



**HAL**  
open science

# INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Charlotte Petiot, François Witte, Yannick Le Guern

► **To cite this version:**

Charlotte Petiot, François Witte, Yannick Le Guern. INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE. [Rapport de recherche] 2012-02, SCORE LCA. 2014. hal-02269178

**HAL Id: hal-02269178**

**<https://hal.science/hal-02269178v1>**

Submitted on 23 Aug 2019

**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.

## INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ANALYSE DE CYCLE DE VIE

### RAPPORT FINAL

Septembre 2013

Responsable scientifique – BIO Intelligence Service



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document ne traduisent pas nécessairement l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.

## Informations sur le projet

TITRE DU RAPPORT	Rapport final
TITRE DU PROJET	Indicateurs d'épuisement des ressources en analyse de cycle de vie
DATE	1er septembre 2013
AUTEURS	Charlotte Petiot, BIO Intelligence Service François Witte, BIO Intelligence Service Yannick Le Guern, BIO Intelligence Service
CONTACT CLE	Charlotte Petiot <a href="mailto:charlotte.petiot@biois.com">charlotte.petiot@biois.com</a>
AVERTISSEMENTS	Les auteurs de cette étude déchargent toute responsabilité concernant tout dommage direct ou indirect faisant suite à l'utilisation de ce rapport.

## Table des matières

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
1.1 Positionnement de la problématique	7
1.2 Objectifs de l'étude	9
1.3 Plan de l'étude	10
1.4 Moyens et sources de données utilisés	10
<b>CHAPITRE 2 : CONCEPTS EN LIEN AVEC LES RESSOURCES ET L'ACV</b>	<b>11</b>
2.1 Concept de ressource	11
2.1.1 Définition générale	11
2.1.2 Valeur intrinsèque et valeur fonctionnelle des ressources	12
2.2 Concept de réserve	13
2.2.1 Réserves dans l'environnement	13
2.2.2 Réserves dans la technosphère	14
2.3 Concept de dommage causé aux ressources en ACV	15
2.3.1 Principe général des méthodes d'évaluation en ACV	15
2.3.2 Définition du dommage causé aux ressources en ACV	17
<b>CHAPITRE 3 : CARTOGRAPHIE DES INDICATEURS D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES EN ACV</b>	<b>19</b>
3.1 Présentation des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV	19
3.1.1 Définition des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV	19
3.1.2 Typologie d'indicateurs d'épuisement des ressources en ACV	20
3.2 Sélection des indicateurs analysés	22
3.3 Analyse transversale des indicateurs sélectionnés	24
3.3.1 Analyse chronologique du développement et des mises à jour des méthodes et identification des liens entre les méthodes	24
3.3.2 Analyse de la typologie des indicateurs	26
3.3.3 Analyse des ressources couvertes par les indicateurs	27
3.3.4 Résultats de l'évaluation des méthodes par le JRC	29
3.4 Analyse détaillée des indicateurs sélectionnés	32
3.4.1 Abiotic Depletion Potential – CML	33
3.4.2 Mineral Depletion and Fossil Depletion – ReCiPe	41
3.4.3 Resource consumption – EDIP97	49

## « Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

3.4.4	Damages Resources – EI99	50
3.4.5	Mineral Extraction, Non-renewable energy et Resources – Impact 2002+	55
3.4.6	Abiotic stock resources – EPS2000	57
3.4.7	Cumulative Energy Demand	59
3.4.8	Cumulative Exergy Demand (CexD) et Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)	61
3.4.9	Energy resources – Swiss Ecological scarcity	66

### **CHAPITRE 4 : ENSEIGNEMENTS TIRÉS D'ÉTUDES DE CAS 68**

4.1	Indicateurs sélectionnés pour les études de cas	68
4.2	Etude de cas n°1 : Illustration de la variation des facteurs de caractérisation des indicateurs sélectionnés	70
4.2.1	Comparaison des facteurs de caractérisation des indicateurs sélectionnés via l'analyse d'inventaires fictifs	70
4.2.2	Comparaison des facteurs de caractérisation des indicateurs via l'analyse d'un inventaire de produit réel	77
4.2.3	Enseignements de l'étude de cas n°1	81
4.3	Etude de cas n°2 : Illustration de la variation des résultats obtenus lors de la comparaison de plusieurs inventaires avec différents indicateurs	85
4.3.1	Analyse de la variation des résultats lors de la comparaison d'inventaires avec différents indicateurs	85
4.3.2	Enseignements de l'étude de cas n°2	93

### **CHAPITRE 5 : BONNES PRATIQUES ET RECOMMANDATIONS 94**

5.1	Bonnes pratiques et points d'attention lors de l'évaluation de l'épuisement des ressources en ACV	94
5.1.1	Importance de la prise en compte des ressources couvertes par les indicateurs	94
5.1.2	Importance des analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix du ou des indicateurs d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus	95
5.1.3	Avantages et inconvénients des indicateurs couvrant différents types de ressources et des indicateurs ciblés par types de ressources	96
5.1.4	Points d'attention concernant l'évaluation des consommations de ressources énergétiques	98
5.1.5	Bonnes pratiques concernant l'évaluation de l'enjeu environnemental associé aux ressources	100
5.1.6	Intérêt de certaines méthodes par rapport au type de parties prenantes et à l'horizon temporel considéré	101
5.1.7	Intérêt de certaines méthodes en matière de communication	102
5.1.8	Influence de la fin de vie et notamment du mode de prise en compte du recyclage lors de l'établissement de l'inventaire	103
5.2	Recommandations du JRC sur les indicateurs d'épuisement des ressources à privilégier	104

5.3 Cas particulier des études ACV réalisées dans le cadre d'un programme de déclaration environnemental de type III 106

5.4 Synthèse et proposition de méthodologie générale pour évaluer l'épuisement des ressources en ACV 108

## **CHAPITRE 6 : LIMITES DES INDICATEURS ACV D'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES, PISTES DE DÉVELOPPEMENT ET COMPLÉMENTARITÉ AVEC LES INDICATEURS DE CRITICITÉ 113**

6.1 Limites des indicateurs ACV d'épuisement des ressources et pistes de développement 113

6.1.1 Prise en compte de la valeur fonctionnelle propre à chaque ressource 113

6.1.2 Assimilation entre baisse de disponibilité des ressources et épuisement effectif des ressources 114

6.1.3 Prise en compte des ressources de types fonds et flux par des indicateurs autres que de catégorie 1 116

6.1.4 Types de réserves prises en compte 117

6.1.5 Prise en compte de la disponibilité géographique des ressources 120

6.1.6 Adéquation entre les indicateurs ACV d'épuisement des ressources et les attentes des utilisateurs 121

6.2 Complémentarité des indicateurs ACV et des indicateurs de criticité des ressources 123

6.2.1 Différences entre les indicateurs ACV sur l'épuisement des ressources et les indicateurs de criticité des ressources 123

6.2.2 Exemples d'indicateurs /outils pour l'évaluation de la criticité des ressources 124

6.2.3 Prise en compte de la criticité des ressources en ACV 127

## **CHAPITRE 7 : SYNTHÈSE FINALE 130**

### **RÉFÉRENCES 135**

### **ANNEXE 1 : INTERVIEWS D'EXPERTS 140**

Compte rendu de l'interview de Marisa Vieira 140

Compte-rendu de l'interview de Cécile Bulle 147

Compte-rendu de l'interview de Laura Schneider 152

### **ANNEXE 2 : CALCUL DES FACTEURS DE CARACTÉRISATION DE L'INDICATEUR MINERAL DEPLETION POTENTIAL DE LA MÉTHODE RECIPE 157**

## Chapitre 1 : Introduction

### 1.1 Positionnement de la problématique

#### ► Une consommation croissante et non durable des ressources

Le développement de l'humanité s'appuie depuis son origine sur l'exploitation et la consommation des diverses ressources naturelles. Les ressources jouent un rôle essentiel dans l'économie mondiale, et l'on observe une tendance à la croissance des quantités extraites pour les différents types de ressources (métaux, biomasse, ressources fossiles, minérales...)

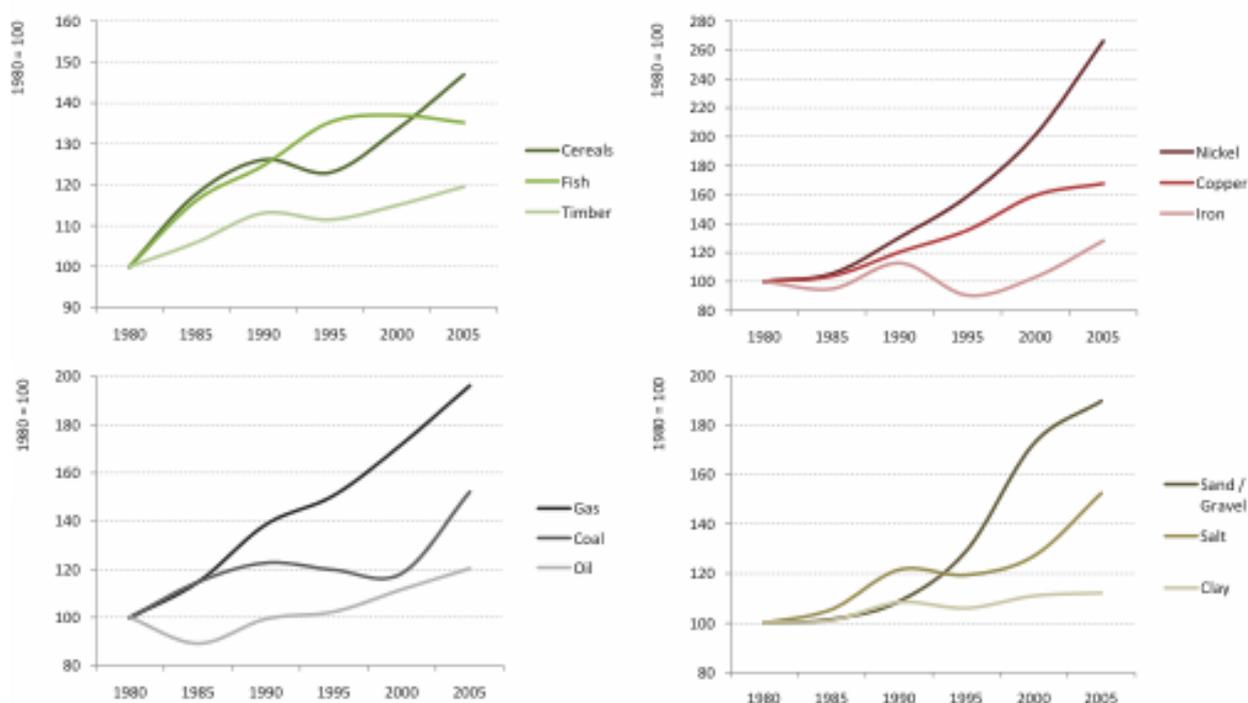


Figure 1 : Evolution de l'extraction d'une sélection de ressources de 1980 à 2005 au niveau mondial [SERI2009]

Une analyse des principaux secteurs utilisateurs de ressources montre qu'en Europe, les ressources sont principalement utilisées pour la production de biens de consommations, le logement et les infrastructures puis l'alimentation.

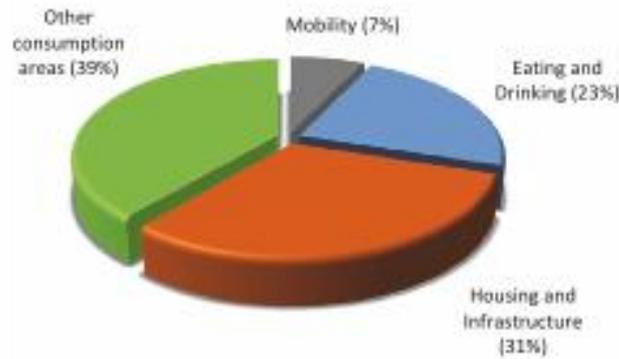


Figure 2 : Distribution de la consommation de ressources en Europe [SERI2009]

De plus, selon le PNUE, la quantité de ressources naturelles (minéraux, minerais, combustibles fossiles et biomasse) consommée chaque année par l'humanité pourrait atteindre 140 milliards de tonnes d'ici 2050, soit trois fois le niveau actuel.

► **Le développement de nombreux indicateurs répondant à des besoins différents en lien avec les ressources**

Compte tenu de cette consommation croissante et du caractère fini des ressources, il est apparu nécessaire de se doter de moyens permettant d'appuyer les choix politiques et industriels visant à **garantir la disponibilité des ressources** pour les générations futures.

Toutefois, cette notion de disponibilité des ressources revêt différents aspects. En effet, si la disponibilité physique des ressources au niveau de la croûte terrestre est un élément important pour évaluer la disponibilité des ressources sur le long terme, d'autres aspects économiques (protectionnisme, monopoles) ou géopolitiques (zones de conflit) sont également à prendre en compte pour évaluer l'accès aux ressources à court ou moyen terme.

C'est pourquoi, différents indicateurs ont été développés au cours des deux dernières décennies, afin de répondre à différents besoins en termes d'évaluation en lien avec les ressources.

Parmi ces indicateurs, on trouve des **indicateurs développés dans le cadre de la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)**. La méthode ACV a pour objectif d'évaluer les conséquences de nos modes de production et de consommation sur l'environnement. Dans ce cadre, différents indicateurs ont été développés afin d'évaluer les dommages causés par l'extraction des ressources. Toutefois, compte tenu de la complexité de la notion de dommage sur les ressources, les indicateurs ACV en lien avec les ressources sont nombreux et peuvent reposer sur des principes et fondements très différents. Ainsi, on trouve par exemple des indicateurs visant à quantifier l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource (masse ou énergie), des indicateurs visant à évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource ou encore des indicateurs visant à évaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur les possibilités d'extraction future.

Néanmoins, on peut noter que ces différents indicateurs ACV ne prennent pas ou peu en compte les aspects économiques ou géopolitiques liés à l'utilisation de ressources.

C'est pourquoi, des **indicateurs visant à évaluer la dimension stratégique (ou criticité) des ressources** ont également été développés ces dernières années. Ces indicateurs visent à mettre en avant la dépendance d'un pays ou d'une entreprise à des ressources stratégiques, éd ayant une importance économique mais dont l'approvisionnement peut être problématique à court ou moyen terme.

► **Un sujet complexe nécessitant une étude approfondie**

Les éléments présentés ci-dessus mettent en avant la complexité de la notion de ressources, l'importance de la quantification et la multiplicité des indicateurs existants.

Il s'avère donc nécessaire de pouvoir apporter une lecture éclairée des différentes approches possibles pour quantifier les impacts associés à la consommation de ressources dans les ACV et identifier leurs forces et faiblesses.

En effet, l'identification des travaux nécessaires pour améliorer la fiabilité et la pertinence de ces indicateurs et l'analyse des possibilités de faire converger les différentes approches est nécessaire pour orienter nos modes de production et de consommations et chercher à **garantir la disponibilité des ressources** pour les générations futures.

## 1.2 Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, l'association SCORELCA a lancé une étude ayant pour objectif :

- d'établir une cartographie sur les indicateurs d'épuisement des ressources en ACV et de synthétiser l'état de l'art,
- d'identifier les bonnes pratiques d'utilisation de ces indicateurs, notamment en analysant des études de cas,
- d'identifier les lacunes de ces indicateurs ACV et les pistes de développement à court ou moyen terme.

Le périmètre de l'étude couvre les ressources minérales, les ressources énergétiques et la biomasse végétale<sup>1</sup>. Les autres catégories de ressources telles que les ressources en eau, les ressources animales ou les terres arables ne sont pas considérées dans cette étude.

---

<sup>1</sup> Il faut noter que la biomasse végétale fait partie du périmètre de l'étude mais qu'elle n'est prise en compte que dans les indicateurs ACV qui évaluent l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource (tels que les indicateurs basés sur la somme des énergies ou des exergies extraites). La biomasse végétale n'est pas prise en compte dans les autres indicateurs ACV qui évaluent les dommages causées aux ressources.

## 1.3 Plan de l'étude

Pour répondre à ces objectifs, la suite de ce rapport d'étude est structurée en 5 parties ayant pour but d'apporter des éléments de réponse aux questionnements suivants :

- Quels sont les principaux concepts en lien avec les ressources en ACV ? Et en particulier, comment peut-on décrire la chaîne de cause à effet entre extraction de ressources, impact environnemental et dommage causé aux ressources ?
- Quels sont les principaux indicateurs d'épuisement des ressources en ACV ? Que cherchent-ils à évaluer ? Quels sont leurs principes et fondements ? Sur quels types de données sont-ils basés ?
- Quels enseignements peut-on tirer d'études de cas ? Et en particulier, quelles sont les principales différences et points communs entre les indicateurs ?
- Quelles sont les bonnes pratiques à mettre en œuvre lorsqu'on utilise des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV ? Quels indicateurs sont les plus appropriés en fonction des études ACV réalisées (objectifs de l'étude, type de produit ou service étudié, public visé, ...) ?
- Quelles sont les principales limites des indicateurs existants ? Et quels sont les travaux en cours pour les améliorer ?

## 1.4 Moyens et sources de données utilisés

Cette étude a été réalisée à l'aide des moyens et sources de données suivants :

- une analyse bibliographique des publications listées au chapitre Références,
- des entretiens avec 2 experts sur les indicateurs d'épuisement des ressources en ACV, dont les comptes-rendus sont présentés en annexe,
- la participation au Workshop du JRC « Security of Supply and Scarcity of Raw Material : A Methodological Framework for Supply Chain Sustainability Assessment » qui a eu lieu les 13 et 14 novembre 2012 et qui regroupait une vingtaine d'experts internationaux dans le domaine des ressources et de l'ACV.

## Chapitre 2 : Concepts en lien avec les ressources et l'ACV

### 2.1 Concept de ressource

#### 2.1.1 Définition générale

Le terme « ressource » recouvre un large spectre de matériaux ou flux énergétiques issus de l'environnement et les définitions de ce terme sont multiples.

La Commission Européenne, dans sa Communication du 26 janvier 2011 « Une Europe efficace dans l'utilisation des ressources – initiative phare relevant de la stratégie Europe 2020 » présente les ressources comme « les matières premières telles que les combustibles, les minéraux et les métaux, mais aussi les produits alimentaires, le sol, l'eau, l'air, la biomasse et les écosystèmes ».

L'OMC [OMC2010] propose quant à elle de définir les ressources naturelles comme des « stocks de matières présentes dans le milieu naturel qui sont à la fois rares et économiquement utiles pour la production ou la consommation, soit à l'état brut, soit après un minimum de transformation ».

L'OMC met en avant les principales caractéristiques des ressources naturelles faisant l'objet d'un marché, à savoir :

- leur caractère épuisable,
- leur répartition géographique inégale,
- la présence d'externalités liées aux retombées de leur extraction et de leur utilisation,
- la prédominance du secteur de l'exploitation des ressources naturelles dans de nombreuses économies nationales,
- la forte volatilité des prix de cette catégorie de marchandises.

Ces caractéristiques s'appliquent à de nombreux matériaux ou vecteurs énergétiques que l'on peut classer selon différentes typologies :

- Typologie par nature
  - **Biotiques** (vivantes) / **Abiotiques** (minéral, pétrole, énergie éolienne...)  
(Typologie décrite par [Guinée2002])
  - **Fossiles / Minérales**
- Typologie par usage
  - **Energies / Matières**
- Typologie par fréquence de renouvellement
  - **Renouvelables / Non-renouvelables**

- **Gisement** (non-renouvelable à échelle humaine – ex : pétrole, minerais...°) / **Fonds** (renouvelable à échelle humaine – ex : nappes phréatiques...) / **Flux** (renouvelé en permanence - ex : énergie solaire, énergie du vent...) (Typologie décrite par [Finnveden1996])

La figure ci-dessous propose une typologie des ressources naturelles adaptée à partir de la typologie définie par le JRC [Sala2012]. Cette typologie tient compte à la fois de la nature des ressources et de leur aspect renouvelable ou non.

Les ressources indiquées en gris ne sont pas couvertes dans le cadre de cette étude.

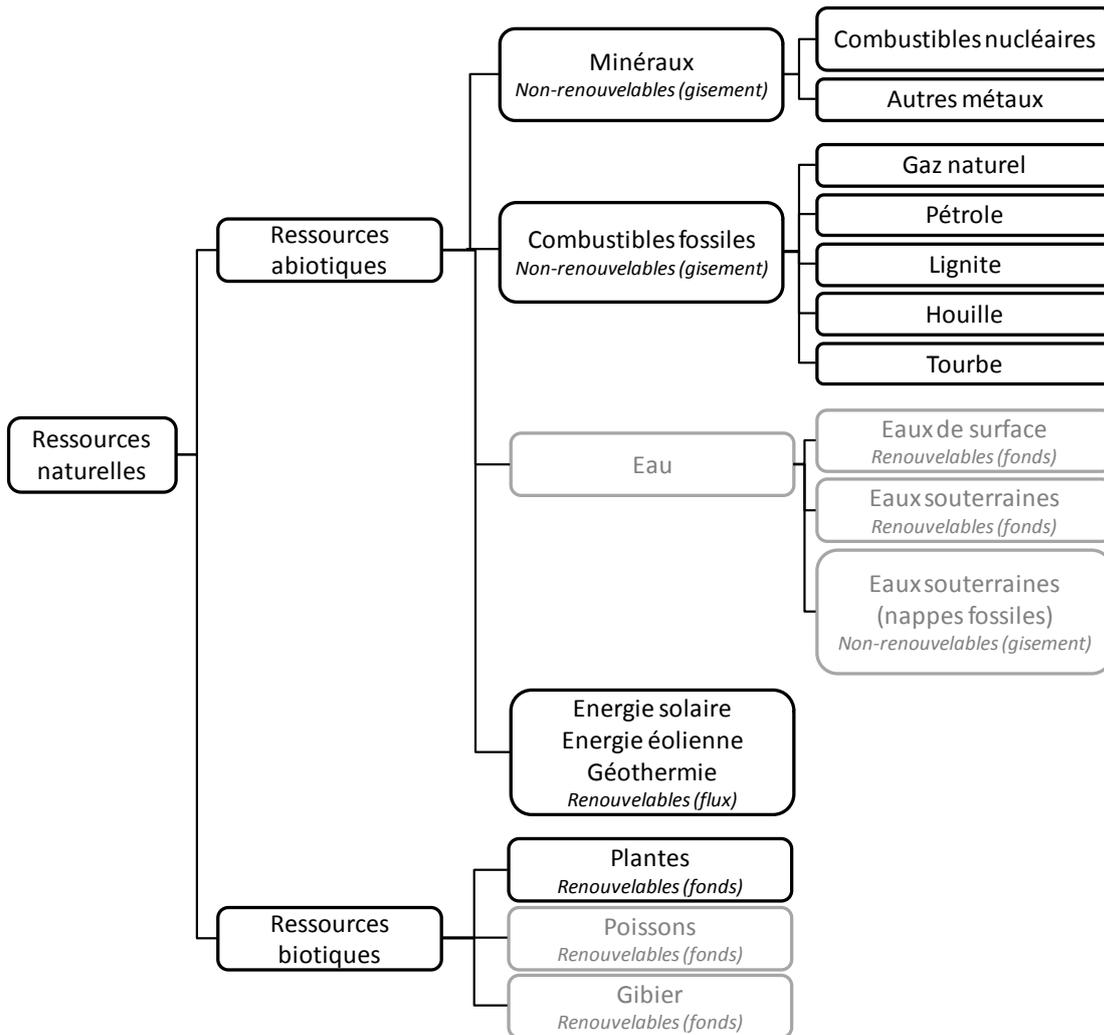


Figure 3 : Types de ressources naturelles, d'après [Sala2012]

### 2.1.2 Valeur intrinsèque et valeur fonctionnelle des ressources

Comme indiqué par Van Oers [VanOers2002], la taskforce SETAC WIA-2 sur les ressources et les sols distingue la valeur intrinsèque de l'environnement naturel de sa valeur fonctionnelle. La valeur intrinsèque correspond à la diversité et à l'unicité des paysages et des espèces qui composent l'environnement tandis que la valeur fonctionnelle représente l'ensemble des services qui permettent la vie humaine.

On peut de façon analogue appliquer cette distinction aux ressources. Van Oers [VanOers2002] distingue ainsi les deux notions suivantes :

- la **valeur intrinsèque** des ressources : Cette notion consiste à définir les ressources en tant que combinaisons uniques d'éléments présents dans l'environnement. Le seul fait de les extraire de l'environnement détruit cette valeur intrinsèque.
- la **valeur fonctionnelle** des ressources : Cette notion consiste à définir les ressources via les fonctions qu'elles apportent ou qu'elles pourraient apporter à l'avenir à l'humanité. Dans ce cas, seul un usage destructif (exemple : combustion) ou dissipatif (émissions diffuses dans l'environnement) détruit la valeur fonctionnelle, car la ressource n'est plus disponible pour fournir des fonctions potentielles.

Cette distinction est très importante et permet ensuite de traduire les dommages causés aux ressources en fonction de la valeur, intrinsèque ou fonctionnelle, qu'on leur attribue.

## 2.2 Concept de réserve

Le concept de réserve est associé au concept de ressource et correspond à la **quantité disponible** d'une ressource. On distingue les ressources dans l'environnement et dans la technosphère.

### 2.2.1 Réserves dans l'environnement

La notion de réserve dans l'environnement peut correspondre :

- à la quantité « disponible » d'une substance dans l'environnement.
- ou à la quantité absolue d'une substance dans l'environnement,

Dans le premier cas, la « disponibilité » d'une ressource peut se traduire par un niveau de concentration dans la nature et par l'existence de procédés techniques permettant l'extraction. Ainsi, en fonction de l'horizon temporel considéré, différents niveaux de « disponibilité » et donc différents types de réserves peuvent être définis. Par exemple, on peut définir la disponibilité :

- à court terme, en ne considérant que les procédés viables économiquement actuellement,
- à moyen terme, en considérant des procédés futurs qui permettront d'extraire des ressources moins concentrées,
- ou à long terme, on considérant les réserves encore non-découvertes.

La figure ci-dessous présente une typologie des différents niveaux de réserves tels que définis par Van Oers [Van Oers 2002] :

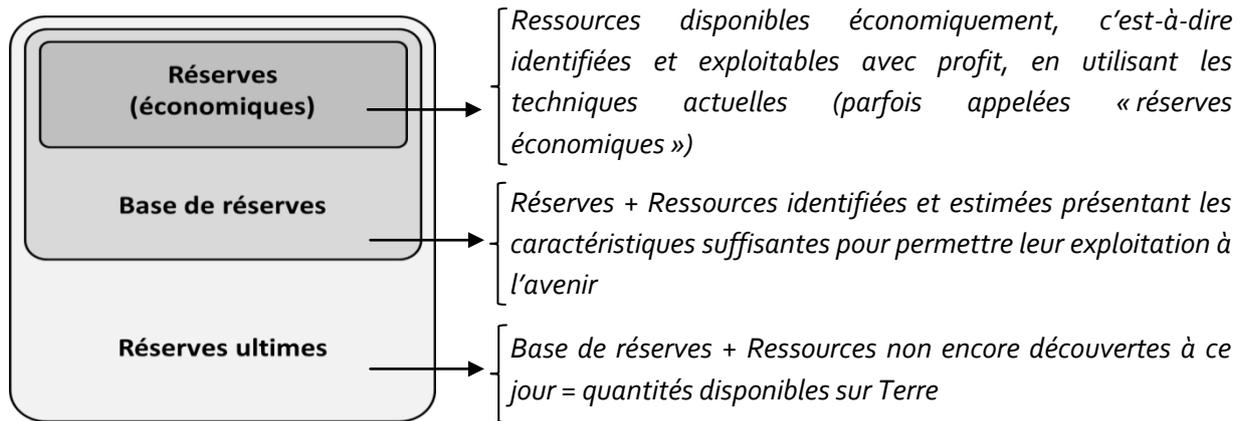


Figure 4 : Illustration des différents niveaux de réserves dans l'environnement selon Van Oers

### 2.2.2 Réserves dans la technosphère

La notion de réserve dans la technosphère correspond aux ressources déjà extraites et présentes dans l'économie<sup>2</sup> au sein de produits ou dans les centres d'enfouissement [VanOers2002], [Schneider2011].

La prise en compte des réserves dans la technosphère a du sens dans une vision fonctionnelle des ressources (cf. § 2.1.2). Par exemple, le fait que du cuivre soit présent dans l'environnement (au sein de minerai) ou dans la technosphère (au sein d'un produit) ne change pas le fait que le cuivre est toujours disponible à l'avenir pour fournir des fonctions.

Le fait qu'une ressource provienne de l'environnement ou de la technosphère n'a donc pas d'influence sur l'épuisement ou non de ses fonctions potentielles, le paramètre important étant qu'elle reste suffisamment disponible (c'est-à-dire suffisamment concentrée et accessible) à un niveau de qualité suffisant pour permettre sa récupération.

---

<sup>2</sup> A ne pas confondre avec les réserves économiques, qui correspondent aux réserves présentes dans l'environnement et accessibles de manière économiquement viable à ce jour.

## 2.3 Concept de dommage causé aux ressources en ACV

### 2.3.1 Principe général des méthodes d'évaluation en ACV

En analyse de cycle de vie, la quantification des conséquences d'une intervention humaine sur l'environnement est reliée à un domaine de protection. Les domaines de protection représentent les éléments de l'environnement considérés comme « de valeur » et que l'on cherche à protéger.

La SETAC<sup>3</sup> [deHaes1999], la norme ISO 14044<sup>4</sup> [ISO2006] et le JRC [ILCD2010-2] considèrent les trois domaines de protection suivants :

- la santé humaine,
- l'environnement naturel,
- les ressources naturelles.

L'objectif des méthodes d'évaluations des impacts environnementaux est d'évaluer les conséquences d'une émission ou d'une extraction sur les domaines de protection en modélisant la chaîne de cause à effet.

Pour cela, les méthodes proposent des indicateurs visant à quantifier l'ampleur de la dégradation du domaine de protection. On distingue les indicateurs selon leur positionnement dans la chaîne de cause à effet allant du flux jusqu'au dommage final. Les indicateurs dits « midpoint » ou « endpoint » quantifient respectivement des « effets » se situant à l'amont ou à l'aval des mécanismes environnementaux.

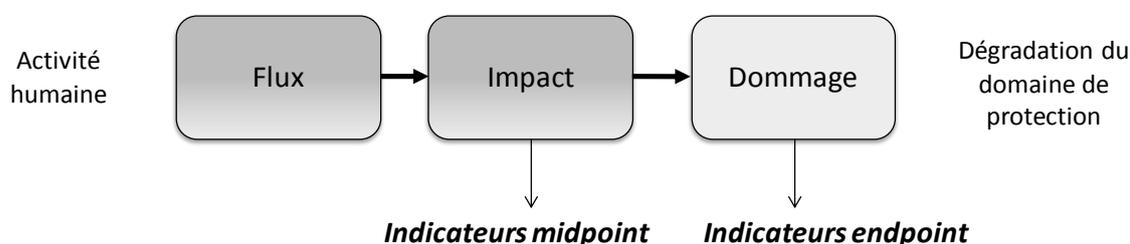


Figure 5 : Chaîne de cause à effet générique évaluée par les méthodes d'évaluations d'impact

L'évaluation de la contribution d'un flux élémentaire en un dommage final s'effectue en général en deux étapes :

- Dans un premier temps, on exprime la contribution du flux élémentaire à un impact selon un indicateur midpoint (en appliquant un facteur de caractérisation midpoint).
- Dans un second temps (et sous réserve que le modèle scientifique existe), on exprime la contribution de l'indicateur midpoint à un dommage selon un indicateur endpoint.

<sup>3</sup> La SETAC ajoute à ces trois domaines celui d' « environnement artificiel ».

<sup>4</sup> La norme ISO 14044 parle d'« impact final par catégorie », qu'elle définit comme un « attribut ou aspect de l'environnement naturel, de la santé humaine ou des ressources permettant d'identifier un point environnemental à problème ».

## « Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Cette seconde étape se fait de manière indépendante des flux élémentaires initiaux. En d'autres termes, pour un couple d'indicateur midpoint-endpoint donné, le facteur de conversion du midpoint vers le midpoint est unique.<sup>5</sup>

La SETAC a notamment défini un cadre général de définition et d'utilisation des indicateurs midpoint et endpoint [Jolliet2004].

A titre d'illustration, la figure ci-dessous présente les différents mécanismes environnementaux généralement modélisés dans les méthodes d'évaluation d'impact en analyse de cycle de vie [ILCD2010-2].

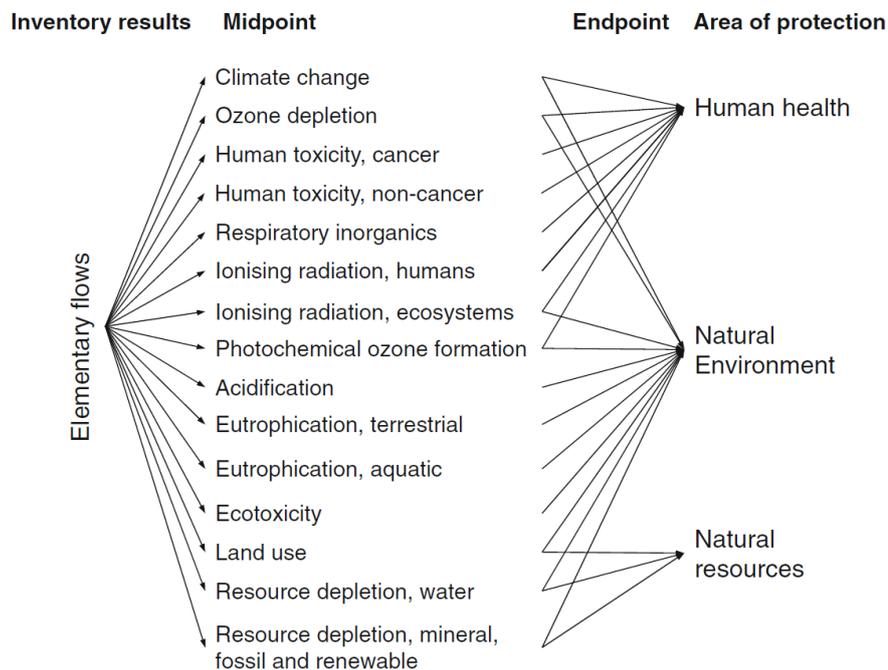


Figure 6 : Relation entre flux élémentaires, indicateurs midpoint et indicateurs endpoint [ILCD2010-2]<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Exemple pour le changement climatique : le GWP (Global Warming Potential) est utilisé comme indicateur midpoint pour le changement climatique. Chaque substance ayant un impact sur le réchauffement climatique a son propre GWP, exprimé en kg CO<sub>2</sub>-eq, tandis que l'indicateur de dommage (endpoint) sur la santé humaine est par exemple le DALY (Disability-adjusted life year). Par définition, pour une méthode donnée, la conversion d'un kilogramme de CO<sub>2</sub>-eq en DALY se fera selon un facteur constant, indépendant de la substance.

<sup>6</sup> Sur la figure de l'ILCD, il est indiqué que les consommations de ressources (Resource depletion, water, mineral, fossil and renewable) contribuent à la dégradation des 2 domaines de protection « environnement naturel » et « ressources naturelles ». Néanmoins, dans la quasi-totalité des méthodes disponibles à ce jour, et notamment celles qui sont présentées dans la suite de ce document, l'épuisement des ressources n'est pris en compte que dans l'évaluation des dommages causés au domaine de protection « ressources naturelles ».

## 2.3.2 Définition du dommage causé aux ressources en ACV

Compte tenu du fait que les ressources naturelles sont considérées comme un domaine de protection, les méthodes d'évaluation relatives aux ressources ont pour objectif d'évaluer les conséquences de l'extraction des ressources sur ce domaine de protection.

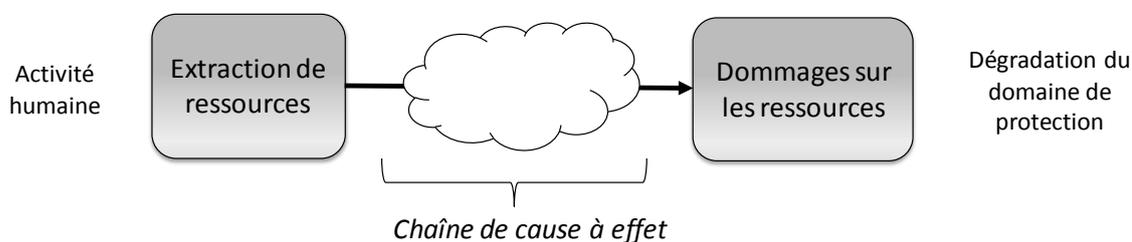


Figure 7 : Chaîne de cause à effet relative aux ressources

D'une manière générale, la façon de définir le dommage causé aux ressources dépend de la façon dont on considère les ressources, à savoir si l'on considère leur valeur intrinsèque ou leur valeur fonctionnelle (cf. §Chapitre 1 :2.1.2).

Si l'on se place dans une vision « valeur intrinsèque des ressources », on peut considérer que le dommage causé aux ressources correspond à leur extraction en tant que telle. Ainsi, avec cette vision, **l'extraction est directement synonyme de dommage.**

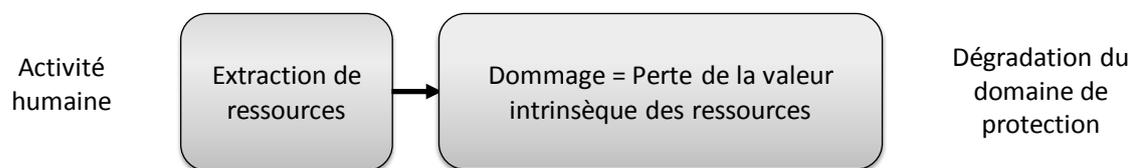


Figure 8 : Chaîne de cause à effet relative aux ressources dans le cas d'une vision « Valeur intrinsèque des ressources »

Toutefois, comme l'indique de nombreux auteurs ([Steen1999] / [Steen2006], [Goedkoop2000] / [Goedkoop2008], [Brentrup2002], [Stewart2005], [Schneider2011]), cette vision n'est pas celle retenue dans les méthodes d'évaluation ACV qui privilégient au contraire la vision fonctionnelle des ressources, et donc le service rendu à l'humanité.

Avec la vision « valeur fonctionnelle des ressources », la définition du dommage causé aux ressources est différente et est notamment décrite par Brentrup [Brentrup2002] de la façon suivante. Si l'on part du principe que les générations futures auront le même intérêt que nous à utiliser des ressources, on peut considérer que le dommage causé aux ressources correspond à la baisse de disponibilité des ressources pour les générations futures.

Ainsi, avec cette vision, **le dommage causé aux ressources peut être défini comme la baisse de disponibilité des fonctions assurées par les ressources pour les générations futures**<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> On notera que la « valeur fonctionnelle des ressources » constitue le fondement général théorique des principaux indicateurs proposés pour l'évaluation des dommages causés par l'utilisation des ressources. Néanmoins, comme cela

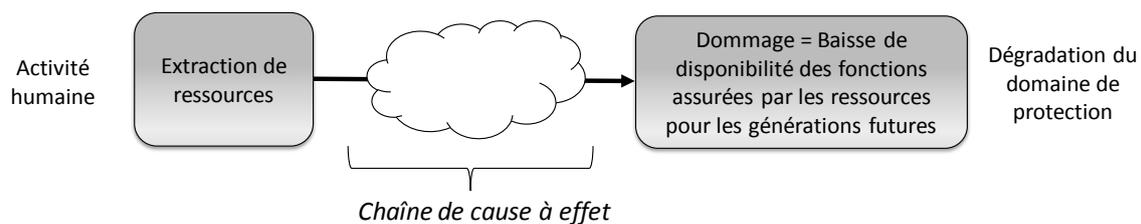


Figure 9 : Chaîne de cause à effet relative aux ressources dans le cas d'une vision « Valeur fonctionnelle des ressources »

---

sera expliqué dans la suite du document, la quasi-totalité des méthodes disponibles à ce jour, et notamment celles qui sont présentées dans ce document, ne permettent pas d'évaluer véritablement la baisse de disponibilité des fonctions assurées par les ressources. Ceci vient d'une part du fait que les méthodes évaluent à l'aide d'un même indicateur différentes ressources n'assurant pas les mêmes fonctions et d'autre part du fait qu'elles ne permettent pas d'évaluer précisément l'aspect destructif/dissipatif ou non des ressources.

## Chapitre 3 : Cartographie des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV

### 3.1 Présentation des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV

#### 3.1.1 Définition des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV

Au regard des différents concepts présentés au chapitre précédent, différentes méthodes et indicateurs ACV ont été développés au cours des dernières décennies. Les nombreuses méthodes existantes visent à évaluer la baisse de la disponibilité des ressources, qui est définie comme le dommage final causé aux ressources. Néanmoins, ces méthodes peuvent évaluer des « effets » différents en lien avec la baisse de disponibilité des ressources et peuvent également proposer des indicateurs situés à des niveaux différents dans la chaîne de cause à effet.

Ces différents indicateurs, qui peuvent présenter des différences importantes, sont pourtant communément regroupés dans un même ensemble et intitulés « indicateurs d'épuisement des ressources ».

**Ce terme générique peut être défini de la façon suivante : un indicateur d'épuisement des ressources est un indicateur dont l'objectif est d'évaluer un « effet » sur la chaîne de cause à effet allant de l'extraction des ressources jusqu'au dommage causé aux ressources.**

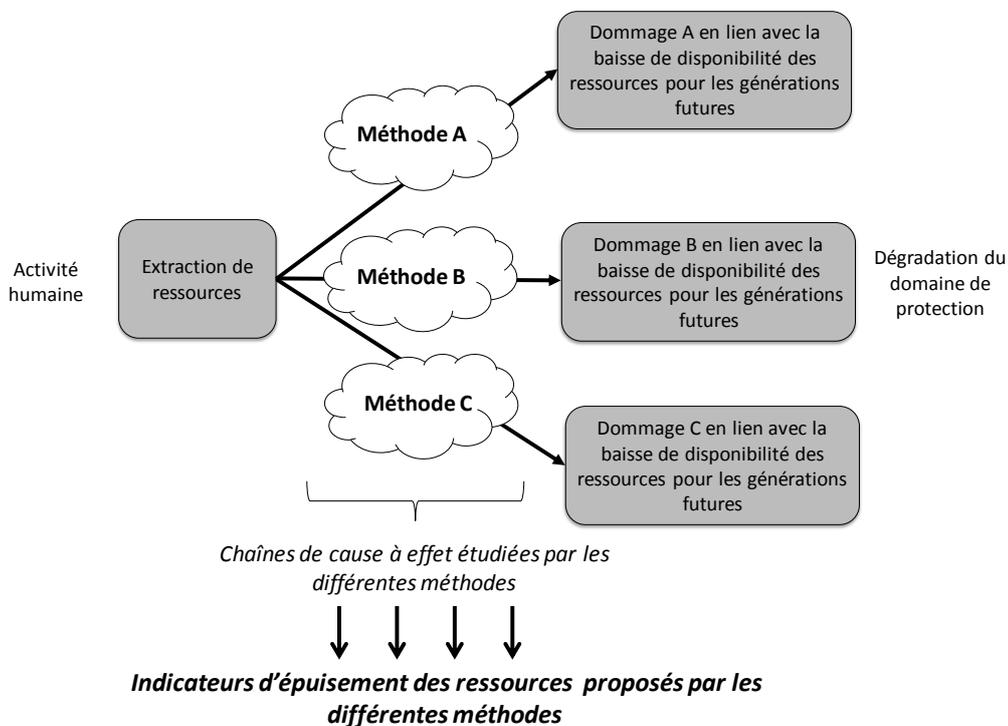


Figure 10 : Notion d'indicateur d'épuisement des ressources

### 3.1.2 Typologie d'indicateurs d'épuisement des ressources en ACV

Afin de classer les différents indicateurs d'épuisement des ressources existants, différents auteurs ont proposé des typologies d'indicateurs. Ces typologies peuvent être basées sur :

- le niveau où se situe l'indicateur dans la chaîne de cause à effet,
- l'objectif visé par l'indicateur,
- les ressources considérées.

Par exemple, Stewart et Weidema [Stewart2005] proposent la typologie suivante :

- Type 1 : indicateurs basés sur la somme des masses ou des énergies,
- Type 2 : indicateurs basés sur la mesure des réserves et l'extraction actuelle,
- Type 3 : indicateurs d'agrégation des impacts sur l'énergie, basée sur des scénarios futurs,
- Type 4 : indicateurs basés sur l'exergie et/ou l'entropie.

Le JRC [ILCD2011] propose quant à lui un classement selon 4 catégories :

- Catégorie 1 : indicateurs basés sur les propriétés inhérentes des ressources (pouvoir calorifique, exergie, ...),
- Catégorie 2 : indicateurs basés sur la rareté physique (géologique) des ressources,
- Catégorie 3 : indicateurs axées sur la ressource en eau (méthodes considérées séparément du fait de la sensibilité de ses méthodes à la région étudiée),
- Catégorie 4 : indicateurs évaluant les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future des ressources.

Ces exemples de typologie montrent bien la diversité des indicateurs et notamment la diversité des objectifs visés par ces indicateurs.

**En particulier, on peut indiquer que les indicateurs de catégorie 1 selon la typologie du JRC ou de type 1 et 4 selon la typologie de Stewart et Weidema ont pour objectif d'évaluer l'extraction selon une grandeur physique de la ressource (énergie, exergie...). Ils ne tiennent pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'extraction des ressources. En ce sens, ces types d'indicateurs ne traduisent donc pas réellement le dommage causé aux ressources, c'est-à-dire la baisse de disponibilité des ressources pour les générations futures.**

Dans le cadre de cette étude, une nouvelle typologie est proposée. Cette typologie est basée sur la typologie du JRC mais propose quelques modifications et compléments.

Premièrement, la typologie proposée ne reprend pas les indicateurs axés sur la ressource en eau, qui ne sont pas compris dans le périmètre de cette étude.

Deuxièmement, la typologie proposée traduit les catégories du JRC sous la forme d'un objectif et propose un niveau de segmentation supplémentaire en fonction du principe de calcul mis en œuvre pour atteindre l'objectif visé par l'indicateur.

Enfin, la typologie proposée permet de prendre en compte un type d'indicateur supplémentaire : les indicateurs de type « Distance-to-target ». Ces indicateurs traduisent l'importance d'un flux (consommation ou émission) par rapport à un objectif politique quantifié (consommation énergétique par habitant, pourcentage d'énergie d'origine renouvelable dans un mix énergétique, ...). Ces indicateurs permettent donc de traduire la contribution d'un produit ou service par rapport à des objectifs nationaux ou internationaux.

