquent des incertitudes « considérables » pour les minéraux.
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les publications utilisées pour l'identification des surplus d'énergie pour les ressources minérales ([Chapman1983] et [DeVries1988]) ne citent pas clairement leurs sources. Par ailleurs, les valeurs varient d'une source à l'autre.</li> <li>- Les facteurs de caractérisation sont calculés à partir de scénarios futurs et reposent donc sur de nombreuses hypothèses.</li> <li>- Le nombre de ressources minérales prises en compte dans l'indicateur est très faible (12).</li> </ul>
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Le projet LC-Impact vise à développer une nouvelle méthode de caractérisation. L'indicateur ressources est développé par M. Goedkoop, auteur de la méthode EI99.

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

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

Nous allons récapituler les informations importantes dans un tableau :

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

	$CF_i^{2002+} = \frac{CF_i^{EI99}}{CF_{fer}^{EI99}}$ <p>Avec :</p> <p><math>CF_i^{2002+}</math> : facteur de caractérisation de la ressource i selon Impact2002+</p> <p><math>CF_i^{EI99}</math> : facteur de caractérisation de la ressource i selon EI99</p> <p><math>CF_{fer}^{EI99}</math> : facteur de caractérisation du fer selon EI99</p>
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	EcoIndicator99 [Goedkoop2000]
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Pour les ressources minérales : représentativité mondiale (cf. EI99).
AUTEURS	7 auteurs principaux de l'EPFL : Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, Ralph Rosenbaum
MISES À JOUR	La version en date est la v2.1 CF 3a (2011)
INCERTITUDES	Les auteurs indiquent une incertitude « medium » [Humber2011] p20
LIMITES	<p>La méthode se base sur un indicateur endpoint (EI99) pour en faire un indicateur midpoint « fictif ».</p> <p>Les limites sont les mêmes que celles associées à EI99.</p> <p>De plus, il y a une limite temporelle : la variation d'énergie est basée sur le fait que la quantité extraite doit atteindre le quintuple de la quantité extraite en 1990. Or, le taux d'extraction étant différent entre la substance et la substance de référence, on compare des quantités extraites à des pas de temps pouvant varier fortement.</p>
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	Impact World + (voir ci-dessous)

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

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

Nous allons récapituler les informations importantes dans un tableau :

NOM	Abiotic stock resources
MÉTHODE	Environmental Priority Strategies (EPS)
TYPE D'INDICATEUR	Endpoint – catégorie 4 = indicateur de dommage, couvrant l'ensemble du mécanisme environnemental, de l'effet aux conséquences
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Steen1999] A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). <a href="http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/AboutDatabase_2.htm">http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/AboutDatabase_2.htm</a>
UNITÉS	ELU (Environmental Load Units)
RESSOURCES COUVERTES	Ressources minérales et fossiles (78 ressources minérales considérées)