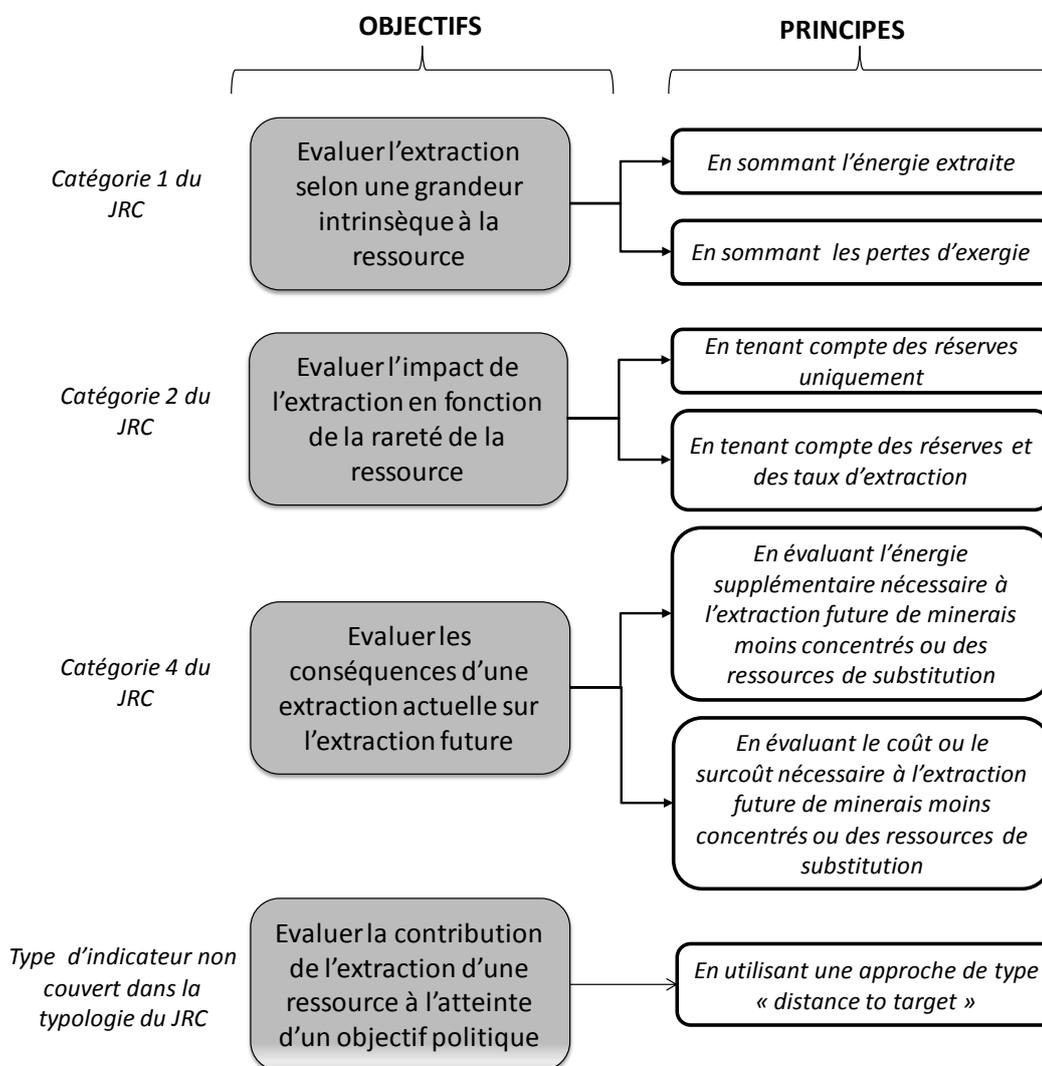


Figure 11 : Typologie d'indicateurs d'épuisement des ressources proposée dans le cadre de cette étude

De façon à mieux appréhender le sens de ces indicateurs, on peut indiquer que :

- Les indicateurs de catégorie 1 du JRC sont globalement des « **indicateurs de consommation de ressources** ».
- Les indicateurs de catégorie 2 du JRC sont :
  - des « **indicateurs de rareté des ressources** » lorsqu'ils tiennent compte des réserves uniquement,
  - des « **indicateurs d'épuisement des ressources** » lorsqu'ils tiennent compte des réserves et de taux d'extraction,
- Les indicateurs de catégorie 4 du JRC sont des « **indicateurs d'accès futur aux ressources** ».

## 3.2 Sélection des indicateurs analysés

La sélection des indicateurs analysés dans le cadre de cette étude a été effectuée en premier lieu sur la base des travaux du JRC puis a été complétée sur la base de l'analyse bibliographique réalisée et des échanges avec ScoreLCA.

Dans [ILCD2010], le JRC a effectué une analyse des méthodes existantes en matière d'évaluation des impacts en ACV et a ainsi sélectionné une liste des méthodes les plus récentes, les plus connues et les plus fréquemment utilisées. Ces méthodes sont les suivantes : CML, El99, EDIP, EPS2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, Swiss Ecoscarcity 07, TRACI.

Parmi ces méthodes, toutes les méthodes présentant des indicateurs d'épuisement des ressources autres que la ressource en eau (non couverte dans cette étude) ont été sélectionnées, sauf les méthodes LIME et TRACI. En effet, ces méthodes ont été respectivement développées au Japon et aux Etats-Unis et sont d'une manière générale représentatives du contexte japonais et américain. Elles présentent donc moins de pertinence dans le cadre de cette étude.

Cette première étape a abouti à la sélection des indicateurs d'épuisement des ressources des méthodes **CML, El99, EDIP, EPS2000, Impact 2002+ et ReCiPe**.

Pour compléter cette liste, les trois indicateurs suivants ont été ajoutés :

- l'indicateur **Cumulative Energy Demand (CED)**, qui est couramment employé pour exprimer la consommation d'énergie primaire totale consommée par un système<sup>8</sup>,
- les indicateurs **Cumulative Exergy Demand (CexD)** et **Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)**, qui traduisent l'extraction de ressources sur la base de l'exergie extraite.

Comme indiqué au paragraphe 3.1.2, ces indicateurs de catégorie 1 selon la typologie du JRC visent à évaluer l'extraction selon une grandeur physique de la ressource (énergie, exergie...) et

---

<sup>8</sup> Cet indicateur n'a pas été sélectionné de façon directe par le JRC. Néanmoins, il a été sélectionné de manière indirecte car cet indicateur se retrouve dans les indicateurs des méthodes ReCiPe ou Impact 2002+, qui sont elles-mêmes sélectionnées par le JRC.

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

ne traduisent donc pas réellement le dommage causé aux ressources, c'est-à-dire la baisse de disponibilité des ressources pour les générations futures. Néanmoins, ils ont été intégrés dans la liste des indicateurs sélectionnés de façon à pouvoir mettre en évidence leurs différences par rapport aux autres indicateurs.

Enfin, l'indicateur **Energy resources de la method Swiss Ecological scarcity** a également été ajouté dans les indicateurs sélectionnés. En effet, cet indicateur est basé sur une approche « Distance to target » et permet donc d'illustrer un type d'indicateur différent de ceux précédemment sélectionnés.

Le tableau suivant présente les indicateurs sélectionnés dans le cadre de cette cartographie, ainsi que les méthodes dont ils sont issus.

**Tableau 1 : Indicateurs sélectionnés dans la cartographie**

Indicateurs	Méthode
Abiotic Depletion Potential (ADP)	CML (version 2002)
Abiotic Depletion Potential- Elements	CML (versions 2009 et suivantes)
Abiotic Depletion Potential – Fossil fuels	
Mineral Depletion Potential – Endpoint	RECIPE
Mineral Depletion Potential – Midpoint	
Fossil Depletion Potential – Endpoint	
Fossil Depletion Potential – Midpoint	
Resource consumption	EDIP
Damages Resources	Elgg
Mineral extraction	Impact2002+
Non-renewable energy consumption	
Resources	
Abiotic stock resources	EPS2000
Cumulative Energy Demand	-
Cumulative Exergy Demand (CexD)	-
Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)	-
Energy resources	Swiss Ecological scarcity

### 3.3 Analyse transversale des indicateurs sélectionnés

L'analyse transversale permet une présentation générale et une mise en perspective des indicateurs sélectionnés. Cette analyse transversale porte sur l'aspect temporel du développement des méthodes et indicateurs, sur la typologie des indicateurs ainsi que sur les ressources couvertes par les indicateurs. Enfin, elle présente également les résultats de l'évaluation des indicateurs par le JRC.

#### 3.3.1 Analyse chronologique du développement et des mises à jour des méthodes et identification des liens entre les méthodes

La frise chronologique ci-dessous présente :

- la date des publications de référence sur les méthodes et indicateurs,
- les mises à jour des facteurs de caractérisation (les mises à jour concernant les indicateurs ressources sont indiquées avec des puces colorées),
- les éventuels liens qui peuvent exister entre les méthodes, notamment lorsqu'un indicateur d'une méthode est réutilisé dans une autre méthode,
- les travaux en cours en lien avec les indicateurs et méthodes.

Cette figure montre que les premiers indicateurs d'épuisement des ressources ont été définis à partir de 1995 et qu'il y a eu ensuite des travaux constants pour développer de nouvelles méthodes et/ou mettre à jour les méthodes existantes. Les premières méthodes sont celles de CML, CED et EDIP 97, suivies par les méthodes El99, EPS200 puis Impact2002+. Sont apparues ensuite les méthodes Swiss Ecological Scarcity, CexD et CEENE, et enfin la méthode ReCiPe qui est la méthode la plus récente.

L'analyse des liens entre les méthodes montre que la méthode Impact 2002+ est basée sur des méthodes existantes et vise à combiner les principes des méthodes CED et El99. La méthode ReCiPe réutilise également la méthode CED pour définir un indicateur midpoint sur les ressources énergétiques. Enfin, la méthode CEENE découle directement de la méthode CexD mais propose différentes améliorations.

Par ailleurs, l'analyse de la fréquence de mise à jour des facteurs de caractérisation ainsi que les travaux en cours témoignent de la dynamique autour des différentes méthodes et de l'intérêt qui leur est porté. Ainsi, il ressort de l'analyse que les méthodes présentant la plus forte « dynamique » sont les méthodes CML, El99, Impact2002+ et ReCiPe. De plus, le fait qu'il y ait d'importants travaux méthodologiques en cours autour des méthodes CML, Impact2002+ et ReCiPe témoigne de la pertinence qui leur est accordée au sein de la communauté scientifique.

Enfin, on peut noter que la méthode CML a fait l'objet d'une importante évolution méthodologique en 2009, avec la séparation de l'indicateur ADP en deux indicateurs distincts, portant respectivement sur les ressources fossiles et sur les ressources minérales (ADP<sub>fossil fuels</sub> et ADP<sub>elements</sub>).

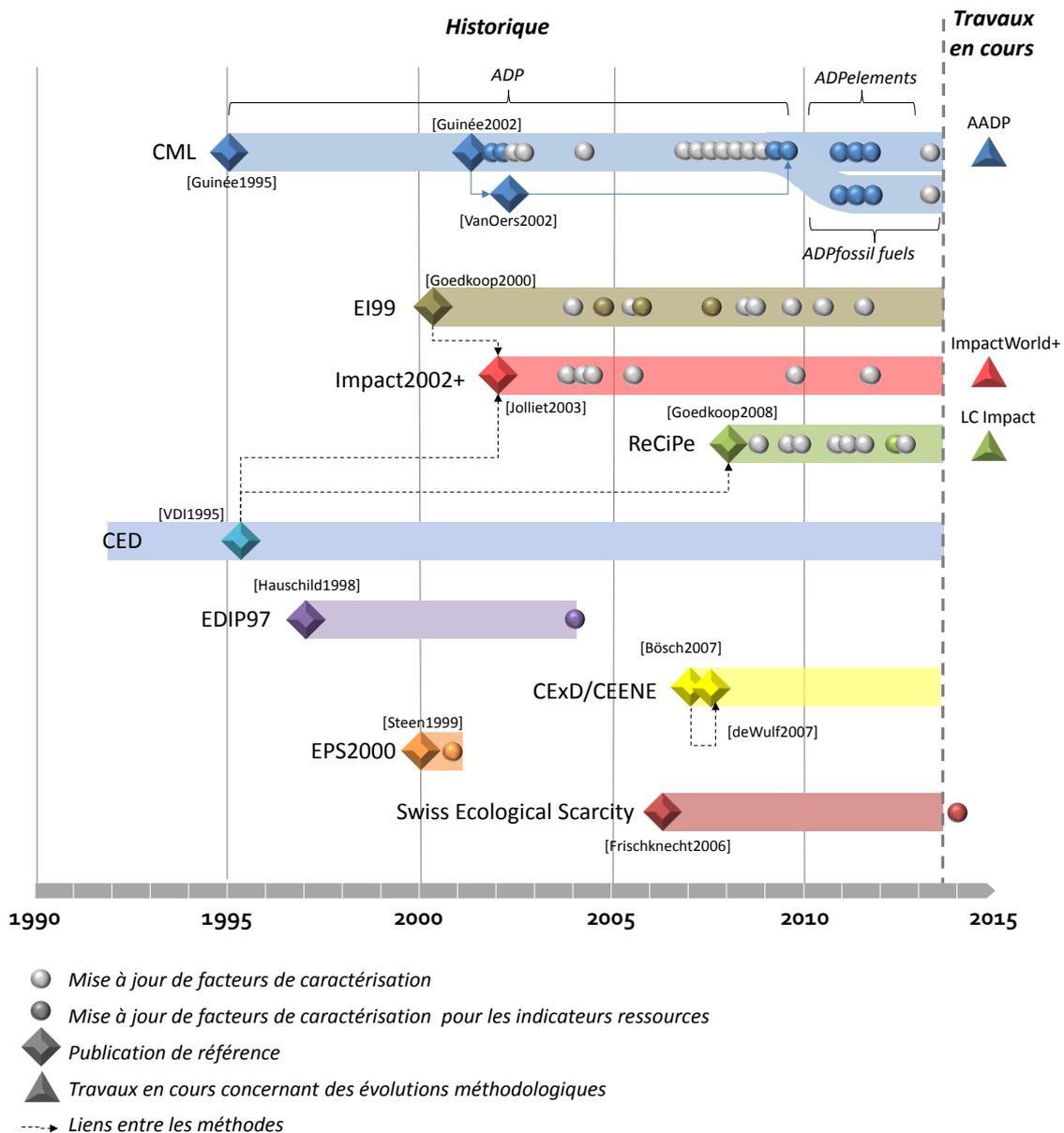


Figure 12 : Frise chronologique des différentes méthodes et des indicateurs associés

Remarques sur les mises à jour indiquées sur la frise chronologique :

- D'une manière générale, les mises à jour indiquées correspondent à la publication par les auteurs de la méthode d'un nouveau tableau de facteurs de caractérisation.
- Méthode EI99 : Pour la méthode EI99, les mises à jour indiquées correspondent aux mises à jour de l'implémentation dans SimaPro.
- Méthodes CexD et CEENE : Ces méthodes sont basées sur l'exergie et ne sont pas propres à l'ACV. Elles peuvent être enrichies de nouveaux facteurs de caractérisation par différents auteurs. En l'absence d'une centralisation des facteurs par les auteurs

comme c'est le cas pour les autres méthodes, il n'a pas été possible d'indiquer les différentes mises à jour sur la frise.

- Méthode Swiss Ecological Scarcity : La version actuelle reste la version de 2006, mais une nouvelle version a été annoncée pour 2013 par les auteurs.

### 3.3.2 Analyse de la typologie des indicateurs

La figure ci-dessous présente les indicateurs étudiés selon la typologie proposée au paragraphe 3.1.2. Comme indiqué précédemment, cette typologie est adaptée à partir de la typologie du JRC et permet de classer les indicateurs selon l'objectif visé. De plus, elle propose un niveau de segmentation supplémentaire en fonction du principe de calcul mis en œuvre pour atteindre l'objectif visé par l'indicateur.

Cette figure montre que les indicateurs étudiés couvrent un large spectre d'objectifs (ceci était un des critères de choix lors de la sélection) mais aussi qu'ils reposent sur des principes variés.

Si l'on fait le parallèle avec l'analyse chronologique précédente, on peut noter que d'une manière générale, les premiers indicateurs développés (CML, CED et EDIP 97) étaient des indicateurs de catégorie 1 ou 2 selon le JRC, c'est-à-dire des indicateurs basés sur des grandeurs intrinsèques des ressources ou sur la rareté des ressources. A l'inverse, la majorité des indicateurs développés plus récemment sont des indicateurs de catégorie 4 selon le JRC, c'est-à-dire des indicateurs prenant en compte la totalité de la chaîne de cause à effet via l'évaluation des conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future.

Enfin, toujours en faisant le parallèle avec l'analyse chronologique précédente, on peut noter que les indicateurs qui présentent la plus forte « dynamique » et sur lesquels des travaux méthodologiques sont en cours sont des indicateurs de catégorie 2 ou 4 selon le JRC.

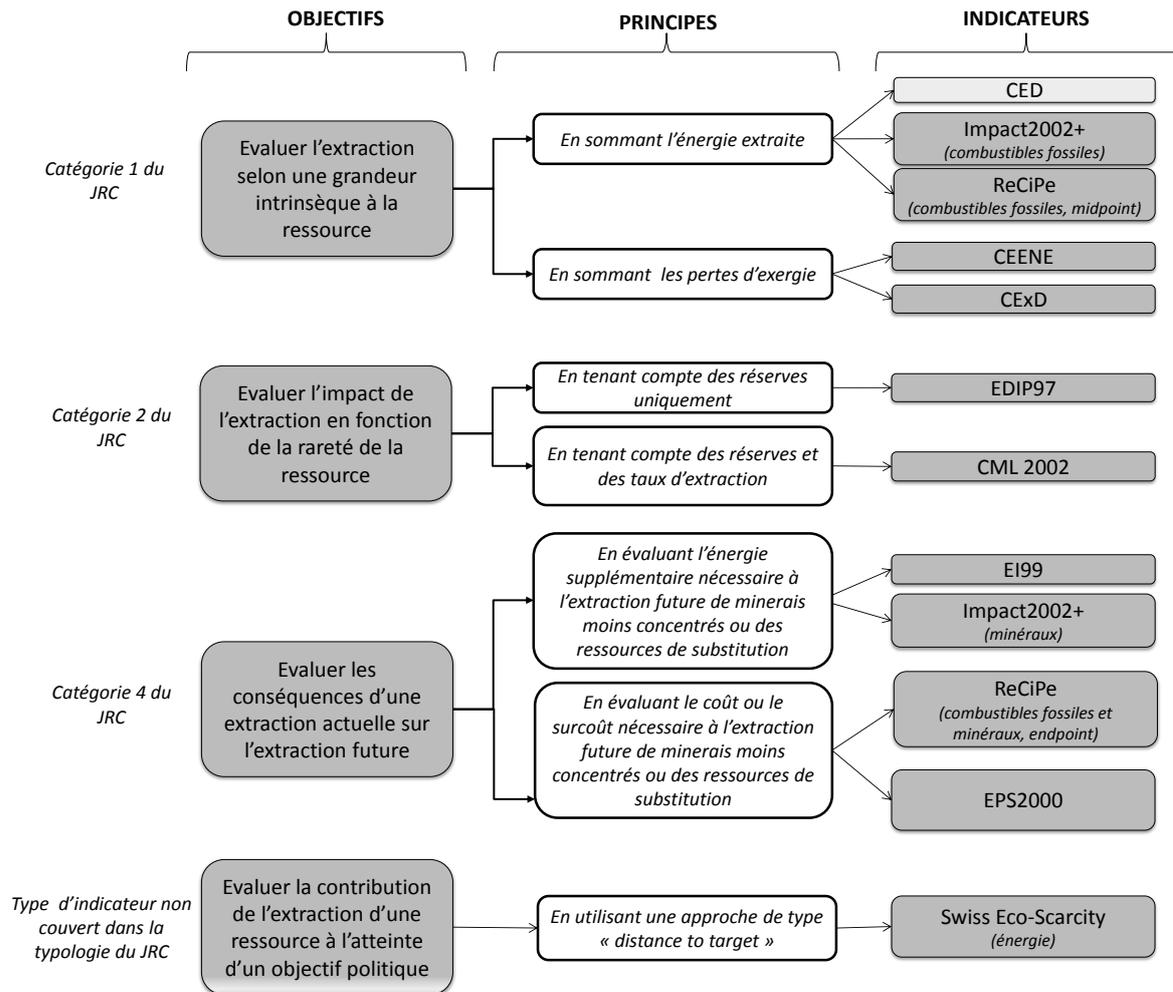


Figure 13 : Classification des indicateurs par type d'objectifs et de principes d'évaluation

### 3.3.3 Analyse des ressources couvertes par les indicateurs

Comme indiqué au paragraphe 2.1.1, il existe différents types de ressources et différentes manières de classer les ressources. Pour présenter les ressources couvertes par les indicateurs d'épuisement des ressources en ACV, la classification suivante a été retenue :

- ressources non renouvelables,
  - Ressources minérales (dont uranium),
  - Ressources fossiles,
- Ressources renouvelables.

Le tableau ci-dessous présente les ressources prises en compte par les différents indicateurs étudiés.

Tableau 2 : Ressources couvertes par les indicateurs sélectionnés

Méthode	Indicateurs	Ressources non-renouvelables		Ressources renouvelables
		Ressources minérales	Ressources fossiles <sup>9</sup>	Biomasse, solaire, vent ...
CML (version 2002)	Abiotic Depletion Potential (ADP)	✓ (49) dont uranium	✓ (P/G/H/L)	
CML (versions 2009 et suivantes)	Abiotic Depletion Potential-Elements	✓ (49/43/42) <sup>10</sup> dont uranium		
	Abiotic Depletion Potential – Fossil fuels		✓ (P/G/H/L)	
ReCiPe	Mineral Depletion Potential – Endpoint	✓ (20) dont uranium		
	Mineral Depletion Potential – Midpoint	✓ (20) dont uranium		
	Fossil Depletion Potential – Endpoint		✓ (P/G/H/L)	
	Fossil Depletion Potential – Midpoint		✓ (P/G/H/L)	
EDIP	Resource consumption	✓ (32) dont uranium	✓ (P/G/H/L)	
Elgg	Damages Resources	✓ (12)	✓ (P/G/H/L)	
Impact2002+	Mineral extraction	✓ (13)		
	Non-renewable energy consumption	uranium uniquement	✓ (P/G/H/L/T)	
	Resources	✓ (14) dont uranium	✓ (P/G/H/L/T)	
EPS2000	Abiotic stock resources	✓ (78) dont uranium	✓ (P/G, Charbon)	
-	Cumulative Energy Demand	uranium uniquement	✓ (P/G/H/L/T)	✓
-	Cumulative Exergy Demand (CexD)	✓ (67) <sup>11</sup> dont uranium	✓ (P/G/H/L/T)	✓
-	Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)	✓ (57) dont uranium	✓ (P/G/H/L/T)	✓
Swiss Ecological scarcity	Energy resource <sup>12</sup> s	uranium uniquement	✓ (P/G/H/L/T)	✓

<sup>9</sup> P = Pétrole, G = Gaz Naturel, H = Houille, L = Lignite, T = Tourbe. Pour EPS2000, pas de distinction entre houille et lignite.

<sup>10</sup> En fonction du type de réserves considérées (respectivement réserves ultimes, bases de réserves et réserves économiques). Ressources pour lesquelles seule la réserve ultime est évaluée : Béryllium, Brome, Chlore, Gallium, Magnésium, Silicium, Sodium.

Ressource pour laquelle seule la base de réserve est évaluée : Helium.

<sup>11</sup> La méthode couvre 67 ressources minérales. De plus, pour certaines ressources, il peut y avoir plusieurs facteurs de caractérisation en fonction de la concentration dans le minerai.

<sup>12</sup> Deux facteurs génériques sont développés : un pour la consommation d'énergie renouvelable, un pour la consommation d'énergie non-renouvelable.

Ce tableau montre que les ressources couvertes sont très variables en fonction des indicateurs.

D'une manière générale, on peut remarquer que les ressources non-renouvelables sont les plus couvertes, car ce sont les ressources pour lesquels le problème de disponibilité des ressources est considéré comme le plus critique.

En ce qui concerne les ressources minérales, le nombre de ressources varie grandement, allant d'une dizaine de ressources considérées pour l'indicateur Damage Resources d'El99 à près de 200 ressources pour l'indicateur CEENE.

En ce qui concerne les ressources fossiles, la plupart des méthodes prennent en compte le gaz naturel, le pétrole, la houille et la lignite. Les indicateurs CED, CexD, CEENE et Non-renewable energy consumption d'Impact2002+ incluent également la tourbe.

Pour ce qui est des ressources renouvelables (fonds et flux), on peut indiquer que seuls les 4 indicateurs suivants les prennent en compte :

- l'indicateur Energy resource de la méthode Swiss Ecological scarcity, qui est un indicateur particulier de type « Distance to target »,
- et les indicateurs CED, CexD et CEENE, qui traduisent l'extraction de ressource selon une grandeur physique intrinsèque à la ressource (catégorie 1 du JRC).

Ainsi, il est important de souligner que tous les autres indicateurs, qui évaluent l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource (catégorie 2 du JRC) ou qui évaluent les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future (catégorie 4 du JRC), ne prennent pas en compte les ressources renouvelables dans l'évaluation du dommage causé aux ressources.

### 3.3.4 Résultats de l'évaluation des méthodes par le JRC

Le JRC a réalisé une évaluation des différentes méthodes de caractérisation existantes, pour l'ensemble des impacts environnementaux couverts par les analyses de cycle de vie.

Dans un premier temps, le JRC a réalisé une analyse des principales méthodes de manière globale, c'est-à-dire pour tous les indicateurs confondus (réchauffement climatique, acidification, épuisement des ressources...) [ILCD2010].

Dans un second temps, le JRC a réalisé une analyse détaillée de certains indicateurs, et notamment d'indicateurs portant sur les ressources [ILCD2011]. Les 6 critères d'analyse utilisés pour cette évaluation sont les suivants :

- Critères scientifiques
  - **1. Complétude du périmètre** : ce critère prend en compte les types de ressources couverts par la méthode.
  - **2. Pertinence environnementale** : Ce critère évalue le concept/modèle de la méthode au regard de l'impact considéré.
  - **3. Robustesse scientifique et niveau de certitude** : Ce critère indique si le modèle utilisé est rudimentaire ou élaboré, si une revue critique ou des calculs d'incertitudes ont été réalisés ou non...

- **4. Documentation, transparence et reproductibilité** : Ce critère indique la facilité d'accès à la documentation.
- **5. Applicabilité** : Ce critère indique la possibilité d'accès aux facteurs de caractérisation et la facilité d'application de ces facteurs.

Les différents critères scientifiques sont regroupés au sein d'un « Critère scientifique » global.

- Critère d'acceptation des parties prenantes
  - **6. Degré d'acceptation et facilité à communiquer dans un contexte business et politique** : Ce critère couvre les questions suivantes : La méthode a-t-elle été approuvée par un organisme reconnu ? Les principes sur lesquels repose cette méthode sont-ils simples ou complexes ? Est-il facile de communiquer sur cette méthode ?

Pour chaque critère, le JRC attribue une note allant de A (note la plus élevée) à E (note la plus basse).

La figure suivante présente l'évaluation réalisée par le JRC pour les indicateurs portant sur les ressources. On peut noter que, parmi les indicateurs sélectionnés dans le cadre de cette étude, tous les indicateurs ont été analysés par le JRC sauf l'indicateur CED qui de ce fait ne figure pas dans le schéma suivant.

Comme on peut le constater, le classement des indicateurs est très variable en fonction des critères analysés et aucun indicateur ne ressort comme étant nettement meilleur que les autres pour tous les critères. Néanmoins, on peut indiquer que les indicateurs qui ressortent comme les mieux notés sont :

- les indicateurs de la méthode CML (2 critères obtiennent la note A, 3 critères obtiennent la note B, 1 critère obtient la note C),
- les indicateurs basés sur l'exergie (3 A, 1 B, 2 C),
- les indicateurs de la méthode ReCiPe (1 A, 3 B, 2 C)
- et l'indicateur EPS2000 (2 A, 2 B, 2 C).

Par ailleurs, on peut indiquer que les indicateurs les mieux notés en termes de complétude du périmètre sont les indicateurs basés sur l'exergie et l'indicateur EPS, qui prennent en compte une grande variété de ressources minérales, les ressources fossiles et les ressources renouvelables.

Enfin, on peut également mentionner que les indicateurs les mieux notés concernant le degré d'acceptation et la facilité à communiquer sont les indicateurs CML et EDIP qui sont tous deux des indicateurs dont l'objectif est d'évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource.

Ensuite, sur la base de cette analyse, le JRC a émis des recommandations sur les indicateurs à privilégier [ILCD2012]. Ces résultats sont présentés au Chapitre 5 : Bonnes pratiques et recommandations.

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

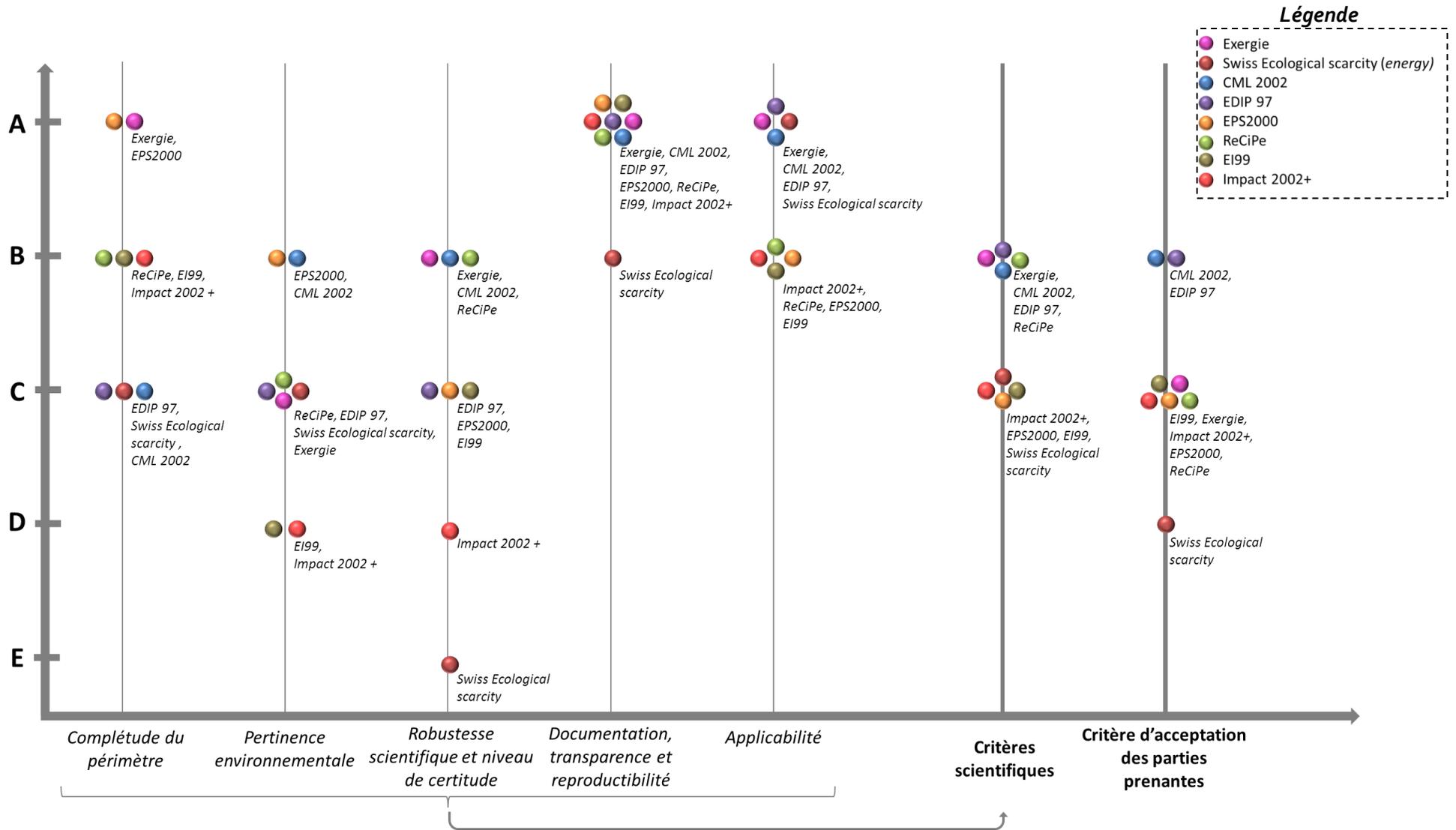


Figure 14 : Résultats de l'évaluation des indicateurs ressources effectués par le JRC, d'après [ILCD2011]

### 3.4 Analyse détaillée des indicateurs sélectionnés

Suite à l'analyse transversale qui proposait une présentation générale et une mise en perspective des indicateurs, l'analyse détaillée a pour objectif de présenter chaque indicateur de façon plus approfondie. Pour cela, chaque indicateur est décrit dans une fiche type, dont les différents champs sont présentés dans le tableau suivant. En complément de ces fiches, les indicateurs suivants font l'objet d'une description plus détaillée :

- indicateurs de la méthode CML,
- indicateurs de la méthode ReCiPe,
- indicateur Damages Resources de la méthode EI99,
- indicateurs CexD / CEENE.

Ces indicateurs ont été sélectionnés en concertation avec ScoreLCA de façon à couvrir des indicateurs de différents types (catégories 1, 2 et 4 selon le JRC) et en fonction de la dynamique actuelle autour des méthodes.

Tableau 3 : Champs retenus pour la description des indicateurs

Liste des champs retenus pour la description des indicateurs
Nom
Méthode (le cas échéant, nom de la méthode globale d'évaluation dont est issu l'indicateur)
Type d'indicateur (flux, midpoint ou endpoint) et catégorie selon le classement de l'ILCD (catégorie 1 = indicateur reposant sur une propriété inhérente de la ressource, catégorie 2 = indicateur prenant en compte la rareté de la ressource, catégorie 4 = indicateur de dommage, couvrant l'ensemble du mécanisme environnemental, de l'effet aux conséquences)
Publications de référence
Unité de l'indicateur
Ressources couvertes (minérales, fossiles, énergies renouvelables...) avec le cas échéant le nombre de ressources minérales considérées
Principes et fondements
Calcul des facteurs de caractérisation
Sources de données principales (pour le calcul des facteurs de caractérisation)
Facteurs de normalisation
Représentativité géographique
Auteurs
Chronologie
Evaluation du JRC (cf. §3.3.4, p29)
Normes et référentiels préconisant la méthode
Incertitudes
Limites
Travaux en cours

### 3.4.1 Abiotic Depletion Potential – CML

Abiotic Depletion Potential – CML			
Nom	Abiotic Depletion Potential (ADP)	ADPelements	ADPfossil fuels
Méthode	CML2002, versions 1.0 à 3.5.	CML2002 version 3.6 et suivantes	CML2002 version 3.6 et suivantes
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>		
Unité(s)	kg antimoine équivalent	kg antimoine équivalent	MJ
Ressources couvertes	Ressources minérales et fossiles (49 ressources minérales considérées).	Ressources minérales (49 (réserves ultimes) ; 43 (base de réserves) ; 42 (réserves économiques))	Ressources fossiles
Principes et fondements	La méthode tient compte du taux d'extraction et du stock disponible. Les réserves ultimes sont considérées.	Ces deux indicateurs (ADPelements et ADP fossil fuels) résultent de la recommandation de [VanOers2002] de considérer l'extraction de ces deux grands types de ressources comme contribuant à des problèmes environnementaux différents, et donc de les évaluer séparément.	
Calcul des facteurs de caractérisation	<p>Le facteur de caractérisation ADP d'une ressource <math>i</math> se définit de la manière suivante :</p> $ADP_i = \frac{DR_i / R_i^2}{DR_{ref} / R_{ref}^2}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ADPi Abiotic Depletion Potential d'une ressource <math>i</math></li> <li>- Ri réserve ultime de la ressource <math>i</math> (kg)</li> <li>- Dri taux d'extraction de la ressource <math>i</math> (kg.an<sup>-1</sup>)</li> <li>- Rref réserve ultime de la ressource de référence (antimoine) (kg)</li> <li>- Dref taux d'extraction de la ressource de référence (antimoine) (kg. An<sup>-1</sup>)</li> </ul>	<p>D'après les recommandations de Van Oers, les indicateurs ressources minérales et ressources fossiles sont distingués :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'ADPelements est analogue à l'ADP, mais ne couvre pas les ressources fossiles.</li> <li>- L'ADPfossil fuels est défini comme la somme des flux de ressources fossiles (exprimé en MJ, sur la base des PCI).</li> </ul> <p>Le calcul des facteurs est réalisé selon les niveaux de réserve suivants : Réserve ultimes (par défaut), mais également réserves économiques et base de réserves.</p>	
Sources de données principales	<p><u>Ressources minérales :</u> 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.</p>	Idem ADP (pour les ressources minérales)	PCI

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

	<p><u>Ressources fossiles :</u>                  Réserves prouvées : [WR1994] et/ou IEA.                  Extrapolation des réserves prouvées en réserves ultimes : [Berner1989]                  Base de réserve des combustibles fossiles : [Campbell1998]</p>		
Facteurs de normalisation	Valeurs de normalisation proposées		
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	
Chronologie	Méthode développée en 2001.	Correspond à une mise à jour majeure de l'indicateur ADP, intégrée en novembre 2009 sur la base de la publication [VanOers2002]. La version la plus récente est la 4.2 publiée en avril 2013.	
	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.  Les versions de CML correspondant à l'ADP unique sont les versions 3.5 et précédentes. Néanmoins, les mises à jour de facteurs réalisées par la suite pour l'ADP fossil fuels et l'ADPelements sont également applicables à l'ADP unique.		
Evaluation du JRC	1. Complétude du périmètre : <b>C</b> 2. Pertinence environnementale : <b>B</b> 3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>B</b> 4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b> 5. Applicabilité : <b>A</b> 6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>B</b>  Le JRC recommande la méthode CML comme indicateur midpoint, avec un Niveau II. Le JRC recommande d'utiliser les facteurs développés par [VanOers2002] tenant compte de la base de réserves (et non des réserves ultimes proposés par défaut par la méthode). Toutefois, le JRC n'applique pas la recommandation de [VanOers2002] de distinguer l'ADPelements de l'ADP fossil fuels, et les agrège ainsi au sein d'un seul indicateur ADP.		
Normes et référentiels préconisant la méthode	La norme NF P01-010 (version décembre 2004), qui encadre la réalisation des fiches environnementales et sanitaires (FDES) pour le bâtiment, préconise l'indicateur ADP, et fournit les facteurs à utiliser.	L'ADPelements et l'ADP fossil fuels sont préconisés dans la norme européenne de déclaration environnementale des bâtiments « NF EN 15804 » (version août 2012). Toutefois, la norme mentionne que l'utilisation de ces indicateurs sera revue du fait de développement en cours sur ces méthodes.  Le JRC recommande (avec un niveau II) d'utiliser les valeurs développées par [VanOers2002] utilisant la base de réserves, et re-fusionne les indicateurs au sein d'un indicateur ADP unique.	

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Incertitudes	<p>Les auteurs mentionnent l'existence d' « incertitudes considérables concernant l'ampleur des réserves actuelles » [Guinee2002] Rapport 3 p153</p>	<p>[VanOers2002] mentionne l'existence d'« importantes incertitudes concernant la taille des réserves ultimes extractibles »</p> <p>« 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. »</p>	
Limites	<p>Le fait que les ressources fossiles sont considérées comme interchangeable et que les facteurs de caractérisation sont basés sur la réserve de l'ensemble des ressources fossiles fait que l'indicateur ADP ne prend pas en compte la rareté spécifique de chaque ressource fossile. Un MJ de charbon est pondéré de la même manière qu'un MJ de pétrole. Ainsi, l'indicateur ADP ne traduit pas l'épuisement spécifique de chaque ressource fossile mais l'épuisement des ressources fossiles dans leur ensemble par rapport à la ressource de référence antimoine.</p> <p>Les facteurs de caractérisation recommandés par les auteurs de CML sont calculés sur la base des réserves ultimes. Cependant, de nombreux auteurs ([Brenttrup2002], [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.</p>	<p>Les facteurs de caractérisation ADP éléments sont disponibles au niveau « bases de réserves ». Ces réserves ne prennent 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.</p>	<p>L'indicateur ADP fossile n'inclut aucune notion de rareté. Il est similaire à un indicateur de type CED couvrant uniquement les ressources fossiles.</p>
Travaux en cours	<p>Extension de l'ADP pour la prise en compte de « stocks anthropogéniques » (en plus des stocks « lithosphériques ») – AADP. Anthropogenic stock extended abiotic depletion potential" [Schneider2011]</p>		

### 3.4.1.1 Présentation détaillée de l'Abiotic Depletion Potential

Concerne la version 1.0 à 3.5 de CML

#### ► Principes et fondements

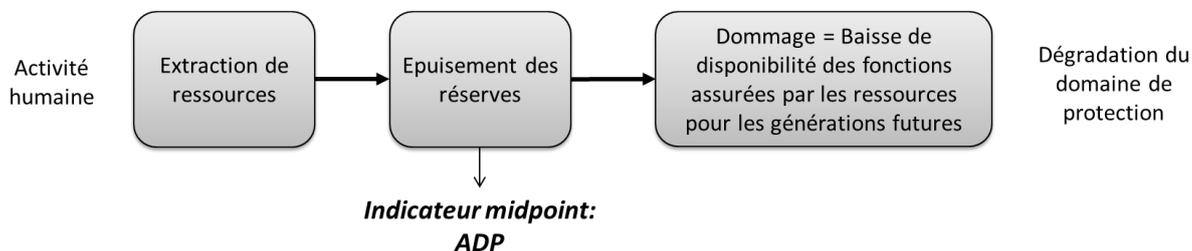


Figure 15 : Chaîne de cause à effet considérée pour la catégorie d'impact « ADP » de la méthode CML

L'Abiotic Depletion Potential est un indicateur visant à évaluer la réduction de la disponibilité des ressources naturelles abiotiques (minérales et fossiles) pour les usages humains. La méthode aborde le problème sous l'angle physique en tenant compte, pour une ressource donnée, du taux d'extraction et de la réserve ultime disponible. Les auteurs illustrent la nécessité de prendre ces deux paramètres en comparant les ressources fictives suivantes :

Ressources	A	B	C
Réserve (Gtonnes)	1	$10^{-5}$	1
Taux d'extraction annuel (Gtonnes / an)	$10^{-6}$	$10^{-6}$	0,1

On considère dans un premier temps les ressources A et B : Celles-ci ont le même taux d'extraction annuel, mais avec les réserves de B sont beaucoup plus réduites. On peut intuitivement penser que l'extraction de B est plus critique que celle de A.

On considère ensuite les ressources A et C : Celles-ci ont la même réserve, mais le taux d'extraction de C est beaucoup plus important que celui de A. On peut cette fois intuitivement penser que l'extraction de C est plus critique que celle de A.

Une manière simple de quantifier l'importance des deux paramètres que sont la réserve R (en kg) et le taux d'extraction DR (en kg/année) consiste à faire le rapport entre les deux. On obtient un facteur DR/R (en année<sup>-1</sup>) qui pourrait être utilisé comme facteur de caractérisation.

Cependant cette définition peut montrer ses limites : Des ratios DR/R égaux pour deux ressources peuvent traduire des réalités très différentes. C'est le cas des ressources fictives B et C définies dans le tableau ci-dessus, pour lesquelles le ratio DR/R est égal à 0,1, mais pour lesquelles les paramètres DR et R ont des ordres de grandeur très différents. Dans le cas où l'on pourrait utiliser une même quantité de la ressource B ou C pour une même fonction, il faut, selon les auteurs, favoriser l'utilisation de C, du fait de sa réserve plus importante.

Ainsi, pour évaluer l'appauvrissement d'une ressource, les auteurs préconisent de pondérer davantage la taille de la réserve, en élevant sa contribution au carré (l'élévation au cube ou à des puissances supérieures est par ailleurs discutée par les auteurs, mais le carré est préconisé).

L'appauvrissement d'une ressource  $i$  s'exprime donc ainsi :  $Appauvrissement_i = \frac{DR_i}{R_i^2}$

Avec :

- $Appauvrissement_i$  Appauvrissement d'une ressource  $i$  ;
- $R_i$  réserve ultime de la ressource  $i$  (kg) ;
- $DR_i$  taux d'extraction de la ressource  $i$  (kg.an<sup>-1</sup>).

### ► Calculs des facteurs de caractérisation

Les facteurs d'ADP sont calculés en rapportant l'appauvrissement de chaque substance à celui d'une substance de référence (l'antimoine). L'ADP s'exprime donc de la manière suivante :

$$ADP_i = \frac{DR_i / R_i^2}{DR_{ref} / R_{ref}^2}$$

Avec :

- $ADP_i$  Abiotic Depletion Potential d'une ressource  $I_i$  ;
- $R_i$  réserve ultime de la ressource  $i$  (kg) ;
- $DR_i$  taux d'extraction de la ressource  $i$  (kg.an<sup>-1</sup>) ;
- $R_{ref}$  réserve ultime de la ressource de référence (antimoine) (kg) ;
- $DR_{ref}$  taux d'extraction de la ressource de référence (antimoine) (kg.an<sup>-1</sup>).

### ► Cas particulier des combustibles fossiles

Les auteurs considèrent que les combustibles fossiles sont interchangeables (à la fois en tant qu'énergie et que matériaux). Ils définissent donc un ADP commun à tous les combustibles fossiles ( $ADP_{fossil\ energy}$ ), exprimé en kg-eq d'antimoine/MJ), qui se base sur les réserves ultimes et le taux d'extraction des énergies fossiles dans leur ensemble, et non pour chacune individuellement<sup>13</sup> (pétrole, gaz, charbon...).

Par définition, le calcul de l' $ADP_{fossil\ energy}$  nécessite de connaître la réserve ultime en énergie fossiles et le taux d'extraction :

---

<sup>13</sup> Dans la toute première publication [Guinée 1995], les combustibles fossiles avaient chacun leur propre ADP.

- Le taux d'extraction est calculé à partir des taux d'extractions des ressources fossiles individuelles (IEA – International Energy Agency, données 1999).
- La réserve ultime en énergie fossiles n'étant pas une donnée facilement accessible, celle-ci est estimée à partir :
  - des réserves prouvées par le World Resources Institute [WRI1994] ;
  - du ratio de carbone fossile géologique [Berner1989] et des réserves prouvées de carbone fossiles (déduites de données de [WRI1994]).

Elle s'exprime ainsi :

$$\text{Energie fossile}_{\text{réserves ultimes}(MJ)} = \text{Energie fossile}_{\text{réserves prouvées}(MJ)} \times \frac{\text{Carbone fossile}_{\text{géologique}(kg)}}{\text{Carbone fossile}_{\text{réserves prouvées}(kg)}}$$

L' $ADP_{\text{fossil energy}}$  (kg-eq d'antimoine/MJ) est ensuite multiplié par le contenu énergétique<sup>14</sup> de chacun des combustibles fossiles (pétrole, gaz, hardcoal, softcoal) afin d'obtenir leur ADP individuel par kilogramme extrait (kg-eq d'antimoine/kg) et ainsi permettre leur addition avec les ADP des autres ressources.

Il faut bien souligner que le fait que les ressources fossiles sont considérées comme interchangeables et que les facteurs de caractérisation sont basés sur la réserve de l'ensemble des ressources fossiles fait que l'indicateur ADP ne prend pas en compte la rareté spécifique de chaque ressource fossile. Un MJ de charbon est pondéré de la même manière qu'un MJ de pétrole.

### 3.4.1.2 **Présentation détaillée de l'Abiotic Depletion Potential – Elements et Abiotic Depletion Potential – Fossil Fuels**

Concerne les versions 3.6 (2009) et suivantes de CML

#### ► **Principes et fondements**

En 2002, Van Oers et al. ont formulé des propositions [VanOers2002] visant à améliorer l'indicateur « *Abiotic Resource Depletion* » de CML.

La principale proposition des auteurs consiste à distinguer les ressources minérales des ressources fossiles<sup>15</sup>.

---

<sup>14</sup> Les valeurs de contenu énergétique utilisées par [VanOers2002] proviennent de [WRI1194]. Aucune des deux sources ne précise s'il s'agit du PCI ou PCS. Les valeurs sont : 41,87MJ/kg pour le pétrole, 38,84MJ/kg pour le gaz, 27,91MJ/kg pour la houille et 13,96MJ/kg pour le lignite.

<sup>15</sup> Parmi les autres propositions, on peut également noter :

- La possibilité de calculer l'ADP en considérant un autre niveau de réserves que les réserves ultimes (réserves économiques, base de réserve)
- La possibilité de modifier la formule du calcul de l'ADP, en ne prenant par exemple en compte que l'inverse de la réserve (1/R), sans le taux d'extraction.

Les auteurs partent du constat que la méthode CML ne traite pas de façon homogène les différents types de ressources. Dans le cas des ressources minérales, la rareté de chaque ressource minérale est évaluée indépendamment de ses fonctions; tandis que les ressources fossiles sont évaluées par rapport à leur fonction (en l'occurrence leur contenu énergétique) et ainsi considérées comme complètement interchangeables.

Les auteurs préconisent donc de distinguer l'ADP en deux indicateurs distincts, l'un traduisant la réduction de l'ensemble des fonctions potentielles que peuvent fournir les éléments naturels et l'autre traduisant le contenu énergétique du carbone fossile.

Les auteurs de CML, qui publient régulièrement des mises à jour du tableur des facteurs de caractérisation, ont intégré cette recommandation à partir de la version 3.6 du tableur (Novembre 2009), en séparant l'**ADPelements** de l'**ADPfossil fuels**.

Cette distinction revient à considérer les dommages liés aux ressources minérales de manière distincte de ceux relatifs aux ressources fossiles, comme représenté sur les figures suivantes :

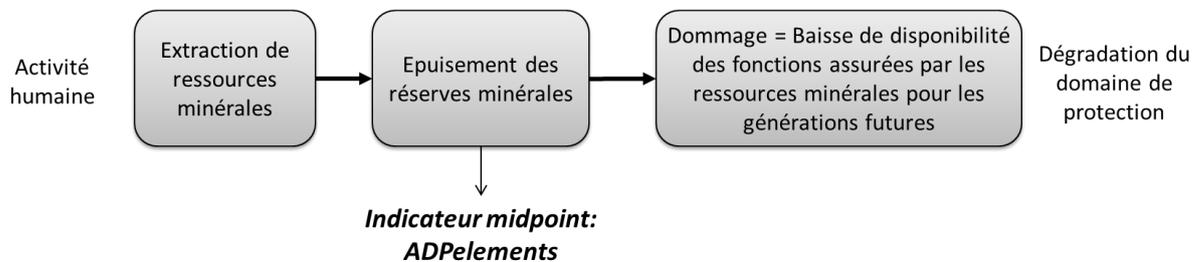


Figure 16 : Chaîne de cause à effet considérée pour la catégorie d'impact « ADPelements » de la méthode CML

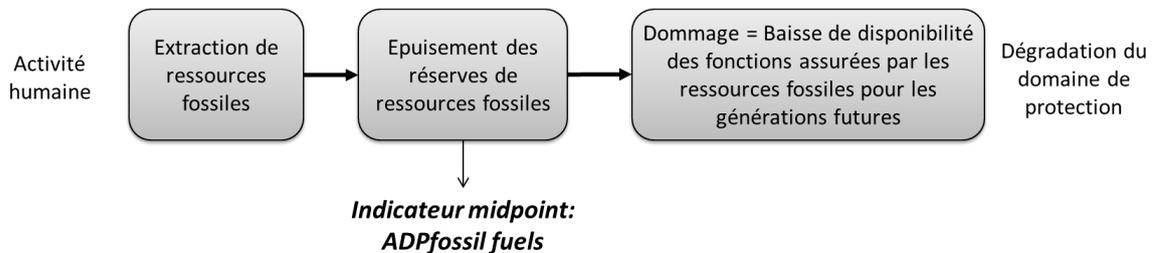


Figure 17 : Chaîne de cause à effet considérée pour la catégorie d'impact « ADPfossil fuels » de la méthode CML

### ► Calcul des facteurs de caractérisation

Pour l'**ADPelements**, la définition de chaque facteur reste identique à la définition de l'ADP, et il est également exprimé en kilogramme-équivalent d'antimoine.

Le calcul de l'**ADPfossil fuels**<sup>16</sup> consiste quant à lui à sommer les flux d'énergie fossiles et est exprimé en MJ.

<sup>16</sup> L'**ADPfossil fuels** est distinct de de l'**ADPfossil energy** : le premier désigne le nom de l'indicateur ADP propre aux combustibles fossiles (exprimé en MJ), tandis que le second désigne le facteur de caractérisation des énergies fossiles (en kg-équivalent antimoine/MJ) utilisé dans l'ADP « agrégé ».

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

En théorie, l'indicateur *ADP**fossil fuels* se définit de manière analogue à l'*ADP**elements* : le calcul de l'indicateur consiste à rapporter le  $\frac{DR_i}{R_i^2}$  de chaque combustible fossile au

$\frac{DR_{ref}}{R_{ref}^2}$  de l'un d'entre eux choisi comme référence (avec les DR en MJ.an<sup>-1</sup> et les R en

MJ). Cependant, les combustibles fossiles étant évalués avec des données communes (réserves et taux d'extraction), cela revient à dire que l'*ADP**fossil fuels* de tous les combustibles fossiles est égal à 1 (MJ/MJ). En pratique, donc, il suffit de sommer les flux d'énergies fossiles en MJ pour calculer l'indicateur.

Outre la séparation en deux indicateurs distincts, les auteurs de CML ont également intégré les améliorations suivantes proposées par Van Oers [VanOers2002] :

- Les facteurs de caractérisations de certaines formes composées (appelés « configurations ») ont été rajoutées à l'*ADP**elements*.
- Les sources de données pour estimer les réserves prouvées en pétrole, gaz naturel et charbon se basent sur une source unique ([WRI1994]).

### 3.4.2 Mineral Depletion and Fossil Depletion – ReCiPe

ReCiPe – Mineral Depletion Potential et Fossil Depletion Potential				
Nom	Mineral Depletion Potential	Mineral Depletion Potential	Fossil Depletion Potential	Fossil Depletion Potential
Méthode	ReCiPe			
Type d'indicateur	Endpoint – catégorie 4	Midpoint « fictif »	Endpoint – catégorie 4	Midpoint « fictif »
Publications et lien 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>			
Unité(s)	\$	kg de fer équivalent	\$	kg de pétrole équivalent
Ressources couvertes	Ressources minérales (20 ressources considérées)		Ressources fossiles	
Principes et fondements	La méthode repose sur le principe que la consommation de ressources actuelle 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 du coût d'extraction des ressources. Pour les minéraux, l'approche se base sur les gisements de minerais (et non des substances individuelles).			
Calcul des facteurs de caractérisation	Les facteurs de caractérisation correspondent à la valeur actualisée de l'augmentation marginale du coût qui aura lieu dans le futur, du fait d'une extraction actuelle.	Les facteurs <i>midpoint</i> sont dérivés des facteurs <i>endpoint</i> , et rapportés à une substance de référence (le fer).	Les facteurs de caractérisation correspondent à la valeur actualisée de l'augmentation marginale du coût qui aura lieu dans le futur, du fait d'une extraction actuelle. Le facteur est calculé pour le pétrole, puis décliné pour les autres ressources fossiles sur la base du rapport des PCS <sup>17</sup> .	Les facteurs de caractérisation correspondent au rapport du PCS <sup>17</sup> de chaque ressource fossile par rapport au PCS de la ressource de référence (pétrole).
Sources de données principales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluation des gisements : Singer et al. (1997) de l'USGS (environ 3000 mines répertoriées selon 50 types de minerais)</li> <li>- Données de coûts : CostMine, World Mine Cost Data Exchange</li> </ul>		IEA (International Energy Agency)	Source pour les PCS : CED (Cumulative Energy Demand) d'ecoinvent
Facteurs de normalisation	Valeurs de normalisation proposées			
Représentativité géographique	Représentativité mondiale : 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 (+Tommie Ponsioen pour le chapitre ressources fossiles)			

<sup>17</sup> Dans [Goedkoop2008], il est indiqué que les facteurs de caractérisation sont basés sur les PCI. Néanmoins, les auteurs utilisent en pratique comme source de données les facteurs de caractérisation de la méthode CED d'ecoinvent, qui correspondent à des PCS.

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Chronologie	<p>La méthode a été publiée en 2008, la version à date est la 108 (Octobre 2012). 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.</p>			
Evaluation du JRC	<p>L'analyse du JRC concerne les deux indicateurs endpoint.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Complétude du périmètre : <b>B</b></li> <li>2. Pertinence environnementale : <b>C</b></li> <li>3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>B</b></li> <li>4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b></li> <li>5. Applicabilité : <b>B</b></li> <li>6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>C</b></li> </ol> <p>Le JRC ne recommande pas de méthode comme indicateur endpoint de consommation de ressources, mais mentionne les deux indicateurs endpoint de ReCiPe (mineral et fossil depletion) comme « Interim ».</p>			
Normes et référentiels préconisant la méthode	<p>Mise à part la classification des deux indicateurs endpoint comme « interim » par le JRC, aucune norme ou référentiel préconisant ces indicateurs n'ont été identifiés.</p>			
Incertitudes	<p>Dans ReCiPe, les incertitudes sont abordées par la définition de perspectives culturelles « Egalitaire », « Hierarchiste » et « Individualiste ». Celles-ci 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 dans 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.</p>			
	<p>Pas de distinction par perspective E/H/I pour les minéraux.</p>	<p>La perspective individualiste considère des paramètres plus optimistes pour le calcul de l'augmentation marginale des coûts d'extraction des ressources fossiles.</p>		
Limites	<p>Le nombre de ressources minérales 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.</p>	<p>Le nombre de ressources minérales 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 endpoint.</p>	<p>Seul le facteur du pétrole est calculé ; ceux des autres ressources fossiles en sont dérivés à partir des contenus énergétiques (PCS). Pas de projections réalisées pour la production de pétrole future.</p>	<p>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, et qu'il n'inclut aucune notion de rareté. De ce fait, il est conseillé de privilégier l'indicateur endpoint.</p>
Travaux en cours	<p>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.</p>			

### 3.4.2.1 Présentation détaillée du Mineral depletion Potential

#### ► Principes et fondements

Le principe de base de la catégorie d'impact « Mineral Depletion Potential » est que l'extraction d'un minerai aujourd'hui diminue la teneur moyenne de ce minerai dans l'environnement. En conséquence, il faudra déployer plus d'efforts à l'avenir pour exploiter les minerais moins concentrés. Pour quantifier ces efforts supplémentaires, les auteurs font le choix d'évaluer les coûts supplémentaires d'extraction. La figure suivante représente cette chaîne de cause à effet, ainsi que les indicateurs proposés par les auteurs. La méthode ReCiPe visant en premier lieu à proposer des indicateurs endpoint, les indicateurs midpoint ont été développés a posteriori. On peut ainsi noter que l'indicateur midpoint n'est pas en lien direct avec la chaîne de cause à effet.

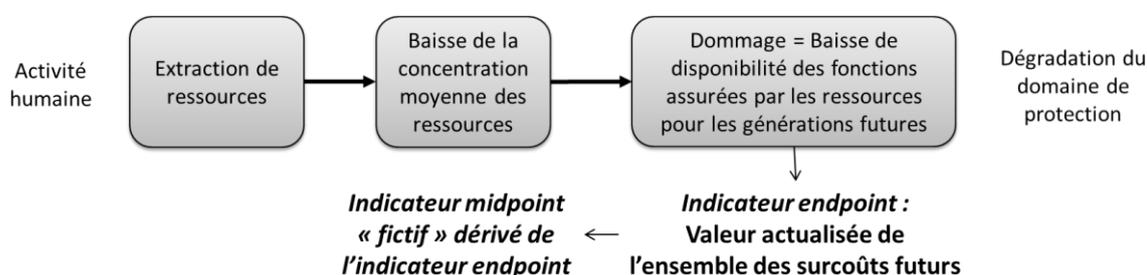


Figure 18 : Chaîne de cause à effet considérée pour la catégorie d'impact « Mineral depletion Potential » de la méthode ReCiPe

#### 3.4.2.1.1 Endpoint

##### ► Principe général

Les auteurs définissent en premier lieu l'indicateur endpoint de la catégorie d'impact « Mineral Depletion Potential ». Le principe de l'indicateur endpoint est d'évaluer l'ensemble des coûts supplémentaires engendrés par l'exploitation de minerais de moins en moins concentrés (déconcentration elle-même engendrée par l'extraction des minerais).

Ainsi, une extraction effectuée aujourd'hui engendre un surcoût pour toutes les extractions futures. Les facteurs de caractérisation traduisent **la valeur actuelle de l'ensemble des surcoûts futurs générés par une extraction.**

Pour évaluer la valeur actuelle des surcoûts futurs, les auteurs développent des facteurs de caractérisation qui intègrent les trois termes suivants :

- L'augmentation marginale du coût d'extraction (Marginal Cost Increase – MCI) ;
- Le taux d'extraction (la quantité totale extraite, par exemple par an) ;
- Un facteur d'actualisation du coût.

Exprimé sous la forme d'une équation, la valeur actuelle des surcoûts générés sur une période T par l'extraction d'une ressource r à l'instant t est :

$$\text{Valeur actuelle des surcoûts} = \sum_{t=1}^T MCI_{r,kg} \times P_{r,t} \times \frac{1}{(1+d)^t} \quad (\text{équation A})$$

Avec :

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

Les paragraphes suivants explicitent chacun des trois termes de l'équation.

On peut souligner le fait que l'approche n'inclut pas directement d'horizon temporel pour évaluer les surcoûts futurs générés par les extractions actuelles. Néanmoins, le choix d'un taux d'actualisation (d) de 3% par les auteurs rend la valeur actuelle des surcoûts futurs négligeable au-delà d'environ 200 ans.

#### ► Augmentation marginale du coût d'extraction (MCI)

L'augmentation marginale du coût d'extraction ( $MCI_{r,kg}$ ) d'une ressource r du fait d'une extraction en kg s'exprime de la manière suivante :

$$MCI_{r,kg} = \frac{\Delta \text{Coût}}{\Delta \text{Production}} \quad \text{exprimée en } \$/\text{kg}^2$$

Avec :

- $\Delta \text{Coût}$  : Augmentation du coût d'extraction de la ressource, engendrée par l'extraction de la quantité  $\Delta \text{Production}(\$/\text{kg})$  ;
- $\Delta \text{Production}$  : Quantité extraite en kg ;
- dollar en l'an 2000 comme référence retenue pour la valeur monétaire.

Les auteurs détaillent les différentes étapes du calcul permettant d'aboutir à l'évaluation de l'augmentation du coût marginal d'extraction. Dans un premier temps, la fonction reliant la baisse de concentration à une extraction est extrapolée à partir de données sur les gisements mondiaux. Dans un second temps, la fonction reliant l'augmentation du coût à une baisse de concentration est extrapolée à partir de données économiques sur les gisements mondiaux. Les auteurs combinent ces deux fonctions pour obtenir la fonction reliant l'augmentation des coûts à une extraction. Cette fonction est ensuite adaptée pour correspondre aux données d'inventaire de cycle de vie : elle est déclinée pour chaque ressource considérée, puis exprimée en fonction de la masse extraite. Les étapes de calcul sont détaillées en annexe (p 157.).

#### ► Taux d'extraction ( $P_{r,t}$ )

Le terme  $P_{r,t}$  correspond ainsi à la quantité de ressource r extraite à l'année t.

L'augmentation marginale du coût (*MCI*) considérée seule n'est pas suffisante pour quantifier l'ampleur du dommage, car l'augmentation du coût d'extraction pour une ressource donnée aura un impact plus ou moins important sur les sociétés en fonction de la quantité totale extraite. A titre d'exemple, les auteurs citent le fait que l'augmentation d'1 \$ par kilogramme de pétrole a beaucoup plus d'impact sur la société que la même augmentation pour le mercure, car l'on extrait beaucoup plus de pétrole que de mercure.

#### ► Actualisation du des coûts futurs

Les coûts d'extraction considérés lors de l'élaboration des facteurs sont des coûts futurs. Au premier abord on peut considérer que les surcoûts générés par une extraction s'appliqueront indéfiniment, et que le dommage généré est donc infini.

Cependant, les principes économiques stipulent que la valeur d'une dépense ou d'un gain d'un euro aujourd'hui est différente de celle d'une dépense ou d'un gain d'un euro à l'avenir. Pour intégrer cet effet, et évaluer la valeur actuelle de coûts ou de bénéfices qui prendront effet dans le futur, les économistes utilisent l'actualisation. Les auteurs appliquent donc un facteur traduisant cet effet en incluant un taux d'actualisation, comme exprimé dans l'équation suivante :

$$\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+d)^t}$$

- Avec *d* : taux d'actualisation (%)
- *T* : nombre d'années considérées

En théorie, on devrait considérer un temps infini, cependant, comme indiqué par les auteurs, la contribution à la valeur actuelle du coût devient négligeable au bout de 200 ans en considérant un taux d'actualisation de 3%.

#### 3.4.2.1.2 *Midpoint*

*NB : Il est important de noter que l'indicateur midpoint proposé par ReCiPe pour les minéraux n'est pas un indicateur midpoint en tant que tel, dans la mesure où il ne traduit pas directement une étape de la chaîne de cause à effet entre l'extraction et le dommage.*

Pour exprimer des indicateurs midpoint, les termes non spécifiques à chaque ressource sont retirés de l'expression de définition des indicateurs endpoint, c'est-à-dire de l'équation B. Ce choix est fait de manière à répondre à la recommandation de la SETAC d'avoir un coefficient de transformation de midpoint en endpoint indépendant de la ressource considérée [Jolliet2004]. On obtient ainsi :

$$CF_{r,kg,mid} = -\frac{M_r}{c_r^2} \times V_r^2 \times P_{r,kg} \quad (\text{équation C})$$

Ces facteurs midpoint, exprimés en 1/(\$.an), sont ensuite rapportés à une substance de référence (le fer), pour donner les facteurs proposés par la méthode, en kg Fe equivalents.

### 3.4.2.2 Présentation détaillée du Fossil Depletion Potential

#### ► Principes et fondements

Le principe de base de la catégorie d'impact « Fossil Depletion Potential » est que l'extraction de ressources fossiles incite à l'exploitation de ressources fossiles non-conventionnelles. En conséquence, il faudra déployer plus d'efforts pour exploiter ces ressources fossiles non-conventionnelles, plus difficilement accessibles. Pour quantifier ces efforts supplémentaires, les auteurs font le choix d'évaluer les coûts supplémentaires d'extraction. La figure suivante représente cette chaîne de cause à effet, ainsi que les indicateurs proposés par les auteurs. La méthode ReCiPe visant en premier lieu à proposer des indicateurs endpoint, les indicateurs midpoint ont été développés a posteriori. On peut ainsi noter que l'indicateur midpoint n'est pas en lien direct avec la chaîne de cause à effet.

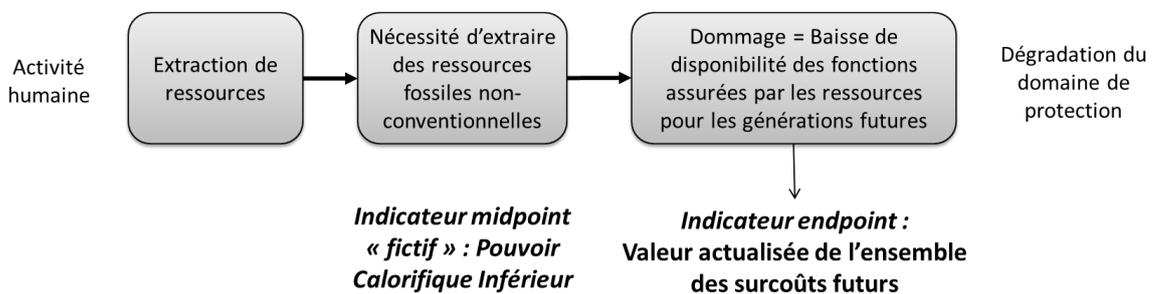


Figure 19 : Chaîne de cause à effet considérée pour la catégorie d'impact « Fossil depletion Potential » de la méthode ReCiPe

#### 3.4.2.2.1 Endpoint

##### ► Principe général

L'indicateur endpoint pour les ressources fossiles utilise la même approche générale que celle utilisée pour les minéraux : l'indicateur traduit la valeur actuelle de l'ensemble des surcoûts futurs générés par une extraction.

La différence vient du fait que pour les ressources « combustibles fossiles », le surcoût ne provient pas d'une baisse de concentration (comme c'est le cas pour les minéraux) du fait que combustibles non-conventionnels doivent être exploités pour répondre à la demande croissante.

##### ► Calcul des facteurs de caractérisation

Le calcul suit la même formule que pour les facteurs de caractérisation des minéraux (indicateur endpoint)

$$\text{Valeur actuelle des surcoûts} = \sum_{t=1}^T MCI_{r,kg} \times P_{r,t} \times \frac{1}{(1+d)^t} \quad (\text{rappel de l'équation A})$$

La différence essentielle provient du calcul de l'augmentation marginale du coût d'extraction (MCI), qui est réalisée à partir de données de l'IEA (agence internationale de

l'énergie), et qui différencie les calculs selon les différentes perspectives culturelles (notion utilisée par ailleurs dans la méthode ReCiPe).

### ► Perspectives culturelles

ReCiPe, à l'instar d'EcoIndicator99, utilise le concept de perspectives culturelles : Les trois perspectives définies (« Egalitaire » ED, « Hiérarchiste » (H) et « Individualiste » (I)) 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 prennent en compte différentes capacités de la société à s'adapter aux conséquences des impacts.

En ce qui concerne les indicateurs ressources, les trois perspectives sont identiques pour tous les indicateurs ReCiPe, la seule exception étant l'indicateur endpoint pour les ressources fossiles « Fossil Depletion – Endpoint ». La différenciation entre perspectives culturelles se situe au niveau calcul de l'augmentation marginale du coût d'extraction (MCI).

### ► Source de base et calcul du facteur de caractérisation pour le pétrole

La source de base pour le calcul de l'augmentation marginale du coût d'extraction (MCI) est un graphique de l'IEA présentant la disponibilité du pétrole en fonction de son prix, tel que présenté sur la figure suivante :

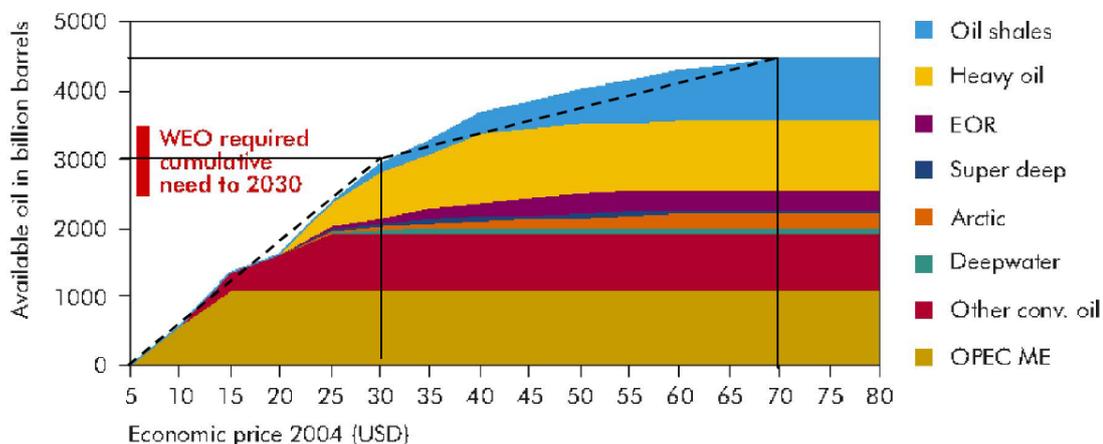


Figure 20 : Disponibilité du pétrole en fonction de son prix [Goedkoop2008], d'après l'IEA

L'augmentation marginale du coût d'extraction (MCI) est directement calculée à partir du coefficient directeur de la courbe présentée dans la figure ci-dessus. Les auteurs de ReCiPe simplifient la courbe en l'assimilant à deux segments de droite (en pointillés sur la figure).

La perspective « Individualiste » considère une augmentation marginale du coût d'extraction faible, qui est calculée à partir du premier segment.

Les perspectives « Hiérarchiste » et « Egalitaire » considèrent une augmentation marginale du coût d'extraction plus forte (égale pour les deux perspectives), qui est calculée à partir du second segment.

► **Calcul des facteurs de caractérisation pour les autres combustibles fossiles**

Pour chaque perspective, le facteur de caractérisation du pétrole (en *endpoint*) est utilisé pour calculer les facteurs de caractérisation (*endpoint*) des autres ressources fossiles, le en multipliant le facteur *midpoint* de chaque ressources fossiles (i) :

$$CF_{endpoint,i} = CF_{midpoint,i} \times CF_{endpoint,pétrole}$$

- $CF_{endpoint,i}$  Facteur de caractérisation *endpoint* de la ressource fossile i, pour une perspective (E/H/I) donnée
- $CF_{endpoint,pétrole}$  : Facteur de caractérisation *endpoint* du pétrole, pour une perspective (E/H/I) donnée
- $CF_{midpoint,i}$  : Facteur de caractérisation *midpoint* de la ressource non-renouvelable (dont la définition est indiquée dans le paragraphe suivant)

Ce choix est fait de manière à répondre à la recommandation de la SETAC [Jolliet2004] d'avoir un coefficient de transformation de *midpoint* en *endpoint* indépendant de la ressource considérée. Ce coefficient est ici égal à la valeur de  $CF_{endpoint,pétrole}$ , facteur de caractérisation *endpoint* du pétrole, pour une perspective (E/H/I) donnée.

#### 3.4.2.2.2 *Midpoint*

*NB : Il est important de noter que l'indicateur midpoint proposé par ReCiPe pour les ressources fossiles n'est pas un indicateur midpoint en tant que tel, dans la mesure où il ne traduit pas directement une étape de la chaîne de cause à effet entre l'extraction et le dommage.*

Les facteurs de caractérisation *midpoint* des ressources fossiles sont définis comme le rapport entre l'énergie primaire (Cumulative Energy Demand – CED cf. §3.4.7, p 59)<sup>18</sup> d'une ressource i et de l'énergie primaire du pétrole, comme exprimé dans l'équation suivante :

$$CF_{midpoint,i} = \frac{CED_i}{CED_{ref}}$$

avec :

- $CF_{midpoint,i}$  en kg de pétrole eq/unité de ressource, le facteur de caractérisation *midpoint* de la ressource non-renouvelable
- $CED_i$  Cumulative Energy Demand d'1kg de la ressource i. La valeur utilisée correspond au PCS de la ressource i.
- $CED_{ref}$  Cumulative Energy Demand d'1kg de la ressource de référence, c'est-à-dire du pétrole. La valeur utilisée correspond au PCS du pétrole.

---

<sup>18</sup> Les valeurs de CED utilisées par les auteurs proviennent de la base de données ecoinvent (dans la version disponible en 2007). La base ecoinvent considère le PCS pour les valeurs de CED.

### 3.4.3 Resource consumption – EDIP97

Resource consumption EDIP 97	
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>
Unité	person reserve
Ressources couvertes	Ressources minérales et fossiles (32 ressources minérales considérées)
Principes et fondements	Les facteurs de caractérisation décrivent la fraction de réserve de ressource disponible par personne (au niveau mondial). La méthode considère les réserves économiques évaluées en 2004.
Calcul des facteurs de caractérisation	Les facteurs de caractérisation tiennent compte des réserves économiques uniquement (le taux d'extraction n'est pas inclus). [ILCD2011]
Sources de données principales	Pour les ressources minérales : [USGS2005] Pour les ressources fossiles : [BP2005]
Facteurs de normalisation	Les facteurs de caractérisation intègrent la normalisation.
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.
Chronologie	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) »
Evaluation du JRC	1. Complétude du périmètre : <b>C</b> 2. Pertinence environnementale : <b>C</b> 3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>C</b> 4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b> 5. Applicabilité : <b>A</b> 6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>B</b>
Normes et référentiels préconisant la méthode	Le référentiel de l'affichage environnemental BPX30-323 (Version du 09/06/2011) préconise l'utilisation de l'indicateur « resource consumption » d'EDIP97 (mise à jour 2004). Le référentiel précise que « si les méthodes sont actualisées, la dernière version de la méthode sera retenue ». En particulier, du fait que le BPX suit les recommandations du JRC, et que ce dernier ne recommande plus EDIP pour l'indicateur ressource, on peut s'attendre à une mise à jour de méthodes recommandées par le BPX.
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 en cours	<i>Pas de travaux identifiés</i>

### 3.4.4 Damages Resources – El99

El99	
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 lien 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>
Unité(s)	MJ
Ressources couvertes	Ressources minérales et fossiles (12 ressources minérales considérées).
Principes et fondements	La méthode repose sur le principe que la consommation de ressources actuelle 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> $\Delta E_i = E_{future_i} - E_{actuelle_i}$ <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_{actuelle_i}</math> : Energie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement</li> <li>- <math>E_{future_i}</math> : Energie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir. Les auteurs définissent ce point dans le futur comme le moment où la quantité extraite cumulée de la ressource i aura atteint 5 fois la quantité extraite cumulée avant 1990.</li> </ul> <p>Pour les ressources fossiles, les facteurs de caractérisation sont définis pour 3 perspectives : « Egalitaire », « Hiérarchiste » et « Individualiste ». Pour chaque perspective, on définit une ressource de remplacement(j) à chaque ressource actuelle (i), puis on fait la différence entre les énergies d'extraction pour calculer le surplus, comme exprimé dans l'équation suivante :</p> $\Delta E_i = E_j - E_i$ <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_i</math> : Energie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement</li> <li>- <math>E_j</math> : Energie nécessaire pour extraire la ressource de remplacement j.</li> </ul> <p>On peut noter que pour la perspective « Individualiste », les facteurs sont tous nuls, car on ne considère pas de changement de ressources fossiles dans cette perspective.</p>
Sources de données principales	[Chapman1983] et [DeVries1988] pour les surplus d'énergie des ressources minérales [Müller-Wenk1998] pour les surplus d'énergie des ressources fossiles
Facteurs de normalisation	Normalisation opérée dans le calcul. Valeurs proposées
Représentativité géographique	Représentativité mondiale. Pour les ressources minérales : Les surplus d'énergie sont définis pour chaque ressource à l'échelle mondiale. Pour les ressources fossiles : Les facteurs découlent de la sélection de ressources énergétiques alternatives faite par les auteurs, réalisée dans une perspective mondiale.

Auteurs	2 auteurs principaux de Pré Consultants : Mark Goedkoop, Renilde Spiensma
Chronologie	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 La version à date est la v2.09 (Juillet 2012)
Limites	Les publications utilisées pour l'identification des surplus d'énergie pour les ressources minérales ([Chapman1983] et [DeVries1988]) ne citent pas clairement leurs sources. Par ailleurs, les valeurs varient d'une source à l'autre. Les facteurs de caractérisation sont calculés à partir de scénarios futurs et reposent donc sur de nombreuses hypothèses. Le nombre de ressources minérales prises en compte dans l'indicateur est très faible (12).
Evaluation du JRC	1. Complétude du périmètre : <b>B</b> 2. Pertinence environnementale : <b>D</b> 3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>C</b> 4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b> 5. Applicabilité : <b>B</b> 6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>C</b>
Normes et référentiels préconisant la méthode	<i>Pas de référentiels ou normes identifiés</i>
Incertitudes	Les auteurs indiquent des incertitudes « considérables » pour les minéraux et des incertitudes limitées pour les combustibles fossiles (si ce n'est pour la définition des énergies de substitution).
Travaux en cours	Le projet LC-Impact vise à développer une nouvelle méthode de caractérisation. L'indicateur ressources sera développé par M. Goedkoop, auteur de la méthode El99.

### 3.4.4.1 **Présentation détaillée de l'indicateur Damages Resources**

#### ► **Principes et fondements**

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 de meilleure qualité.

Pour les ressources minérales, la baisse de qualité correspond à une baisse de concentration des minerais.

Pour les ressources fossiles, la baisse de qualité correspond à la nécessité d'exploiter des ressources moins accessibles, c'est-à-dire les ressources fossiles non-conventionnelles (ex : sables bitumineux, schiste bitumineux...).

Les chaînes de cause à effet considérées sont présentées sur les figures suivantes.

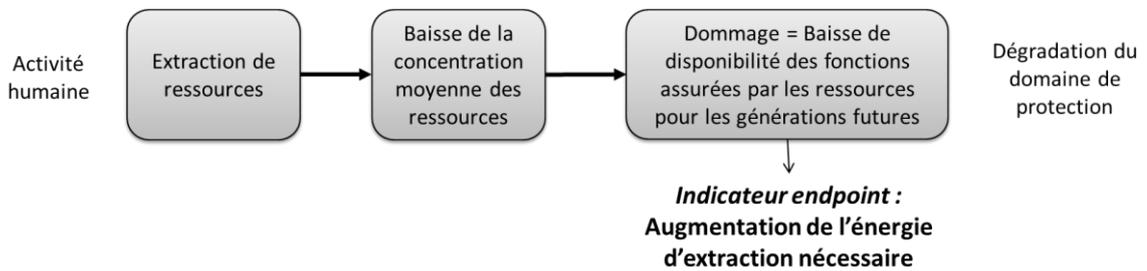


Figure 21 : Chaîne de cause à effet considérée pour les ressources minérales pour l'indicateur Damages Resources

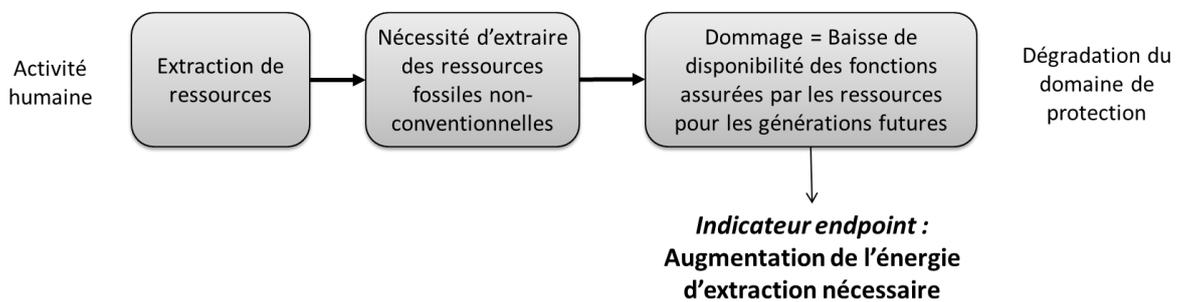


Figure 22 : Chaîne de cause à effet considérée pour les ressources fossiles pour l'indicateur Damages Resources

Les limites exprimées par les auteurs sont les suivantes :

- Le modèle considère une baisse graduelle de la qualité des ressources, ce qui est en phase avec les modèle géostatistiques. Cependant, on peut s'attendre à des baisses soudaines pour le gaz ou le pétrole.
- Toutes les ressources couvertes sont considérées comme d'importance égale.
- La possibilité de substituer un minerai par un autre n'est pas intégrée dans le modèle.
- L'usage non dissipatif des minéraux permettant une récupération et un recyclage futur n'est pas pris en compte.

#### ► Calcul des facteurs de caractérisation dans le cas des ressources minérales

Les facteurs se basent sur les travaux de [Chapman1983], [DeVries1988] et [Müller-Wenk1998]. [Chapman1983] et [DeVries1988] proposent, pour respectivement 8 et 12 minéraux, la courbe reliant les quantités disponibles et le taux de concentration (cf. Figure 23 p53). Les pentes de ces courbes, nommé « M-values » sont utilisées comme paramètres pour quantifier cette relation : Une « M-value » élevée signifie que la concentration diminue peu lorsque la quantité extraite augmente fortement.

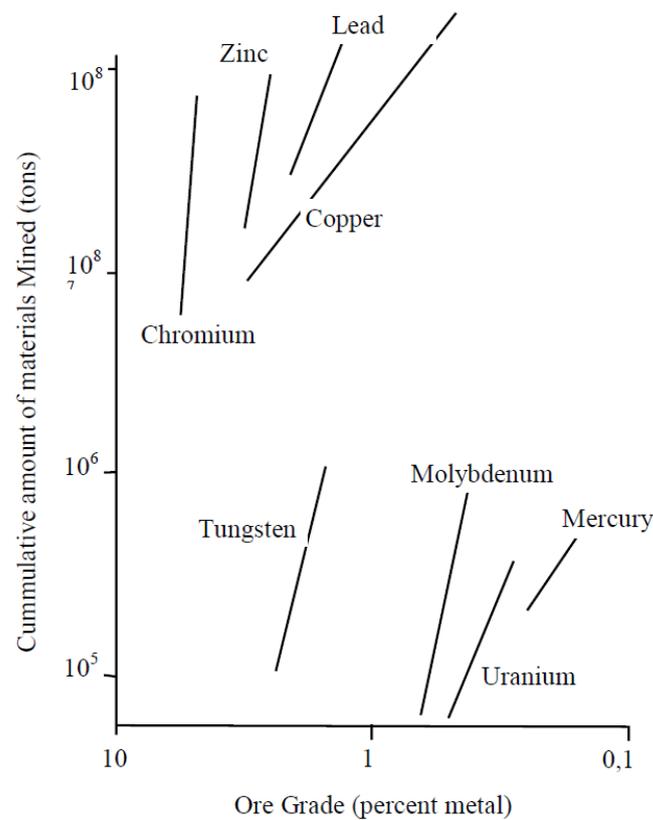


Figure 23 : Disponibilité des ressources minérales en fonction de la teneur du minerai [Goodkoop2000], repris de [Chapman1983]

Sur cette base, [Müller-Wenk1998] calcule l'énergie nécessaire à l'extraction dans le futur. Ce point dans le futur est choisi arbitrairement comme le moment où la quantité extraite cumulée d'une ressource donnée aura atteint 5 fois la quantité extraite cumulée avant 1990.

$$\Delta E_i = E_{future_i} - E_{actuelle_i}$$

Avec :

- $\Delta E_i$  : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i
- $E_{actuelle_i}$  : Energie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement
- $E_{future_i}$  : Energie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir.

► **Calcul des facteurs de caractérisation dans le cas des ressources fossiles**

A chaque ressource fossile (i) est associée une ressource non-conventionnelle de remplacement (j). Les énergies d'extractions proviennent de [Müller-Wenk1998].

Les facteurs correspondent au surplus d'énergie, c'est-à-dire à la différence entre les énergies d'extraction de la ressource évaluée et sa ressource de remplacement, comme exprimé dans l'équation suivante :

$$\Delta E_i = E_j - E_i$$

Avec :

- $\Delta E_i$  : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i
- $E_i$  : Energie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement
- $E_j$  : Energie nécessaire pour extraire la ressource de remplacement j.

### ► Perspectives culturelles pour les ressources fossiles

Pour les ressources fossiles, EcoIndicator99 propose des facteurs de caractérisation différents selon 3 perspectives culturelles : « Egalitaire », « Hiérarchiste » et « Individualiste ». Ces perspectives correspondent à différentes visions des impacts de la société sur l'environnement et prennent en compte différentes capacités de la société à s'adapter aux conséquences des impacts.

Les perspectives culturelles servent à traduire les différents scénarios possibles pour le remplacement des ressources fossiles par des ressources non conventionnelles.

A titre illustratif, le tableau ci-dessous présente les ressources fossiles de substitution aux ressources fossiles actuelles considérées dans les différentes perspectives culturelles.

**Tableau 4 : Ressources fossiles de substitution considérées pour les différentes perspectives culturelles d'EI 99**

Ressources actuelles	Perspective « Hiérarchiste »	Perspective « Egalitaire »	Perspective « Individualiste »
Gaz naturel conventionnel	Schistes bitumineux	Mix charbon-schistes	Gaz naturel conventionnel
Pétrole conventionnel	Pétrole de schistes bitumineux	Mix charbon-schistes	Pétrole conventionnel
Houille (mine à ciel ouvert)	Lignite	Mix charbon-schistes	Houille (mine à ciel ouvert)
Pétrole (extraction secondaire)	Lignite	Mix charbon-schistes	Pétrole (extraction secondaire)
Houille (exploitation souterraine)	Lignite	Mix charbon-schistes	Houille (exploitation souterraine)
Lignite (mine à ciel ouvert)	Lignite	Mix charbon-schistes	Lignite (mine à ciel ouvert)
Pétrole (extraction tertiaire)	Lignite	Mix charbon-schistes	Pétrole (extraction tertiaire)
Pétrole de schistes bitumineux	Schistes bitumineux	Schistes bitumineux	Schistes bitumineux
Pétrole de sables bitumineux	Sables bitumineux	Sables bitumineux	Sables bitumineux

On peut noter que pour la perspective « Individualiste », l'exploitation des ressources fossiles n'est pas considérée comme un problème et qu'un scénario « business as usual » est considéré. En conséquence, on ne considère pas de changement de ressources fossiles et les facteurs sont donc tous nuls.

### 3.4.5 Mineral Extraction, Non-renewable energy et Resources – Impact 2002+

Impact2002+			
Nom	Mineral extraction	Non-renewable energy consumption	Resources
Méthode	Impact2002+		
Type d'indicateur	Midpoint « fictif »	Midpoint « fictif »	Endpoint – catégorie 4
Publications et lien de référence	<p>[Jolliet2003] IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology Int J LCA 8 (6) 324 – 330 (2003)</p> <p>[Humber2011] IMPACT 2002+: User Guide – Draft for version 2.1 – IMPACT Modeling Team, 2003-2011</p> <p><a href="http://www.impactmodeling.org/">http://www.impactmodeling.org/</a></p>		
Unité(s)	kg fer équivalent	kg pétrole équivalent	MJ
Ressources couvertes	Ressources minérales (13 ressources considérées <sup>19</sup> )	Ressources énergétiques non renouvelables (Ressources fossiles + Uranium).	Ressources minérales et énergétiques non renouvelables (Ressources fossiles + Uranium)
Principes et fondements	<p>Cette méthode combine les principes de deux méthodes existantes (El99 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.</p>		
Calcul des facteurs de caractérisation	<p>Les facteurs de caractérisation de la méthode El99 sont utilisés. Ils sont rapportés à une substance de référence (le fer).</p> $CF_i^{2002+} = \frac{CF_i^{El99}}{CF_{fer}^{El99}}$ <p>avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>CF_i^{2002+}</math> : facteur de caractérisation de la ressource i selon Impact2002+</li> <li>- <math>CF_i^{El99}</math> : facteur de caractérisation de la ressource i selon El99</li> <li>- <math>CF_{fer}^{El99}</math> : facteur de caractérisation du fer selon El99</li> </ul>	<p>Les facteurs de caractérisation correspondent au pouvoir calorifique supérieur (PCS) des ressources extraites (ou équivalent énergétique pour l'uranium) ; rapportés à une substance de référence (le pétrole).</p> $CF_i = \frac{PCS_i}{PCS_{pétrole}}$ <p>avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>CF_i</math> : facteur de caractérisation de la ressource i</li> <li>- <math>PCS_i</math> : pouvoir calorifique supérieur de la ressource i</li> <li>- <math>PCS_{pétrole}</math> : pouvoir calorifique supérieur du pétrole</li> </ul>	<p>Le calcul de l'indicateur <i>endpoint</i> consiste à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Exprimer les indicateurs « Mineral extraction » et « Non-renewable energy consumption » en énergie (c.-à-d. sans considérer la substance de référence)</li> <li>- Sommer les deux indicateurs</li> </ul> <p>Ainsi, les facteurs de caractérisation correspondent au surplus d'énergie (selon El99) pour les minéraux et au PCS pour les ressources énergétiques.</p>
Sources de données principales	EcoIndicator99 [Goedkoop2000]	Source pour les PCS : ecoinvent	-

<sup>19</sup> Les auteurs ajoutent la bauxite aux facteurs El99.

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Facteurs de normalisation	Valeurs de normalisation proposées		
Représentativité géographique	Pour les ressources minérales : représentativité mondiale (cf. El99). Pour les ressources fossiles : non-applicable (Le PCS est une grandeur inhérente aux ressources).		
Auteurs	7 auteurs principaux de l'EPFL : Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, Ralph Rosenbaum		
Chronologie	Initialement développée par l'EPFL en 2002, la méthode est à ce jour maintenue et développée par l'«IMPACT Modeling Team » La version en date est la v2.1 CF 3a (2011)		
Evaluation du JRC	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Complétude du périmètre : <b>B</b></li> <li>2. Pertinence environnementale : <b>D</b></li> <li>3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>D</b></li> <li>4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b></li> <li>5. Applicabilité : <b>B</b></li> <li>6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>C</b></li> </ol>		
Normes et référentiels préconisant la méthode	<i>Pas de référentiels ou normes identifiés</i>		
Incertitudes	Les auteurs indiquent une incertitude « medium » [Humber2011] p20	Les auteurs indiquent une incertitude « basse » [Humber2011] p20	Les auteurs indiquent une incertitude « basse » [Humber2011] p20
Limites	La méthode se base sur un indicateur endpoint (El99) pour en faire un indicateur midpoint. « fictif ». Les limites sont les mêmes que celles associées à El99.	A l'instar de la CED sur laquelle il se base, l'indicateur de consommation d'énergies fossiles non-renouvelables n'inclut pas la notion de réserve des ressources.	L'indicateur endpoint « Ressources » d'Impact2002+ combine le surplus d'énergie pour l'extraction future des ressources minérales ou contenu énergétique des ressources fossiles. Cependant, ces deux paramètres, bien qu'exprimés en énergie, correspondent à des concepts différents.
Travaux en cours	La « IMPACT modeling team », en charge de la maintenance et du développement d'Impact2002+, développe la nouvelle méthode de caractérisation « Impact World+ » dont la particularité est de proposer des facteurs de caractérisation régionalisés, c'est-à-dire dépendant de l'endroit où les émissions ou les extractions auront lieu.		