PRINCIPES ET FONDEMENTS	L'indicateur se base sur le concept de « consentement à payer » (Willingness to Pay (WTP)) pour quantifier un dommage environnemental. Dans la perspective d'une société future plus peuplée, l'auteur fait l'hypothèse que les ressources actuelles devront être produites autrement ou remplacées par d'autres ressources.
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	<p>L'auteur identifie des ressources alternatives ou des procédés alternatifs à la production de ressources actuelles. La ressource actuelle est alors remplacée par une ressource ou un procédé alternatif :</p> <p>Métaux issus de minerais → Ressources provenant de « minerais fictifs » dont la teneur est la teneur moyenne dans la croûte terrestre, puis transformation de ce minerai en métal.</p> <p>Les facteurs de caractérisation sont calculés de la manière suivante :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour chaque ressource, la WTP du procédé alternatif est estimée, en incluant le coût actuel de ce procédé et les externalités des émissions polluantes associées.</li> <li>- Le WTP d'une version optimisée du procédé est estimée, afin de tenir compte des progrès technologiques qui pourront être réalisés.</li> <li>- Cette dernière valeur (WTP du procédé alternatif optimisé) est le facteur de caractérisation de la ressource actuelle correspondante.</li> </ul>
SOURCES DE DONNÉES PRINCIPALES	Sources diverses en fonction des procédés alternatifs
REPRÉSENTATIVITÉ GÉOGRAPHIQUE	Représentativité mondiale : Les facteurs découlent de l'évaluation du traitement de minerais fictifs correspondant aux teneurs moyennes mondiales.
AUTEURS	1 auteur principal, de la Chalmers University : B. Steen
MISES À JOUR	Méthode créée entre 1990 et 1999. Mise à jour jusqu'en 2000. Grosse mise à jour en 2015 de la méthode entière
INCERTITUDES	La méthode quantifie les incertitudes pour chaque facteur de caractérisation. La méthode se base sur des scénarios à très long-termes qui sont emprunts d'incertitudes très fortes.
LIMITES	La méthode considère une ressource alternative unique pour chaque ressource évaluée. Elle considère ainsi soit les mines d'argent, soit les mines d'aluminium soit l'arsenic ou le zirconium contenu dans un minerai. La substitution par des éléments étudiés (par équivalence) permet d'avoir des calculs sûrs. Par ailleurs, le fait que la méthode se base sur des scénarios à très long termes réduit son potentiel d'acceptation. En particulier, le choix de considérer qu'à l'avenir, les métaux seront extraits à partir de roche « moyenne » est sujet à discussion.
TRAVAUX SUPPLÉMENTAIRES	ImpactWorld+

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

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

Nous allons récapituler les informations importantes dans un tableau :

NOM	Cumulative Exergy Demand (CexD)	Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)
MÉTHODE	Aucune	
TYPE D'INDICATEUR	Indicateurs de flux - catégorie 1 = indicateurs reposant sur une propriété inhérente de la ressource	
PUBLICATIONS ET LIENS DE RÉFÉRENCE	[Bösch2007] Applying Cumulative Energy Demand (CexD) Indicators to the 61ublicati Database <a href="http://link.springer.com/content/pdf/10.1065%2F1ca2006.11.282">http://link.springer.com/content/pdf/10.1065%2F1ca2006.11.282</a>	[DeWulf2007] Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Assessment method for resource accounting. <a href="http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es0711415">http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es0711415</a>
UNITÉS	MJ-équivalent	
RESSOURCES COUVERTES	79 ressources couvertes comprenant 67 ressources minérales, 6 ressources fossiles et 6 ressources renouvelables. Pour certaines ressources minérales, il peut y avoir plusieurs facteurs de caractérisation en fonction de la concentration dans le minerai.	64 ressources couvertes comprenant 57 ressources minérales, 4 ressources fossiles et 3 ressources renouvelables.
PRINCIPES ET FONDEMENTS	L'exergie est une grandeur quantifiant la disponibilité de l'énergie d'un système. Les principes de thermodynamique permettent d'affirmer que l'exergie d'un produit sortant d'un procédé est forcément plus faible que l'exergie des ressources initiales. Ceci s'applique aux ressources énergétiques comme matérielles. Les auteurs proposent donc d'utiliser la destruction d'exergie (inhérente à toute transformation) comme une mesure de la consommation de ressources.  L'indicateur est une comptabilisation, pour un système donné, de l'exergie totale extraite.	La CEENE est une évolution de la CexD qui repose sur le même principe mais propose des nouveaux facteurs de caractérisation pour les minéraux, propose une nouvelle approche pour les métaux, l'énergie nucléaire et la biomasse et prend en plus en compte l'occupation des sols (land use).
CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION	<p>Les facteurs de caractérisation correspondent à l'exergie spécifique de chaque ressource.</p> <p>Il s'agit de la dégradation de la disponibilité de l'énergie, quantifiable par la destruction d'exergie, qui intervient dans les procédés physico-chimiques en général, que ce soit dans les écosystèmes naturels (production de biomasse par exemple) ou dans les « écosystèmes » industriels (production, consommation,). Pour calculer l'exergie d'un système, on a :</p> $CexD = \sum_i m_i * Ex_{(ch),i} + \sum_j n_j * r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$ <p>Avec : CexD = Demande Exergétique Cumulée par unité de produit ou de procédé (MJ-eq)  <math>m_i</math> = masse de la ressource i (kg)  <math>Ex_{(ch),i}</math> = exergie par kg de ressource i (MJ-eq/kg)  <math>n_j</math> = quantité d'énergie de la source d'énergie j (MJ)  <math>r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}</math> = ratio d'exergie à énergie pour la source d'énergie j (Mj-eq/MJ)</p>	