### 3.4.6 Abiotic stock resources – EPS2000

EPS2000													
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 lien 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>												
Unité(s)	ELU (Enviornmental Load Units)												
Ressources couvertes	Ressources minérales et fossiles (78 ressources minérales considérées)												
Principes et fondements	L'indicateur se base sur le concept de « propension 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. Ces ressources ou procédés sont présentés dans le tableau suivant pour quelques ressources importantes :</p> <table border="1" data-bbox="496 958 1366 1227"> <thead> <tr> <th>Ressource actuelle</th> <th>Ressources ou procédés alternatifs considérés</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pétrole fossile</td> <td>Huile de colza</td> </tr> <tr> <td>Charbon fossile</td> <td>Charbon de bois</td> </tr> <tr> <td>Gaz naturel</td> <td>Biogaz (valeur moyenne de plusieurs procédés)</td> </tr> <tr> <td>Aluminium</td> <td rowspan="3">Ressources provenant de « minerais fictifs » dont la teneur est la teneur moyenne dans la croûte terrestre, puis transformation de ce minerai en métal.</td> </tr> <tr> <td>Métaux issus de minerais sulfidiques (Cuivre, Zinc...)</td> </tr> <tr> <td>Fer</td> </tr> </tbody> </table> <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>- La 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>	Ressource actuelle	Ressources ou procédés alternatifs considérés	Pétrole fossile	Huile de colza	Charbon fossile	Charbon de bois	Gaz naturel	Biogaz (valeur moyenne de plusieurs procédés)	Aluminium	Ressources provenant de « minerais fictifs » dont la teneur est la teneur moyenne dans la croûte terrestre, puis transformation de ce minerai en métal.	Métaux issus de minerais sulfidiques (Cuivre, Zinc...)	Fer
Ressource actuelle	Ressources ou procédés alternatifs considérés												
Pétrole fossile	Huile de colza												
Charbon fossile	Charbon de bois												
Gaz naturel	Biogaz (valeur moyenne de plusieurs procédés)												
Aluminium	Ressources provenant de « minerais fictifs » dont la teneur est la teneur moyenne dans la croûte terrestre, puis transformation de ce minerai en métal.												
Métaux issus de minerais sulfidiques (Cuivre, Zinc...)													
Fer													
Sources de données principales	Sources diverses en fonction des procédés alternatifs												
Facteurs de normalisation	Normalisation déjà effectuée												
Représentativité géographique	Représentativité mondiale Pour les ressources fossiles : la sélection des ressources alternatives a été réalisée dans une perspective mondiale. Pour les ressources minérales : 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												
Chronologie	Méthode créée entre 1990 et 1999. Mise à jour jusqu'en 2000. La version en date est la 2000d.												

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Evaluation du JRC	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Complétude du périmètre : <b>A</b></li> <li>2. Pertinence environnementale : <b>B</b></li> <li>3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>C</b></li> <li>4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b></li> <li>5. Applicabilité : <b>B</b></li> <li>6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>C</b></li> </ol>
Normes et référentiels préconisant la méthode	<i>Pas de référentiels ou normes identifiés</i>
Incertitudes	<p>La méthode quantifie les incertitudes pour chaque facteur de caractérisation.</p> <p>La méthode se base sur des scénarios à très long-termes qui sont emprunts d'incertitudes très fortes.</p>
Limites	<p>La méthode considère une ressource alternative unique pour chaque ressource évaluée.</p> <p>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.</p>
Travaux en cours	<i>Pas de travaux identifiés</i>

### 3.4.7 Cumulative Energy Demand

Cumulative Energy Demand	
Nom	Cumulative Energy Demand
Méthode	-
Type d'indicateur	Indicateur de flux – catégorie 1 = indicateur reposant sur une propriété inhérente de la ressource
Publications et lien de référence	[Hischer2010] Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, 59publicati report No. 3, St. Gallen, July 2010 <a href="http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/o3_LCIA-Implementation-v2.2.pdf">http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/o3_LCIA-Implementation-v2.2.pdf</a> [VDI1997] Cumulative Energy Demand – Terms, Definitions, Methods of Calculation. In: VDI-Richtlinien 4600. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf [VDI1995]VDI-Gesellschaft Energietechnik tEd.): Cumulated energy demand. Terms, definitions, methods of calculation (in German). VDI Draft Guideline 4600, May 1995
Unité(s)	MJ
Ressources couvertes	Ressources énergétiques (1 ressource minérale considérée : Uranium).
Principes et fondements	Cet indicateur évalue le prélèvement d'énergie primaire dans l'environnement. Il n'existe pas de méthode standardisée à ce jour et l'énergie primaire peut être déterminée selon différentes approches.
Calcul des facteurs de caractérisation	Les facteurs de caractérisation peuvent correspondre au PCI ou au PCS des ressources considérées. Par ailleurs, le périmètre des ressources considérées n'est pas figé et peut intégrer les énergies renouvelables et/ou non renouvelables. De plus, les énergies nucléaire et hydro-électriques peuvent également être intégrées ou non. Par exemple, pour le calcul de la CED, ecoinvent utilise les PCS des ressources et propose une ventilation de l'indicateur en 8 catégories : fossile, nucléaire et forêt primaire pour les ressources non renouvelables ; et biomasse, vent, solaire, géothermique et eau pour les ressources renouvelables.
Sources de données principales	<i>Non identifiées</i>
Facteurs de normalisation	Non
Représentativité géographique	Non-applicable : les facteurs correspondent à une grandeur intrinsèque aux ressources pour laquelle il n'y a pas de variabilité géographique.
Auteurs	Les guidelines de l'association des ingénieurs allemands (VDI) sont souvent citées comme référence pour la définition de la CED ([VDI1995], [VDI1997]). Pour l'implementation ecoinvent : 2 auteurs pour la partie CED (13 Pour l'ensemble du rapport ecoinvent) : Niels Jungbluth, Rolf Frischknecht
Chronologie	L'indicateur CED a été formalisé des 1995 par l'association des ingénieurs allemands. L'indicateur a été depuis intégré dans les outils ACV, notamment dans la base de données ecoinvent. La partie expliquant l'implémentation de la CED date de 2007.
Evaluation du JRC	Méthode non évaluée par le JRC

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Normes et référentiels préconisant la méthode	<p>Le système de déclaration environnementale de type 3 « EPD » (Version 14/05/2012) préconise de réaliser le bilan massique et énergétique des ressources utilisées (en masse pour les ressources sans contenu énergétique, en énergie pour les flux élémentaires énergétiques, en énergie et en masse pour les ressources avec contenu énergétique).</p> <p>La norme européenne de déclaration environnementale des bâtiments « NF EN 15804 » (version août 2012) préconise d'utiliser l'énergie primaire (Pouvoir Calorifique Inférieur) des ressources utilisées dans le système, à la fois en tant que matière et énergie.</p>
Incertitudes	<p>Les incertitudes sont plutôt basses dans la mesure où les facteurs reflètent le PCI ou PCS des ressources, qui sont des propriétés inhérentes aux matériaux et évalués par ailleurs.</p>
Limites	<p>Cet indicateur ne tient pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'extraction des ressources. En ce sens, il ne traduit pas réellement le dommage causé aux ressources.</p> <p>Le concept peut présenter une certaine variabilité en fonction des auteurs (utilisation du PCI ou PCS, exclusion d'un certain type de ressources énergétiques du périmètre...)</p>
Travaux en cours	<p><i>Pas de travaux identifiés</i></p>

### 3.4.8 Cumulative Exergy Demand (CexD) et Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)

Exergie	Cumulative Exergy Demand	Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment
Nom	Cumulative Exergy Demand (CexD)	Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment
Méthode	-	-
Type d'indicateur	Indicateurs de flux - catégorie 1 = indicateurs reposant sur une propriété inhérente de la ressource	
Publications et lien 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 Impact 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>
Unité(s)	MJ-équivalent	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. De plus, la ressource en eau est également couverte par l'indicateur.	64 ressources couvertes comprenant 57 ressources minérales, 4 ressources fossiles et 3 ressources renouvelables De plus, la ressource en eau et l'occupation des sols sont également couverts par l'indicateur.
Principes et fondements	L'exergie est une grandeur quantifiant la disponibilité de l'énergie d'un système. Les principes de thermodynamique permettent d'affirmer que l'exergie d'un produit sortant d'un procédé est forcément plus faible que l'exergie des ressources initiales. Ceci s'applique aux ressources énergétiques comme matérielles. Les auteurs proposent donc d'utiliser la destruction d'exergie (inhérente à toute transformation) comme une mesure de la consommation de ressources. L'indicateur est une comptabilisation, pour un système donné, de l'exergie totale extraite.	La CEENE est une évolution de la CexD qui repose sur le même principe mais propose des nouveaux facteurs de caractérisation pour les minéraux, propose une nouvelle approche pour les métaux, l'énergie nucléaire et la biomasse et prend en plus en compte l'occupation des sols (land use).
Calcul des facteurs de caractérisation	Les facteurs de caractérisation correspondent à l'exergie spécifique de chaque ressource.	
Sources de données principales	[Szargut1988] et [Szargut2005] pour les premières valeurs d'exergie pour certaines ressource [Bösch2007] pour les valeurs complémentaires d'exergie par type de ressources	[Szargut1988] [Szargut2005] [Bösch2007]
Facteurs de normalisation	Non	Non

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
Chronologie	Méthode créée en 2007.	Méthode créée en 2007. CEENE est une mise à jour de la méthode CexD.
Evaluation du JRC	Le JRC évalue la méthode de [DeWulf2007] (CEENE) 1. Complétude du périmètre : <b>A</b> 2. Pertinence environnementale : <b>C</b> 3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>B</b> 4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>A</b> 5. Applicabilité : <b>A</b> 6. Degré d'acceptation et faciliter à communiquer dans un contexte business et politique : <b>C</b>	
Normes et référentiels préconisant la méthode	<i>Pas de référentiels ou normes identifiés</i>	
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.	
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 aux ressources.	
Travaux en cours	<i>Pas de travaux identifiés</i>	

### 3.4.8.1 **Présentation détaillée de la Cumulative Exergy Demand (CexD)**

#### ► **Principes et fondements**

L'indicateur CexD est basé sur la notion d'exergie. 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. A 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.

L'utilisation de l'exergie en ACV repose donc sur le fait qu'en raison de la génération d'entropie, l'énergie disponible dans les produits sortants d'un système (exergie des produits sortants) est inférieure à celle disponible dans les ressources. Cette dégradation de la disponibilité de l'énergie, quantifiable par la destruction d'exergie, intervient dans les procédés physico-chimiques en général, qu'ils interviennent dans les écosystèmes naturels (production de biomasse par exemple) ou dans les « écosystèmes » industriels (production,

consommation,...). Ainsi, comme l'exergie peut être définie à la fois pour des ressources énergétiques et de la matière, la destruction d'exergie permet de quantifier la consommation globale de ressources issues de l'environnement.

L'indicateur CexD traduit l'extraction totale d'exergie des écosystèmes naturels et correspond donc à la somme des exergies de toutes les ressources consommées.

La formule permettant de calculer la CexD d'un produit ou d'un procédé est la suivante :

$$CExD = \sum_i m_i * Ex_{(ch),i} + \sum_j n_j * r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$$

Avec

- CexD = Demande Exergétique Cumulée par unité de produit ou de procédé (MJ-eq)
- $m_i$  = masse de la ressource i (kg)
- $Ex_{(ch),i}$  = exergie par kg de ressource i (MJ-eq/kg)
- $n_j$  = quantité d'énergie de la source d'énergie j (MJ)
- $r_{ex-e(k,p,n,r,t),j}$  = ratio d'exergie à énergie pour la source d'énergie j (Mj-eq/MJ)
- ch = chimique
- k = cinétique
- p = potentielle
- n = nucléaire
- r = radioactive
- t = exergie thermique

En fonction du type de ressource, l'exergie est stockée sous différentes formes : chimique, thermique, cinétique, potentielle, nucléaire et radioactive.

- L'exergie chimique est appliquée à toutes les ressources « matérielles » (ressources minérales, ressources fossiles, eau, biomasse).
- L'exergie thermique est appliquée à la géothermie, quand la chaleur est récupérée sans extraction de matière.
- L'exergie cinétique est appliquée au vent dans le cas des éoliennes.
- L'exergie potentielle est appliquée à l'eau utilisée pour faire fonctionner les usines hydroélectriques.
- L'exergie nucléaire est appliquée aux combustibles nucléaires utilisés dans les réactions de fissions.
- L'exergie radiative est appliquée aux radiations solaires qui influent sur les panneaux photovoltaïques.

► **Définition des facteurs de caractérisation**

Les facteurs de caractérisation de la méthode CexD reposent sur les lois de la thermodynamique et sont définis à partir des types d'exergie présentés précédemment. Les différentes formules utilisées pour la détermination de l'exergie (et donc des facteurs de caractérisation) des ressources sont présentées dans [Bösch2007].

A titre d'exemple, l'exergie chimique est déterminée à partir de la composition de la matière, de l'énergie de formation de la matière (énergie libre de Gibbs) et de l'exergie propre des éléments chimiques contenus dans la matière.

En ce qui concerne les ressources fossiles, il est important de mentionner que l'exergie d'une ressource (qui est de type chimique) est très proche du contenu énergétique de cette ressource. En effet, pour les ressources fossiles, l'exergie peut être exprimée à partir du contenu énergétique de la ressource et d'un ratio d'exergie à énergie (de manière similaire à ce qui est fait pour les autres types d'énergies). Or, il s'avère que ces ratios sont très proches de 1 (par exemple : 1,04 pour le pétrole et 1,03 pour le charbon). Ainsi, il est important de noter qu'en ce qui concerne les ressources fossiles, les facteurs de caractérisation de l'indicateur CexD sont très proches de ceux de l'indicateur CED.

### **3.4.8.2 Présentation détaillée de la Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)**

► **Principes et fondements**

Les concepts de base de cet indicateur sont les mêmes que ceux de l'indicateur CexD. L'indicateur repose sur la quantification de l'exergie extraite de l'environnement par les produits ou services étudiés dans les ACV.

Toutefois, les deux méthodes présentent certaines différences. Ces différences sont listées et présentées ci-dessous :

▷ **Prise en compte de l'occupation des sols dans la méthode CEENE**

Dans la méthode CEENE, une catégorie de ressources a été ajoutée : l'occupation des sols. La logique d'inclusion de cette catégorie est de considérer que l'occupation des sols utilise de l'exergie solaire qui pourrait être utilisée pour produire de la biomasse (dans un écosystème « naturel »). Cette approche permet de prendre en compte de manière plus pertinente les matériaux et vecteurs énergétiques produits avec de l'énergie solaire : solaire thermique, photovoltaïque et biomasse. Par ailleurs, les auteurs de la méthode CEENE précisent que la catégorie « ressources renouvelables » ne prend pas en compte l'énergie solaire et la biomasse afin d'éviter les doubles-comptage (voir point suivant).

### ▷ **Différence de comptabilisation de l'exergie solaire**

Dans le cas d'un système de production d'énergie photovoltaïque, la méthode CexD considère la consommation d'exergie comme étant la quantité d'exergie solaire qui « frappe » le panneau photovoltaïque. A l'inverse, dans le cas de la biomasse, la quantité d'exergie extraite de l'environnement est calculée à partir de l'exergie de la biomasse et non à partir de la quantité d'exergie solaire qui « frappe » la biomasse (qui est largement supérieure au contenu en exergie de la biomasse à cause du rendement du processus de photosynthèse). Il existe donc une différence entre les deux approches utilisées dans la méthode CexD. De plus, cette différence peut amener des doubles-comptages (pour les matériaux issus de la biomasse) si l'on considère à la fois l'exergie solaire qui frappe la biomasse et celle contenue dans la biomasse (combinaison des deux approches).

Afin de pallier à ce problème, la méthode CEENE prend en compte l'exergie solaire utilisée par la biomasse à partir de la surface occupée pour faire croître cette biomasse (approche similaire à celle des panneaux photovoltaïques de la méthode CexD). Cette approche permet donc d'éviter les possibles doubles-comptage rencontrés dans la méthode CexD et évoqués par le JRC.

### ▷ **Différence de comptabilisation de l'exergie des métaux**

Dans la méthode CexD, l'exergie des métaux est calculée à partir de la quantité totale de minerai qui est utilisée. De manière différente, 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 toutefois que cette évolution n'entraîne pas de différences majeures entre les deux méthodes.

### ▶ **Définition des facteurs de caractérisation**

En raison des différences évoquées dans la partie précédente, les facteurs de caractérisation de la méthode CEENE sont légèrement différents de ceux de la méthode CexD. Néanmoins, les deux méthodes utilisent une approche similaire pour le calcul des facteurs de caractérisation puisqu'elles reposent toutes les deux sur les lois de la thermodynamique.

Enfin, il est important de noter qu'en plus des nouveaux facteurs de caractérisation pour l'occupation des sols, la méthode CEENE fournit une mise à jour des facteurs de caractérisation pour la biomasse (cf « Différence de comptabilisation de l'exergie solaire »), les minéraux et les métaux (cf « Différence de comptabilisation de l'exergie des métaux ») et pour l'énergie nucléaire (facteurs basés sur des données thermodynamiques plus précises).

### 3.4.9 Energy resources – Swiss Ecological scarcity

Swiss Ecological scarcity – Energy Resources	
Nom	Energy resources
Méthode	Sous-catégorie de l'indicateur « Swiss Ecological Scarcity »
Type d'indicateur	Distance to target – catégorie 1 = indicateur reposant sur une propriété inhérente de la ressource (l'énergie)
Publications et lien de référence	[Frischknecht2006] Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006 [Frischknecht2009] Eco-Factors 2006. A method for impact assessment in LCA. <a href="http://www.bafu.admin.ch/publikationen/66ublication/01031/index.html?lang=en">http://www.bafu.admin.ch/publikationen/66ublication/01031/index.html?lang=en</a>
Unité(s)	EP (Eco-Points) – en allemand : UBP (Umweltbelastungspunkte)
Ressources couvertes	Ressources énergétiques (1 ressource minérale considérée : Uranium)
Principes et fondements	La méthode « Swiss Ecological Scarcity » se base sur les niveaux actuels (2006) d'émissions et de consommations de substances ainsi que sur les objectifs environnementaux de la Suisse, qu'ils soient nationaux ou qu'ils découlent d'accords internationaux.
Calcul des facteurs de caractérisation	<p>Les facteurs utilisés (éco-facteurs) pour le calcul de l'indicateur combinent la caractérisation, la normalisation et la pondération des flux :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Caractérisation : facteur traduisant la "gravité" du flux (extraction/émission) par rapport aux objectifs politiques</li> <li>- Normalisation : facteur traduisant la contribution du flux par rapport au flux total annuel dans la région considérée (la Suisse)</li> <li>- Pondération : facteur traduisant l'écart entre la consommation actuelle et la consommation visée par les politiques environnementales de la région considérée</li> </ul> $Eco - facteurs = K \times \frac{1}{F_n} \times \left(\frac{F}{F_k}\right)^2 \times c$ <div style="text-align: center;"> <p>caractérisation      normalisation      pondération      constante</p> </div> <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- K = Facteur de caractérisation</li> <li>- Fn = Flux de normalisation – Flux annuel actuel dans en Suisse.</li> <li>- F = Flux actuel: flux annuel actuel dans la région de référence</li> <li>- Fk = Flux critique: flux critique annuel (objectif visé) dans la région de référence</li> <li>- c = Constante (10<sup>12</sup>/an): Sert à obtenir des résultats chiffrés plus lisibles</li> </ul> <p>Concernant l'épuisement des ressources, seuls deux flux sont considérés : la consommation d'énergie renouvelable et la consommation d'énergie non-renouvelable (exprimées en MJ).</p> <p>Pour déterminer les facteurs de caractérisation (K) de ces flux, les auteurs se basent sur l'objectif de la Suisse d'atteindre une consommation contenant 1 MJ d'énergie non-renouvelable pour 3 MJ d'énergie renouvelable, ce qui entraîne des facteurs de caractérisation respectivement 1 et 1/3 pour l'énergie non-renouvelable et l'énergie renouvelable.</p> <p>Les facteurs donnés par la publication sont calculés en considérant que toutes les émissions/utilisations de ressources ont lieu en Suisse. Dans ce contexte, le calcul permet d'aboutir aux éco-facteurs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3,3 EP/MJ d'énergie non-renouvelable</li> <li>- 1,1 EP/MJ d'énergie renouvelable</li> </ul>

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

	Si, au sein d'un système, certaines émissions/utilisations de ressources ont lieu dans une autre région, il est possible de régionaliser les facteurs en calculant le facteur de pondération à partir de flux annuels locaux, tout en gardant la valeur de normalisation Suisse pour maintenir la cohérence avec le reste du système étudié.
Sources de données principales	Conseil Fédéral Suisse
Facteurs de normalisation	Le calcul des indicateurs inclut les étapes de normalisation et de pondération.
Représentativité géographique	Représentativité suisse : Les facteurs de caractérisation découlent d'objectifs politiques suisses.
Auteurs	3 auteurs principaux : R. Frischknecht, R. Steiner et N. Jungbluth
Chronologie	Méthode créée en 1990, mise à jour en 1997 et 2006. La version en date est celle de 2006. Les auteurs ont annoncé une mise à jour pour 2013.
Evaluation du JRC	1. Complétude du périmètre : <b>C</b> 2. Pertinence environnementale : <b>C</b> 3. Robustesse scientifique et niveau de certitude : <b>E</b> 4. Documentation, transparence et reproductibilité : <b>B</b> 5. Applicabilité : <b>A</b> 6. Degré d'acceptation et facilité à communiquer dans un contexte business et politique : <b>D</b>
Normes et référentiels préconisant la méthode	<i>Pas de référentiels ou normes identifiés</i>
Incertitudes	Les deux facteurs de caractérisation proposés pour cet indicateur sont spécifiques à la Suisse. La définition de facteurs propres à d'autres zones géographiques doit se faire au cas par cas et dépend fortement de la manière dont les objectifs politiques environnementaux de la zone sont explicités.
Limites	Les différentes sources énergétiques ne sont pas distinguées. De plus, la sous-catégorie « Energy resources » a vocation à être sommée avec les autres sous-catégories développées dans le cadre de l'indicateur « Swiss Ecological Scarcity », plutôt que de servir à évaluer la consommation de ressources indépendamment des autres sous-catégories.
Travaux en cours	Prochaine mise à jour prévue en 2013 (avec l'année 2011 comme année de référence)

## Chapitre 4 : Enseignements tirés d'études de cas

### 4.1 Indicateurs sélectionnés pour les études de cas

Les indicateurs sélectionnés pour les études de cas sont :

- les indicateurs de la méthode CML (ADP, ADPelements, ADP<sub>fossil fuels</sub>),
- les indicateurs endpoint de la méthode ReCiPe avec la perspective culturelle « Hierarchist » (ReCiPe – Endpoint Hierarchist – Mineral Depletion Potential et ReCiPe – Endpoint Hierarchist – Fossil Depletion Potential),
- l'indicateur Damages recourses d'Eco-Indicateur 99 avec la perspective culturelle « Hierarchist »,
- l'indicateur Cumulative Energy Demand (CED),
- et l'indicateur Cumulative Exergy Demand (CexD).

Ces indicateurs ont été sélectionnés en concertation avec ScoreLCA en fonction de leur disponibilité dans le logiciel Simapro utilisé pour la réalisation des études de cas et de façon à prendre en compte :

- les indicateurs les mieux notés par le JRC (voir paragraphe 3.3.4),
- des indicateurs de différents types (voir paragraphes 3.1.2 et 3.3.2),
- des indicateurs couvrant différents types de ressources (voir paragraphe 3.3.3).

En termes de ressources couvertes, on peut distinguer parmi les indicateurs sélectionnés :

- les indicateurs tenant compte des ressources minérales uniquement :
  - CML – ADPelements,
  - ReCiPe – Endpoint Hierarchist – Mineral Depletion Potential,
- les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement :
  - ReCiPe – Endpoint Hierarchist – Fossil Depletion Potential,
  - CML – ADP<sub>fossil fuels</sub>,
- les indicateurs tenant compte des ressources minérales et fossiles :
  - CML – ADP,
  - Elgg – Damages ressources – Hierarchist,
- l'indicateur CED, qui tient compte de toutes les ressources énergétiques : ressources fossiles, uranium, biomasse, autres énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, ...),

- l'indicateur CexD qui tient compte des ressources suivantes : ressources fossiles, ressources minérales (dont uranium), eau, biomasse, autres énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, ...).

On peut noter que les indicateurs ReCiPe midpoint n'ont pas été inclus. En effet, seuls les indicateurs Endpoint de Recipe sont recommandés par le JRC. De plus, le coefficient de conversion depuis l'indicateur midpoint vers endpoint étant constant pour les minéraux d'une part et pour les combustibles fossiles d'autre part, le positionnement relatif des différents flux contribuant aux indicateurs est donc le même entre l'indicateur midpoint et l'indicateur endpoint.

Par ailleurs, les études de cas ayant été réalisées avec le logiciel Simapro (version 7.3.3), les facteurs de caractérisation employés pour les différents indicateurs correspondent à ceux qui sont implémentés dans le logiciel<sup>20</sup>. Ainsi, des écarts peuvent éventuellement être rencontrés entre les derniers facteurs en date proposés par les auteurs des méthodes et la version de la méthode ayant été implémentée dans Simapro

En ce qui concerne l'indicateur CexD, il faut noter qu'il s'agit du seul indicateur basé sur l'exergie disponible dans Simapro. C'est pourquoi il a été choisi au détriment de l'indicateur CEENE, qui est pourtant décrit par les auteurs comme un indicateur plus abouti que CexD.

Il faut également noter que l'indicateur CML-ADPelements, qui n'est pas présent dans Simapro, a été créé à partir de l'indicateur CML ADP en retirant les facteurs de caractérisation relatifs aux ressources fossiles. De même, l'indicateur CML-ADP fossil fuels qui n'est pas présent dans Simapro, a été créé à partir de l'indicateur CED en conservant uniquement les facteurs de caractérisation relatifs aux ressources fossiles.

Enfin, il faut mentionner que Simapro propose deux indicateurs distincts pour la méthode El99, l'un portant sur les ressources fossiles et l'un portant sur les ressources minérales. Ces deux indicateurs sont exprimés en MJ surplus et ont été sommés pour l'étude de cas.

---

<sup>20</sup> Une unique correction a été réalisée dans Simapro pour l'indicateur CExD. Cette correction a consisté à mettre à zéro le facteur de caractérisation relatif au flux « Water, turbine use, unspecified natural origin ». En effet, dans la publication [Bösch2007] relative à l'indicateur CExD, il est clairement indiqué que l'eau utilisée dans les turbines des centrales hydroélectriques n'est pas prise en compte (en tant que matière) et que seule l'énergie potentielle de cette eau est considérée.

## 4.2 Etude de cas n°1 : Illustration de la variation des facteurs de caractérisation des indicateurs sélectionnés

L'objectif de cette première étude de cas est d'illustrer la variation des facteurs de caractérisation propres à chaque ressource pour les différents indicateurs d'épuisement des ressources sélectionnés. Pour cela, cette étude de cas consiste à analyser la contribution des différentes ressources dans le résultat obtenu lors de la caractérisation d'un inventaire de cycle de vie selon les différents indicateurs.

Dans un premier temps, l'analyse est effectuée en utilisant des inventaires de cycle de vie fictifs composés d'1kg de différentes ressources.

Dans un second temps, l'analyse est effectuée en utilisant un inventaire de cycle de vie de produit réel.

### 4.2.1 Comparaison des facteurs de caractérisation des indicateurs sélectionnés via l'analyse d'inventaires fictifs

#### ► Définition de l'inventaire fictif A

L'idée d'un inventaire fictif composé d'1kg de différentes ressources est issue de [Schneider2011]. Compte tenu du fait que l'inventaire est distribué de façon proportionnelle entre les ressources, l'analyse de la contribution relative des flux aux impacts reflète directement l'importance des facteurs de caractérisation de chacune des ressources.

La sélection des ressources prises en compte dans l'inventaire fictif A a été établie par itération en cherchant à prendre en compte les ressources présentant les facteurs de caractérisation les plus importants en absolu mais aussi les ressources dont la consommation dans le cas du produit réel étudié par la suite est suffisamment importante pour pouvoir contribuer significativement aux impacts.

L'inventaire fictif A comporte les flux élémentaires<sup>21</sup> suivants :

- ressources minérales : 1 kg d'aluminium, 1 kg de cuivre, 1 kg d'or, 1 kg de fer, 1 kg d'argent, 1 kg d'uranium,
- ressources fossiles : 1 kg de gaz naturel, 1 kg de pétrole, 1 kg de houille,
- ressources biomasse : 1 kg de biomasse. (Pour la biomasse, le flux utilisé est un flux exprimé en MJ. Il a été converti en masse avec une hypothèse de 15 MJ/kg).

---

<sup>21</sup> Les flux pris en compte correspondent aux flux de ressources prélevés dans l'environnement (par exemple 1kg de cuivre) et non pas à l'ensemble des flux nécessaires à l'extraction des ressources (ICV de la production de 1kg de cuivre).

► **Facteurs de caractérisation pour les ressources et les indicateurs analysés**

Le tableau ci-dessous présente les facteurs de caractérisation relatifs aux 10 ressources présentes dans l'inventaire fictif A pour les différents indicateurs sélectionnés.

**Tableau 5 : Facteurs de caractérisation issus de SimaPro (version 7.3.3) pour les ressources et les indicateurs sélectionnés**

	CML – ADPelements	ReCiPe – Endpoint H – Mineral	CML – ADPfossil fuels	ReCiPe – Endpoint H – Fossil	CML – ADP	El99 – H	CED	CexD
	kg Sb-éd	\$	MJ	\$	kg Sb-éd	MJ surplus	MJ	MJ
Rappel du principe de l'indicateur	<i>Rapport de la quantité annuelle extraite sur le niveau de réserve ultime au carré.</i>	<i>Surcoût des extractions futures dû aux extractions actuelles</i>	<i>Energie primaire d'origine fossile</i>	<i>Surcoût des extractions futures dû aux extractions actuelles</i>	<i>Rapport de la quantité annuelle extraite sur le niveau de réserve ultime au carré.</i>	<i>Surplus d'énergie nécessaire aux extractions futures</i>	<i>Energie primaire</i>	<i>Perte d'exergie</i>
Aluminium	1,00 <sup>E</sup> -08	6,44 <sup>E</sup> -03	-	-	1,00 <sup>E</sup> -08	2,38 <sup>E</sup> +00	-	5,73 <sup>E</sup> +00
Cuivre	1,94 <sup>E</sup> -03	3,05 <sup>E</sup> +00	-	-	1,94 <sup>E</sup> -03	3,67 <sup>E</sup> +01	-	7,32 <sup>E</sup> +01
Or	8,95 <sup>E</sup> +01	5,00 <sup>E</sup> +03	-	-	8,95 <sup>E</sup> +01	X	-	4,50 <sup>E</sup> +05
Argent	1,84 <sup>E</sup> +00	2,05 <sup>E</sup> +01	-	-	1,84 <sup>E</sup> +00	X	-	6,30 <sup>E</sup> +03
Fer	8,43 <sup>E</sup> -08	7,15 <sup>E</sup> -02	-	-	8,43 <sup>E</sup> -08	5,10 <sup>E</sup> -02	-	2,52 <sup>E</sup> +00
Uranium	2,87 <sup>E</sup> -03	8,76 <sup>E</sup> +00	-	-	2,87 <sup>E</sup> -03	X	5,60 <sup>E</sup> +05	5,60 <sup>E</sup> +05
Gaz naturel	-	-	4,79 <sup>E</sup> +01	1,70 <sup>E</sup> -01	2,34 <sup>E</sup> -02	6,47 <sup>E</sup> +00	4,79 <sup>E</sup> +01	4,50 <sup>E</sup> +01
Pétrole	-	-	4,58 <sup>E</sup> +01	1,72 <sup>E</sup> -01	2,01 <sup>E</sup> -02	6,22 <sup>E</sup> +00	4,58 <sup>E</sup> +01	4,65 <sup>E</sup> +01
Houille	-	-	1,91 <sup>E</sup> +01	7,17 <sup>E</sup> -02	1,34 <sup>E</sup> -02	1,65 <sup>E</sup> -01	1,91 <sup>E</sup> +01	1,97 <sup>E</sup> +01
Biomasse	-	-	-	-	-	-	1,50 <sup>E</sup> +01	1,58 <sup>E</sup> +01

Légende :  
 « - » signifie ressource non couverte par l'indicateur  
 « X » signifie ressource normalement couverte par l'indicateur mais pour laquelle aucun facteur de caractérisation n'est disponible

Ce tableau montre que les ressources prises en compte par les différents indicateurs diffèrent :

- en fonction des objectifs visés par les indicateurs : par exemple l'indicateur CML – ADPelements couvre par principe les ressources minérales alors que l'indicateur CML - ADPfossil fuels couvre par principe les ressources fossiles,
- en fonction des données disponibles et des travaux réalisés par les auteurs des méthodes pour mettre à disposition des facteurs de caractérisation : par exemple, l'indicateur Damages Ressources d'El99 ne propose pas de facteur de caractérisation pour l'or, l'argent et l'uranium et ne permet donc pas d'évaluer les impacts associés à l'extraction de ces ressources.

► **Résultats de la caractérisation de l'inventaire fictif A**

La figure suivante présente le résultat de la caractérisation de l'inventaire fictif A décrit ci-dessus, avec les indicateurs retenus.

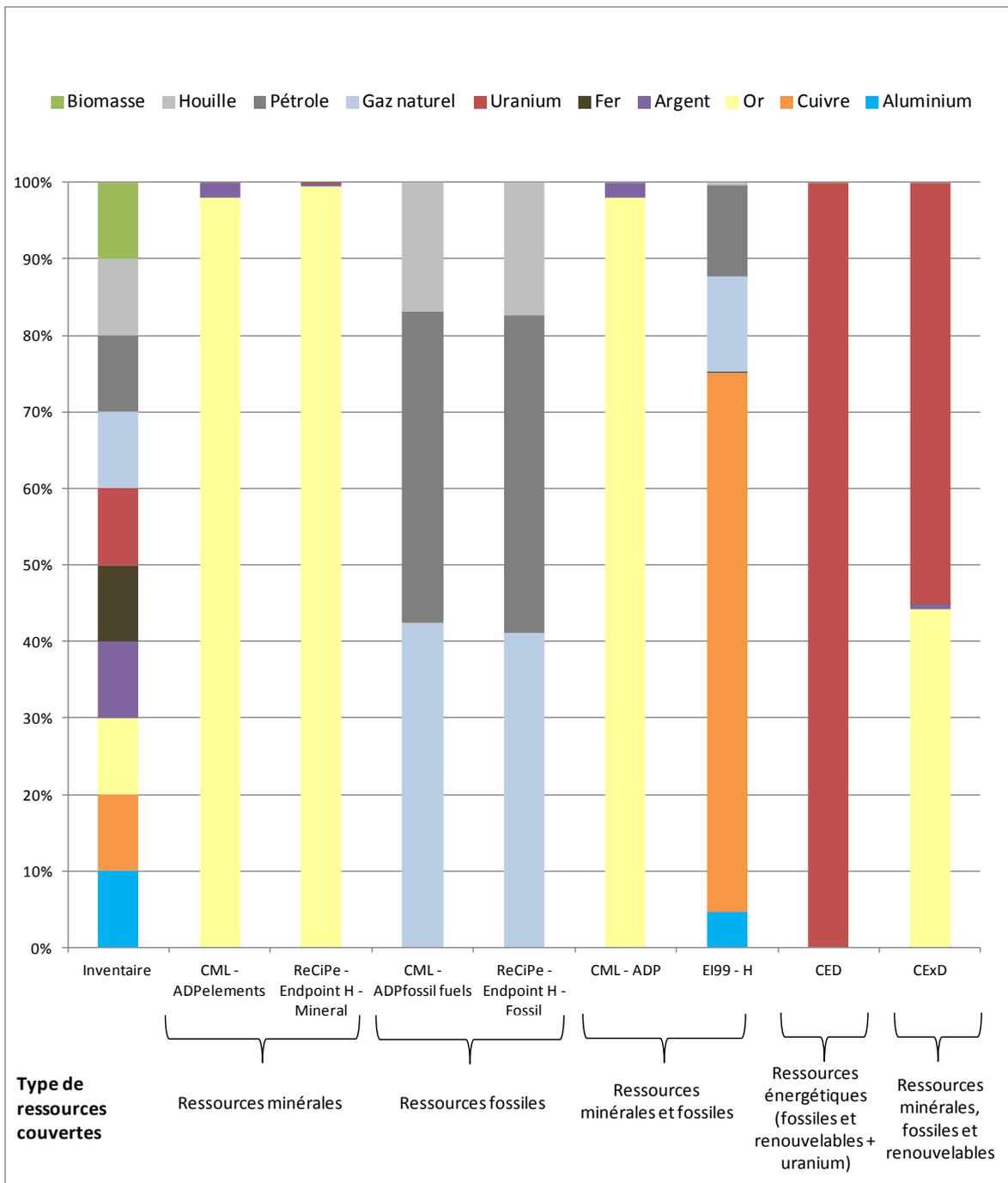


Figure 24 : Contribution des différents flux de l'inventaire A aux indicateurs sélectionnés

► **Analyse de la caractérisation de l'inventaire fictif A**

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales uniquement**

Les profils de contribution aux impacts sont très similaires entre l'indicateur ADPelements de CML et l'indicateur Mineral depletion Potential de ReCiPe. On remarque que l'or est le

principal contributeur. On note ensuite une contribution de l'argent pour quelques pourcents de l'impact. Il est intéressant de constater que pour cet inventaire fictif, les principaux contributeurs sont identiques pour les deux indicateurs, malgré le fait qu'ils sont basés sur des modèles très différents (modèle basé sur le niveau de réserve et le taux d'extraction pour ADPelements, modèle basé sur l'évaluation des surcoûts futurs pour ReCiPe - Mineral Depletion Potential).

#### ■ Pour les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement

On observe que l'indicateur ADPfossil fuels de CML et l'indicateur Fossil Depletion Potential de ReCiPe présentent des contributions quasi-identiques entre le pétrole, le gaz naturel et la houille. Ceci est dû au fait que ces deux indicateurs sont directement liés au contenu énergétique des ressources (PCI ou PCS).

#### ■ Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales et fossiles

La contribution des flux est extrêmement différente entre les indicateurs CML – ADP et Elgg – Damages ressources.

On peut observer que l'indicateur CML-ADP présente un profil similaire à ceux des indicateurs CML-ADPelements et ReCiPe-Mineral Depletion Potential, avec une très forte contribution de l'or puis dans une moindre mesure de l'argent. En d'autres termes, dans le cas précis de cet inventaire fictif A, ce sont les ressources minérales qui contribuent davantage aux impacts que les ressources fossiles.

Pour l'indicateur Elgg – Damages Ressources, on note une contribution forte du cuivre, puis du gaz et du pétrole, puis enfin de l'aluminium. Les impacts sont donc balancés entre les ressources minérales et fossiles.

Pour expliquer les différences observées entre CML – ADP et Elgg – Damages ressources, il faut mentionner qu'en plus des différences méthodologiques qui existent entre ces indicateurs, le fait que l'or et l'argent n'apparaissent pas dans les contributeurs de l'indicateur Elgg vient du fait que ce dernier ne propose pas de facteur de caractérisation pour ces deux métaux.

#### ■ Pour l'indicateur CED

L'uranium contribue à la quasi-totalité de l'impact sur cet indicateur. Ceci est dû au fait que l'uranium a une densité énergétique très élevée comparé aux autres ressources énergétiques. Ainsi, comparé à un kilogramme d'autres ressources énergétiques, il ressort fortement dans cet indicateur qui est basé sur le contenu énergétique.

#### ■ Pour l'indicateur CExD

Pour la Cumulative Exergy Demand, on observe une répartition de l'impact entre l'uranium (55%) et l'or (44%), qui correspondent respectivement à des pertes d'exergie de type nucléaire et de type chimique. Par ailleurs, on peut noter que dans le cas précis de cet inventaire fictif A, l'indicateur CExD couvre quasi les mêmes ressources que l'indicateur

CML-ADP et l'indicateur Elgg<sup>22</sup>. Néanmoins, on peut constater qu'il n'y a pas de corrélation entre les résultats obtenus pour ces 3 indicateurs.

### ► Définition de l'inventaire fictif B

Sur la base de cette première analyse, un inventaire fictif B est défini. Pour cela, on repart de l'inventaire A et on supprime de l'inventaire les 3 ressources minérales contribuant le plus aux impacts : l'or, l'argent et l'uranium.

L'inventaire fictif B comporte ainsi les flux élémentaires suivants :

- ressources minérales : 1 kg d'aluminium, 1 kg de cuivre, 1 kg de fer,
- ressources fossiles : 1 kg de gaz naturel, 1 kg de pétrole, 1 kg de houille,
- ressources biomasse : 1 kg de biomasse.

### ► Résultats de la caractérisation de l'inventaire fictif B

La figure suivante présente le résultat de la caractérisation de l'inventaire fictif B décrit ci-dessus, avec les méthodes retenues.

---

<sup>22</sup> Dans le cas précis de l'inventaire fictif A, la biomasse est la seule ressource à être prise en compte dans l'indicateur CExD sans être prise en compte dans les indicateurs CML-ADP et l'indicateur Elgg.

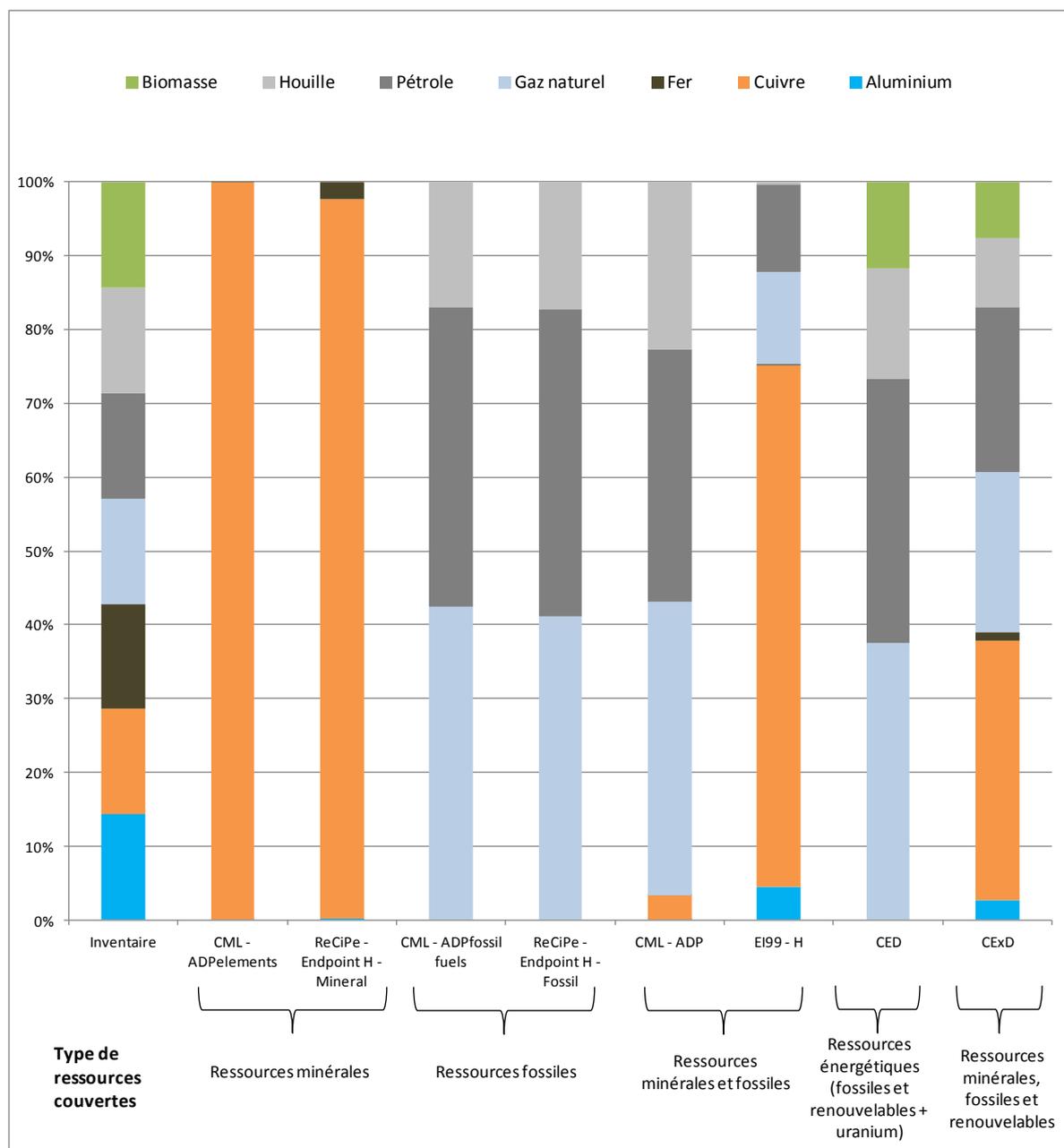


Figure 25 : Contribution des différents flux de l'inventaire B aux indicateurs sélectionnés

► **Analyse de la caractérisation de l'inventaire fictif B**

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales uniquement**

On observe que pour les deux indicateurs ADPelements de CML et Mineral Depletion Potential de ReCiPe, le cuivre est le contributeur majoritaire. Pour Elgg – Mineral depletion, l'aluminium contribue également, mais de manière assez limitée (5%). Tout comme pour l'inventaire fictif A, on observe le même contributeur principal malgré la différence des principes sous-jacents à ces deux indicateurs.

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement**

On retrouve le même cas de figure que lors de l'analyse de l'inventaire A, à savoir une répartition quasi identique entre les ressources pour les deux indicateurs.

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales et fossiles**

La contribution des flux est extrêmement différente entre les indicateurs CML – ADP et Elgg – Damages ressources.

On peut observer que l'indicateur CML-ADP présente un profil proche de ceux des indicateurs CML-ADP fossil fuels et ReCiPe-Fossil Depletion Potential, avec toutefois une contribution du cuivre de quelques pourcents. En d'autres termes, dans le cas précis de cet inventaire fictif B, ce sont les ressources fossiles qui contribuent davantage aux impacts que les ressources minérales.

Pour l'indicateur Elgg, les résultats sont similaires à ceux obtenus avec l'inventaire A, compte tenu du fait que les ressources or, argent et uranium qui ont été supprimées dans l'inventaire fictif B ne sont pas couvertes par cet indicateur.

Contrairement à la situation rencontrée avec l'inventaire fictif A, toutes les ressources considérées dans l'inventaire fictif B disposent bien d'un facteur de caractérisation pour les indicateurs CML – ADP et Elgg – Damages ressources.

Ainsi, les différences observées ici entre CML – ADP et Elgg – Damages ressources viennent donc du fait que les modèles sur lesquels sont basés ces indicateurs sont très différents.

Dans CML, le modèle basé sur le niveau de réserve et le taux d'extraction pour ADP conduit à des facteurs de caractérisation plus importants pour sortir les ressources fossiles que pour les ressources minérales considérées (fer, cuivre et aluminium).

Dans Elgg, le modèle basé sur l'évaluation des surplus d'énergie nécessaires aux extractions futures fait en revanche davantage ressortir le cuivre par rapport aux ressources fossiles. Cela signifie que le modèle considère que le surplus d'énergie nécessaire à l'avenir pour extraire du cuivre sera plus important que pour extraire du gaz, du pétrole ou de la houille, dans la perspective « hiérarchiste ».

■ **Pour l'indicateur CED**

On observe une répartition similaire à celle de l'indicateur CML-ADP fossil fuels et celle de l'indicateur ReCiPe-Fossil Depletion Potential, car ces derniers sont tous basés sur le contenu énergétique (Pouvoir calorifique). La différence observée réside dans le fait que la CED incorpore toutes les formes d'énergies (renouvelables, non-renouvelables), et en particulier l'énergie provenant de la biomasse qui contribue ici à l'impact.

■ **Pour l'indicateur CExD**

Pour la Cumulative Exergy Demand, on observe une répartition des impacts entre les ressources minérales, les ressources fossiles et la biomasse.

En ce qui concerne les ressources énergétiques, on peut constater que la répartition des contributions est très proche de celle observée pour l'indicateur CED. On effect, on rappelle que dans le cas des ressources énergétiques de type fossile ou biomasse, le ratio d'exergie

à énergie considéré dans l'indicateur CExD<sup>23</sup> est très proche de 1, ce qui signifie que pour ces ressources les facteurs de caractérisation de l'indicateur CExD sont très proches de ceux de l'indicateur CED.

## 4.2.2 Comparaison des facteurs de caractérisation des indicateurs via l'analyse d'un inventaire de produit réel

L'objectif de cette seconde partie de l'étude de cas n°1 est de compléter l'analyse précédente en utilisant un inventaire d'un produit réel. Pour cela, le produit retenu est un ordinateur portable.

### ► Etablissement de l'inventaire de cycle de vie d'un ordinateur portable

Un inventaire représentatif du cycle de vie d'un ordinateur portable est établi. Il correspond à l'unité fonctionnelle suivante : Utiliser un ordinateur portable pendant 3 ans. L'inventaire est établi à partir d'inventaires ecoinvent en considérant les hypothèses suivantes, qui sont basées sur des études précédemment réalisées par BIO IS.

- Production :
  - Utilisation de l'inventaire Laptop computer, at plant/GLO, en supprimant les procédés correspondant à la fin de vie,
- Utilisation :
  - Utilisation de l'inventaire Electricity, low voltage, production FR, at grid/FR,
  - Hypothèse d'une consommation électrique correspondant une puissance de 60W et un chargement 8 heures par jours pendant 3 ans,
- Fin de vie :
  - Utilisation de l'inventaire Dismantling, laptop, mechanically, at plant/GLO,
  - Estimation de la quantité de métaux contenus dans l'ordinateur à partir des flux élémentaires de l'inventaire « Laptop computer, at plant/GLO » (hypothèse majorante dans la mesure où l'on considère que l'intégralité des métaux prélevés se retrouve dans le produit).
  - Pour les métaux<sup>24</sup> :
    - Hypothèse de 24% de recyclage et de 76% d'élimination sous forme d'enfouissement et d'incinération,

---

<sup>23</sup> Pour l'indicateur CEENE, les facteurs de caractérisation relatifs à la biomasse sont définis différemment de ceux considérés dans l'indicateur CExD. Aussi, dans le cas de l'indicateur CEENE, les facteurs de caractérisation restent très proches de ceux de l'indicateur CED pour les ressources fossiles mais pas pour la biomasse.

<sup>24</sup> Seuls les métaux suivants, pour lesquels des inventaires de production de matière recyclée et des inventaires de production de matière vierge sont disponibles dans ecoinvent, ont été considérés à l'étape de fin de vie : Acier, Cuivre, Aluminium, Argent, Or, Nickel.

## « Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

- Pour la fraction recyclée : utilisation d'inventaires de production de matière secondaire pour tenir compte des procédés de recyclage auxquels on retranche des inventaire de production de matière vierge pour les impacts évités,
  - Pour la fraction non recyclée : utilisation d'inventaires d'incinération et d'enfouissement<sup>25</sup> en considérant une répartition de 74% d'enfouissement et 26% d'incinération.
- Pour le reste de l'ordinateur: utilisation d'inventaires d'incinération et d'enfouissement d'un mélange de plastique en considérant une répartition de 74% d'enfouissement et 26% d'incinération.

Ensuite, afin d'illustrer graphiquement les différents flux de l'inventaire dans la figure ci-dessous, il a été nécessaire de convertir certains flux afin de les exprimer en masse. Les hypothèses suivantes ont été retenues : 0,8 kg/m<sup>3</sup> pour les flux de gaz, 15 MJ/kg pour les flux d'énergie issue de la biomasse, 650 kg/m<sup>3</sup> pour les flux de bois. Les flux de bois et d'énergie biomasse ont été regroupés en « Biomasse ». Par ailleurs, les flux sans équivalence massique ne sont pas intégrés à cette colonne inventaire (il s'agit notamment des flux d'énergie potentielle hydraulique, d'énergie solaire et d'énergie éolienne).

### ► Résultats de la caractérisation de l'inventaire de cycle de vie d'un ordinateur portable

La figure suivante présente le résultat de la caractérisation de l'inventaire de cycle de vie d'un ordinateur portable avec les indicateurs retenus.

---

<sup>25</sup> Lorsque les inventaires d'enfouissement et/ou d'incinération d'un métal ne sont pas disponibles, ceux de l'aluminium sont utilisés en approximation.

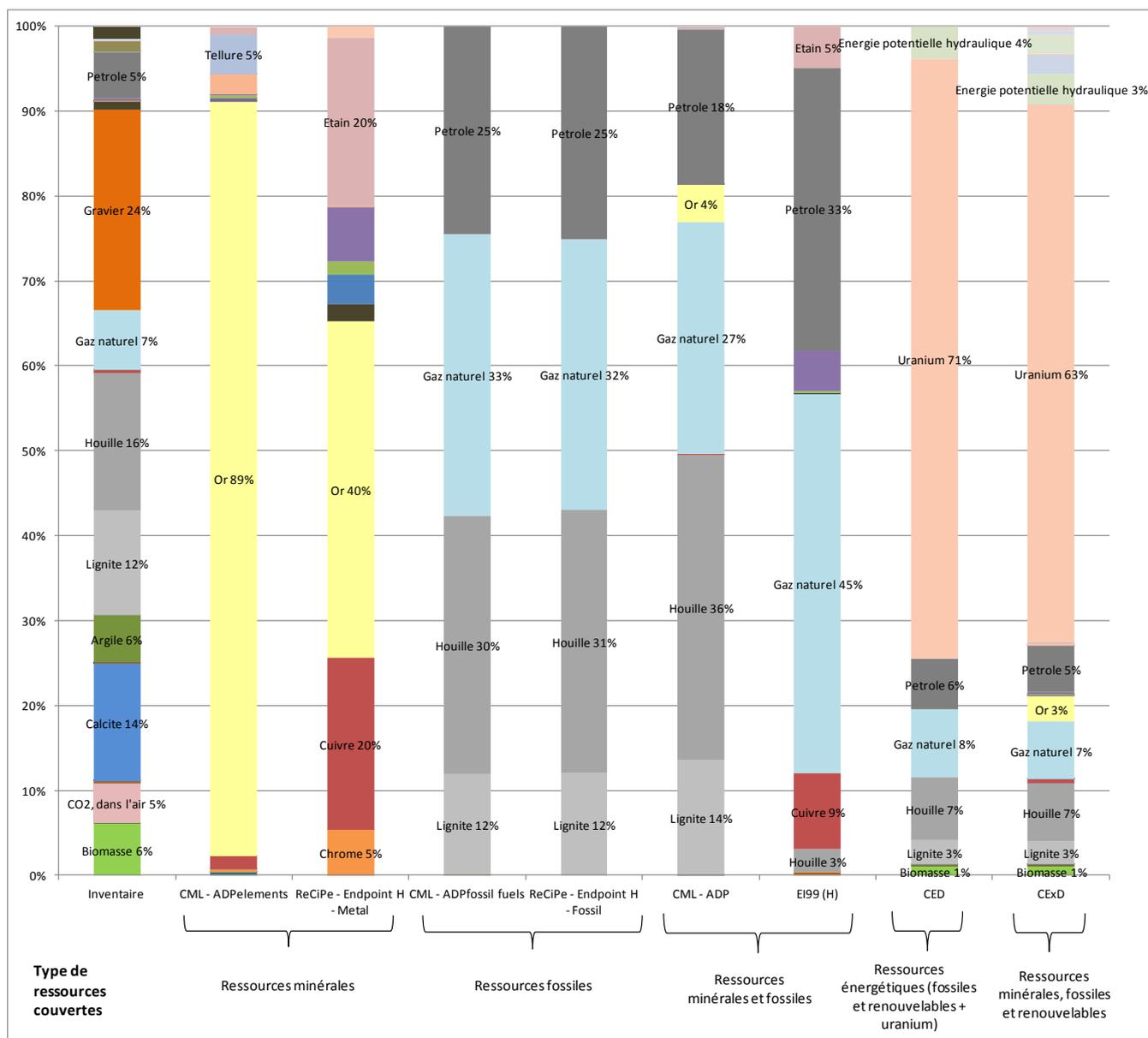


Figure 26 : Contribution des différents flux de l'inventaire de cycle de vie d'un ordinateur portable aux indicateurs sélectionnés

► **Analyse de la caractérisation de l'inventaire de cycle de vie d'un ordinateur portable**

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales uniquement**

On peut noter des différences significatives dans la répartition des contributions entre l'indicateur ADPelements de CML et l'indicateur Mineral Depletion Potential de ReCiPe.

Pour l'ADPelements de CML, l'or contribue à la quasi-totalité (90%) de l'impact. Pour l'indicateur Mineral Depletion Potential de ReCiPe, la contribution de l'or est également importante (47%), mais l'étain (23%) et le cuivre (11%) présentent également des contributions significatives.

On peut donc noter que les similitudes observées précédemment entre ces indicateurs dans le cas des inventaires fictifs A et B ne sont plus observées dans le cas de l'inventaire réel. Ainsi, même si pour certaines ressources on peut observer des corrélations entre les facteurs de caractérisations de ces indicateurs, ce n'est pas le cas pour l'ensemble des ressources compte tenu de la différence entre les modèles relatifs à ces deux indicateurs.

#### ■ Pour les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement

Comme dans le cas des inventaires fictifs A et B, on observe que les deux indicateurs ADP<sub>fossil fuels</sub> de CML et Fossil Depletion Potential de ReCiPe présentent des profils de contributions quasi-identiques.

#### ■ Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales et fossiles

On note des différences significatives dans les profils de contribution des indicateurs CML – ADP et Elgg – Damages Resources.

L'ADP de CML présente un profil similaire à celui de l'ADP<sub>fossil fuels</sub>. L'or apparaît toutefois, mais avec une faible contribution (5%). En d'autres termes, **dans le cas de l'ordinateur portable, ce sont les ressources fossiles qui contribuent davantage aux impacts que les ressources minérales**<sup>26</sup>.

Pour l'indicateur Elgg – Damages Resources, on observe une contribution importante des ressources fossiles gaz et pétrole et des ressources minérales de type cuivre, nickel et étain. Pour ce qui est des ressources fossiles, on peut noter que le lignite n'apparaît pas comme un contributeur à cet indicateur, car la perspective « Hiérarchiste » indique un facteur de caractérisation nul pour cette ressource. Pour ce qui est des ressources minérales, on peut rappeler ici que l'indicateur Elgg ne propose pas de facteur de caractérisation pour l'or. Néanmoins, si l'on exclut l'or de l'analyse, on peut noter que les ressources minérales qui contribuent le plus à l'indicateur Elgg sont les mêmes que celles obtenues avec l'indicateur Mineral Depletion Potential de ReCiPe (cuivre, nickel et étain).

#### ■ Pour l'indicateur CED

L'uranium est le principal contributeur à cet impact (72%). Pour le reste des contributions, le profil est similaire à celui observé pour l'ADP<sub>fossil fuels</sub> de CML et l'indicateur Fossil Depletion Potential de ReCiPe. On peut également remarquer que l'énergie hydraulique contribue à hauteur de 4%.

#### ■ Pour l'indicateur CExD

Pour la Cumulative Exergy Demand, on observe un profil de contribution très proche de celui observé pour l'indicateurs CED avec toutefois une légère contribution de l'or (3%). En effet, dans le cas de l'ordinateur portable, ce sont les ressources énergétiques (fossiles et nucléaires) qui contribuent très majoritairement aux pertes d'exergie. De plus, le fait que les ratios d'exergie à énergie soient très proches de 1 pour ces ressources explique que les résultats observés soient relativement similaires entre les indicateurs CExD et CED.

---

<sup>26</sup> Les procédés et étapes du cycle de vie qui contribuent le plus à l'indicateur ADP sont la consommation d'électricité pour la production des circuits intégrés de l'ordinateur et la consommation d'électricité en phase utilisation.

### 4.2.3 Enseignements de l'étude de cas n°1

La caractérisation des inventaires fictifs A et B et de l'inventaire de cycle de vie de l'ordinateur avec différents indicateurs permet de tirer les enseignements suivants.

- ▶ **La couverture des ressources prises en compte par les indicateurs est un point très important à considérer lors de l'interprétation des résultats.**

Il est important de noter que les différences de profil de contribution que l'on peut observer entre différents indicateurs relèvent à la fois : des catégories de ressources prises en compte, des principes de calcul des facteurs de caractérisation et de l'éventuelle absence de facteurs de caractérisation pour des ressources données.

Par exemple, dans cette étude de cas, le fait que l'or ne dispose pas de facteur de caractérisation pour l'indicateur Elgg Mineral depletion engendre une répartition des impacts très différente de celle observée pour les autres indicateurs prenant en compte les ressources minérales.

Par ailleurs, on peut noter que les ressources renouvelables comme la biomasse, le vent ou le rayonnement solaire ne sont que rarement prises en compte dans les indicateurs. Toutefois, on peut indiquer que le fait de ne pas considérer les ressources renouvelables lors de l'évaluation de l'épuisement des ressources présuppose qu'il n'y a pas d'enjeu d'épuisement relatif à ces ressources et/ou qu'elles sont gérées durablement. Néanmoins, cela n'est pas toujours le cas en ce qui concerne la biomasse.

- ▶ **Les contributions relatives des différentes ressources minérales aux indicateurs prenant en compte ces ressources sont variables du fait des différences de méthode et de ressources couvertes** (CML-ADP, CML-ADPelements, ReCiPe-Mineral Depletion Potential, Elgg-Damage Resources, CExD).

Si des convergences en termes de contributions relatives peuvent être observées entre indicateurs pour certaines ressources (en particulier entre les indicateurs CML - ADPelements et ReCiPe-Mineral Depletion Potential dans le cas des inventaires fictifs A et B), ces convergences ne sont pas généralisées à l'ensemble des ressources (comme on le voit dans le cas de l'inventaire de cycle de vie de l'ordinateur). Ceci vient du fait que les facteurs de caractérisation des différents indicateurs reposent sur des fondements très différents. On peut rappeler par exemple que les indicateurs CML évaluent l'impact de l'extraction des ressources en tenant compte des réserves et des taux d'extraction actuels. Les indicateurs ReCiPe et Elgg évaluent les conséquences d'une extraction actuelle sur une extraction future en évaluant respectivement les surcoûts futurs ou l'énergie supplémentaire nécessaire dans le futur. L'indicateur CExD évalue quant à lui l'extraction en prenant en compte les pertes d'exergie liées aux ressources extraites.

De plus, il faut aussi mentionner que les variations observées entre les indicateurs viennent du fait qu'ils ne prennent pas tous en compte les mêmes ressources. Par exemple, l'indicateur ReCiPe- Mineral Depletion Potential ne couvre que 20 ressources alors que l'indicateur CML-ADPelements couvre plus de 40 ressources.

Compte tenu de ces deux facteurs explicatifs, il est donc logique d'observer des écarts significatifs lors de l'analyse de la contribution des ressources minérales.

- ▶ **Les contributions relatives des différentes ressources fossiles aux indicateurs prenant en compte ces ressources sont très proches pour tous les indicateurs sauf pour l'indicateur Damage ressources d'El99** (CML-ADP, CML-ADP*fossil fuels*, ReCiPe- Fossil Depletion Potential, CED, CExD et El99-Damage ressources fossil).

Pour ce qui est des indicateurs **CML-ADP, CML-ADP*fossil fuels*, ReCiPe- Fossil Depletion Potential et CED**, les similitudes observées dans les profils de contribution s'expliquent par la méthode d'élaboration des facteurs de caractérisation de ces indicateurs :

- Pour les indicateurs **CML-ADP et CML-ADP*fossil fuels***, les auteurs considèrent que les ressources fossiles sont interchangeables et ils définissent au départ un unique facteur de caractérisation pour l'ensemble des ressources fossiles. Ce facteur est basé sur les réserves de carbone fossile et sur les taux d'extraction des ressources fossiles. Les facteurs de caractérisation propres à chaque ressource fossile sont ensuite dérivés de ce facteur unique sur la base du contenu énergétique de chaque ressource. Ainsi, la contribution relative des différentes ressources fossiles est toujours proportionnelle au contenu énergétique de la ressource.
- Pour **ReCiPe- Fossil Depletion Potential** (endpoint), on se trouve dans un cas de figure similaire. Un facteur de caractérisation est calculé pour le pétrole. Ce facteur traduit les surcoûts futurs engendrés par le fait que la baisse de disponibilité du pétrole va nécessiter l'exploitation de ressources pétrolières non-conventionnelles. Les facteurs de caractérisation propres à chaque ressource fossile sont ensuite extrapolés à partir de celui du pétrole en fonction du contenu énergétique de chaque ressource.
- Pour **CED**, les valeurs des facteurs de caractérisation sont les contenus énergétiques eux-mêmes.

Ainsi, on peut noter que même si les 2 indicateurs CML et l'indicateur ReCiPe mentionnés ci-dessus reposent au départ sur des principes très différents de ceux de l'indicateur CED, le fait que les facteurs de caractérisation de ces 3 indicateurs soient dérivés d'un facteur unique sur la base du contenu énergétique de chaque ressource fait qu'au final la contribution relative des différentes ressources fossiles pour ces 3 indicateurs est la même que celle obtenue avec l'indicateur CED<sup>27</sup>. Autrement dit, bien que respectivement présentés comme des indicateurs de catégorie 2 (évaluant l'impact d'une extraction en fonction de la rareté de la ressource) et de catégorie 4 (évaluant les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future), les indicateurs des méthodes CML et ReCiPe se

---

<sup>27</sup> Les légères différences proviennent du fait que les méthodes n'utilisent pas toujours la même source de données pour évaluer le contenu énergétique des ressources fossiles : l'indicateur Fossil Depletion de ReCiPe se base sur les valeurs de CED présentes dans ecoinvent (PCS) tandis que l'indicateur ADP*fossil fuels* se base sur des contenus énergétiques provenant de [WRI1994].

ramènent à des indicateurs de catégorie 1 (évaluant l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource) dans le cas des ressources fossiles.

Par exemple, dans le cas des indicateurs ADP et ADP<sub>fossil fuels</sub> de CML, le fait que les ressources fossiles sont considérées comme interchangeable et le fait que les facteurs de caractérisation sont basés sur la réserve de l'ensemble des ressources fossiles font que les indicateurs CML ne permettent pas de prendre en compte la rareté spécifique de chaque ressource fossile. Un MJ de charbon est pondéré de la même manière qu'un MJ de pétrole. Ainsi, dans le cas de l'indicateur ADP<sub>fossil fuels</sub> qui ne considère que les ressources fossiles, seul le contenu énergétique est pris en compte. Dans le cas de l'indicateur ADP qui considère à la fois les ressources fossiles et minérales, la rareté de l'ensemble des ressources fossiles est prise en compte au regard de la rareté des différentes ressources minérales.

**Ces observations mettent en avant le fait que les indicateurs ADP et ADP<sub>fossil fuels</sub> de CML ainsi que et l'indicateur Fossil Depletion Potential de ReCiPe offrent des perspectives d'analyse limitées quand on souhaite comparer les différentes ressources fossiles entre elles.**

Par ailleurs, pour ce qui est de l'indicateur **CExD**, il s'avère que l'exergie d'une ressource fossile est très proche du contenu énergétique d'une ressource fossile. Ceci explique que l'indicateur CExD présente un profil de contribution similaire à ceux obtenus avec les indicateurs mentionnés ci-dessus pour ce qui concerne les ressources fossiles.

Par contre, dans le cas de l'indicateur **El99-Damage Resources**, l'approche est différente et ne repose pas sur le contenu énergétique. En effet, pour les ressources fossiles, on rappelle que les facteurs de caractérisation de cet indicateur correspondent aux surplus d'énergie qui seront nécessaires à l'extraction des ressources non conventionnelles dans le futur. Ces facteurs de caractérisation dépendent fortement des scénarios établis et des ressources fossiles de substitution considérées. Cette approche conduit donc à des profils de contribution présentant des différences significatives par rapport aux indicateurs précédents.

► **Pour les indicateurs tenant compte à la fois des ressources fossiles et minérales (CML – ADP, El99-Damage Resources et CExD), les ressources fossiles ressortent en général comme les principaux contributeurs. Néanmoins, en fonction des indicateurs et des inventaires analysés, on peut observer des profils de contribution très variables.**

L'étude de cas montre que les répartitions d'impact obtenues pour les indicateurs CML – ADP, El99-Damage Resources et CExD sont très différentes. Ce résultat obtenu ici à partir de l'analyse de 3 inventaires est confirmé par [Bösch2007], qui a montré qu'il n'y a pas de corrélation entre les facteurs de caractérisation de ces 3 méthodes.

Néanmoins, quand on se trouve dans des cas de figure où l'inventaire présente d'importantes consommations de ressources fossiles, les profils de contribution de ces 3 indicateurs présentent davantage de similitudes. En effet, comme cela a été évoqué précédemment, il s'avère que les contributions relatives des différentes ressources fossiles sont assez similaires pour ces 3 indicateurs.

Par ailleurs, [Bösch2007] a également mis en avant que, dans la majorité des cas, l'indicateur CML-ADP pondère plus faiblement les ressources minérales par rapport aux ressources fossiles que l'indicateur CExD. Même si cela n'est pas observable pour l'inventaire fictif A et l'inventaire d'ordinateur, cela est bien notable dans le cas de l'inventaire fictif B.

Enfin, on peut souligner que pour l'indicateur CML – ADP, le profil de contribution est en général proche de celui de l'indicateur CML-ADP fossil fuels. Ceci signifie qu'en général, ce sont les ressources fossiles qui contribuent davantage aux impacts que les ressources minérales. Toutefois, dans certains cas de figure où les inventaires présentent des flux significatifs de métaux peu communs comme l'or, l'argent ou l'uranium, la tendance peut être inversée et le profil de contribution de l'indicateur CML – ADP peut se rapprocher de celui de CML – ADP elements.

► **Les modes d'établissement des inventaires peuvent influencer les résultats observés en termes d'épuisement des ressources.**

En ce qui concerne l'établissement de l'inventaire à analyser, il faut mentionner que l'évaluation de l'épuisement des ressources doit être effectuée sur le cycle de vie complet d'un produit de façon à bien pouvoir prendre en compte les éventuelles boucles de recyclage des matériaux constituant le produit. En effet, ces boucles de recyclage et la façon dont elles sont modélisées ont des conséquences directes sur les quantités de matière vierge consommées et donc sur les quantités de ressources extraites et ainsi donc sur les résultats obtenus en termes d'épuisement des ressources.

## 4.3 Etude de cas n°2 : Illustration de la variation des résultats obtenus lors de la comparaison de plusieurs inventaires avec différents indicateurs

L'objectif de cette seconde étude de cas est d'illustrer la variation des résultats que l'on peut observer lors de la comparaison de plusieurs inventaires de cycle de vie de produits avec les différents indicateurs précédemment sélectionnés. L'objectif est ainsi d'illustrer dans quelles mesures les conclusions concernant l'évaluation de l'épuisement des ressources que l'on peut tirer lorsque l'on compare des produits varient en fonction des indicateurs utilisés.

### 4.3.1 Analyse de la variation des résultats lors de la comparaison d'inventaires avec différents indicateurs

De façon à analyser les problématiques propres aux ressources fossiles, minérales et biomasse, les produits retenus pour cette étude de cas correspondent à trois types de cadres de fenêtre :

- un cadre de fenêtre en aluminium,
- un cadre de fenêtre en PVC (contenant des éléments en acier),
- un cadre de fenêtre en bois.

#### ► Etablissement des inventaires de cycle de vie des cadres de fenêtre

Des inventaires de cycle de vie de 3 cadres de fenêtre sont établis. Pour les besoins de l'étude, on fait l'hypothèse que les cadres de fenêtre rendent le même service sur une durée de vie identique de 30 ans et qu'ils ne nécessitent aucun entretien<sup>28</sup>.

On considère l'unité fonctionnelle suivante : « Encadrer un m<sup>2</sup> de fenêtre visible, avec un coefficient de performance thermique U compris entre 1,5 et 1,6 watt par mètre carré-kelvin (W/m<sup>2</sup>K), pendant 30 ans ».

Les inventaires sont établis à partir d'inventaires ecoinvent en considérant les hypothèses détaillées ci-dessous.

- **Cadre de fenêtre en aluminium**
  - Caractéristiques : cadre de 50,7 kg contenant 39,7 kg d'aluminium

---

<sup>28</sup> Il faut bien noter que ces hypothèses sont simplificatrices. Les résultats issus de cette étude de cas ne peuvent donc pas être considérés comme représentatifs de la performance environnementale réelle des produits en ce qui concerne l'épuisement des ressources. Toutefois, il faut garder à l'esprit que cette étude de cas n'a pas pour objectif de tirer des conclusions sur la qualité environnementale des cadres de fenêtre mais a pour objectif d'illustrer avec un cas simple les variations de résultats que l'on peut obtenir lorsque l'on compare des produits avec différents indicateurs.

- Production : Utilisation de l'inventaire Window frame, aluminium,  $U=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , at plant/RER en modifiant les flux relatifs à l'aluminium de façon à ne considérer que de l'aluminium vierge,
- Fin de vie (pour l'aluminium) :
  - Hypothèse de 34% de recyclage, 33% d'incinération et 33% d'enfouissement,
  - Pour la fraction recyclée : utilisation de l'inventaire de production d'aluminium recyclé pour tenir compte du procédé de recyclage auquel on retranche l'inventaire de production d'aluminium vierge pour les impacts évités,
  - Pour la fraction non recyclée : utilisation d'inventaires d'incinération et d'enfouissement d'aluminium.

Tableau 6 : Principaux intrants du cadre aluminium (pour 1 m<sup>2</sup> de surface visible)

Principaux intrants	Quantité	Unité	Inventaire ecoinvent
EPDM	4,87	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Acier	0,516	kg	Reinforcing steel, at plant/RER
Acier chromé	0,457	kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER
Polyéthylène	0,246	kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER
Polyamide	5,27	kg	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant/RER
ABS	0,4	kg	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant/RER
Aluminium	39,7	kg	Aluminium, primary, at plant/RER
Electricité	1,27	kWh	Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE

#### ▷ Cadre de fenêtre en PVC

- Caractéristiques : cadre de 94,5 kg contenant 58,4 kg de PVC et 30 kg d'acier
- Production : Utilisation de l'inventaire Window frame, plastic (PVC),  $U=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , at plant/RER en modifiant les flux relatifs à l'acier de façon à ne considérer que de l'acier vierge,
- Fin de vie :
  - Pour le PVC:
    - Hypothèse de 50% d'incinération et 50% d'enfouissement,
    - utilisation d'inventaires d'incinération et d'enfouissement de plastique,
  - Pour l'acier :
    - Hypothèse de 34% de recyclage, 33% d'incinération et 33% d'enfouissement,

- Pour la fraction recyclée : utilisation de l'inventaire de production d'acier recyclé pour tenir compte du procédé de recyclage auquel on retranche l'inventaire de production d'acier vierge pour les impacts évités,
- Pour la fraction non recyclée : utilisation d'inventaires d'incinération et d'enfouissement d'acier.

Tableau 7 : Principaux intrants du cadre PVC (pour 1 m<sup>2</sup> de surface visible)

Principaux intrants	Quantité	Unité	Inventaire ecoinvent
PVC	58,4	kg	Polyvinylchloride, at regional storage/RER
Acier	30	kg	Steel, low-alloyed, at plant/RER (modifié)
EPDM	0,798	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Cuivre	0,00698	kg	Copper, at regional storage/RER
Zinc	0,325	kg	Zinc, primary, at regional storage/RER
Polypropylène	0,219	kg	Polypropylene, granulate, at plant/RER
Polystyrène	0,208	kg	Polystyrene, high impact, HIPS, at plant/RER
Aluminium	1,1	kg	Aluminium, production mix, at plant/RER
Electricité	13,8	kWh	Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE

▷ **Cadre de fenêtre en bois**

- Caractéristiques : cadre de 80,5 kg contenant 65,2 kg de bois (0,213 m<sup>3</sup>)
- Production : Utilisation de l'inventaire Window frame, wood, U=1.5 W/m<sup>2</sup>K, at plant/RER,
- Fin de vie (pour le bois) :
  - Hypothèse de 50% d'incinération et 50% d'enfouissement,
  - utilisation d'inventaires d'incinération et d'enfouissement de bois.

Tableau 8 : Principaux intrants du cadre bois (pour 1 m<sup>2</sup> de surface visible)

Principaux intrants	Quantité	Unité	Inventaire ecoinvent
EPDM	1,14	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Peinture	5,49	kg	Alkyd paint, white, 60% in H <sub>2</sub> O, at plant/RER
Cuivre	0,00623	kg	Copper, at regional storage/RER
Bois	0,211	m <sup>3</sup>	Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER
Bois	0,00171	m <sup>3</sup>	Sawn timber, hardwood, planed, kiln dried, u=10%, at plant/RER
Acier	5,18	kg	Steel, low-alloyed, at plant/RER
Zinc	0,29	kg	Zinc, primary, at regional storage/RER
Nylon	0,349	kg	Nylon 66, glass-filled, at plant/RER
Aluminium	3,06	kg	Aluminium, production mix, at plant/RER
Electricité	57,7	kWh	Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid/UCTE

► **Résultats de la comparaison des inventaires de cycle de vie des 3 cadres de fenêtre avec les différents indicateurs sélectionnés**

La figure suivante présente le résultat de la comparaison des 3 cadres de fenêtre avec les indicateurs retenus. Les résultats sont présentés de manière relative, en normant à 100% le cadre de fenêtre en aluminium.

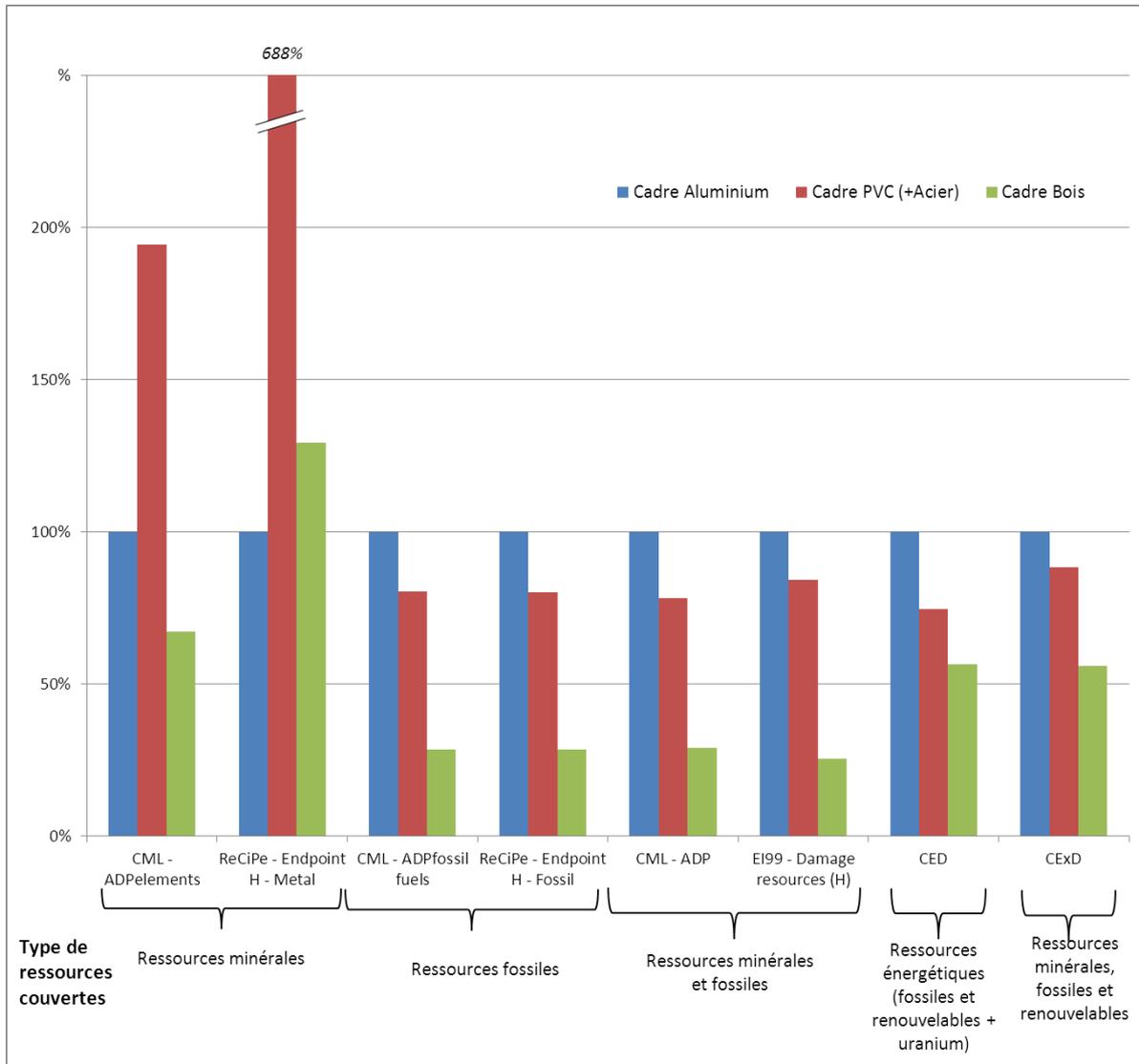


Figure 27 : Caractérisation de trois types de cadres de fenêtres selon les indicateurs sélectionnés (UF : encadrer 1m<sup>2</sup> de fenêtre visible, référence : Cadre Aluminium)

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque indicateur retenu, les principaux contributeurs à l'impact. Pour chaque type de cadre de fenêtre, les contributeurs sont à la fois présentés en termes d'étape de cycle de vie et de flux élémentaires.

Pour les étapes contributrices, le fait d'indiquer un matériau comme principal contributeur signifie que c'est sa production qui est la principale source d'impact. De plus, pour la production de certains matériaux, la mention « élec. » indique que l'impact provient principalement de l'électricité nécessaire au procédé de production.

Tableau 9 : Principaux contributeurs (étapes du cycle de vie et flux) aux indicateurs ressources, pour chaque type de cadre étudié

Type d'indicateurs	Indicateur	Type de contribution	Principaux contributeurs		
			Cadre Aluminium	Cadre PVC	Cadre Bois
Indicateurs tenant compte des ressources minérales	CML - ADPelements	Etape(s)	Zinc utilisé dans la fabrication du joint EPDM	Zinc	Zinc
		Flux	Zinc, Cadmium	Zinc, Chrome	Zinc
	ReCiPe - Endpoint H - Metal	Etape(s)	Acier chromé	Acier	Acier
		Flux	Chrome, nickel	Manganese, Fer, Nickel	Manganese, Fer, Nickel
Indicateurs tenant compte des ressources fossiles	CML - ADP fossil fuels	Etape(s)	Aluminium (élec.)	PVC	Electricité pour la fabrication
		Flux	Pétrole, Gaz, Houille	Gaz, Pétrole	Pétrole, Gaz, Houille
	ReCiPe - Endpoint H - Fossil	Etape(s)	Aluminium (élec.)	PVC	Electricité pour la fabrication
		Flux	Pétrole, Gaz, Houille	Gaz, Pétrole, Houille	Pétrole, Gaz, Houille
Indicateurs tenant compte des ressources minérales et fossiles	CML - ADP	Etape(s)	Aluminium (élec.)	PVC	Electricité pour la fabrication
		Flux	Pétrole, Houille, Gaz	Gaz, Pétrole, Houille	Houille, Pétrole, Gaz
	El99 - H	Etape(s)	Aluminium (élec.)	PVC	Electricité pour la fabrication, peinture, bois, aluminium
		Flux	Pétrole, Gaz	Pétrole, Gaz	Pétrole, Gaz
Autres indicateurs	CED	Etape(s)	Aluminium (élec.)	PVC	Bois
		Flux	Gaz, Pétrole, Uranium, Houille	Gaz, Pétrole, Uranium	Energie Biomasse
	CExD	Etape(s)	Aluminium (élec.)	PVC	Bois
		Flux	Pétrole, Gaz, Charbon, Uranium	Pétrole, Eau de refroidissement, gaz, Uranium	Bois

► **Analyse des résultats de la comparaison des inventaires avec les différents indicateurs sélectionnés**

▷ **Analyse des résultats selon les types de ressources couvertes par les indicateurs**

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales uniquement**

Pour l'indicateur CML ADPelements, le cadre PVC apparaît comme le plus impactant, suivi par le cadre aluminium et enfin le cadre bois.

Pour l'indicateur ReCiPe-Mineral Depletion Potential, le cadre PVC est toujours le plus impactant (environ 7 fois plus important que celui du cadre Aluminium), mais l'ordre s'inverse ensuite : le second est le cadre en bois, suivi du cadre aluminium.

Ces différences de résultats s'expliquent par le fait que les indicateurs ont des fondements différents et donc des facteurs de caractérisation différents. Ainsi, les ressources consommées par les différents cadres ne sont pas pondérées de la même manière d'un indicateur à l'autre.

Avec CML-ADP, ce sont les quantités de zinc consommées pour les 3 cadres qui sont jugées comme participant le plus à l'épuisement des ressources. Avec ReCiPe, ce sont les flux de fer, manganèse, chrome et nickel utilisés lors de la production d'acier<sup>29</sup> présent dans les 3 cadres qui participent le plus à l'impact. Cet indicateur considère que ces consommations de ressources sont celles dont l'extraction générera le plus de surcoût à l'avenir.

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement**

Pour les indicateurs CML-ADP fossil fuels et ReCiPe-Fossil Depletion Potential, le classement relatif des trois types de cadre est identique : le cadre aluminium apparaît comme le plus impactant, suivi par le cadre PVC (80% des impacts du cadre aluminium) puis le cadre bois (28%).

De plus, pour un type de cadre donné, l'origine des impacts est la même pour les deux indicateurs. Pour le cadre aluminium, les impacts proviennent principalement de l'électricité utilisée pour la production d'aluminium. Pour le cadre PVC, il s'agit des ressources fossiles utilisées pour la production de PVC. Enfin, pour le cadre bois, il s'agit de l'électricité consommée lors de la fabrication du cadre.

Ces résultats similaires sont dus au fait que, pour ces deux indicateurs, les facteurs de caractérisation sont dérivés d'un facteur unique sur la base du contenu énergétique de chaque ressource.

■ **Pour les indicateurs tenant compte des ressources minérales et fossiles**

Les deux indicateurs CML-ADP et El99-Damage Resources présentent des impacts relatifs assez proches pour les trois cadres de fenêtre : le cadre aluminium est le plus impactant, suivi par le cadre PVC (78% à 84% de l'impact du cadre aluminium) puis le cadre bois (25 à 29% de l'impact du cadre aluminium).

---

<sup>29</sup> On rappelle que le cadre en bois contient des éléments en acier représentant environ 6% en masse.

De plus, pour les trois types de cadres, l'origine des impacts est similaire et provient principalement de l'extraction de ressources fossiles : pour le cadre aluminium et le cadre bois, celles-ci sont utilisées pour produire de l'électricité, tandis que pour le cadre PVC, elles sont principalement utilisées comme matière.

Ainsi, malgré le fait que ces indicateurs sont basés sur des modèles très différents (modèle basé sur le niveau de réserve et le taux d'extraction pour CML, modèle basé sur les surplus d'énergie engendrés par les extractions actuelles pour El99-Damage Resources), les deux indicateurs font ressortir les ressources fossiles comme principal contributeur et les pondèrent de manière relativement homogène.

#### ■ Pour l'indicateur CED

Pour l'indicateur CED, on retrouve le même positionnement relatif que pour les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement. Ceci s'explique par le fait que ces derniers se basent sur les contenus énergétiques (tout comme l'indicateur CED) pour l'élaboration de leurs facteurs de caractérisation. Néanmoins, le cadre bois, qui contient de la biomasse, présente un impact plus élevé (57% par rapport au cadre aluminium) que pour les indicateurs couvrant uniquement les ressources fossiles. Ceci vient du fait que l'indicateur CED ne se limite pas aux ressources fossiles, mais couvre également les autres ressources énergétiques.

Pour le cadre aluminium, la consommation électrique pour la production d'aluminium est le principal contributeur. Pour le cadre PVC, c'est l'utilisation de ressources fossiles qui participe principalement à l'impact. Enfin, pour le cadre bois, c'est l'énergie de la biomasse qui contribue le plus à l'impact.

#### ■ Pour l'indicateur CExD

Pour l'indicateur CExD, on observe le même positionnement relatif qu'avec l'indicateur CED. En effet, pour les 3 types de cadre de fenêtre, ce sont les ressources énergétiques (fossiles, nucléaire et biomasse) qui contribuent très majoritairement aux pertes d'exergie. De plus, le fait que les ratios d'exergie à énergie soient très proches de 1 expliquent la similitude des résultats observés.

#### ▷ Analyse des résultats pour les méthodes proposant des indicateurs ressources uniques (CML-ADP, El99-Damages Resources, CED, CExD)

Certaines méthodes ne proposent qu'un indicateur, portant sur un ensemble de ressources plus ou moins large, pour évaluer l'épuisement des ressources. C'est le cas pour les indicateurs CML-ADP, El99-Damages Resources et CExD. C'est également le cas pour l'indicateur CED qui peut être considéré comme un indicateur autonome visant à quantifier l'énergie primaire consommée par un système.

Si on analyse les résultats obtenus avec ces 4 indicateurs uniques, on constate que, malgré les différences méthodologiques qui sous-tendent chaque indicateur, le positionnement relatif des 3 cadres est similaire : le cadre en aluminium ressort comme le plus impactant, suivi par le cadre en PVC puis le cadre en bois. On peut également noter que l'écart d'impact entre le cadre en PVC et le cadre en aluminium est relativement homogène (écart

entre 12 et 25% selon les indicateurs). Par contre l'écart d'impact entre le cadre aluminium ou PVC et le cadre en bois est plus variable. L'écart est important pour les indicateurs CML-ADP et Elgg-Damages Ressources mais beaucoup plus réduit pour les indicateurs CED et CExD. Ceci vient du fait que les indicateurs CED et CExD prennent en compte la biomasse alors que les deux autres ne la considèrent pas.

▷ **Analyse des résultats pour les méthodes proposant des couples d'indicateurs ressources (CML-ADPelements et ADPfossil fuels, ReCiPe-Mineral Depletion Potential et Fossil Depletion Potential)**

Certaines méthodes proposent un couple d'indicateurs pour évaluer l'épuisement des ressources. C'est le cas pour les indicateurs ADPelements et ADPfossil fuels de CML et pour les indicateurs Mineral Depletion Potential et Fossil Depletion Potential de ReCiPe. Pour ces deux méthodes, les deux indicateurs portent respectivement sur les ressources minérales et sur les ressources fossiles.

Si on analyse les résultats obtenus avec le couple d'indicateurs de CML, on constate que le cadre en bois ressort comme le moins impactant pour les deux indicateurs. Par contre, le positionnement relatif des cadres en aluminium et en PVC s'inverse entre les deux indicateurs. Le cadre en aluminium est le moins impactant des deux pour l'indicateur ADPelements et le plus impactant pour l'indicateur ADPfossil fuels. Ainsi, pour les cadres en aluminium et en PVC, l'utilisation du couple d'indicateurs ADPelements et ADPfossil fuels ne permet pas de conclure sur le positionnement relatif des deux cadres.

On peut noter qu'on arrive à des conclusions différentes de celles observées lors de l'utilisation d'indicateurs uniques. En effet, avec les 4 indicateurs analysés au paragraphe précédent, le cadre en aluminium ressortait systématiquement comme le plus impactant.

Si on analyse maintenant les résultats obtenus avec le couple d'indicateurs de ReCiPe, on observe des positionnements très contrastés entre les 3 cadres. Concernant l'indicateur Mineral Depletion Potential, le cadre en aluminium présente le plus faible impact, suivi par le cadre en bois puis enfin le cadre en PVC qui présente un impact nettement supérieur. Concernant l'indicateur Fossil Depletion Potential, le cadre en aluminium ressort comme le plus impactant, suivi par le cadre en PVC puis le cadre en bois. Ainsi, l'utilisation du couple d'indicateurs de ReCiPe ne permet pas de conclure sur le positionnement relatif des trois cadres.

Ces analyses montrent que les tendances observées pour les indicateurs uniques sont en phase avec celles observées sur les indicateurs couvrant les ressources fossiles uniquement (CML-ADPfossil fuels et ReCiPe-Fossil Depletion Potential) mais sont très différentes de celles observées sur les indicateurs couvrant les ressources minérales uniquement (CML-ADPelements et ReCiPe-Mineral Depletion Potential). Ceci vient en partie du fait que, dans cette étude de cas, les ressources fossiles sont les principales sources de contribution aux indicateurs « uniques », c'est-à-dire couvrant à la fois les ressources fossiles et les ressources minérales, comme présenté au point précédent.

## 4.3.2 Enseignements de l'étude de cas n°2

Cette seconde étude de cas permet de tirer l'enseignement suivant.

- ▶ **Lors de la comparaison de produits ou services, il est important de réaliser des analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix du ou des indicateurs d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus.**

En effet, le choix de l'indicateur ou du couple d'indicateurs sélectionné pour évaluer l'épuisement des ressources peut avoir une influence sur la performance environnementale relative des différents produits comparés. Par exemple, dans l'étude de cas, les indicateurs CML-ADP, Elgg-Damages Resources, CED, CExD et le couple d'indicateurs CML-ADPelements et CML-ADPfossil fuels conduisent tous au résultat que le cadre de fenêtre en aluminium contribue plus à l'épuisement des ressources que le cadre de fenêtre en bois. Par contre, le couple d'indicateurs ReCiPe – Mineral depletion Potential et ReCiPe – Fossil depletion Potential conduit à des résultats contrastés (1 indicateur en faveur du cadre en aluminium et 1 indicateur en faveur du cadre en bois) qui empêchent de conclure sur la performance environnementale comparée des deux produits.