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

- **Enfin, nous avons rendus compte des méthodes en cours de développement :**
- **AADP ; Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential**

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

La méthode AADP (Schneider et al. 2011) considère les stocks anthropiques de la manière suivante : les données peuvent, théoriquement, provenir d'analyse des flux (MFA en anglais). Cependant, comme ce type de données est difficile à exploiter, Schneider estime le stock anthropogénique comme suit : il s'agit de comptabiliser les taux d'extraction annuelle de chaque ressource depuis 1900 (c'est à dire depuis les premières données exploitables). Il est fait l'hypothèse que le stock anthropogénique dissolu, c'est-à-dire dont la fonction est perdue car dissipée dans l'environnement, est négligeable. Cette hypothèse est basée sur le fait qu'une étude de données MFA a montré que le stock dissolu du cuivre représentait moins de 1% du stock anthropogénique du cuivre. Cela en fait des données sûres si nous considérons que le recensement des matières extraites est exact. Basé sur le modèle ADP, il s'agit de faire 2 modifications successives :

- Les « ressources », comme définies par Schneider 2011 (voir ci-dessus) sont utilisées à la place des « réserves ultimes » :

$$- \text{ADP}_{i, \text{resources}} = \frac{\text{extraction rate } i}{(\text{resources } i)^2} * \frac{(\text{resources antimony})^2}{\text{extraction rate antimony}}$$

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

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

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

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

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

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

Avec :

- $CF_{\text{end},x}$  (kgore/kgx) : le potentiel moyen de minerai excédentaire du minerai x,  $OP_x$  est la teneur en minéral produite par quantité de minerais x extraite
- (kg de minéral / kg de minerai x), et  $R_x$  (kg x) est la réserve actuelle du minerai x, définie comme la différence entre la quantité maximale à extraire de ce minerai
- (MMEx) et la quantité actuelle de minerai x extrait (CME<sub>x</sub>).

Cela montre, de manière très visuelle, la différence de SOP suivant le type de réserve utilisé. Une nouvelle fois, la question de la réserve la plus appropriée est posée.

Le SOP peut être calculé à partir de n'importe quel type de réserve ; il n'y a pas de restriction quant à l'horizon de l'étude : elle s'applique où et quand on le souhaite. Le graphique ci-dessous est issu de ce dernier article :

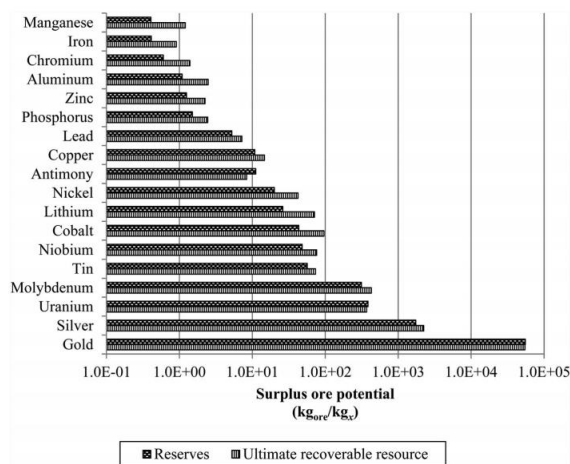


Figure 2 Surplus ore potential calculated using reserves and ultimate recoverable resource as estimates of future resource extraction.