De plus, cette seconde étude de cas permet de confirmer les enseignements de la première étude de cas :

- Les indicateurs tenant compte des ressources fossiles uniquement (CML - ADPfossil fuels et ReCiPe – Fossil Depletion Potential) présentent des résultats quasi identiques. En effet, malgré des fondements au départ très différents, ces indicateurs se basent dans la pratique sur le contenu énergétique des ressources fossiles pour définir les facteurs de caractérisation propres à chaque ressource fossile.
- Dans les cas où les ressources fossiles constituent la principale source d'impact, les résultats des différents indicateurs tenant des ressources fossiles et d'autres ressources (ressources minérales, biomasse, ...) présentent des résultats très similaires à ceux obtenus avec des indicateurs portant uniquement sur les ressources fossiles. C'est notamment le cas pour les cadres de fenêtre en aluminium et en PVC qui présentent des impacts relatifs très proches pour les différents indicateurs suivants : CML - ADPfossil fuels, ReCiPe – Fossil Depletion Potential, CML-ADP, Elgg-Damages Resources, CED et CExD.
- Les contributions relatives des différentes ressources minérales aux indicateurs prenant en compte ces ressources sont assez variables. De ce fait, les indicateurs tenant compte des ressources minérales uniquement (CML – ADPelements et ReCiPe – Mineral depletion Potential) présentent de fortes variations en termes d'impacts relatifs entre produits.

## Chapitre 5 : Bonnes pratiques et recommandations

### 5.1 Bonnes pratiques et points d'attention lors de l'évaluation de l'épuisement des ressources en ACV

#### 5.1.1 Importance de la prise en compte des ressources couvertes par les indicateurs

La couverture des ressources prises en compte par les indicateurs est un point très important à considérer lors de l'analyse et l'interprétation des résultats.

Ainsi, lorsqu'on analyse les résultats obtenus avec un indicateur, il convient de bien avoir en tête les catégories de ressources prises en compte par l'indicateur et les différentes ressources couvertes au sein de chaque catégorie. En effet, les études de cas ont montré que **la variation des contributions aux impacts que l'on peut observer lors de la caractérisation d'un même inventaire avec différents indicateurs peut évidemment venir des modèles de calcul des facteurs de caractérisation mais aussi des catégories de ressources prises en compte et de l'éventuelle absence de facteurs de caractérisation pour des ressources données.**

De plus, il faut garder à l'esprit que les résultats obtenus avec un indicateur proposant des facteurs de caractérisation pour un faible nombre de ressources présentent des limites importantes, même si par ailleurs le modèle de calcul de cet indicateur est jugé robuste. Pour illustrer la variabilité du nombre de ressources couvertes par les indicateurs, on peut par exemple signaler que l'indicateur Mineral depletion Potential de la méthode ReCiPe ne couvre que 20 ressources minérales alors que les indicateurs ADPelement de CML et Abiotic stock resources d'EPS2000 couvrent respectivement 48 et 78 ressources minérales.

Par ailleurs, on peut noter que les ressources comme la biomasse, le vent ou le rayonnement solaire ne sont que rarement prises en compte dans les indicateurs. Or, même si ces ressources sont renouvelables, il peut y avoir un enjeu de disponibilité relatif à ces ressources. En effet, la biomasse est un fonds et non un flux, ce qui signifie qu'elle est renouvelable à échelle humaine mais que sa disponibilité peut réduire si elle n'est pas gérée durablement. Par ailleurs, même pour les ressources de type flux, qui sont renouvelées en permanence, on peut aussi considérer que la disponibilité de la ressource est, dans une certaine mesure, contrainte par les technologies disponibles à ce jour pour l'utiliser. Ainsi, l'utilisation d'indicateurs prenant en compte à la fois les ressources non-renouvelables et renouvelables peut s'avérer intéressante dès lors que l'on cherche à traduire l'enjeu relatif à la disponibilité des ressources et non seulement à l'épuisement des ressources.

Toutefois, il faut garder à l'esprit qu'à ce jour, seuls les indicateurs CED, CExD ou CEENE permettent de prendre en compte les ressources non-renouvelables et renouvelables

(fonds et flux). Or, comme expliqué au chapitre 3.1.2, ces indicateurs de catégorie 1 du JRC ne tiennent pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'utilisation des ressources. En ce sens, ces indicateurs traduisent une consommation de ressources mais ne traduisent pas réellement le dommage causé aux ressources.

Ces différents éléments doivent être pris en compte pour essayer d'orienter au mieux le choix des indicateurs à utiliser en fonction du champ de l'étude ACV.

Par exemple, on peut indiquer que l'indicateur Elgg-Damages Resources ne semble pas adapté pour évaluer les impacts de produits électroniques car il ne dispose pas de facteurs de caractérisation pour certains métaux rares (or et argent notamment). De plus, compte tenu du fait qu'il ne dispose pas de facteur de caractérisation pour l'uranium, il ne semble pas non plus adapté pour analyser des produits fabriqués en France ou utilisant de l'électricité dans un contexte français.

D'autre part, on peut mentionner toujours à titre d'exemple que la ressource cadmium n'est pas couverte par les indicateurs des méthodes Elgg, Impact 2002+ ou ReCiPe. Il est donc déconseillé d'utiliser ces indicateurs pour évaluer des produits électroniques utilisant des batteries de type Nickel-Cadmium.

Enfin, on peut indiquer que des ressources telles que le Niobium et le Rhenium, qui selon la Commission Européenne présentent une importance forte dans l'économie européenne, ne sont prises en compte que dans les indicateurs CML et EPS2000 [EuropeanCommission2010]. Il convient donc de privilégier l'un de ces deux indicateurs dès lors que ces ressources sont utilisées par le système étudié.

Par ailleurs, on peut indiquer qu'il peut être intéressant d'utiliser des indicateurs comme CED, CExD ou CEENE dès lors que l'on étudie des bioproduits ou biocarburants. En effet, même si ces indicateurs ne permettent pas d'évaluer le dommage causé aux ressources, ils permettent néanmoins d'offrir une vision d'ensemble sur l'utilisation des différents types de ressources et notamment des ressources renouvelables.

### **5.1.2 Importance des analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix du ou des indicateurs d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus**

Comme évoqué au paragraphe précédent, on peut observer de fortes variations des contributions aux impacts lorsque l'on analyse un même inventaire avec différents indicateurs.

En conséquence, lorsque l'on compare différents inventaires de produits ou services, le choix de l'indicateur sélectionné pour évaluer l'épuisement des ressources peut avoir une influence sur la performance environnementale relative des systèmes comparés.

**Ainsi, quel que soit l'objectif de l'étude (analyse d'un produit visant à identifier les principales sources d'impact ou comparaison de produits visant à identifier le produit**

de moindre impact), il est donc toujours important de réaliser des analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix de l'indicateur d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus.

### 5.1.3 Avantages et inconvénients des indicateurs couvrant différents types de ressources et des indicateurs ciblés par types de ressources

L'intérêt d'utiliser des indicateurs couvrant différents types de ressources ou des indicateurs ciblés par type de ressource est discutable. En effet, les deux catégories d'indicateurs présentent à la fois des avantages et des inconvénients qui sont présentés ci-dessous. C'est notamment en partant de ce constat que les recommandations proposées au paragraphe 5.4 ont été formulées.

Les indicateurs couvrant différents types de ressources permettent d'évaluer de manière agrégée l'épuisement des ressources associé à différents types de ressources. Ils permettent ainsi de mettre en perspective, sur la base d'un modèle donné, leurs contributions relatives.

Par exemple, l'indicateur ADP de CML propose d'évaluer l'épuisement des ressources en considérant à la fois les ressources fossiles et minérales. Le modèle proposé tient compte des réserves et du taux d'extraction des ressources et permet de mettre en perspective la rareté de l'ensemble des ressources fossiles et la rareté de différentes ressources minérales. L'indicateur CED propose quant à lui d'évaluer l'ensemble des ressources énergétiques (fossiles, nucléaires, biomasse, ...) en se basant sur le contenu énergétique des ressources. Enfin, les indicateurs CExD ou CEENE proposent par exemple d'évaluer les pertes d'exergie associés à l'extraction des différentes ressources minérales, fossiles, biomasse ou autres énergies renouvelables (énergie éolienne, énergie potentielle...).

Tous ces indicateurs présentent l'**avantage** de proposer :

- **un résultat unique** qui peut être facilement utilisé pour une prise de décision (démarche d'éco-conception, comparaison de produits dans le cadre d'une démarche d'achat éco-responsables, ...),
- **et une estimation de la contribution relative des ressources.**

Néanmoins, ces indicateurs présentent certaines **limites** dans la mesure où on peut considérer qu'il n'est pas possible d'évaluer en même temps et de comparer des ressources :

- **qui n'appartiennent pas à la même catégorie de ressources,**
- **et/ou qui ne présentent pas les mêmes fonctionnalités.**

En ce qui concerne la question de la catégorie de ressources, les avantages et inconvénients des indicateurs couvrant différents types de ressources sont notamment bien décrits par les auteurs de la méthode CExD. En effet, dans [Bösch2007], les auteurs indiquent qu'une des forces de l'indicateur CExD est qu'il couvre une très grande variété de

ressources en se basant sur une même grandeur physique pour toutes les ressources. Néanmoins, les auteurs indiquent également que même si l'indicateur présente un intérêt particulier en tant qu'indicateur unique, il est recommandé d'analyser les pertes d'exergie de manière séparée pour les différentes catégories de ressources (ressources fossiles, minérales, biomasse, éolien, ...). En effet, les auteurs indiquent que dans le cas des énergies renouvelables (biomasse, vent, photovoltaïque, ...), l'exergie perdue provient du rayonnement solaire et est donc extérieure au système terrestre. A l'inverse, dans le cas des ressources minérales et fossiles, l'exergie perdue provient du système terrestre. Ils recommandent donc de ne pas agréger les pertes d'exergie en lien avec les ressources renouvelables et non renouvelables compte tenu de la différence de nature de l'exergie pour ces ressources. Ces éléments, présentés dans le cas de l'indicateur CExD, traduisent de manière plus générale le fait qu'il est délicat d'évaluer en même temps l'utilisation de ressources renouvelables et non renouvelables et d'établir une pondération pertinente entre ces deux types de ressources, qui participent à des problématiques environnementales distinctes.

En ce qui concerne la question de la fonctionnalité des ressources, on peut indiquer que le fait d'utiliser des indicateurs couvrant différents types de ressource revient à considérer implicitement que toutes les ressources couvertes sont équivalentes et interchangeables. Or, on peut considérer que les consommations de ressources ayant des fonctionnalités différentes contribuent à des dommages différents et doivent donc être traités avec des indicateurs de ressources différents. Ainsi, on peut mentionner que le fait d'utiliser des indicateurs ciblés par types de ressources est plus en phase avec la notion de « valeur fonctionnelle des ressources » qui a été définie au départ comme un fondement des indicateurs d'épuisement des ressources.

C'est notamment cette question de la fonctionnalité des ressources qui a poussé les auteurs<sup>30</sup> de la méthode CML à segmenter en 2009 l'indicateur ADP en deux indicateurs ADPelements et ADPfossilfuels portant respectivement sur les ressources minérales et fossiles.

Mais là encore, on peut indiquer que l'indicateur ADP et le couple d'indicateurs ADPelements et ADPfossilfuels présentent tous deux des avantages et des inconvénients.

En effet, le fait que l'indicateur CML-ADP soit souvent largement dominé par la contribution des ressources fossiles peut avoir tendance à focaliser l'attention sur ce type de ressource et à masquer les enjeux associés aux ressources minérales. Or, il s'agit de problématiques environnementales distinctes et le fait de préserver les ressources fossiles ne peut pas compenser la baisse de disponibilité des ressources minérales pour les générations futures. C'est pourquoi le fait d'utiliser les indicateurs ADPelements et ADPfossil fuels permet dans une certaine mesure de mieux prendre en compte les différents enjeux et de bien identifier les principales sources d'impacts de chaque catégorie de ressource.

---

<sup>30</sup> Modification qui a été effectuée suite aux recommandations formulées dans [VanOers2002]

Par contre, on peut indiquer que dans le cas de l'utilisation d'indicateurs séparés, les possibilités d'analyse concernant les ressources fossiles peuvent être assez limitées si les facteurs de caractérisation des différentes ressources fossiles sont extrapolés à partir d'une référence unique. Par exemple, pour CML, le fait que la méthode considère que les ressources fossiles sont interchangeables et constituent une réserve globale de ressources fossiles a pour conséquence que l'indicateur ADP<sub>fossil fuels</sub> ne permet pas de prendre en compte la rareté spécifique de chaque ressource. Ainsi, l'indicateur ADP<sub>fossil fuels</sub> se ramène à un indicateur quantifiant uniquement l'extraction des ressources fossiles selon leur contenu énergétique. En ce sens, il ne répond donc plus à l'objectif visé au départ par les indicateurs CML, à savoir évaluer l'impact d'une extraction en fonction de la rareté de la ressource.

Enfin, pour finir sur l'exemple de l'indicateur CML, on peut mentionner que, malgré certains avantages apportés par le couple d'indicateurs ADP<sub>elements</sub> et ADP<sub>fossil fuels</sub>, le JRC a préconisé en 2012 un retour en arrière et l'utilisation de l'indicateur ADP qui agrège les ressources fossiles et minérales.

**Ainsi, les éléments présentés ci-dessus et illustrés à travers les exemples de l'indicateur CExD et des indicateurs de la méthode CML montrent bien que les différents types d'indicateurs présentent à la fois des avantages et des inconvénients et qu'il n'y a pas d'avis tranché concernant l'utilisation d'indicateurs couvrant différents types de ressources ou l'utilisation d'indicateurs ciblés par types de ressources.**

#### 5.1.4 Points d'attention concernant l'évaluation des consommations de ressources énergétiques

Les ressources énergétiques font souvent l'objet d'une attention particulière en ACV.

Pour analyser l'utilisation de ressources énergétiques d'un système, il est courant d'utiliser des indicateurs de flux basés sur le contenu énergétique des ressources.

Néanmoins, dans l'article [Arvidsson2012], l'auteur met en avant les problématiques suivantes concernant ces indicateurs :

- Les indicateurs basés sur le contenu énergétique sont très variables. Par exemple, certains indicateurs prennent en compte les ressources renouvelables alors que d'autres ne les considèrent pas. Certains indicateurs considèrent l'énergie matière contenue dans les produits alors que d'autres indicateurs sont exclusivement axés sur les ressources énergétiques utilisés dans les procédés. Enfin, certains indicateurs sont basés sur des consommations d'énergie finale et non sur des flux d'énergie primaire (ce qui n'est pas conforme à la logique ACV).
- Le choix de l'indicateur est rarement discuté ou justifié.
- L'indicateur utilisé est souvent mal décrit, ce qui rend difficile l'analyse et l'interprétation des résultats d'une étude et ce qui entraîne des limites importantes dès lors que l'on souhaite comparer des études.

Sur la base de ces constats, on peut recommander les bonnes pratiques suivantes.

**De façon à évaluer l'ensemble des ressources énergétiques utilisées par un système, il peut être intéressant d'utiliser l'indicateur CED.** Cet indicateur :

- est par définition basé sur les flux d'énergie primaire,
- prend à la fois en compte l'énergie matière et procédé,
- et couvre à la fois les ressources non-renouvelables et renouvelables.

De plus, compte tenu du fait que la définition de cet indicateur n'est pas très précise, il est recommandé de bien décrire :

- les types de ressources couvertes par l'indicateur utilisé (fossiles, nucléaires, biomasse, éolien, ...),
- le mode d'établissement des facteurs de caractérisation (par exemple s'ils sont basés sur le PCI ou le PCS des ressources).

Enfin, compte tenu des avantages et inconvénients des indicateurs couvrant différents types de ressources ou différents usages des ressources (voir paragraphe précédent), il est recommandé de présenter les résultats obtenus de façon agrégée mais aussi de façon segmentée en distinguant notamment les énergies renouvelables et non-renouvelables et les énergies matières et procédés. Ceci permettra une meilleure analyse et interprétation des résultats, en particulier dans le cas de comparaisons entre systèmes.

Toutefois, il faut garder à l'esprit que l'indicateur CED est un indicateur de catégorie 1 du JRC et qu'il ne tient donc pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'utilisation des ressources. En ce sens, cet indicateur offre une vision globale des ressources utilisées par un système mais ne traduit pas le dommage causé par l'utilisation des ressources. **Il est donc pertinent d'utiliser l'indicateur CED comme un indicateur de suivi de consommation des ressources énergétiques tout en analysant par ailleurs d'autres indicateurs permettant d'évaluer l'effet sur les ressources (comme par exemple les indicateurs CML, ReCiPe, EI99...).**

Par ailleurs, sur la base des enseignements issus des études de cas, on peut aussi rappeler ici plusieurs points importants concernant d'autres indicateurs couvrant les ressources énergétiques, et en particulier les ressources fossiles.

Si l'on utilise l'indicateur agrégé **CML-ADP** pour évaluer les impacts liés à l'utilisation de ressources, il faut être conscient que **le modèle ne traduit pas l'épuisement spécifique de chaque ressource fossile individuelle, mais l'épuisement global de l'ensemble des ressources fossiles par rapport aux ressources minérales.**

**En ce qui concerne les indicateurs CML-ADP fossil fuels et ReCiPe- Fossil Depletion Potential, il faut garder à l'esprit que les facteurs de caractérisation des ressources fossiles sont dérivées d'un facteur unique sur la base du contenu énergétique de chaque ressource.** Ainsi, même s'ils sont respectivement présentés au départ comme des indicateurs de catégorie 2 (évaluant l'impact d'une extraction en fonction de la rareté de la ressource) et de catégorie 4 (évaluant les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future), ces 2 indicateurs se ramènent à des indicateurs de catégorie 1

(évaluant l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource) et présentent des contributions relatives pour les différentes ressources identiques à celle obtenue avec l'indicateur CED.

Pour ce qui est des indicateurs CExD ou CEENE, il s'avère que l'exergie d'une ressource énergétique est très proche de son contenu énergétique. De ce fait, les résultats obtenus pour les ressources fossiles avec ces indicateurs sont également très proches de ceux obtenus avec l'indicateur CED.

Enfin, parmi les indicateurs analysés dans cette étude, **seuls les indicateurs Elgg-Damage Resources, EDIP et EPS2000 présentent des facteurs propres aux différentes ressources fossiles qui ne soient pas basés sur le contenu énergétique.** Ainsi, ces indicateurs présentent l'avantage d'offrir un éclairage différent pour la comparaison des ressources fossiles entre elles.

### 5.1.5 Bonnes pratiques concernant l'évaluation de l'enjeu environnemental associé aux ressources

Lors d'une ACV de produits ou services, il peut être intéressant d'évaluer si l'épuisement des ressources ressort comme un enjeu environnemental de premier ordre pour les systèmes étudiés.

**En ce qui concerne les ressources fossiles et minérales, on peut pour cela effectuer une démarche de normation** sur les résultats obtenus avec plusieurs jeux d'indicateurs couvrant différentes catégories d'impact afin de juger si l'épuisement de ces ressources ressort ou non comme un enjeu prioritaire par rapport aux autres catégories d'impact.

Pour ce faire, on peut par exemple utiliser les jeux d'indicateurs des méthodes CML, ReCiPe, Elgg ou Impact 2002+, qui couvrent différentes catégories d'impact et qui proposent des facteurs de normation.

En fonction des méthodes et indicateurs choisis, la démarche de normation peut être effectuée :

- à un niveau midpoint pour voir si le ou les indicateurs midpoint d'épuisement des ressources présentent un résultat normé significatif ou non par rapport aux résultats normés d'autres indicateurs midpoint comme le changement climatique, la production d'ozone photochimique ou autre,
- à un niveau endpoint pour voir si le dommage évalué sur le domaine de protection « ressources naturelles » présente un résultat normé significatif ou non par rapport aux résultats normés de dommage sur les domaines de protection « environnement naturel » et « santé humaine ».

Il est proposé de réaliser cette démarche de normation pour différentes méthodes ou jeux d'indicateurs car il ressort de cette étude que la couverture des ressources fossiles et minérales prises en compte par les différents indicateurs sur les ressources est très variable. Ainsi, le fait de réaliser cette démarche de normation sur les résultats issus d'une seule méthode (dans laquelle par exemple l'indicateur d'épuisement des ressources ne

proposerait pas de facteur de caractérisation pour une substance donnée utilisée par le produit étudié) pourrait biaiser l'analyse.

**En ce qui concerne les ressources renouvelables (biomasse et autres énergies renouvelables), il n'est par contre pas possible d'évaluer l'ampleur de l'enjeu à l'aide d'une démarche de normation.** En effet, les indicateurs d'épuisement des ressources proposés dans la plupart des méthodes couvrant différentes catégories d'impact ne couvrent pas ces ressources. De plus, les indicateurs tels que CED, CExD ou CEENE qui prennent en compte ces ressources ne proposent pas de facteurs de normation. Ainsi, en ce qui concerne les ressources renouvelables, il convient donc de se baser sur une approche qualitative basée sur l'analyse des flux entrants pour évaluer si le produit étudié est susceptible de présenter un enjeu spécifique en termes d'utilisation de ressources renouvelables.

Ensuite, si la démarche de normation concernant les ressources fossiles et minérales et l'évaluation qualitative concernant les ressources renouvelables conduisent à la conclusion que les ressources constituent ou peuvent constituer en enjeu environnemental pour le produit étudié, il convient d'analyser de façon approfondie cette catégorie d'impact et d'identifier les principales sources d'impact.

## 5.1.6 Intérêt de certaines méthodes par rapport au type de parties prenantes et à l'horizon temporel considéré

Les méthodes ReCiPe et Elgg proposent différents facteurs de caractérisation<sup>31</sup> en fonction de trois perspectives culturelles : « Egalitaire » (E), « Hiérarchiste » (H) et « Individualiste » (I). Ces perspectives culturelles 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 prennent en compte différentes capacités de la société à s'adapter aux conséquences des impacts.

Dans le cas de la méthode Elgg, les perspectives culturelles servent à traduire les différents scénarios possibles pour le remplacement des ressources fossiles par des ressources non conventionnelles. Dans le cas de la méthode ReCiPe, la différenciation entre perspectives culturelles se situe au niveau du calcul de l'augmentation marginale du coût d'extraction des ressources fossiles.

Ainsi, ces méthodes présentent l'intérêt de pouvoir être adaptées en fonction du type de parties prenantes de l'étude (commanditaire, public visé, ...). Pour cela, on peut par exemple recommander d'utiliser :

- la perspective « **Egalitaire** » lorsque l'on s'adresse à des **pouvoirs publics ou à des ONG (vision long-terme)**,

---

<sup>31</sup> Il faut mentionner que l'adaptation des facteurs de caractérisation en fonction de la perspective culturelle est partielle. En effet, dans le cas d'Elgg, l'adaptation des facteurs de caractérisation de l'indicateur Damages Resources ne concerne que les ressources fossiles. Dans le cas de la méthode ReCiPe, l'adaptation des facteurs de caractérisation ne concerne que l'indicateur endpoint Fossil depletion Potential.

- la perspective « **Hierarchiste** » lorsque l'on s'adresse à des **citoyens (projection sur quelques générations)**,
- la perspective « **Individualiste** » lorsque l'on s'adresse à des **entreprises (vision court terme)**.

Le choix de la perspective culturelle peut avoir une influence forte sur les résultats obtenus. En effet, on peut par exemple citer le fait que les facteurs de caractérisation des ressources fossiles de l'indicateur Elgg sont tous nuls dans le cas de la perspective « Individualiste ». Dans ce cas extrême, l'exploitation des ressources fossiles n'est pas considérée comme un enjeu et un scénario « business as usual » est pris en compte. En conséquence, aucune ressource de substitution n'est considérée pour les ressources fossiles et les facteurs de caractérisation sont tous nuls.

Par ailleurs, on peut mentionner que d'autres méthodes peuvent être partiellement adaptées à l'horizon temporel considéré. C'est notamment le cas de la méthode CML qui propose des facteurs de caractérisation pour différents types de réserve. Ainsi, **dans le cas d'une étude ACV avec une vision long-terme, on privilégiera les facteurs de caractérisation calculés à partir des réserves ultimes. Dans le cas d'une étude ACV avec une vision plus court terme, on privilégiera les facteurs de caractérisation calculés à partir des bases de réserves ou des réserves économiques.**

### 5.1.7 Intérêt de certaines méthodes en matière de communication

Lors de l'évaluation par le JRC des différentes méthodes de caractérisation (voir 3.3.4), le critère « degré d'acceptation et facilité à communiquer dans un contexte business et politique » a été pris en compte. Ce critère couvre les questions suivantes : La méthode a-t-elle été approuvée par un organisme reconnu ? Les principes sur lesquels repose cette méthode sont-ils simples ou complexes ? Est-il facile de communiquer sur cette méthode ?

Pour ce critère, **les indicateurs d'épuisement des ressources les mieux notés sont ceux des méthodes CML et EDIP**, qui sont tous deux des indicateurs dont l'objectif est d'évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource (Catégorie 2 du JRC).

Par ailleurs, l'indicateur ADP de CML étant le mieux noté pour l'ensemble des critères, on peut donc recommander de communiquer avec cet indicateur. On peut toutefois souligner que l'unité utilisée par cet indicateur (kilogramme antimoine équivalent) est peu parlante. Pour pallier ce problème, on peut proposer d'utiliser, en complément de l'unité par défaut, une équivalence selon une ressource plus parlante en fonction du public visé (pétrole, cuivre...).

Par ailleurs, on peut mentionner que les indicateurs se basant sur une grandeur intrinsèque à la ressource (catégorie 1 du JRC) proposent des facteurs de caractérisation relativement robustes. Ainsi, bien qu'ils ne caractérisent pas l'épuisement des ressources en tant que tel, il peut être intéressant de les communiquer du fait de leur plus faible niveau d'incertitude. Parmi ces indicateurs, **l'indicateur CED offre en outre l'avantage d'être facilement compréhensible, dans la mesure où il s'agit d'un bilan énergétique.**

On peut toutefois souligner un point d'attention lors de l'utilisation de l'indicateur CED. Cet indicateur peut couvrir tous les types d'énergie utilisés par le système étudié et peut par exemple donner un résultat élevé même si l'on utilise uniquement des ressources renouvelables, pour lesquelles l'enjeu est différent de celui des ressources non-renouvelables. En conséquence, une bonne pratique liée à la communication de l'indicateur CED est de communiquer les résultats pour les différents types d'énergies utilisés par le système, ou a minima la répartition entre énergie renouvelables et non-renouvelables.

Enfin, on peut noter que les indicateurs CML et CED sont souvent retenus dans les programmes de déclaration environnementale. De plus, lorsque l'indicateur CED est préconisé dans un programme, la séparation entre énergie renouvelable et non-renouvelable est généralement exigée, ce qui confirme les bonnes pratiques énoncées ci-dessus.

### **5.1.8 Influence de la fin de vie et notamment du mode de prise en compte du recyclage lors de l'établissement de l'inventaire**

La façon dont un produit est géré en fin de vie peut avoir une influence forte sur son impact en termes d'épuisement des ressources. En effet, le fait qu'un produit puisse être envoyé en filière de recyclage peut permettre de produire de la matière secondaire qui vient se substituer à l'utilisation de matière vierge, limitant ainsi l'extraction de ressources naturelles.

Par ailleurs, la prise en compte du recyclage, qui est un procédé multifonctionnel, peut être réalisée de différentes manières. En effet, les impacts et bénéfices d'une filière de recyclage peuvent être alloués de façons différentes entre le produit amont qui fournit de la matière recyclée et le produit aval qui utilise cette matière recyclée.

Sur la base de ces éléments qui concernent l'établissement de l'inventaire, on peut donc formuler les bonnes pratiques suivantes :

- **L'évaluation de l'épuisement des ressources doit être effectuée sur le cycle de vie complet d'un produit** de façon à bien pouvoir prendre en compte les éventuelles boucles de recyclage des matériaux constituant le produit.
- Il convient de réaliser des analyses de sensibilité pour **évaluer l'influence de la méthode de prise en compte du recyclage** sur les résultats obtenus en termes d'épuisement des ressources.

## 5.2 Recommandations du JRC sur les indicateurs d'épuisement des ressources à privilégier

Suite au travail d'évaluation des méthodes et indicateurs réalisé dans [ILCD2010] et [ILCD2011] (voir paragraphe 3.3.4), le JRC a émis des recommandations sur les indicateurs à privilégier dans [ILCD2012].

Pour cela, le JRC a identifié pour chaque catégorie d'impact les indicateurs considérés comme les plus aboutis et a proposé une évaluation de ces indicateurs selon 4 niveaux :

- Niveau I : indicateur recommandé et satisfaisant,
- Niveau II : indicateur recommandé mais nécessitant des améliorations,
- Niveau III : indicateur recommandé, mais à appliquer avec précaution,
- Niveau Interim : indicateur identifié comme le plus prometteur au sein de sa catégorie d'impact, mais pas suffisamment développé pour être recommandé.

En ce qui concerne l'épuisement des ressources, le JRC a émis des recommandations pour différents types d'indicateurs. Ces recommandations sont présentées ci-dessous.

### ► Indicateurs visant à évaluer l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource (catégorie 1 du JRC)

Les indicateurs basés sur l'exergie sont considérés par le JRC comme les indicateurs les plus matures au sein de cette catégorie. En particulier, la méthode CEENE est présentée comme la plus pertinente pour évaluer la perte d'exergie. Néanmoins, dans le cadre de référence de l'ILCD [ILCD2010-2], le JRC recommande le fait que les indicateurs ressources incluent dans leur définition un élément traduisant la rareté des ressources, ce qui n'est pas le cas pour les indicateurs de cette catégorie. En conséquence, aucune recommandation n'est faite par le JRC pour les indicateurs de cette catégorie.

### ► Indicateurs visant à évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource (catégorie 2 du JRC)

Pour cette catégorie d'indicateur, le JRC recommande la méthode CML. La recommandation est de Niveau II, c'est-à-dire que le JRC considère que des améliorations sont nécessaires pour que l'indicateur soit satisfaisant. La méthode présente l'avantage de couvrir la plupart des matériaux et substances identifiées comme critique par le groupe de travail de la commission Européenne [EuropeanCommission2010]. Le JRC recommande d'utiliser les facteurs développés par [VanOers2002] tenant compte de la base de réserves et non des réserves ultimes proposés par défaut par la méthode. Par ailleurs on peut mentionner le fait le JRC n'applique pas la recommandation de [VanOers2002] de distinguer l'ADP éléments de l'ADP fossil fuels, et les agrège ainsi au sein d'un seul indicateur ADP.

► **Indicateurs visant à évaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future (Catégorie 4 du JRC)**

Le JRC considère qu'aucune des méthodes disponibles à ce jour n'est suffisamment mature pour être recommandée. Néanmoins, le JRC propose de retenir les indicateurs endpoint de la méthode ReCiPe avec un niveau de recommandation de type « Interim ». Un avantage souligné par le JRC est que l'indicateur des ressources minérales adopte une approche par gisement, reflétant ainsi davantage la réalité des différents coproduits miniers qu'une approche par élément. Par ailleurs, le fait d'intégrer les coûts des minéraux dans le modèle est, selon le JRC, une source importante d'incertitude du fait de leur variabilité.

► **Synthèse des avis et recommandations du JRC**

En conclusion, les avis et recommandations du JRC qui sont résumés dans le tableau ci-dessous mettent en avant les éléments suivants :

- Il existe des indicateurs de ressources très différents, qui présentent des avantages et inconvénients.
- Les indicateurs visant à évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource (catégorie 2 du JRC) ou visant à évaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future (Catégorie 4 du JRC) sont à privilégier par rapport aux indicateurs visant à évaluer l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource (catégorie 1 du JRC).
- Parmi les indicateurs disponibles à ce jour, on dispose d'indicateurs plus matures pour évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource que pour évaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future. Ces derniers indicateurs doivent faire l'objet d'importants travaux de développement avant de pouvoir être recommandés.
- Aucun indicateur disponible à ce jour n'est jugé satisfaisant.

**Tableau 10 : Synthèse des recommandations du JRC concernant les indicateurs ressources**

Type d'indicateurs	Indicateur recommandé	Niveau de recommandation	Commentaire
Indicateurs visant à évaluer l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource (catégorie 1 du JRC)	x	x	Indicateurs ne prenant pas en compte la rareté des ressources donc non recommandés par le JRC
Indicateurs visant à évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource (catégorie 2 du JRC)	Indicateur ADP de CML	Niveau II	Recommandation d'utiliser les facteurs de caractérisation basés sur les bases de réserves et non sur les réserves ultimes Recommandation d'utiliser l'indicateur ADP agrégé proposé initialement dans la méthode et non les deux indicateurs ADPéléments et ADPfossil qui ont été proposés par la suite.
Indicateurs visant à évaluer les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future (Catégorie 4 du JRC)	Indicateurs Endpoint de ReCiPe	Niveau Interim	Méthode à privilégier de façon provisoire mais jugée non suffisamment mature pour être recommandée sur le long terme

### 5.3 Cas particulier des études ACV réalisées dans le cadre d'un programme de déclaration environnemental de type III

Certaines études ACV ont pour objectif de réaliser un support de communication (FDES, Affichage environnemental, ...) qui s'inscrit dans le cadre d'un programme de déclaration environnemental de type III (ISO 14025).

Dans ce cas, les études ACV doivent être réalisées en conformité avec un référentiel (ou Product category Rules) qui indique de façon détaillée la méthodologie à mettre en œuvre.

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

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

Ce respect du référentiel garantit ensuite que tous les produits faisant l'objet d'une déclaration environnementale sont évalués sur une même base.

Les indicateurs d'épuisement des ressources exigés dans les référentiels les plus courants sont présentés ci-dessous.

Tableau 11 : Indicateurs d'épuisement des ressources exigés dans les principaux référentiels (Product Category Rules) concernant les déclarations environnementales sur les produits

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

<sup>32</sup> Il y a très peu de publications disponibles sur l'indicateur RMD et son mode d'obtention. Le programme PEP Ecopassport fournit les facteurs de caractérisation de l'indicateur.

## 5.4 Synthèse et proposition de méthodologie générale pour évaluer l'épuisement des ressources en ACV

Sur la base des informations collectées dans le cadre de cette étude, il ressort qu'il est difficile d'énoncer des recommandations spécifiques sur les indicateurs d'épuisement des ressources à privilégier ou sur des méthodologies à mettre en œuvre en fonction du type d'étude et de l'objectif visé.

Néanmoins, sur la base des enseignements tirés des études de cas et des bonnes pratiques identifiées et présentées dans les paragraphes précédents, on peut proposer une méthodologie générale pour traiter la problématique de l'épuisement des ressources en ACV.

L'approche proposée est une démarche en 4 temps qui repose sur les bases suivantes.

D'une part, l'approche proposée tient compte du fait que la couverture des ressources prises en compte par les indicateurs est très variable. Il convient donc d'orienter au mieux le choix des indicateurs à utiliser en fonction des ressources consommées par le système étudié (voir paragraphe 5.1.1).

D'autre part, cette approche est basée sur le fait que la prise en compte de différents types de ressources au sein d'un même indicateur présente à la fois des avantages et des inconvénients (voir paragraphe 5.1.3). Ainsi, l'approche proposée consiste à combiner l'utilisation d'indicateurs couvrant différents types de ressources et d'indicateurs ciblés par types de ressource de façon à tirer le meilleur profit de ces différents outils d'analyse.

Enfin, cette approche est basée sur le fait qu'il est important de réaliser des analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix de l'indicateur d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus (voir paragraphe 5.1.2).

L'approche proposée est présentée dans le schéma ci-dessous et détaillée dans les paragraphes suivants.

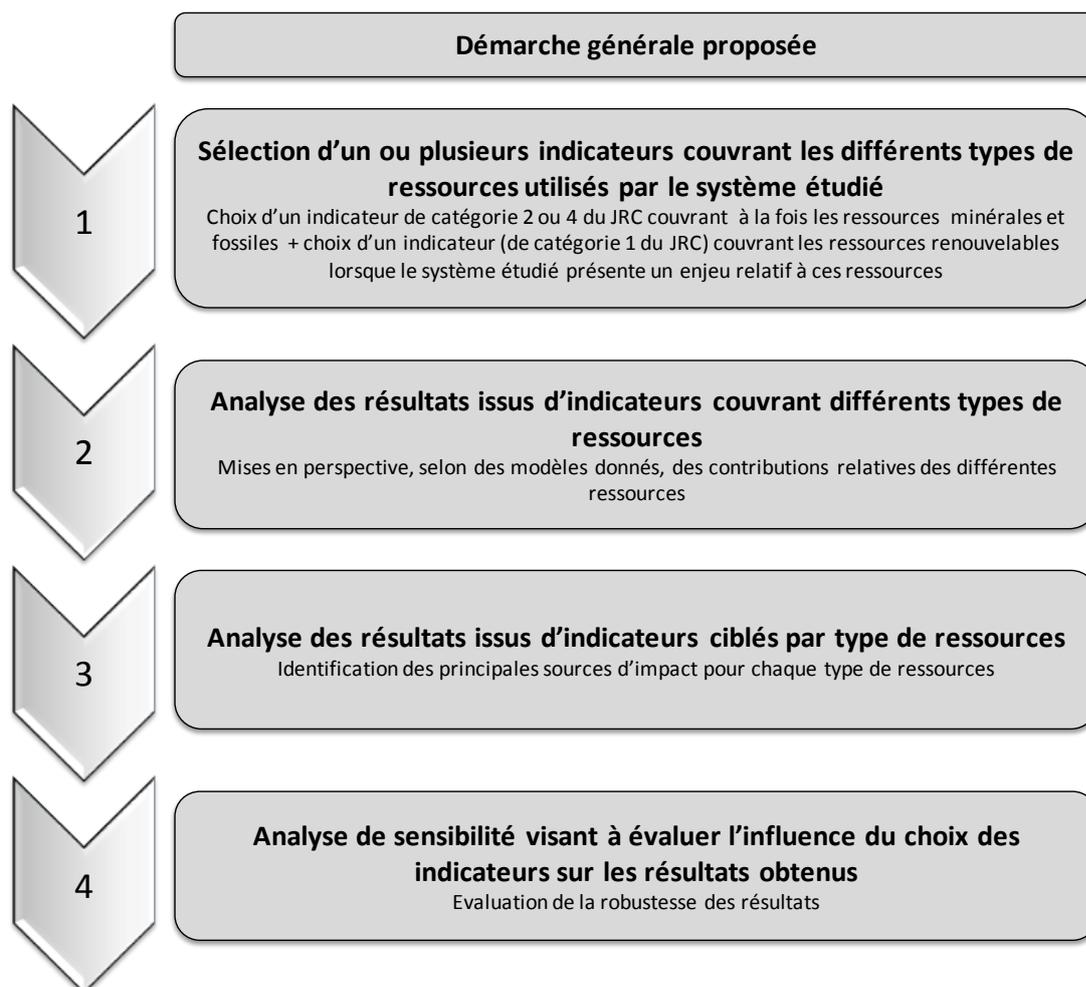


Figure 28 : Démarche proposée pour évaluer l'épuisement des ressources en ACV

► **Analyse de l'inventaire et sélection d'un ou plusieurs indicateurs couvrant les différents types de ressources utilisés par le système étudié**

La première étape consiste à analyser l'inventaire du système étudié de façon à bien identifier les différentes ressources consommées par le système. Ensuite, il convient de sélectionner un ou plusieurs indicateurs permettant de couvrir au mieux ces ressources.

Lors de cette étape, il faut garder à l'esprit que les indicateurs existants sont pour la plupart focalisés sur les ressources non renouvelables (ressources minérales et fossiles) et que seuls des indicateurs de catégorie 1 du JRC, tels que CED, CExD ou CEENE, permettent de couvrir les ressources renouvelables. Néanmoins, il s'avère que ces indicateurs de catégorie 1 qui évaluent l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource ne tiennent pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'utilisation des ressources. En ce sens, ils ne traduisent donc pas réellement le dommage causé aux ressources.

Compte tenu de cela, il est conseillé de sélectionner en premier lieu un indicateur :

- de catégorie 2 du JRC (qui évalue l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource) ou de catégorie 4 du JRC (qui évalue les conséquences d'une extraction actuelle sur l'extraction future),

## « Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

- prenant à la fois en compte les ressources minérales et fossiles de façon à pouvoir analyser la contribution relative de ces différentes ressources,
- et couvrant le maximum de ressources utilisées par le système.

En ce qui concerne la couverture des ressources, l'attention doit être principalement portée sur les ressources minérales car ce sont les ressources pour lesquelles on observe les plus grandes différences de couverture entre les indicateurs.

En plus de la couverture des ressources, le choix de l'indicateur peut également être influencé par d'autres aspects tels que :

- le souhait d'évaluer les impacts environnementaux à un niveau midpoint ou endpoint<sup>33</sup>,
- le type de parties prenantes de l'étude et l'horizon temporel considéré (voir paragraphe 5.1.6),
- les objectifs de l'étude en matière de communication (voir paragraphe 5.1.7).

Cette étape aboutit à la sélection d'un indicateur comme par exemple CML-ADP, El99-Damages Resources, EDIP-Resource consumption, Impact 2002+-Resource ou la somme des indicateurs endpoint de la méthode Recipe (qui sont tous deux exprimés dans une même unité). On peut notamment indiquer que le JRC recommande **la méthode CML pour une analyse au niveau midpoint et la méthode ReCiPe pour une analyse au niveau endpoint**. Les indicateurs de ces méthodes peuvent donc être utilisés en priorité s'ils couvrent les ressources utilisées par le système.

Par ailleurs, dans le cas de produits ayant recours à la biomasse et/ou à d'autres ressources renouvelables, il est conseillé de sélectionner en complément un indicateur couvrant ces ressources de type fonds et flux comme les indicateurs CED, CExD ou CEENE. En effet, même si ces indicateurs ne permettent pas d'évaluer le dommage causé aux ressources, ils permettent néanmoins d'offrir une vision d'ensemble sur les différents types de ressources utilisés par le système. **On peut notamment recommander d'utiliser l'indicateur CED**, qui est plus simple à appréhender que les indicateurs basés sur l'exergie et qui permettent de couvrir les mêmes ressources en ce qui concerne les ressources renouvelables.

Enfin, on indique également que dans le cas où une ressource utilisée par le système n'est prise en compte dans aucun indicateur disponible, il convient de conserver cette consommation de ressource comme un indicateur de flux afin de ne pas l'exclure de l'évaluation environnementale.

### ► **Analyse des résultats issus d'un ou plusieurs indicateurs couvrant différents types de ressources**

La seconde étape consiste à analyser les résultats issus de l'indicateur couvrant les ressources minérales et fossiles sélectionné. Cette analyse :

---

<sup>33</sup> De manière générale, les indicateurs midpoint proposés dans les méthodes sont des indicateurs de catégorie 2 du JRC et les indicateurs endpoint sont des indicateurs de catégorie 4 du JRC.

- permet d'évaluer, sur la base d'un modèle donné, la contribution relative des ressources fossiles par rapport aux ressources minérales,
- présente l'avantage de proposer un résultat unique qui peut être facilement utilisé pour une prise de décision (démarche d'éco-conception, comparaison de produits dans le cadre d'une démarche d'achat éco-responsables, ...).

Dans le cas de produits ayant recours à la biomasse et/ou à d'autres ressources renouvelables, cette étape peut être complétée par l'analyse des résultats de l'indicateur sélectionné couvrant ces ressources. Les résultats de cet indicateur apportent une vision complémentaire et permettent de traduire l'enjeu global relatif à l'utilisation des ressources et non seulement à l'épuisement des ressources.

Néanmoins, il faut être conscient des limites associées à tous ces indicateurs couvrant différents types de ressources et notamment être conscient du fait qu'ils considèrent implicitement que toutes les ressources couvertes sont équivalentes et interchangeables. Or, on peut considérer que les consommations de ressources ayant des fonctionnalités différentes contribuent à des dommages différents et doivent donc être traités avec des indicateurs différents. Il en est de même pour les ressources non-renouvelables et renouvelables, qui peuvent être considérées comme participant à des problématiques environnementales différentes.

C'est pourquoi, en complément des résultats globaux issus d'un ou plusieurs indicateurs couvrant différents types de ressources, il est pertinent d'analyser les résultats distincts obtenus pour chaque catégorie de ressource.

### ► **Analyse des résultats issus d'indicateurs ciblés par type de ressources**

La troisième étape consiste à segmenter les indicateurs précédemment utilisés en sous-indicateurs ciblés par catégorie de ressource, de façon à pouvoir analyser chacune de ces catégories de façon distincte.

Dans le cas où l'on a utilisé précédemment l'indicateur CML-ADP ou la somme des indicateurs endpoint de ReCiPe, on peut alors utiliser respectivement le couple d'indicateurs ADP<sub>fossil fuels</sub> et ADP<sub>elements</sub> de CML ou le couple d'indicateurs endpoint de ReCiPe. Mais on peut également analyser de façon séparée les contributions des ressources fossiles et minérales des autres indicateurs, même s'ils ne sont pas forcément proposés sous forme d'indicateurs spécifiques par les auteurs.

Enfin, on peut aussi segmenter par type de ressources les résultats d'indicateurs tels que CED, CExD ou CEENE, en distinguant en particulier les ressources renouvelables et non-renouvelables.

L'utilisation de tels indicateurs ciblés permet d'identifier les principales sources d'impact pour chacune des catégories de ressources analysées. En effet, alors que les indicateurs couvrant différents types de ressources peuvent masquer certaines contributions, cette analyse séparée permet de bien considérer la diversité des enjeux environnementaux associés aux ressources.

De plus, dans le cas d'études d'aide à la décision avec une comparaison de produits, cette approche permet d'avoir une analyse plus fine et d'essayer de comparer au mieux les différents enjeux environnementaux. Néanmoins, il est vrai que cela peut complexifier l'analyse et conduire à des résultats divergents par types de ressources, qui peuvent rendre difficiles les prises de décision. Mais cela traduit la complexité générale liée au caractère multicritère de l'approche ACV et cela permet de prendre des décisions en ayant la vision la plus exhaustive possible de la problématique.

► **Analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix des indicateurs d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus**

Enfin, la dernière étape consiste à évaluer l'influence du choix de l'indicateur d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus, en analysant les résultats issus d'un ou plusieurs autres indicateurs.

On peut indiquer que cette étape est facultative et qu'elle est recommandée dès lors que l'on souhaite porter une attention particulière sur les enjeux environnementaux associés aux ressources.

Pour cette analyse de sensibilité, on peut notamment utiliser des indicateurs issus d'autres méthodes. Par exemple, si on a utilisé les indicateurs de la méthode CML lors des étapes précédentes, on peut utiliser les indicateurs endpoint de la méthode ReCiPe en analyse de sensibilité.

On peut également utiliser des indicateurs basés sur des perspectives culturelles différentes. Par exemple, si on a utilisé précédemment les indicateurs endpoint de la méthode ReCiPe avec la perspective « Hiérarchiste », on peut en analyse de sensibilité utiliser ces indicateurs en considérant la perspective « Egalitaire » ou « Individualiste ».

Enfin, on peut aussi utiliser des indicateurs basés sur différents types de réserves, qui permettent ainsi de projeter l'analyse à différents horizons temporels. Par exemple, si on a utilisé dans les étapes précédentes les indicateurs CML basés sur les bases de réserves (comme cela est conseillé par le JRC), on peut en analyse de sensibilité utiliser les indicateurs CML basés sur les réserves ultimes (comme cela est conseillé par les auteurs de la méthode).

Dans le cas d'études ACV visant à identifier les principales sources d'impact d'un produit, ces analyses de sensibilité permettent d'évaluer la robustesse des contributeurs identifiés.

Dans le cas d'études ACV visant à comparer des produits et à identifier le produit de moindre impact, cette démarche permet de vérifier si le positionnement des produits reste le même sur les ressources ou si les conclusions changent en fonction de la méthode prise en compte.

## Chapitre 6 : Limites des indicateurs ACV d'épuisement des ressources, pistes de développement et complémentarité avec les indicateurs de criticité

### 6.1 Limites des indicateurs ACV d'épuisement des ressources et pistes de développement

#### 6.1.1 Prise en compte de la valeur fonctionnelle propre à chaque ressource

Toutes les méthodes analysées dans cette étude abordent les ressources via leur valeur fonctionnelle et considèrent que le dommage causé aux ressources est la baisse de disponibilité des fonctions assurées par les ressources pour les générations futures.

Cependant, comme le souligne Brentrup [Brentrup2002], dans la plupart des méthodes d'évaluation, la consommation des différentes ressources est agrégée au sein d'un ou de deux indicateurs lors de l'étape de caractérisation. Ceci néglige le fait que les ressources sont utilisées à des fins différentes et qu'elles ne sont pas équivalentes les unes aux autres.

Selon les normes ISO, les flux d'un inventaire de cycle de vie doivent être classés par catégorie d'impact et si possible agrégés à l'aide de facteurs de caractérisation de façon à calculer des indicateurs d'impact traduisant des problématiques environnementales spécifiques.

Dans le cas des ressources, le fait d'agréger entre elles des ressources utilisées à des fins différentes n'est donc pas conforme aux recommandations des normes.

En effet, la consommation de ressources ayant des fonctionnalités différentes contribue à des dommages différents. Par exemple, l'épuisement des ressources fossiles a des conséquences sur la production de chaleur et d'électricité alors que l'épuisement des ressources en minerai de phosphate a des conséquences sur l'agriculture. Le fait de préserver une des ressources ne peut compenser le dommage causé sur l'autre. Et, pour poursuivre l'exemple précédent, le fait de disposer de ressources de charbon importantes ne peut pas contribuer à fournir les nutriments nécessaires pour assurer des récoltes suffisantes pour l'alimentation des générations futures.

En conséquence, l'épuisement des ressources relatif à des ressources de fonctionnalités différentes devrait être traité comme des problématiques environnementales différentes, c'est-à-dire avec des indicateurs différents.

Pour aller dans ce sens, Brentrup propose de définir un ensemble d'indicateurs pertinents en fonction du système étudié. Dans le cas des systèmes agricoles qui sont pris comme

exemple dans sa publication, Brentrup propose quatre indicateurs: un indicateur d'épuisement des ressources fossiles, en considérant que pour des applications agricoles toutes les ressources fossiles sont substituables, et trois indicateurs sur les ressources en phosphate, en potassium et en chaux, en considérant que ces ressources essentielles qui sont utilisées comme nutriment ou comme amendement ne sont pas substituables.

Cette limite bien décrite par Brentrup est également citée dans [VanOers2002]. Cette dernière publication est notamment à l'origine de l'évolution de la méthode CML qui est passée d'une méthode avec un unique indicateur (ADP) à une méthode avec deux indicateurs (ADP<sub>fossil fuels</sub> et ADP<sub>elements</sub>) distinguant d'une part les fonctions énergétiques et d'autre part les fonctions « élémentaires » des ressources.

Cependant, même si cette limite est couramment soulignée dans les publications, les auteurs mettent également en avant la difficulté à définir des indicateurs spécifiques à chaque fonction compte tenu du fait qu'on peut en général définir autant ou même plus de fonctions que de ressources consommées.

Dans cette perspective, Stewart et Weidema [Stewart2005] proposent un cadre méthodologique pour la définition d'indicateurs basé sur les fonctions des ressources. Ce cadre est basé sur le fait que seules les fonctions apportées par les ressources sont d'intérêt pour l'humanité, et non les ressources en tant que telles. Dans cette vision, il peut être moins critique de dissiper une ressource rare géologiquement mais pour laquelle il existe une technologie ou ressource de substitution que de dissiper une ressource relativement abondante mais sans substitution existante.

La méthode Impact World+<sup>34</sup>, en cours de développement par le CIRAIG, l'University of Michigan, Quantis International, la Technical University of Denmark (DTU), l'EPFL et Cycleco), a pour objectif de proposer un indicateur en phase avec le cadre méthodologique proposé par Stewart & Weidema. La méthode traduit les fonctions de chaque ressource en intégrant au modèle la notion de secteurs utilisateurs (emballage, aéronautique...) et en identifiant, pour chacun de ces secteurs, l'existence de technologies de substitution à ces ressources (cf l'interview de C. Bulle, auteur de la méthode, p147).

### 6.1.2 Assimilation entre baisse de disponibilité des ressources et épuisement effectif des ressources

Dans une vision « valeur fonctionnelle des ressources », le dommage causé aux ressources est défini comme la baisse de disponibilité des ressources pour les générations futures.

D'une manière générale, la baisse de disponibilité des ressources peut provenir :

- d'un **épuisement effectif**, c'est-à-dire d'une perte définitive des fonctions potentielles de la ressource,
- d'un **usage compétitif**, c'est-à-dire lorsque les fonctions potentielles ne sont pas perdues, mais non disponibles pour d'autres usages.

---

<sup>34</sup> [www.impactworldplus.org](http://www.impactworldplus.org)

On peut illustrer cette distinction par les exemples suivants tirés de [VanOers2002] :

- Lorsque l'on extrait du pétrole et qu'on l'utilise à des fins énergétiques, sa fonction de fourniture d'énergie est perdue. Il s'agit donc d'un problème d'épuisement car les fonctions sont perdues pour un usage futur.
- Lorsque l'on extrait un minerai et qu'on le transforme en matière première, cela n'implique pas nécessairement de perte de fonction :
  - Par exemple, lorsque du cuivre est extrait et utilisé dans des fils électriques, sa fonction de conduction d'électricité est conservée. En fin de vie, si les fils sont recyclés, le cuivre pourra être utilisé à nouveau, pour remplir la même fonction ou d'autres fonctions. Il s'agit alors d'un usage compétitif car le cuivre ne peut pas être dans d'autres produits tant qu'il est utilisé dans les fils en question.
  - Cependant, si le cuivre est répandu sur des vignes, pour des fonctions pesticides, il est « dilué » dans l'environnement. Les fonctions potentielles sont toujours présentes, mais dans une forme non-accessible à l'humanité. Dans ce cas, on considère que la ressource est perdue et qu'il s'agit donc d'un problème d'épuisement.

Ainsi, même si la baisse de disponibilité des ressources à un instant donné peut provenir à la fois d'un épuisement effectif et d'un usage compétitif, ces deux usages n'ont pas du tout les mêmes conséquences en ce qui concerne la disponibilité des ressources pour les générations futures. Il semblerait donc fondamental de prendre en compte cette distinction lorsque l'on cherche à évaluer le dommage lié à l'utilisation des ressources.

Cependant, dans la pratique, il faut noter que les indicateurs évaluent un **épuisement potentiel** et assimilent ainsi l'extraction des ressources à un épuisement effectif des ressources sans tenir compte de l'usage compétitif qui peut en être fait.

Pour justifier cela, il est parfois avancé que l'usage compétitif de ressources au sein de produits peut être considéré comme un problème socio-économique et n'est de ce fait pas intégré par les méthodes d'évaluation environnementales [VanOers2002].

Néanmoins, ce manque de distinction entre les usages (épuisement effectif et usage compétitif) constitue une limite des indicateurs d'épuisement des ressources en ACV. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'on s'intéresse à des ressources telles que le fer, l'aluminium ou le cuivre pour lesquelles les filières de recyclage sont largement développées, ou encore lorsqu'on s'intéresse par exemple au bitume, fraction lourde du pétrole qui n'est jamais utilisé comme combustible et dont la fonction de « matériau liant » n'est jamais perdue.

La méthode Impact World+, en cours de développement, a pour objectif de lever en partie cette limite. L'objectif visé est de quantifier la dissipation des fonctions des ressources. Ainsi, la méthode va permettre de tenir compte du recyclage comme une nouvelle mise à disposition des fonctions d'une ressource. Ainsi, seule la fraction réellement dissipée sera prise en compte, et non la totalité du flux de ressource extrait (cf l'interview de C. Bulle, auteur de la méthode, p147).

Enfin, on peut noter que des travaux de recherche sont en cours pour intégrer les réserves de la technosphère dans les ACV. Ces travaux, présentés au paragraphe suivant, permettront en partie de pallier ce problème.

### **6.1.3 Prise en comptes des ressources de types fonds et flux par des indicateurs autres que de catégorie 1**

Les méthodes existantes pour évaluer l'épuisement des ressources se focalisent essentiellement sur les ressources de type « gisement », c'est-à-dire non renouvelables (ressources minérales et fossiles). Parmi les indicateurs existants, seuls des indicateurs de catégorie 1 du JRC, c'est-à-dire basés sur une propriété intrinsèque aux ressources, comme par exemple l'énergie ou l'exergie, permettent de couvrir les ressources renouvelables de types fonds (biomasse) ou flux (énergie solaire, éolienne). Néanmoins, si ces indicateurs présentent un intérêt pour évaluer la consommation de ressource d'un système, il s'avère qu'ils ne tiennent pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'utilisation des ressources.

Ceci constitue une limite car il existe aussi des enjeux de baisse de disponibilité pour les ressources renouvelables, qui ne sont à ce jour pas traduits dans les indicateurs. On peut par exemple citer les enjeux suivants :

- Une ressource de type fonds peut s'épuiser de manière définitive si elle est exploitée à un rythme supérieur à son taux de renouvellement, comme par exemple certaines ressources halieutiques. Il s'agit alors d'une baisse de disponibilité pour les générations futures, au même titre que pour les ressources non-renouvelables.
- Une ressource renouvelable (de type fonds ou flux) peut faire l'objet d'une compétition entre utilisateurs. Ainsi, même si la ressource ne s'épuise pas définitivement, l'utilisation de cette ressource par certains réduit sa disponibilité pour d'autres. On peut par exemple citer la biomasse forestière, qui bien que renouvelable, présente une capacité de production annuelle finie. Dans l'hypothèse d'une consommation de toute la biomasse forestière existante, on peut supposer qu'il faudrait plusieurs générations pour rétablir le stock actuel.

Afin de pallier cette limite, une piste de développement pourrait consister à développer des indicateurs de catégorie 2 du JRC (basés sur la rareté des ressources) ou de catégorie 4 du JRC (évaluant les conséquences sur les extractions futures) couvrant les ressources de types fonds et flux.

On peut par exemple imaginer un indicateur de catégorie 2 portant sur la biomasse forestière. Cet indicateur pourrait tenir compte de la capacité de production sur une zone donnée (ex : production de biomasse forestière annuelle en Europe) et l'évaluer au regard du taux d'extraction correspondant. En d'autres termes, cela reviendrait à appliquer l'approche « ADP » en considérant une « réserve annuelle » au lieu d'une réserve absolue.

## 6.1.4 Types de réserves prises en compte

### ► Réserves dans l'environnement

Certaines méthodes telles que la méthode CML se basent sur la notion de réserves ultimes pour évaluer l'épuisement des ressources. Cependant, l'utilisation du concept de réserves ultimes pour évaluer la quantité potentiellement disponible d'une ressource fait débat au sein de la communauté scientifique. En effet, 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.

Ces auteurs critiquent donc l'usage du concept de réserves ultimes et préconisent l'usage du concept de base de réserves ou encore l'usage du concept de réserves (économiques).

Dans la publication [ILCD2011], le JRC recommande ainsi d'utiliser la méthode CML avec les facteurs de caractérisation relatifs aux bases de réserves. Le JRC indique que cette approche permet de se placer dans un horizon temporel lointain et de prendre en compte les futurs progrès technologiques en matière d'extraction.

Brentrup [Brentrup2002] estime quant à lui que le concept de réserves (économiques) est le plus approprié. En effet, selon lui, les ACV ne tiennent pas compte d'une manière générale des développements ou progrès technologiques futurs, tels que l'amélioration d'un traitement médical permettant de résoudre des problèmes de santé humaine ou, dans le cas des ressources, l'amélioration de techniques d'extractions permettant d'extraire des ressources moins concentrées. De ce fait, il n'est pas selon lui cohérent d'utiliser des données de type « réserves de base », qui sont justement basées sur des futures et hypothétiques progrès technologiques.

Par ailleurs, on peut également indiquer que les niveaux de réserves et/ou les scénarios de substitution entre ressources considérés par les indicateurs ACV sont basés sur l'état des connaissances actuelles. Or, on peut mentionner que les débats politiques actuels autour des gaz de schiste et les éventuels développements technologiques visant à extraire cette ressource sont susceptibles de modifier la situation. Cela pourrait notamment avoir pour conséquence de modifier les niveaux de réserves disponibles en ressources fossiles et les scénarios de substitution à considérer lors du passage de ressources fossiles conventionnelles à des ressources alternatives. Ces éléments étant pris dans le calcul des facteurs de caractérisation de différents indicateurs ACV, il conviendrait donc de mettre à jour ces facteurs si la situation concernant les ressources fossiles était amenée à changer considérablement.

### ► Réserves dans la technosphère

Selon [Gerst2008], l'augmentation continue de l'utilisation des ressources au cours du siècle dernier a conduit à un déplacement des ressources depuis les réserves dans l'environnement vers les réserves dans la technosphère.

Or, le fait qu'une ressource soit présente dans l'environnement ou dans la technosphère ne change pas le fait qu'elle puisse être potentiellement disponible à l'avenir. En effet, la provenance n'a pas d'influence sur l'épuisement ou non de ses fonctions potentielles, le paramètre important étant qu'elle reste suffisamment disponible, c'est-à-dire suffisamment concentrée et accessible, pour permettre son utilisation.

Compte tenu de cela, les indicateurs basés sur une vision fonctionnelle des ressources et prenant en compte la notion de réserves dans leur méthodologie de calcul devraient intégrer les réserves présentes dans la technosphère au même titre que les réserves présentes dans l'environnement.

Cependant, ce n'est pas le cas actuellement et les méthodes analysées dans cette étude tiennent compte uniquement des réserves présentes dans l'environnement.

Ce manque a été identifié par Schneider [Schneider2011] qui propose un indicateur incluant les réserves présentes dans la technosphère. Pour cela, l'auteur propose d'ajouter au stock « lithosphérique » (réserves présentes dans l'environnement) le stock « anthropogénique » (réserves dans la technosphère), tel qu'indiqué sur la figure ci-dessous.

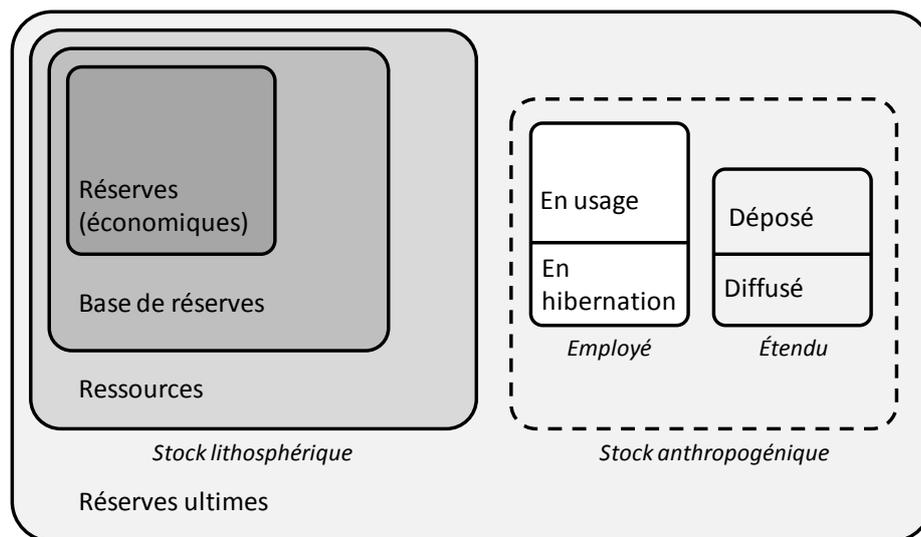


Figure 29 : Types de réserves à prendre en compte dans l'évaluation de la disponibilité des ressources pour les générations futures selon [Schneider2011]<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Par rapport aux différents niveaux de réserves dans l'environnement définis au paragraphe 2.2.1, on notera que Schneider intègre un niveau de segmentation supplémentaire. Ainsi, aux notions de réserves, bases de réserves et réserves ultimes, l'auteur ajoute le niveau « ressource », qui se situe entre les bases de réserves et les réserves ultimes. La définition de ce niveau de réserve est comparable à celle des bases de réserves mais considère un horizon temporel plus lointain pour évaluer les gisements dont les caractéristiques sont suffisantes pour permettre leur exploitation à l'avenir. Néanmoins, ce niveau de réserve intitulé « ressource » n'étant pas couramment décrit en tant que tel dans les publications, il n'a pas été défini en introduction de ce document par souci de simplification et pour éviter toute confusion avec la définition plus générale de ressource.

En pratique, l'indicateur AADP (Anthropogenic stock extended abiotic depletion potential) proposé par Schneider est basé sur l'indicateur ADP de CML et est modifié sur deux points :

- D'une part, les réserves dans l'environnement considérées ne sont pas les réserves ultimes (comme cela est préconisé par CML) mais les « ressources »<sup>36</sup>,
- D'autre part, les réserves considérées prennent en compte les ressources dans la technosphère en plus des ressources dans l'environnement.

La formule pour calculer les facteurs de caractérisation s'écrit de la manière suivante :

$$AADP_{i, \text{ressources}} = \frac{\text{Taux d'extraction } i / (\text{ressources } i + \text{stock anthropogénique } i)^2}{\text{Taux d'extraction } Sb / (\text{ressources } Sb + \text{stock anthropogénique } Sb)^2}$$

Dans la publication [Schneider2011], l'auteur propose des facteurs de caractérisation pour 10 ressources minérales (Al, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sb et Zn).

Les données utilisées pour évaluer les stocks anthropogéniques de ces ressources peuvent en théorie provenir de données de type MFA (Material flow analysis). Toutefois, compte tenu du fait que ce type de données est difficile à exploiter, Schneider estime le stock anthropogénique en comptabilisant les taux d'extraction annuelle de chaque ressource depuis 1900 (époque des premières données disponibles). De plus, Schneider fait l'hypothèse que le stock anthropogénique diffusé, 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 diffusé du cuivre représentait moins de 1% du stock anthropogénique du cuivre.

Sur la base de ces premiers travaux, il ressort que la prise en compte du stock anthropogénique (non diffus) permet d'évaluer la disponibilité des ressources pour les générations futures de façon plus juste et que ceci sera d'autant plus vrai à mesure que ce stock va s'accroître.

Néanmoins, l'utilisation d'une telle méthode nécessite de déterminer les facteurs de caractérisation pour de nombreuses ressources. Or, très peu de données sont disponibles ou facilement exploitables pour estimer les stocks anthropogéniques non diffus. De plus, en parallèle de ce problème de données, il existe également des problématiques méthodologiques à résoudre pour définir la manière de comptabiliser le stock anthropogénique pour certaines ressources telles que les ressources fossiles. Ces considérations font qu'une telle approche ne pourra pas être implémentée à court terme dans les pratiques ACV.

Outre la méthode de l'AADP développée par L. Schneider, on peut également noter que la méthode Impact World+, actuellement en développement, intègre les réserves

---

<sup>36</sup> Voir note de bas de page précédente

anthropogéniques en plus des réserves économiques (cf l'interview de C. Bulle, auteur de la méthode, p147).

### 6.1.5 Prise en compte de la disponibilité géographique des ressources

Les ressources étant distribuées de manière hétérogène sur Terre, on peut se demander s'il est pertinent de distinguer les ressources selon leur origine géographique. Si l'on prend l'exemple de la ressource « eau douce », celle-ci présente les caractéristiques suivantes :

- sa disponibilité est très variable selon les zones du globe,
- il est possible de définir une unité géographique pour tenir compte de la variabilité de sa disponibilité, à savoir le bassin versant, dans la mesure où un prélèvement sur un bassin versant donné n'a pas d'influence sur les autres bassins versants.

Si la première caractéristique est également applicable aux ressources minérales et fossiles couvertes par les indicateurs ACV, ceci est moins évident pour la deuxième caractéristique.

D'un certain côté, on peut considérer qu'il ne semble pas pertinent de distinguer les ressources selon leur origine géographique. En effet, la plupart des ressources sont échangées sur un marché mondial et le lieu d'extraction n'a pas d'influence sur le dommage causé aux ressources, à savoir la baisse de disponibilité de la ressource : une extraction à un endroit donné prive tous les utilisateurs potentiels de cette ressource de la même manière. Ainsi, on peut indiquer que l'origine géographique n'est pas prise en compte dans les indicateurs ACV disponibles à ce jour et que les facteurs de caractérisation sont basés sur des données mondiales<sup>37</sup>.

D'un autre côté, on peut considérer que certaines ressources sont partagées à une échelle géographique intermédiaire (continent, pays...). Dans ce cas, une extraction dans une zone géographique donnée privera différemment les utilisateurs de cette même zone des autres utilisateurs mondiaux. L'origine géographique des ressources semble alors être une distinction pertinente dans ce cas de figure.

On peut noter que la méthode ImpactWorld+ qui est en cours de développement a pour objectif de prendre en compte cet aspect et de proposer des facteurs de caractérisation régionalisés pour les ressources partagées à une échelle continentale. La méthode utilise une approche analogue à celles développées pour les indicateurs « eau » ([Boulay2011], [Boulay2011-2]), en appliquant l'analogie des bassins versants aux ressources fossiles et minérales.

---

<sup>37</sup> La seule exception est la méthode Swiss EcoScarcity, qui propose des facteurs de caractérisation reflétant les objectifs politiques de la Suisse.

## 6.1.6 Adéquation entre les indicateurs ACV d'épuisement des ressources et les attentes des utilisateurs

Afin de mieux comprendre les besoins et attentes des utilisateurs d'indicateurs sur les ressources, une consultation a été réalisée en 2010 dans le cadre du projet LC Impact [Emanuelsson2011]. Cette consultation regroupant des représentants de l'industrie, des décideurs politiques et des experts en ressources avait pour objectif d'apporter des éléments de réponse à la question suivante : « Qu'est-ce que les décideurs dans le domaine des politiques publiques et de l'industrie veulent savoir au sujet de la consommation de ressources abiotiques ? ». L'objectif était en particulier d'identifier les contextes dans lesquels les acteurs seraient amenés à prendre des décisions en utilisant un indicateur lié à l'utilisation des ressources et ce que cet indicateur devait exprimer.

La synthèse de cette consultation a été présentée en 2011 à la conférence LCM de Berlin est résumée ci-dessous.

Les représentants de l'industrie sont particulièrement intéressés par les conséquences économiques à court-terme de l'épuisement des ressources, notamment en raison des contraintes de rentabilité des projets, tandis que les décideurs politiques attendent plutôt solidité et fiabilité sur un horizon temporel plus long. Par ailleurs, parmi les aspects que peuvent couvrir les indicateurs, les experts en ressources ont notamment mis en avant la disponibilité de la ressource, l'augmentation de la difficulté d'extraction, les possibilités de substitution et la valeur sociétale.

A l'issue de la consultation, plusieurs aspects importants portant sur des horizons temporels différents ont été sélectionnés pour les ressources minérales d'une part et pour les ressources fossiles d'autre part.

Pour les ressources minérales, il s'agit des aspects suivants :

- à court terme (environ 5 ans) : la disponibilité des ressources évaluée sur la base de facteurs politiques,
- à moyen terme (5 à 20 ans) : l'augmentation de la difficulté d'extraction, exprimée en énergie ou en coût,
- à long terme (> 50 ans) : la disponibilité des ressources évaluée sur la base des réserves et des technologies d'extraction permettant leur exploitation actuelle et future.

Pour les ressources fossiles, il s'agit des aspects suivants :

- à court terme (environ 5 ans) : la disponibilité des ressources évaluée sur la base de facteurs politiques,
- à moyen terme (5 à 20 ans) : l'augmentation de la difficulté d'extraction.

Cette consultation illustre donc la variabilité des besoins en termes d'évaluation de la consommation de ressources en fonction du type de décideurs et des horizons temporels des enjeux.

## « Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »

De plus, elle souligne le fait que les indicateurs ACV d'épuisement des ressources, qui permettent de prendre en compte l'augmentation de la difficulté d'extraction et/ou la disponibilité physique des ressources, sont particulièrement adaptés pour répondre aux enjeux de moyen et long termes. Néanmoins, il ressort qu'ils sont moins adaptés pour les décisions à court terme, pour lesquelles la priorité est donnée aux contraintes politiques.

## 6.2 Complémentarité des indicateurs ACV et des indicateurs de criticité des ressources

### 6.2.1 Différences entre les indicateurs ACV sur l'épuisement des ressources et les indicateurs de criticité des ressources

Comme évoqué en introduction de ce rapport, il existe de nombreux outils d'analyse permettant d'appuyer les choix politiques et industriels visant à garantir la disponibilité des ressources pour les générations futures.

Parmi ces outils, les indicateurs ACV sur l'épuisement des ressources sont par principe essentiellement axés sur la dimension environnementale et considèrent avant tout la disponibilité physique (géologique) des ressources. Ils peuvent également parfois revêtir une dimension économique, comme par exemple les indicateurs endpoint de la méthode ReCiPe qui visent à évaluer les surcoûts engendrés dans le futur par l'extraction actuelle des ressources. Néanmoins, ils ne prennent pas en compte d'autres aspects économiques ou géopolitiques (protectionnisme, monopoles, zones de conflit, ...) qui sont également à considérer pour évaluer la disponibilité des ressources et leur accès à court ou moyen terme. En cela, les indicateurs ACV présentent donc certaines limites et ne sont pas adaptés pour répondre aux différents besoins possibles en termes d'évaluation en lien avec les ressources.

C'est pourquoi, des indicateurs visant à évaluer la dimension stratégique des ressources ont également été développés ces dernières années. Ces indicateurs visent à mettre en avant la dépendance d'un pays, d'une entreprise ou même d'un produit à des ressources ayant une importance économique mais dont l'approvisionnement peut être problématique à court ou moyen terme. Ces indicateurs peuvent prendre en compte des aspects géologiques, économiques, technologiques, sociaux, réglementaires et géopolitiques. Les paramètres les plus communément inclus dans ce type d'indicateurs sont : le niveau de concentration du marché (répartition géographique des réserves, monopoles, ...), l'importance économique des ressources en fonction des secteurs, le degré de substituabilité, le potentiel de recyclage. Ces indicateurs présentent un intérêt pour les pouvoirs publics et les entreprises car ils offrent un éclairage sur les enjeux ressources à court terme, qui ne sont pas forcément les mêmes que ceux mis en avant par les indicateurs ACV. On peut par exemple citer le cas des terres rares, qui ne ressortent pas forcément dans les indicateurs ressources en ACV alors que l'enjeu de leur disponibilité à court terme est important du fait de la prépondérance de la Chine dans la production mondiale.

Les différents enjeux liés à la disponibilité des ressources à court terme sont souvent regroupés sous la notion de « criticité », qui traduit non seulement le risque d'approvisionnement propre à chaque ressource mais également l'importance de chaque ressource vis-à-vis de l'entité étudiée (pays, continent, secteur, entreprise...).

## 6.2.2 Exemples d'indicateurs /outils pour l'évaluation de la criticité des ressources

Cette section présente trois exemples d'indicateurs ou outils portant sur la criticité des ressources. Ces outils développés au cours des dernières années sont appliqués à différents niveaux (continent, secteur, entreprise).

### ► **Au niveau de l'Europe : la liste de matières premières critiques de la Commission européenne**

La Commission européenne a lancé en 2008 la « Raw material initiative ». Cette initiative avait pour objectif d'identifier les matières premières non énergétiques essentielles à l'économie de l'Union européenne afin d'en assurer l'accessibilité. Dans cette optique, la Commission a défini une méthode d'évaluation basée sur deux indicateurs :

- le risque d'approvisionnement dans les 10 prochaines années : cet indicateur est évalué en considérant le taux de substituabilité, le taux de recyclage à l'échelle européenne, l'indice Herfindahl-Hirschman (HHI, traduisant la concentration d'un marché) et l'indice de gouvernance mondiale (WGI, traduisant la stabilité politique d'un pays).
- l'importance de ces matières premières dans l'économie européenne : cet indicateur est évalué en considérant l'utilisation des ressources par secteur, pondérée par la valeur ajoutée créée par le secteur utilisateur.

Ensuite, le croisement des résultats issus de ces deux indicateurs a permis de dresser la liste des 14 matières premières ou groupe de matières premières<sup>38</sup> considérées comme les plus critiques pour l'économie européenne. La figure ci-dessous présente le résultat de cette évaluation.

---

<sup>38</sup> Antimoine, Béryllium, Cobalt, Fluorine, Gallium, Germanium, Graphite, Indium, Magnésium, Niobium, PGMs (Platinum Group Metals: platine, palladium, iridium, rhodium, ruthénium et osmium), Terres rares (yttrium, scandium, lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, prométhium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium et lutétium), Tantale, Tungstène

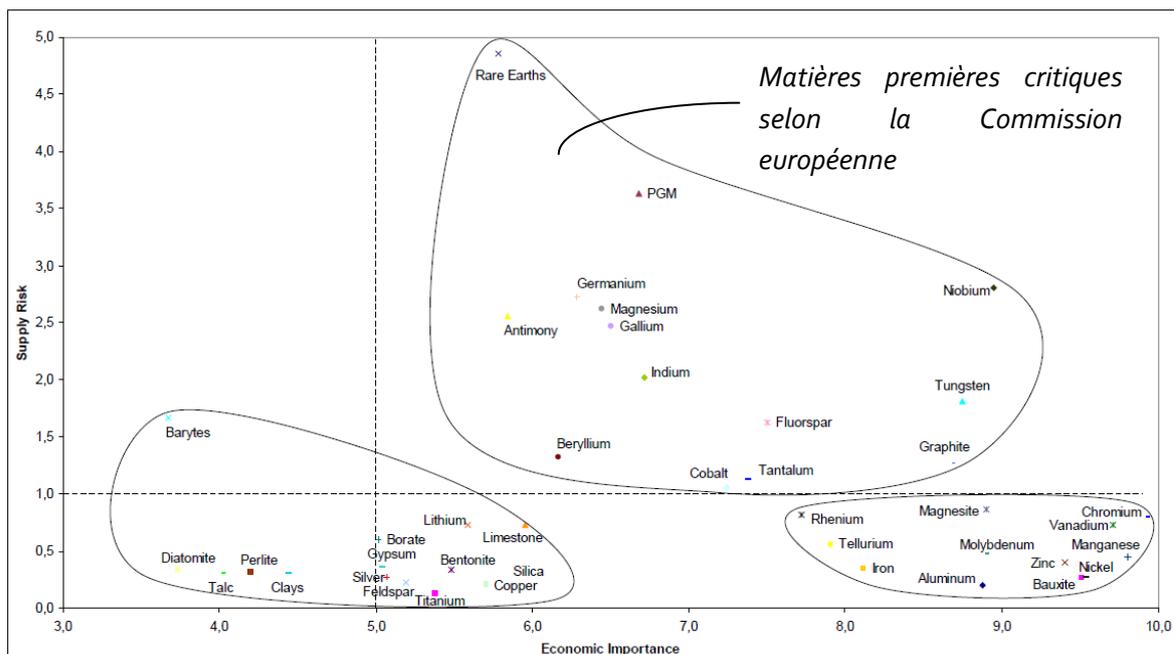


Figure 30 - Risque d'approvisionnement en fonction de l'importance économique, Commission européenne

► **Au niveau d'un secteur : Evaluation de la criticité des matériaux utilisés dans le secteur de l'énergie [Tzimas2012]**

Le JRC a réalisé une étude sur la disponibilité des métaux en tant que frein au déploiement de technologies énergétiques en Europe. Un des objectifs a consisté à identifier les métaux critiques, c'est-à-dire ceux pour lesquelles une interruption de l'approvisionnement impacterait le déploiement d'une technologie.

Dans un premier temps, les matériaux « significatifs » pour le secteur énergétique ont été identifiés (matériaux pour lesquels la demande pour le secteur énergétique est supérieure à 1% de la production totale). Ensuite, les 14 métaux significatifs ainsi identifiés ont été soumis à une analyse de criticité, comportant les critères suivants :

- Critères de marchés :
  - probabilité d'une augmentation rapide de la demande,
  - limites à l'augmentation de la capacité de production.
- Critères politiques :
  - concentration du marché (nombre de pays fournissant l'essentiel de la production),
  - risque politique (Failed States Index, Worldwide Governance Index, évaluation d'expert).

Cette analyse a permis d'identifier les 5 métaux les plus critiques pour le secteur de l'énergie : l'Indium, le Gallium, le Tellure ainsi que deux terres rares Dysprosium et Néodyme.

► **Au niveau des entreprises françaises : l'outil COMES du Ministère en charge de l'industrie**

Le COMES<sup>39</sup> a mis à disposition des entreprises un outil d'auto-diagnostic<sup>40</sup> permettant de piloter leur approvisionnement via l'analyse de leur vulnérabilité aux matières premières minérales stratégiques. Cet outil permet à une entreprise d'identifier les matériaux les plus critiques, en tenant compte d'une part du risque d'approvisionnement relatif de chaque matériau, et de la vulnérabilité de l'entreprise face à ce risque.

- Pour le risque d'approvisionnement, les paramètres pris en compte sont :
  - stabilité politique des pays producteurs (WGI),
  - niveau de concentration de la production (HHI),
  - entraves au libre commerce,
  - fraction issue de sous-produits (niveau de risque lié au niveau de risque du métal « père »),
  - volatilité historique des coûts,
  - capacité de recyclage en fin de vie en France.
- Pour la vulnérabilité de l'entreprise, les paramètres pris en compte sont :
  - importance économique pour l'entreprise,
  - capacité à supporter une hausse des coûts,
  - importance pour la stratégie de l'entreprise,
  - caractéristiques des substituants,
  - capacité de l'entreprise à innover,
  - connaissance de la chaîne d'approvisionnement,
  - contraintes réglementaires ou autres.

On peut noter que pour ces trois exemples d'évaluations de criticité, les approches tiennent compte :

- d'une dimension liée aux ressources : le risque d'approvisionnement,
- d'une dimension propre à la zone géographique, au secteur ou à l'entreprise étudiée : l'importance économique des ressources pour l'entité considérée.

---

<sup>39</sup> Comité pour les métaux stratégique (COMES), créé à l'initiative du ministère en charge de l'industrie par le décret du 24 janvier 2011. Il regroupe l'ensemble des acteurs concernés par la problématique des métaux stratégiques en France (Etat, organismes de recherche et industriels) et a pour vocation de proposer une stratégie aux pouvoirs publics.

<sup>40</sup> [www.dgcis.redressement-productif.gouv.fr/secteurs-professionnels/industrie/chimie/metaux-strategiques](http://www.dgcis.redressement-productif.gouv.fr/secteurs-professionnels/industrie/chimie/metaux-strategiques)

### 6.2.3 Prise en compte de la criticité des ressources en ACV

Les indicateurs de criticité, dont trois exemples ont été présentés dans la section précédente, sont utilisés pour un périmètre géographique, un secteur ou une entreprise donnés. Ils peuvent être utilisés de manière indépendante des indicateurs ressources ACV, qui sont quant à eux utilisés dans des approches « produit ».

On peut toutefois se demander dans quelle mesure les indicateurs de criticité pourraient être intégrés au cadre méthodologique de l'ACV.

- D'un côté, on peut considérer que le risque d'approvisionnement n'est pas un enjeu environnemental et qu'il ne doit pas être intégré à l'ACV. En effet, le risque d'approvisionnement n'est pas un « impact » au sens ACV du terme : il ne représente pas la conséquence environnementale d'une interaction (extraction ou émission) avec l'environnement.
- D'un autre côté, on peut considérer que l'ACV offre un cadre méthodologique pertinent pour intégrer la criticité des ressources dans une approche « produit ». Cela permettrait d'offrir une aide à la décision complémentaire sur le cycle de vie d'un système. En ce sens, on peut mentionner les conclusions du workshop du JRC « Security of supply and scarcity of raw materials - A methodological framework for sustainability assessment » qui indiquent clairement que l'ACV peut permettre l'évaluation de la criticité des ressources en plus des impacts environnementaux [JRC2013].

Dans ce contexte, on peut noter que des travaux de recherches sont en cours pour intégrer les aspects de criticité aux indicateurs ACV :

#### ► **Réflexions proposées dans le cadre du projet LC Impact [Emanuelsson2011]**

Dans le cadre du projet LC-Impact, une réflexion a été menée afin de proposer un cadre méthodologique permettant de considérer à la fois les enjeux de criticité des ressources et les enjeux d'épuisement des ressources. Les auteurs ont ainsi proposé la définition de deux indicateurs midpoint :

- un indicateur midpoint « environnemental » correspondant à la baisse de la teneur en minerai pour les ressources minérales et au passage à des ressources alternatives pour les ressources fossiles,
- un indicateur midpoint « social » correspondant au risque d'approvisionnement (et qui est défini de façon similaire à celui utilisé par la Commission européenne pour l'identification des matières premières critiques au niveau européen).

Ces deux indicateurs contribuent ensuite à un indicateur endpoint traduisant l'augmentation des coûts de la ressource, comme présenté dans la figure ci-dessous.

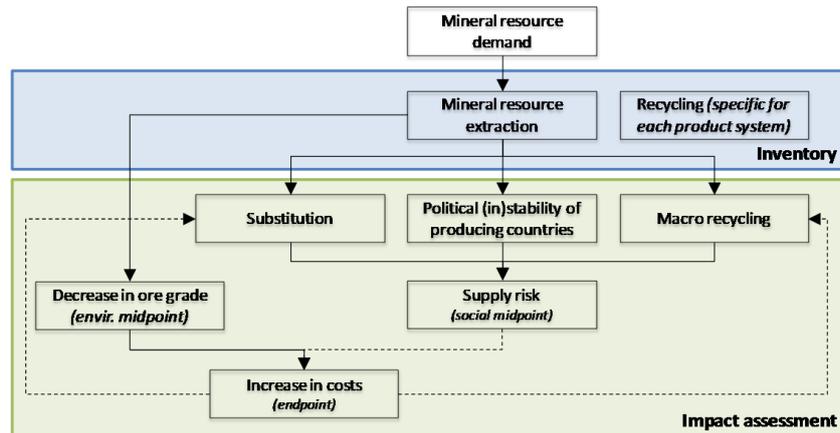


Figure 31 : Chaîne de cause à effet pour l'utilisation de ressources minérales, intégrant le risque d'approvisionnement [Emanuelsson2011]

Cependant, ces travaux sont restés au stade de réflexion et ne seront pas intégrés dans la méthode LC-impact qui est en cours de développement. Une des raisons évoquées par les auteurs est la difficulté à définir les facteurs de l'indicateur de risque d'approvisionnement (cf. entretien avec M. Vieira en annexe).

Néanmoins, ces travaux offrent un éclairage intéressant sur le rapprochement possible entre les indicateurs ACV et les indicateurs de criticité.

► **Travaux de Schneider et al. sur l'inclusion de la disponibilité économique des ressources dans les ACV [Schneider2012]**

Schneider et al. proposent d'intégrer le risque d'approvisionnement au cadre méthodologique de l'ACV. Les auteurs considèrent que le facteur géologique n'est pas le seul critère participant à la rareté et que le risque d'approvisionnement y participe également. Les auteurs définissent ainsi un indice de disponibilité économique des matières premières qui prend en compte les paramètres suivants :

- la concentration du marché (exprimé selon l'indice Herfindahl-Hirschman HHI),
- l'instabilité politique des pays producteurs (calculé à partir de l'indice de gouvernance mondiale WGI),
- l'augmentation de la demande (exprimé en pourcentage d'augmentation par an),
- le pourcentage de la production soumis à des barrières commerciales,
- le pourcentage en matériau vierge permettant de satisfaire la demande,
- le ratio entre la production annuelle et les réserves estimées.

Ces paramètres sont combinés selon une approche « distance-to-target ». Pour chaque paramètre, les auteurs proposent un seuil au-delà duquel la disponibilité de la ressource est considérée comme incertaine. Ensuite, chaque paramètre supérieur au seuil est retenu pour le calcul de l'indicateur. Enfin, l'indicateur est calculé de la manière suivante :

$$\prod_i \left( \frac{\text{paramètre}_i \text{ supérieur au seuil}_i}{\text{seuil}_i} \right)^2$$

Les auteurs ont notamment réalisé une étude de cas en calculant d'un indice de disponibilité économique pour 4 ressources : aluminium, cuivre, terres rares et argent. Ils ont ensuite comparé les résultats obtenus avec les résultats de l'indicateur CML-ADP. Si l'argent domine les trois autres ressources pour l'indicateur CML-ADP, ce sont en revanche les terres rares qui présentent l'indice de disponibilité économique le plus fort.

► **Synthèse et recommandations pour la prise en compte de la criticité des ressources en ACV**

Les éléments présentés ci-dessus montrent la complémentarité des indicateurs ACV et des indicateurs de criticité, qui offrent un éclairage différent sur l'enjeu de la disponibilité des ressources. De plus, les travaux de développement en cours et en particulier les travaux de Schneider et al. montrent qu'il est possible de définir des indices de disponibilité économique par matériau, pouvant donc être intégrés au cadre méthodologique de l'ACV (de façon analogue à des facteurs de caractérisation).

Toutefois, ces travaux restent au stade de développement et ne sont pas à ce jour applicables en pratique dans les ACV.

Si l'on souhaite néanmoins apporter un premier niveau d'information concernant la criticité des ressources lors de l'ACV d'un produit ou d'un service, on peut proposer les deux approches suivantes :

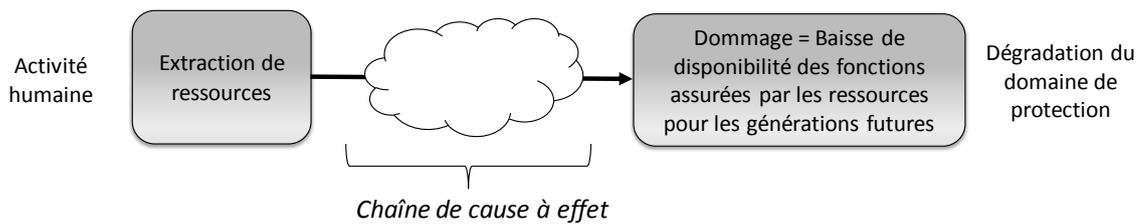
- Une première approche simple consiste à utiliser la liste des 14 matières premières critiques établies par la Commission européenne. Cette « check-list » permet de passer en revue les ressources utilisées par le système étudié et d'identifier les ressources considérées comme critiques parmi celles-ci.
- Une seconde approche consiste à évaluer un indicateur de risque d'approvisionnement spécifique au système étudié. Pour cela, on peut utiliser des résultats d'indicateurs de risque d'approvisionnement propres à chaque ressource (en utilisant par exemple les résultats de la Raw Material initiative de la Commission Européenne) en les multipliant par les quantités respectives de ressources utilisées par le système étudié. Ceci revient en fait à utiliser les indicateurs de risque d'approvisionnement propres à chaque ressource comme des facteurs de caractérisation. Ceci permet ainsi de définir un indicateur simple de criticité des ressources dans le cadre d'une approche « produit ».

## Chapitre 7 : Synthèse finale

Cette étude a permis en premier lieu de bien définir les concepts en lien avec les ressources, et en particulier les concepts de ressources et de réserves.

Par ailleurs, le dommage causé aux ressources communément considéré en ACV a été exposé : il s'agit de la baisse de disponibilité des fonctions assurées par les ressources pour les générations futures.

La chaîne de cause à effet considérée est schématisée dans la figure ci-dessous.



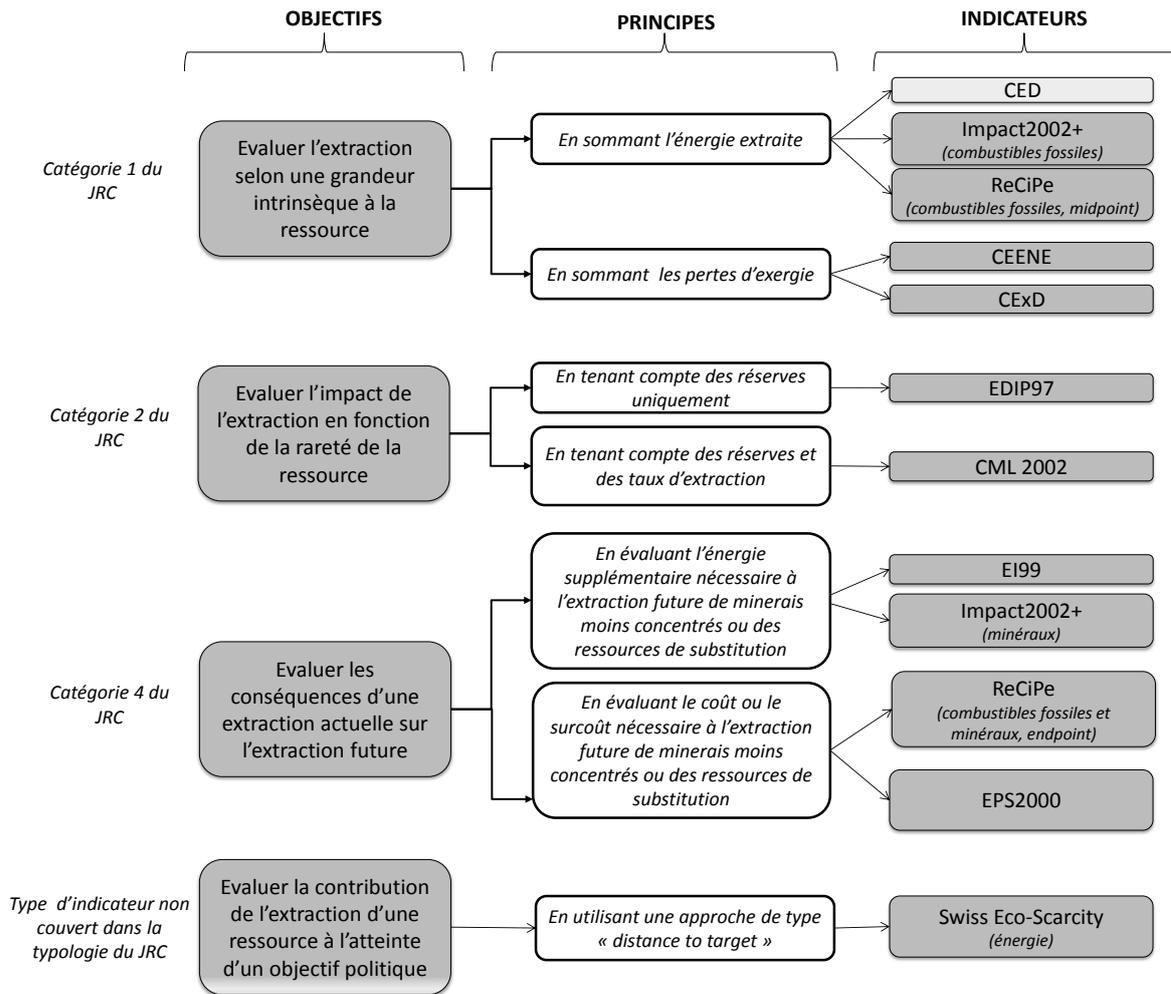
Chaîne de cause à effet relative aux ressources dans le cas d'une vision « Valeur fonctionnelle des ressources »

Ensuite, une cartographie d'une sélection d'indicateurs ACV portant sur les ressources a été réalisée. Une analyse transversale a permis de comparer les différents indicateurs, notamment en termes d'objectifs et de ressources couvertes. Une analyse détaillée a ensuite permis de présenter les principes et fondements des indicateurs, les modes de calcul des facteurs de caractérisation, ainsi que les limites propres à chaque indicateur.