(Vieira et al. 2012)

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

Les travaux d'Adibi et al. (2017) reflètent l'importance d'une méthode multicritère comme le Global Resource Indicator (GRI) qui reprend la rareté, la recyclabilité et la disponibilité géopolitique de la ressource évaluée. Le calcul est le suivant :

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

avec :

- x la rareté, basée sur les facteurs de caractérisation de CML. Effectivement, c'est l'ADP qui est utilisé pour « quantifier » la rareté ici :

$$\bullet \text{ ADP}_i = \frac{\text{Ext}_i}{\text{Res}_i^2} * \frac{\text{Res\_Fe}_i^2}{\text{Ext\_Fe}_i}$$

Pour une ressource i, on a :

ADP en kg Fe-eq,

Ext, taux d'extraction annuel de i

Res<sup>2</sup>, la réserve au carré de ce même élément

Res-Fe<sup>2</sup>, taux d'extraction annuel du fer

Ext-Fe, la réserve au carré du fer

- y est la recyclabilité ou le facteur de qualité qui dépend des taux de dispersion et de recyclage ( $F_{\text{dispersion}}$  et  $F_{\text{recycling}}$ )
- z est la disponibilité géopolitique, qui dépend de l'index WGI, le nombre de pays et le standard de déviation ( $F_{\text{WGI}}$ ,  $F_{\text{countries}}$  et  $F_{\text{deviation}}$ ). En développant un peu :

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

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

- **ImpactWorld+ :**

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

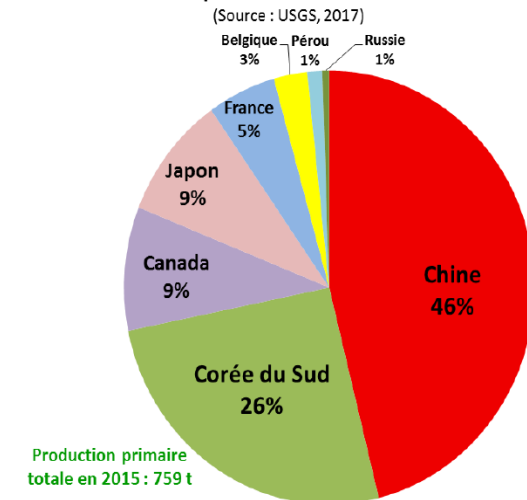
## ANNEXE 3 : Fiches de criticité des matériaux étudiés

### 1. L'Indium

#### 1.1. Domaines d'utilisation en Europe :

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

#### Répartition de la production métallurgique mondiale primaire d'indium en 2015



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

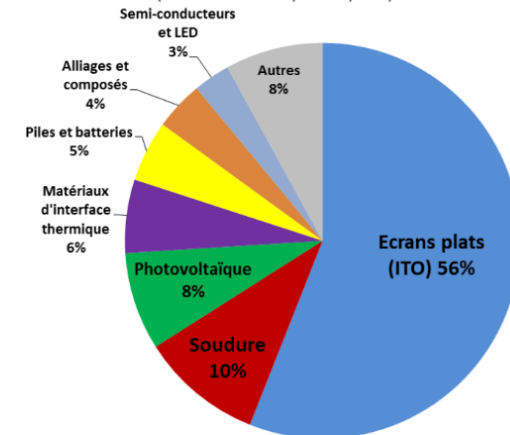
Nous parlons ici des pays producteurs où sont extraits les minéraux en question et nous pas de leur raffinement car les pays sont différents :

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

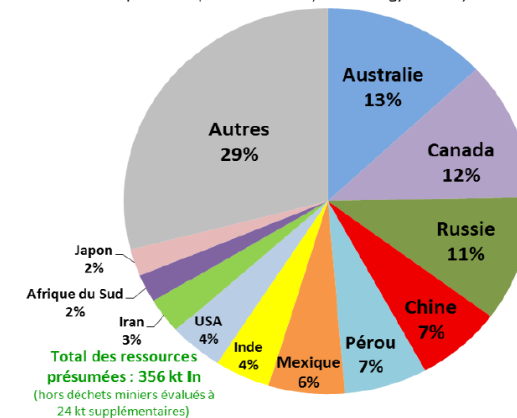
-Les principales réserves mondiales sont très dispersées :

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

**Répartition des usages de l'indium primaire en 2012**  
(source : Indium Corporation, 2013)



**Répartition des ressources minières mondiales présumées d'indium en 2017**  
telles qu'évaluées par Werner et al., Ore Geology Reviews, 2017





### 1.3. Le recyclage :

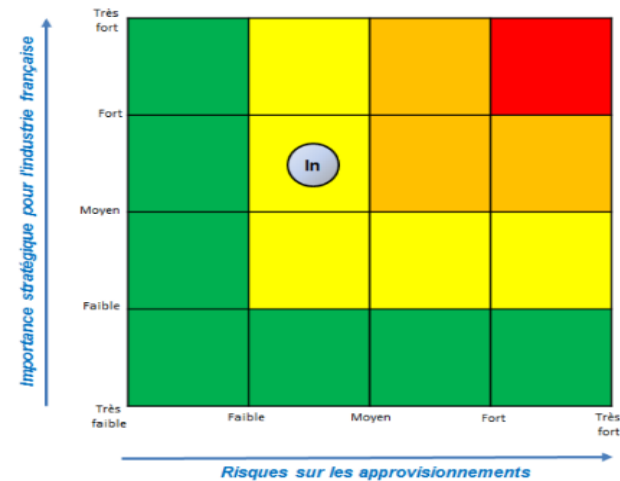
- L'essentiel du recyclage est réalisé en boucle courte des chutes de fabrication ("new scraps"). Durant le processus de pulvérisation de couches minces, seulement 30% d'indium est déposé avec succès sur la cible. Il est donc théoriquement possible de recycler jusqu'à 70% d'indium, mais des pertes sont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

### 1.4. La substitution :

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

### 1.5. Sa criticité :

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



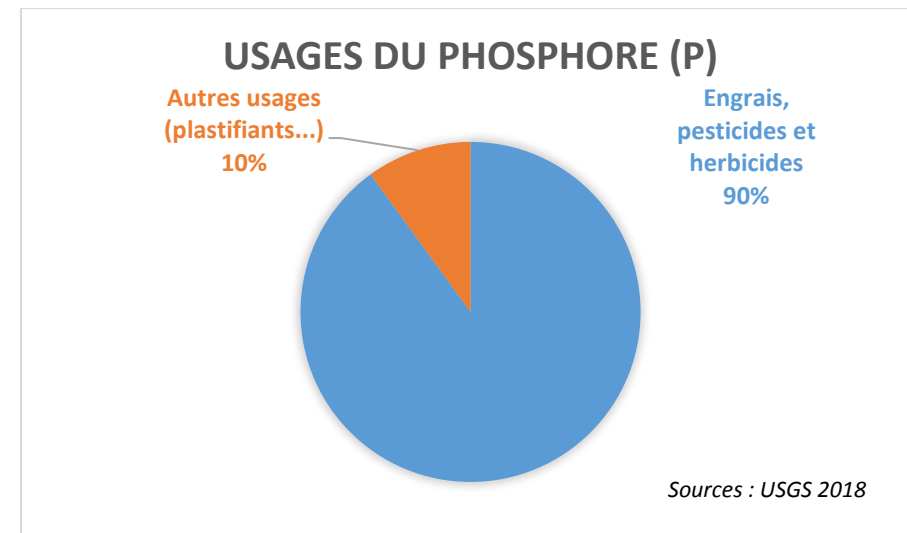
Sources : BRGM 2017

## 2. Le Phosphore

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

### 2.1. Domaines d'utilisation en Europe :

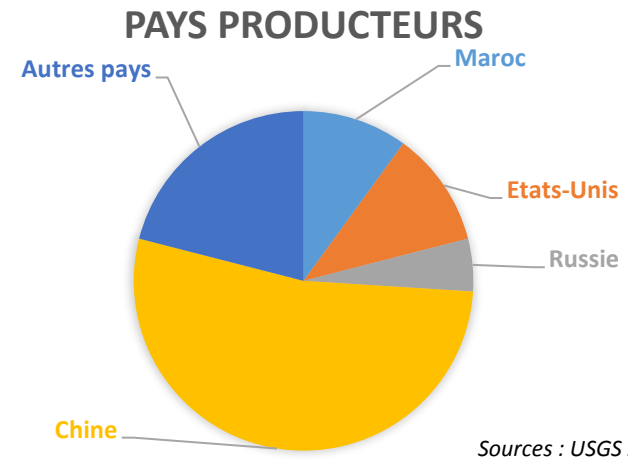
- Les engrais représentent environ 90 % des usages du phosphore en Europe. Cela est donc très conséquent et est essentiel pour pouvoir nourrir les êtres humains directement (plantes) ou indirectement (plantes consommées par du bétail).
- On retrouve le phosphore dans quelques applications industrielles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



**Les pays producteurs et les réserves mondiales :**

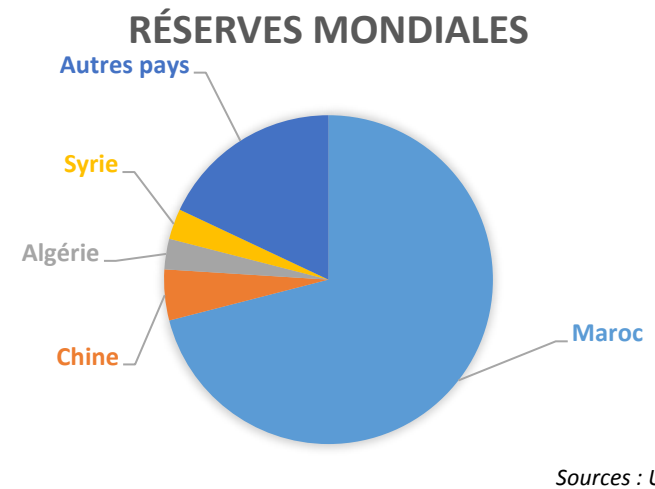
Nous parlons ici des pays producteurs où sont extraits les minéraux en question et nous pas de leur raffinement car les pays peuvent différer :

- Chine : 53 % ;
- Russie : 5 % ;
- Maroc : 10 % ;
- États-Unis 11 % ;
- Autres pays producteurs : 21 %.



**Les principales réserves mondiales sont détenues par**

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



## 2.2. Le recyclage :

- Le recyclage est complexe pour le phosphore, actuellement. Il fait l'objet de recherches afin d'optimiser les coûts (environnementaux et financiers) ; il faut en effet progresser dans ce domaine en traitant plus complètement les eaux usées domestiques car il faut extraire/reconcentrer le P et en disposer sous une forme disponible pour les plantes. L'épandages des boues, par exemple, est problématique car considérées comme des déchets et ce statut empêche entre-autre son utilisation libre.
  
- Après un entretien auprès de M. Eveillard, Directeur Agriculture, Environnement et Statistiques de l'Union des industries de la fertilisation (UNIFA) ; nous avons pu nous rendre compte qu'en France, actuellement, le recyclage du P issu des effluents organiques représentent plus de 50% du P apporté aux terres cultivées et prairies en France, selon l'Observatoire national de la fertilisation minérale et organique, sur une étude de 2010 à 2016. De plus, « les réserves de phosphates minéraux ont fait l'objet d'une nouvelle évaluation en 2014 par l'International Fertilizer Development Centre (IFDC). Cette étude porte à 300 ans la durée d'exploitation possible des réserves actuelles (de futures explorations pourraient révéler de nouveaux gisements) ; depuis les années 2010, l'Arabie Saoudite est un nouveau producteur parmi les dix mondiaux et projette déjà l'ouverture d'une 2ème mine », selon M. Eveillard. Cela sous-entend qu'il n'y a pas de risque de pénurie géologique à court ou moyen terme pour le phosphore.

## 2.3. La substitution :

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

## 2.4. Sa criticité :

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

**ANNEXE 4 :**

**Figure 8 : Diagramme de Sankey du cobalt**