La figure page suivante présente les différents indicateurs étudiés selon une typologie précisant les objectifs et les principes de base de ces indicateurs. La catégorie de l'indicateur selon le JRC est également rappelée.

Après cette analyse des indicateurs, deux études de cas ont été menées. La première a consisté à illustrer la variabilité des ressources couvertes et des facteurs de caractérisation des indicateurs. La seconde a consisté à illustrer la variabilité des résultats obtenus lors de la comparaison de plusieurs inventaires avec différents indicateurs. Il a ainsi été montré que les conclusions d'une comparaison de systèmes peuvent s'inverser en fonction des indicateurs ressources utilisés.

« Indicateurs d'épuisement des ressources en Analyse de Cycle de Vie »



Classification des indicateurs par type d'objectifs et de principes d'évaluation

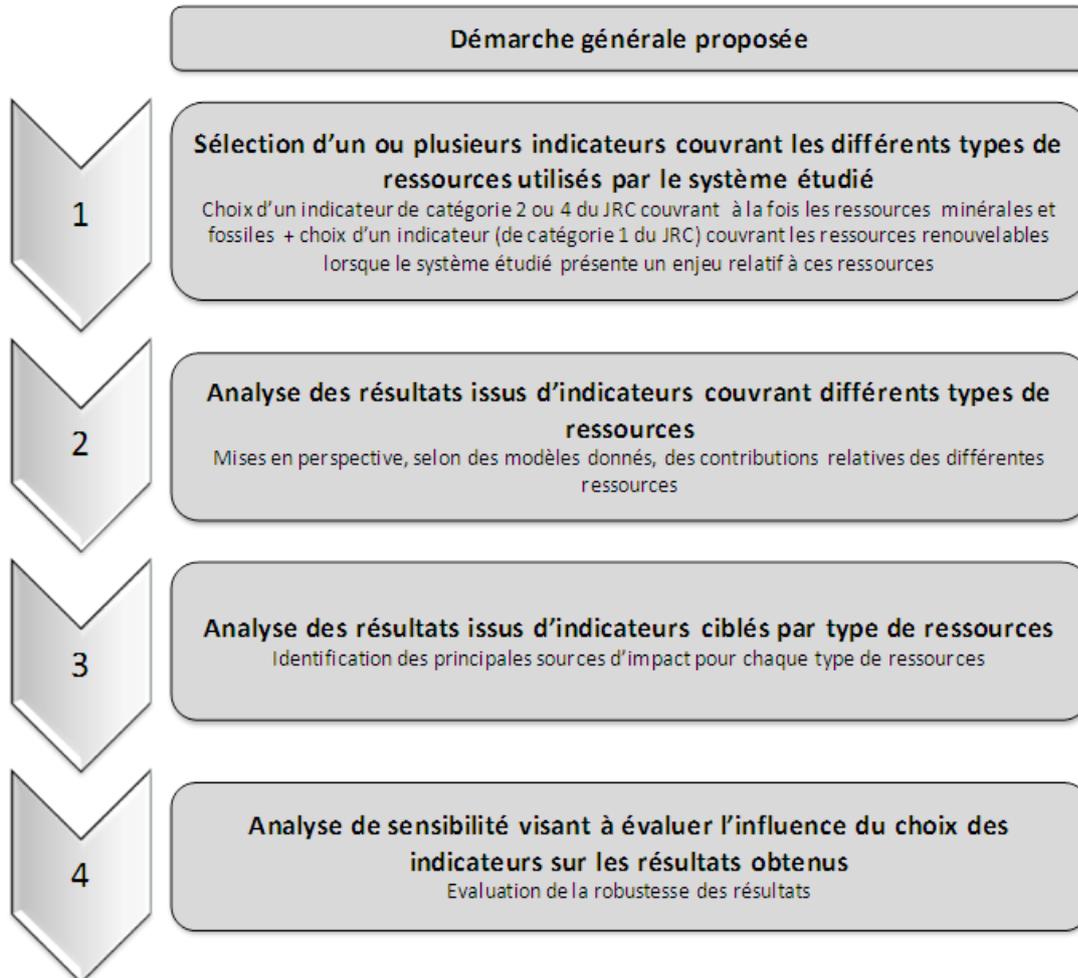
Sur la base de l'analyse des indicateurs et des enseignements tirés des études de cas, des recommandations et bonnes pratiques en termes d'utilisation des indicateurs ressources en ACV ont été élaborées. Les principales recommandations sont les suivantes :

- La couverture des ressources prises en compte par les indicateurs est un point très important à considérer lors du choix des indicateurs à utiliser et lors de l'analyse et l'interprétation des résultats.
- Les indicateurs couvrant différents types de ressources et les indicateurs ciblés par type de ressource présentent à la fois des avantages et des inconvénients. Il est donc intéressant de les combiner de façon à tirer le meilleur profit de ces différents outils d'analyse.
- Il faut noter qu'à ce jour aucun indicateur ACV permettant de traduire le dommage causé aux ressources (catégories 2 et 4 du JRC) ne prend en compte les ressources renouvelables. Ceci peut s'avérer limitant dès lors que l'on étudie des produits ayant recours à la biomasse et/ou à d'autres ressources renouvelables. Néanmoins, dans ces cas là, il peut s'avérer intéressant d'utiliser à défaut des indicateurs de catégorie 1 du JRC tels que CED, CExD ou CEENE. En

effet, ces indicateurs basés sur une grandeur intrinsèque à la ressource sont à ce jour les seuls à prendre en compte à la fois les ressources non-renouvelables et renouvelables. Et, même s'ils ne permettent pas d'évaluer réellement le dommage causé aux ressources, ils permettent d'offrir une vision d'ensemble sur les différents types de ressources utilisés par un système.

- Quel que soit l'objectif de l'étude (analyse d'un produit visant à identifier les principales sources d'impact ou comparaison de produits visant à identifier le produit de moindre impact), il est toujours important de réaliser des analyses de sensibilité visant à évaluer l'influence du choix de l'indicateur d'épuisement des ressources sur les résultats obtenus.
- Il est possible d'utiliser des méthodes de normation pour évaluer l'enjeu environnemental associé aux ressources fossiles et minérales utilisées par un système donné. Néanmoins, en ce qui concerne les ressources renouvelables, il convient de se baser sur une approche qualitative basée sur l'analyse des flux entrants pour évaluer si le produit étudié est susceptible de présenter un enjeu spécifique par rapport à ces ressources.
- Certaines méthodes proposent plusieurs perspectives culturelles ou peuvent être calculées pour différents types de réserves traduisant des horizons temporels différents. Elles présentent ainsi l'intérêt de pouvoir être adaptées en fonction du type de parties prenantes de l'étude (commanditaire, public visé, ...).
- Dans le cas d'une communication des résultats ACV, on peut privilégier l'utilisation d'indicateurs dont l'objectif est d'évaluer l'impact de l'extraction en fonction de la rareté de la ressource. En effet, selon le JRC, il s'agit des indicateurs dont le degré d'acceptation et de compréhension est le plus fort. En particulier, il est conseillé d'utiliser l'indicateur CML-ADP qui est l'indicateur recommandé par le JRC. Néanmoins, un indicateur de flux comme CED (avec une présentation des résultats par type de ressource) peut également être intéressant à communiquer car il est simple et robuste. Il faut toutefois garder à l'esprit que cet indicateur traduit une utilisation de ressource et non un dommage sur les ressources.
- Il est important de couvrir l'ensemble du cycle de vie d'un produit pour tenir compte des éventuelles boucles de recyclage et de réaliser des analyses de sensibilité sur les différentes méthodologies de prise en compte du recyclage.

Ces différentes bonnes pratiques et recommandations ont permis de proposer la méthodologie générale suivante pour traiter la problématique de l'épuisement des ressources en ACV.



#### Démarche proposée pour évaluer l'épuisement des ressources en ACV

Ensuite, les limites des indicateurs ressources en ACV ont été présentées, ainsi que les développements en cours qui pourraient permettre de les lever. Les principales limites identifiées sont les suivantes :

- Les indicateurs ACV existants sont pour la plupart focalisés sur les ressources non renouvelables (ressources minérales et fossiles) et seuls des indicateurs de catégorie 1 du JRC, tels que CED, CExD ou CEENE, permettent de prendre en compte les ressources renouvelables. Néanmoins, il s'avère que ces indicateurs de catégorie 1 qui évaluent l'extraction selon une grandeur intrinsèque à la ressource ne tiennent pas compte des réserves disponibles ni des conséquences de l'utilisation des ressources. En ce sens, ils ne traduisent donc pas réellement le dommage causé aux ressources.
- La valeur fonctionnelle des ressources n'est pas bien prise en compte par les indicateurs ACV, qui tendent à agréger ensemble les impacts associés à des ressources de fonctions différentes. La future méthode Impact World+ vise à pallier en partie ce problème, en considérant notamment la notion de substitution entre ressources basée sur les usages réels.

- Les indicateurs ACV ne permettent pas de distinguer l'usage compétitif des ressources de l'épuisement effectif des ressources. Ainsi, dans la pratique, les indicateurs ACV évaluent un épuisement potentiel et assimilent l'extraction des ressources à un épuisement effectif. Là encore, la méthode Impact World+ vise à lever cette limite, en évaluant la privation potentielle d'autres utilisateurs à l'accès aux fonctions des ressources, plutôt qu'un épuisement effectif.
- Les indicateurs ACV disponibles à ce jour ne prennent en compte que les réserves dans l'environnement et pas les réserves dans la technosphère. Les travaux en cours de Laura Schneider visent à intégrer ces réserves anthropogéniques, de façon à évaluer de façon plus juste la disponibilité des ressources pour les générations futures.
- La variabilité géographique de la disponibilité des ressources n'est pas intégrée dans les indicateurs ACV. En effet, il est d'une manière générale considéré que le lieu d'extraction n'a pas d'influence sur le dommage causé aux ressources. Néanmoins, la méthode Impact World+ a pour objectif de proposer des facteurs de caractérisation régionalisés pour les ressources partagées à une échelle continentale.
- Les indicateurs ACV sont par principe essentiellement axés sur la dimension environnementale et considèrent avant tout la disponibilité physique (géologique) des ressources. Néanmoins, ils ne prennent pas en compte d'autres aspects économiques ou géopolitiques (protectionnisme, monopoles, zones de conflit, ...) qui sont également à considérer pour évaluer la disponibilité des ressources et leur accès à court ou moyen terme. En cela, les indicateurs ACV présentent donc certaines limites et ne sont pas adaptés pour répondre aux différents besoins possibles en termes d'évaluation en lien avec les ressources. Pour pallier cette limite, il est possible d'utiliser, en complément des indicateurs ACV, des indicateurs de criticité. Ces indicateurs prennent en compte le risque d'approvisionnement des ressources et l'importance économique des ressources par rapport à un système considéré (continent, secteur économique, entreprise). De plus, des travaux sont en cours afin d'intégrer la notion de criticité dans le cadre méthodologique de l'ACV et ainsi pouvoir prendre en compte ces aspects dans une approche « produit ».

## Références

- [Arvidsson2012] Rickard Arvidsson, Kristin Fransson, Morgan Fröling, Magdalena Svanström, Sverker Molander (2012) Energy use indicators in energy and life cycle assessments of biofuels review and recommendations. *Journal of Cleaner Production* 31 54-61
- [Brenttrup2002] Frank Brenttrup, Jiirgen Kiisters, Joachim Lammel and Hermann Kuhlmann (2002) Impact Assessment of Abiotic Resource Consumption - Conceptual Considerations, *International Journal of Life Cycle Assessment* 7 (5) 301 - 307
- [Berger2011] Markus Berger & Matthias Finkbeiner (2011) Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use, *Int J Life Cycle Assess* (2011) 16:74–81
- [Berner1989] Berner, R.A.; Lasaga, A.C. (1989) Modeling the geochemical carbon cycle, *Scientific American*; (USA); Journal Volume: 260:3
- [Bösch2007] Michael E. Bösch, Stefanie Hellweg, Mark A.J. Huijbregts and Rolf Frischknecht (2007) - Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database, *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (3) 181–190
- [Boulay2011] Boulay, A.-M.; Bulle, C.; Bayart, J.-B.; Deschenes, L.; Margni, M. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health, *Environmental Science & Technology* 2011, 45, 8948-8957
- [Boulay2011-2] Boulay, A.-M.; Bouchard, C.; Bulle, C.; Deschênes, L.; Margni, M. Categorizing water for LCA inventory *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2011, 16, 639-651.
- [BP2005] BP (2005). Statistical Review of World Energy "Putting energy in the spotlight": [www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/publications/energy\\_reviews\\_2005/STAGING/local\\_assets/downloads/pdf/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2005.pdf](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/publications/energy_reviews_2005/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2005.pdf)
- [Campbell1998] Colin J. Campbell and Jean H. Laherrère (1998) The End of Cheap Oil, *Scientific American*. [www.oilcrisis.com/campbell/endofcheapoil.pdf](http://www.oilcrisis.com/campbell/endofcheapoil.pdf)
- [Chapman1983] Chapman, P.F.; Roberts, F. (1983): Metal Resources and Energy. Butterworths Monographs in Materials
- [DeVries1988] Vries, D. de; Sustainable resource use, optimal depletion with a geostatistical framework, IVEM report nr.35 Groningen 1988
- [DeWulf2007] De Wulf, J.; Böch, M.E.; De Meester, B.; Vanderovrst, G; Vanlangenhove, H; Hellweg, S; Huijbregts, M.A.J. (2007) Cumulative Exergy

Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting. *Environ. Sci. Technol.*, 2007, 41 (24), pp 8477–8483

- [Emanuelsson2011] Emanuelsson, Goedkoop, Hanafiah, Hellweg, Hornborg, Huijbregts, Koellner, Leuven, Llorenç Milà i Canals, Núñez, Obersteiner, Pfister, Sonesson, Storm, Van der Velde, Van Zelm, Vieira, Ziegler (2011), LC-IMPACT, Development and application of environmental Life Cycle Impact assessment Methods for improved sustainability - Characterisation of Technologies - Recommended assessment framework, method and characterisation and normalisation factors for resource use impacts: phase 1
- [Erdmann2011] Lorenz Erdmann and Thomas E. Graedel (2011) Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses, *Environ. Sci. Technol.* 45 (18), pp 7620–7630
- [EuropeanCommission2010] Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials Critical raw materials for the EU (2010)
- [Finnveden1996] Finnveden, G. (1996) "Resources" and related impact categories. In: H.A. Udo de Haes ted.), 1996: Towards a methodology for life cycle impact assessment. SETAC-Europe, Brussels, 39-48
- [Frischknecht2006] Rolf Frischknecht, Roland Steiner, Braunschweig Arthur, Egli Norbert, Hildesheimer Gabi (2006) - Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006
- [Frischknecht2009] Frischknecht Rolf, Steiner Roland, Jungbluth Niels (2009) - The Ecological Scarcity Method – Eco-Factors 2006. A method for impact assessment in LCA. Environmental studies no. 0906. Federal Office for the Environment, Bern: 188 pp.
- [Gerst2008] Gerst MD, Graedel TE (2008) In-use stocks of metals: status and implications. *Environ Sci Technol* 42(19):7038–7045
- [Goedkoop2008] Goedkoop M.J., Heijungs R, Huijbregts M., De Schryver A.;Struijs J., Van Zelm R - ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009
- [Guinée 1995] Guinée, J.B. & Heijungs, R. (1995) - A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14 (5), pp. 917-925.
- [Guinée 2002] Guinée, J.B. & Gorree, M. & Heijungs, R. & Huppes, G. & Kleijn, R. & Koning, A., de & Oers, L.F.C.M., van & Wegener Sleswijk, A. & Suh, S. & Udo de Haes, H.A. & Bruijn, H., de & Duin, R., van & Huijbregts, M.A.J. (2002) - Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers/ ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp

- [Hauschild1998] Hauschild, Michael Z., Wenzel, Henrik (1998) - Environmental Assessment of Products. Volume 2: Scientific Background, Springer
- [Hischier2010] Hischier R., Weidema B., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. and Nemecek T. (2010) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods - ecoinvent report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- [Humbert2011] Sébastien Humbert, Manuele Margni, Olivier Jolliet (2011) IMPACT 2002+: User Guide - Draft for version 2.1 - IMPACT Modeling Team, 2003-2011
- [ILCD2010] JRC (2010) European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment – First Edition
- [ILCD2010-2] JRC (2010) European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators. First edition March 2010. EUR24586 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union
- [ILCD2010-3] JRC (2010) European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook –General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. First edition 2010
- [ILCD2011] JRC (2011) European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - First edition, EUR 24571 EN, Publication Office of the European Union
- [ISO2006] Norme NF ISO 14044 (2006) Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices, AFNOR
- [Jolliet2003] Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer and Ralph Rosenbaum (2003) - IMPACT2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology Int J LCA 8 (6) 324 – 330 (2003)
- [Jolliet2004] Olivier Jolliet, Ruedi Müller-Wenk, Jane Bare, Alan Brent, Mark Goedkoop, Reinout Heijungs, Norihiro Itsubo, Claudia Pefia, David Pennington, José Potting, Gerald Rebitzer, Mary Stewart , Helias Udo de Haes and Bo Weidema (2004) The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, International Journal of Life Cycle Assessment 9 (6) 394 – 404

- [JRC2013] Mancini, L., De Camillis, C., Pennington, D. (eds.) (2013) Security of supply and scarcity of raw materials. A methodological framework for sustainability assessment - European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- [Müller-Wenk1998] Müller-Wenk, R. (1998): Depletion of Abiotic Resources Weighted on the Base of "Virtual" Impacts of Lower Grade Deposits in Future, IWOE Discussion Paper no 57. St. Gallen: IWOE.
- [OMC2010] OMC, Rapport sur le commerce mondial 2010 – Partie B : Les ressources naturelles : définitions, structure des échanges et mondialisation
- [Sala2012] Serenella (2012) Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues, JRC presentation
- [Seriz009] Overconsumption? Our use of the world's natural resources, Sustainable Europe Research Institute (SERI), Austria and GLOBAL 2000 (Friends of the Earth Austria, 2009
- [Schneider2011] Laura Schneider, Markus Berger & Matthias Finkbeiner (2011) - The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources, International Journal of Life Cycle Assessment 16:929–936
- [Schneider2012] Laura Schneider, Markus Berger, Matthias Finkbeiner (2012) Measuring material scarcity- limited availability despite sufficient reserves - Technische Universität Berlin, Department of Environmental Technology, Chair of Sustainable Engineering
- [Steen1999] Steen, Bengt (1999) A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) - Version 2000 CPM report 1999:4 - Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning
- [Stewart2005] Mary Stewart<sup>1</sup> and Bo Weidema (2005) A Consistent Framework for Assessing the Impacts from Resource Use A focus on resource functionality, International Journal of Life Cycle Assessment 10 (4) 240 – 247
- [Szargut1988] Szargut J, Morris DR, Steward FR (1988): Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Hemisphere Publishing Corporation, New York
- [Szargut2005] Szargut J (2005) Exergy method: Technical and ecological applications. WITPress, Southampton
- [Tzimas2012] V. Tzimas (2012) Criticality screening for raw materials in energy technologies, Institute for Energy and Transport (Petten, NL), Joint Research Centre, European Commission
- [VanOers2002] Oers, L.F.C.M., van & Koning, A., de & Guinée, J.B. & Huppes, G. (2002) - Abiotic resource depletion in LCA: improving characterisation factors for

abiotic depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. Delft: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.

- [USGS2005] U.S. Department of the Interior (2005) Mineral Commodity Summaries U.S. Geological Survey (USGS): [minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2005/mcs2005.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2005/mcs2005.pdf)
- [VDI1995] VDI-Gesellschaft Energietechnik (Ed.): Cumulated energy demand. Terms, definitions, methods of calculation (in German). VDI Draft Guideline 4600, May 1995
- [VDI1997] VDI (1997) Cumulative Energy Demand - Terms, Definitions, Methods of Calculation. In: VDI-Richtlinien 4600. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- [Weidema2005] Bo Weidema, Göran Finnveden and Mary Stewart (2005) Impacts from Resource Use - A common position paper, International Journal of Life Cycle Assessment 10 (6) 382
- [WRI1994] The World Resources Institute (1994) People and the environment – Resource Consumption, Population Growth, Women, Oxford University Press.

## Annexe 1 : Interviews d'experts

### Compte rendu de l'interview de Marisa Vieira

L'interview de Marisa Vieira, de Pré Consultants, a été réalisée le 7 février 2013. Les objectifs de cet entretien étaient les suivants :

- obtenir des précisions sur la méthode ReCiPe,
- obtenir des informations sur les travaux en cours concernant LC Impact,
- puis d'une manière générale recueillir la vision de M. Vieira sur les indicateurs d'épuisement des ressources, tant en termes de recommandations qu'en termes de limites.

### Precisions on the ReCiPe method

#### ► Overview of the ReCiPe approach

*ReCiPe resource depletion endpoint indicators assess the consequences of an extraction on future extractions (damage to resource cost). As far as we understood, the ReCiPe endpoint indicators have an overall similar approach as the one used in El99 (besides the fact that these "future processes" are assessed through cost (Maginal Cost Increase) instead of surplus energy). What are the main reasons that lead to the choice of this type of indicator?*

M. Vieira confirms that ReCiPe follows the same overall approach as El99, in the sense that both methods address the additional effort that will be necessary for future extractions.

According to M. Vieira, the main choice for this approach relies in the fact that for stakeholders, the increasing difficulty to extract a resource is a topic of higher concern than the decrease of reserves. The difference between both methodologies is indeed that El99 resource indicators assess additional effort through surplus energy, whereas ReCiPe resource indicators use surplus costs. M. Vieira considers that cost is a more comprehensive indicator than energy alone (although an important part of resource extraction cost is energy), and also that cost is the main decision driver in trade-offs for the choice of extraction techniques or mining location.

#### ► Calculation of indicators for minerals

##### ▷ Reserve

*The main source used for deposits (i.e. Singer 1997) provides grade and tonnage for a large number of deposits around the world. Do you confirm that the notion of reserve is not included in the method?*

M. Vieira is almost sure that reserve was not considered in the ReCiPe method.

▶ **Production amounts**

*The production amount (amount of commodity extracted per year) is used to calculate the characterisation factors. Is an estimated production amount used for each year in the future? Is a reference year used? If so, of which year is production volume representative?*

M. Vieira confirms that yearly production amounts considered for future years are based on the last available year in the data sources. The data used for ReCiPe does not include any projection on the future production amounts.

M. Vieira underlines the fact that production amounts should anyway be included in the assessment of surplus costs: if two resources have the same MCI, the overall damage to society is higher for the resource that is the most produced.

▶ **Discount rates**

*Is a specific time perspective considered? Does it depend on the considered discount rate?*

The use of a discount factor allows to avoid the use of a time-horizon cut-off, as in practice, the actualization factor becomes negligible after a certain number of years.

*What lead to the choice of a 3% discount rate?*

This discount rate was mainly chosen in order to be in line with the hierarchist approach used for other indicators of the ReCiPe method (notably for human health), for which a 3% discount rate was already considered.

▶ **Cultural perspectives**

*The different cultural perspectives (Egalitarian/Hierachist/Individualist) have not been considered for mineral indicators. Is there any specific reason for this?*

M. Vieira confirms the fact that mineral depletion indicators do not include the cultural perspective. The different perspectives, if included, would probably be in the future production forecasts and the discount rates.

However the calculation is based on past production amounts (and thus do not require the use of cultural perspectives), due to a lack of data.

▶ **Alignment between endpoint and midpoint indicators**

*One of the main focuses of ReCiPe resource indicator is the development of consistent endpoint indicators. To our understanding, the midpoint indicators are derived from endpoint indicators afterwards. What is the meaning of mineral midpoint indicator (in  $1/(\$ \cdot \text{year})$ )? We do not clearly if it corresponds to the grade decrease, as presented in table 2.1 (p6 in the ReCiPe report).*

*Why has a different approach been used for fossil fuels midpoint indicators (i.e. use of lower heating values)?*

M. Vieira underlines the fact that the main purpose of ReCiPe is to propose a consistent set of endpoint indicators. The development of the method has thus focused on the definition of endpoint indicators.

As it is a common request among LCIA users to have access to midpoint characterization factors, midpoint indicators have been developed afterwards. However, the midpoint indicators defined in ReCiPe for are not midpoint indicators as such, in the sense that they do not directly reflect a specific point in the cause-effect chain between an extraction and the damage (as assessed by ReCiPe endpoint indicators).

M. Vieira presents the reflections and work that happened after ReCiPe was developed, namely in the context of LC-IMPACT, in terms of midpoint indicator definition:

Initially, the ore grade decrease was thought to be a good midpoint indicator, as it has an actual physical meaning in the cause-effect chain leading to the impact. However, using ore grade decrease as a midpoint indicator is not in line with the recommendations made by UNEP/SETAC [Jolliet2004] on midpoint-endpoint alignment. According to UNEP/SETAC, for a given midpoint indicator, a unique conversion factor should be used to convert the midpoint indicator into an endpoint indicator. This is not consistent with the use of ore grade decrease as a midpoint, because the conversion to endpoint requires the produced quantities, which are specific to each resource.

M. Vieira acknowledges ore decrease as a meaningful indicator, especially for mining industry, but underlines the fact that it can not be considered as a proper midpoint indicator when combined with the proposed endpoint indicator surplus cost.

The use of other midpoint indicators has also been investigated. However, other resource depletion midpoint indicators such as ADP (CML) or exergy are also not consistent with the endpoint indicators proposed by ReCiPe.

M. Vieira also reminds the methodological issues linked to these indicators:

Regarding ADP, the type of reserve that should be considered is still debated. M. Vieira also mentions that ADP takes only availability into account, and not quality, whereas both aspects should be considered.

On the other hand, exergy aims at assessing the quality of resources, but does not include any notion of scarcity, i.e. exergy of a given resource is the same whether a large reserve is available or if it is the last kilogram of this resource on earth.

According to M. Vieira, ReCiPe midpoint resource indicators are "fictional" midpoint indicators. They do not reflect any actual effect in the cause effect chain that leads to the damage. However they address a common LCIA user need to have midpoint indicators.

M. Vieira does not recommend considering them as actual midpoint indicators.

Moreover, M. Vieira considers that there is no satisfying midpoint indicator for resource depletion in LCA.

► **Mineral resource "coverage"**

*ReCiPe metal depletion indicators covers 20 minerals. Minerals such as Rare Earths, Niobium, Tantalum, Cadmium are generally considered as critical in the literature, but are not covered in the ReCiPe mineral depletion indicator. Is it due to the fact that USGS data does not cover these deposits?*

M. Vieira explains that the limitation in terms of resource coverage is linked to the data sources that have been used. M. Vieira underlines that it is very difficult to find a sufficient amount of reliable data that allows the development of a consistent set of characterisation on a wide range of minerals.

## Development of LC-Impact

*What are the main differences between ReCiPe and LC-impact regarding resource indicators?*

*Are only the data sources updated, or are there also differences in the methodology?*

M. Vieira states that the same overall approach as ReCiPe has been used, but that the method has been much improved. The main improvements concern notably the following points:

- better data;
- better statistical analysis;
- better estimates for future production;
- more consistency in the discount rates.

M. Vieira underlines that the issue of data availability could lead to changes in the new method. If there is not enough quality data available to feed the model, a simplification of the LC-Impact method as defined so far could be carried out.

Another improvement of LC-Impact resource indicators is the fact that they use different cultural perspectives (Egalitarian/Hierarchist/Individualist). The cultural perspective are used to provide different scenarios for:

- Resource production forecast: Production forecasts for future years are based on population, economic development and energy production forecasts, taken from IPCC projection scenarios. These scenarios are linked to the E/H/I cultural perspectives.

- Discount rates
  - 0% for the Egalitarian perspective: In other words, the MCI will apply equally on everything that's left to be mined, assessed as reserve base (The reserve base definition is the same as for CML, but with more recent references);
  - 3% for Hierarchist perspective: This discount rate is in line with the choice done for other impact categories;
  - 15% for Individualist perspective: This discount rate is still under discussion A 15% discount rate is line with a time perspective of about 20 years, which is consistent with the time horizon generally considered in the individualist perspective. Also, private companies generally use discount rates that are higher than 10%.

*Will LC-Impact mineral indicator cover more resources than ReCiPe?*

LC-Impact should also provide wider resource coverage than ReCiPe. M. Vieira states that characterization factors for PGM and RE (as groups) will be developed.

*What lead to the choice of the midpoint indicator for minerals?*

LC-Impact proposes a different midpoint as ReCiPe for minerals: ore grade decrease will be used as a "fictional" midpoint indicator. M. Vieira underlines that it is a valuable and useful indicator, although it is not a midpoint as such (as recommended by SETAC [Jolliet2004]).

*What is the status of LC-Impact? Will the method and the characterization factors be made publicly available, and when?*

M. Vieira states that the final reports should be delivered to the European Commission by end of April. A public release of the reports could be expected in the 2-3 following months.

Regarding fossil fuels: The development of the method and the calculation of characterization factors are ready for endpoint indicator. Crude oil, natural gas and coal are covered.

Regarding mineral: the method for midpoint is ready; the method for endpoint is almost ready. Data collection has still to be performed in order to feed the model.

*The LC-Impact report (D1.1) presents a supply risk indicator (called "social midpoint") in addition to other resource indicators. How will the supply risk indicator be linked to the endpoint?*

This point has been included in the report in order to present the concept of a supply risk indicator that addresses criticality. However this indicator will not be further developed and will not be included in the final LC-Impact methodology.

M. Vieira explains that the issue of criticality is more related to social aspects rather than environmental aspects. The scope of LC-Impact is environmental impact assessment.

*Does the LC-Impact LCIA method aim at replacing ReCiPe?*

M. Vieira confirms that the LC-Impact LCIA method (regarding resource indicators) has been developed as an improvement of the ReCiPe indicator.

## Recommendations

*What are your personal recommendations for the use of resource indicators?*

M. Vieira generally uses the endpoint ReCiPe indicators. This choice is not driven by the resource indicator, but by the fact that ReCiPe allows the calculation of consistent endpoint indicators. If necessary, M. Vieira recommends the use of multiple indicators as a sensitivity analysis.

Also, if a midpoint indicator is explicitly requested, M. Vieira will use the ReCiPe midpoint indicators, but also carry out a sensitivity analysis using the CML and EDIP indicators.

M. Vieira provides her view on the use of the different cultural perspectives:

- Egalitarian: This perspective is in line with NGO vision, as it is a precautionary perspective that considers each interaction with nature as potentially damaging;
- Individualist: This perspective is in line with industry, as this vision corresponds to a short-term vision, linked to a strong belief that technology development will resolve environmental problems.
- Hierarchist: This perspective is in line with a consumer vision; as consumers care both about their own situation, but also to the situation of the next generations (for instance children and grandchildren).

## Limits

*What are the main limits of resource depletion indicators?*

M. Vieira states that the first limit to resource depletion indicators is their acceptance. A lot of people consider that resource depletion is an economic problem only and that it should not be part of an environmental assessment.

M. Vieira states that a second limit is the data on which the indicators are based. While the methods can be well defined, a limit to their implementation is the lack of impartial data.

M. Vieira cites the case of fossil fuels, for which indicators are based on data from OPEC

countries. M. Vieira underlines that this data can be subjective as they are published by an organization that have an interest in producing fossil fuels.

M. Vieira also mentions that this less the case for minerals, for which data are more widely available.

*What is your opinion on the fact that methods do not consider competitive use?*

In M. Vieira's opinion, this is not an issue for fossil fuels, as the vast majority is burned.

For metals, M. Vieira states that indicators should consider primary production only.

M. Vieira explains that in LC-Impact, future primary production forecast includes resource consumption forecast, but also secondary production (i.e. recycling) that are not dissipative uses (for instance, the use of metal in an alloy is dissipative, as the metal it is not retrievable as a pure form afterwards) and substitution.

*Since each resource provides its own functions, what is your opinion on the fact that different on resources are grouped in the same category?*

M. Vieira states that this is not a problem, as otherwise it would not be possible to make trade-offs between resources. Resources can all be taken into account in the same category, as long as they are consistently assessed.

*What is your opinion on the inclusion of policy or industry-oriented resource indicators (criticality) into the LCA methodology?*

M. Vieira underlines that such indicators are important and valuable, but that it may not be necessary to try to link them with LCA.

Methodologies already exist for criticality indicators, which may be difficult to link with LCA. M. Vieira explains that these types of indicators are highly dependent of the scope of the system (different ownerships, different trade barriers). In order to be sufficiently accurate, the implementation of such indicators in LCA would require the development of a high amount of factors, in order to reflect the complexity of the possible trade flows, which is not feasible today.

M. Vieira states that in the future, existing methods on criticality could be integrated on the social part of life cycle sustainability assessment, but that LCIA environmental indicators should focus on the geological availability.

## Compte-rendu de l'interview de Cécile Bulle

L'interview de Cécile Bulle, du CIRAIG, a été réalisée le 6 mars 2013. L'objectif de cet entretien était d'obtenir des précisions sur l'indicateur ressource de la méthode Impact World+ en cours de développement.

### Principe et fondements

*Le site de présentation d'Impact World+ présente la méthode comme une mise à jour majeure des méthodes Impact2002+, EDIP et LUCAS. L'indicateur d'épuisement des ressources d'Impact World+ se base-t-il sur Impact2002+ (EI99 pour les minéraux, Cumulative Energy Demand pour les ressources fossiles) ou sur EDIP (personnes.réserves) ?*

#### ► Principe de base

La méthode proposée pour l'indicateur ressource ne reprend pas les méthodes existantes. Il s'agit d'une nouvelle approche fondée sur la fonctionnalité des ressources pour les utilisateurs en compétition, inspirée de Stewart et Weidema [Stewart2005]. Le cadre méthodologique reprend l'approche développée pour l'indicateur eau par Boulay et al [Boulay2011] [Boulay2011-2], en l'adaptant aux ressources minérales fossiles.

Le domaine de protection considéré correspond aux services rendus par les écosystèmes et les ressources (et non pas les ressources en tant que telles). Ainsi, la méthode vise à évaluer la dissipation des fonctions fournies par les ressources.

#### ► Chaîne de cause à effet considérée

Les mécanismes considérés sont les suivants :

1. L'usage dissipatif d'une ressource fossile ou minérale modifie la disponibilité pour les utilisateurs en compétition.
2. La modification de la disponibilité entraîne une privation pour les utilisateurs en compétition (→ *C'est ce qu'évaluent les indicateurs midpoint*).
3. La privation nécessite des adaptations de la part des utilisateurs, dont certains sont en mesure de s'adapter et d'autres non (capacité d'adaptation).
4. Ces adaptations entraînent :
  - a. des coûts (→ *C'est ce qu'évalue l'indicateur endpoint*),
  - b. et des impacts environnementaux indirects (ceux du processus d'adaptation).

#### ► Focus sur les mécanismes d'adaptation

Les « adaptations » possibles dépendent des secteurs utilisateurs :

- Dans certains cas, l'adaptation au manque d'une ressource donnée peut consister à aller chercher des minerais moins concentrés ou des ressources fossiles plus difficiles à extraire (On rejoint dans ce cas les approches d'Elgg et ReCiPe, qui quantifient les efforts supplémentaires via les surplus d'énergie ou les surplus de coûts).
- Dans d'autres cas, l'adaptation peut consister à réaliser la fonction autrement, en utilisant une autre technologie ou une autre ressource.

Si on prend l'exemple de l'aluminium, on peut considérer que les secteurs utilisateurs de l'aluminium sont l'aéronautique, la construction (fenêtre) et l'emballage (canettes).

Si l'aluminium devient plus rare et que son prix augmente, le secteur de l'emballage peut s'adapter facilement, car d'autres technologies existent pour remplir la même fonction (bouteille PET, bouteille en verre, emballage multicouche (type Tetra-pack),...).

En revanche, le secteur aéronautique aura une capacité d'adaptation plus faible, car il est plus difficile de trouver des alternatives présentant les mêmes caractéristiques fonctionnelles que l'aluminium (légèreté, résistance mécanique...).

### ► **Prise en compte du recyclage**

La méthode vise à évaluer la dissipation des fonctionnalités des ressources. De ce point de vue, le recyclage peut être considéré comme une nouvelle mise à disposition des fonctionnalités d'une ressource à d'autres utilisateurs. Les fonctions des ressources ne sont pas perdues (mais peuvent être éventuellement dégradées).

Du point de vue de la modélisation, une nouvelle mise à disposition correspond à un flux de ressource sortant du système étudié.

Du point de vue de la méthode de caractérisation, des réflexions sont en cours au sein de l'équipe Impact World+ pour définir des facteurs de caractérisation sont différents pour ces flux sortants, dans le cas où les fonctions sont dégradées (par exemple, pour tenir compte du fait que l'aluminium d'emballage ne peut pas être utilisé en aéronautique).

## **Type(s) d'indicateur(s)**

*La méthode propose-t-elle des indicateurs midpoint et endpoint pour les ressources ? Comment sont-ils exprimés ?*

### ► **Midpoint**

La méthode propose deux indicateurs midpoint :

- un indicateur midpoint pour les ressources fossiles, appelé FoCSI, exprimé en « MJ deprived »,
- un indicateur midpoint pour les ressources minérales, appelé MACSI, exprimé en « kg deprived ».

Ces indicateurs traduisent le « facteur de compétition », c'est-à-dire la fraction de la ressource dissipée qui va potentiellement manquer à un usager en compétition pour cette ressource. On cherche ainsi à évaluer l'ampleur de ce facteur de compétition en tenant compte :

- des stocks (réserves économiques et réserves anthropogéniques),
- des taux de dissipation actuel des ressources,
- et d'un temps caractéristique qui permet de déterminer des « taux de renouvellement de la fonctionnalité de la ressource », c'est-à-dire la vitesse à laquelle un secteur utilisateur est en mesure de s'adapter à une privation d'une ressource donnée.

Les indicateurs FoCSI et MACSI tiennent compte des équivalences fonctionnelles entre certaines ressources interchangeables : c'est la dissipation du service rendu par la ressource qui est caractérisée et non l'extraction de la ressource.

### ► Endpoint

La méthode propose également un indicateur endpoint qui rend compte de l'impact économique direct dû à l'adaptation des usagers en compétition affectés. C. Bulle cite l'exemple du coût de la désalinisation, dans le cas des ressources en eau.

Par ailleurs, C. Bulle mentionne qu'au-delà de ces surcoûts (les endpoints), il est possible de réaliser en parallèle et de manière cohérente avec la méthode Impact World+ la modélisation des impacts environnementaux potentiels indirects dus à l'adaptation via l'extension des frontières de l'inventaire. En reprenant l'exemple des ressources en eau, cela revient à modéliser les impacts dus à la désalinisation. Ceci correspond à une approche conséquentielle, dans la mesure où l'on étend les frontières du système afin d'intégrer les conséquences de l'impact et n'est pas directement intégré dans les facteurs de caractérisation d'Impact World+ pour ne pas imposer la prise en compte de ces conséquences indirectes à ceux qui décident d'adopter une approche attributionnelle. Par contre, l'ensemble des processus d'adaptation identifiés pour faire l'estimation des surcoûts est à la disposition des praticiens.

## Facteurs de caractérisation

### ► Définition des facteurs

*La méthode visant à caractériser la dissipation des fonctions, y'a-t-il autant de facteurs que de fonctions identifiées ?*

Il y a un facteur individuel par ressource. Chaque ressource fournit un jeu de fonction à un ensemble de secteurs utilisateurs. Néanmoins, lorsque l'on dissipe les fonctions d'une ressource donnée, c'est bien l'ensemble des secteurs qui est potentiellement affecté ; il n'y a donc pas lieu de définir des facteurs propres à chaque fonction.

### ► Régionalisation

*Les facteurs sont-ils régionalisés ou évalués au niveau mondial ?*

C. Bulle cite l'exemple de l'indicateur eau : les facteurs sont propres au bassin versant depuis lequel l'eau est prélevée. La méthode pour l'indicateur ressource suit la même approche et distingue les ressources partagées à l'échelle mondiale (par exemple le pétrole, qui est expédié partout sur le globe) des ressources partagées localement.

Pour les ressources partagées à l'échelle mondiale, le facteur de caractérisation est global.

Quand elle est partagée localement, on peut alors utiliser des facteurs régionalisés, avec la possibilité d'utiliser un facteur global (moyennes pondérées des facteurs régionalisés).

En revanche, la disponibilité d'un point de vue géopolitique (barrières économiques, etc..) n'est pas incluse dans le modèle à ce jour.

## Ressources couvertes

*Quelles sont les ressources couvertes ? Les ressources minérales et fossiles sont-elles évaluées de manière analogue ?*

Les facteurs de caractérisation sont développés pour 189 ressources minérales, ainsi que pour les ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon). Les ressources minérales et fossiles sont évaluées selon un cadre méthodologique cohérent.

## Données sources

*Sur quels types de données le calcul des facteurs de caractérisation est-il basé ? Par exemple : si les réserves sont utilisées, quel est le type considéré (réserves ultimes, base de réserves...)?*

Les stocks considérés sont les réserves économiques et les stocks anthropogéniques. C. Bulle précise que des analyses de sensibilité ont été réalisées afin d'évaluer comment les facteurs sont affectés par la variabilité des niveaux de réserves considérés et chaque facteur de caractérisation sera accompagné de l'incertitude qui y est associée.

*Selon vous, quelles données actuellement non disponibles vous permettrait une implémentation plus complète du modèle utilisé pour l'indicateur ressource ? (Données d'extraction annuelles, données de coûts, réserves identifiées...)*

C. Bulle indique les deux types de données suivantes comme les plus difficiles à obtenir :

- La substituabilité entre les ressources pour différents secteurs. L'équipe de développement travaille avec des économistes pour établir des modèles de substitution entre secteurs.

- L'adaptabilité des secteurs, c'est-à-dire le temps de réaction nécessaire aux différents secteurs industriels pour s'adapter à une augmentation du coût des ressources qu'ils utilisent.

## Incertitudes

*La méthode Impact World+ fournit des incertitudes sur les facteurs de caractérisation. Sous quelle forme sont-ils indiqués ?*

C. Bulle indique que les facteurs de caractérisation seront fournis avec une incertitude combinant :

- L'incertitude, exprimée en écart-type. Cette incertitude représente l'incertitude des modèles, des choix de modélisation et des données utilisées dans chacun des modèles.
- L'incertitude liée à la variabilité spatiale, considérée de manière distincte. Cette incertitude peut notamment être réduite par le praticien ACV en spécifiant les régions d'extraction des ressources.

C. Bulle mentionne que des travaux sont en cours avec les éditeurs de logiciels ACV pour faciliter l'identification des flux les plus contributeurs à l'incertitude, afin d'être en mesure d'identifier lors de la réalisation d'une étude de cas quels flux d'inventaire valent la peine d'être régionalisés lors du processus itératif de l'ACV.

## Normalisation

*La méthode propose-t-elle des facteurs de normalisation ?*

C. Bulle indique que la méthode proposera une valeur de normalisation mondiale, uniquement pour l'indicateur endpoint, exprimée en valeur monétaire.

De plus, C. Bulle et les autres auteurs de la méthode recommandent l'utilisation des indicateurs endpoint, afin de mettre les indicateurs en perspective les uns par rapport aux autres au niveau dommage, avant l'application d'une normalisation.

## Planning

*Une date prévisionnelle de publication est-elle prévue ?*

Les articles, ainsi que la documentation d'Impact World+ sont en cours de rédaction. L'objectif est une mise à disposition de la documentation en mai 2013.

Les facteurs midpoint sont développés pour les ressources minérales et fossiles. Les facteurs endpoint sont développés pour les ressources fossiles, et en cours de développement pour les ressources minérales.

## Compte-rendu de l'interview de Laura Schneider

L'interview de Laura Schneider, de la TU Berlin, a été réalisée le 28 mai 2013. Les objectifs de cet entretien étaient les suivants :

- obtenir des précisions sur l'indicateur AADP,
- obtenir des informations sur les travaux en cours concernant l'indicateur de criticité « Economic resource availability »
- puis d'une manière générale recueillir la vision de L. Schneider sur les indicateurs d'épuisement des ressources, tant en termes de recommandations qu'en termes de limites.

### AADP

#### ► Calculation and data sources of the indicator

*You indicate that the dissipated stock for copper has been evaluated as very low (less than 1%) and is thus negligible. Could the dissipated stock be important for other materials, for example for metals that are used in very small quantities in electronic components?*

The dissipated stock for copper (1%) is based on a detailed study from Kapur and Graedel. The situation can be very different for other metals, like e.g. metals that are often used in alloys at low concentrations or mercury that is easily dissipated in the environment. However, data on dissipated stock is very scarce, so it is very difficult to have representative figures on different materials. For now, default values are used in the method.

*What is the status of reflection regarding the possibility of taking into account the potential quality decrease for the materials in the anthropogenic stock?*

The quality decrease of resource is a relevant aspect to take into account. However assessing the quality decrease is a complex task, because you need to take into account the possible usages of each resource, for instance distinguish the technologies that use high quality resource from the one that can use degraded material.

Quality decrease is not quantified at this point, but the discussion for the possible inclusion of this aspect is still on-going.

#### ► Resource coverage

*Besides the 10 material for which an AADP has already been developed, you mention that other materials will be included in the future. Will these additional AADP be published?*

AADP characterisation factors have been developed for 20 metals so far. These factors will be published soon.

*To which extent can AADP be developed for fossil fuels?*

The principle of AADP can be applied to fossil fuels, too. However, assessment of the anthropogenic stock of fossil fuel is not straightforward: it would be necessary to distinguish the part of the fossil fuels that are used as energy or as material, as well as quantify the global end-of-life scenarios. For example, plastics can be recycled or burned. Due to the difficulty of identifying this data, fossil fuels are so far is not included in the AADP method.

*What are the main roadblocks that make the development of additional characterization factors difficult today (e.g. type of missing data)?*

The main difficulties concern both geological and anthropogenic stocks:

- Regarding geological aspects: It is difficult to identify "resource" data, i.e. the level of geological reserve that is used to calculate AADP. Even if data sources are enhancing their content (e.g. USGS), it is probable that resource data will never be available for some materials, like for example for gold.
- Regarding anthropogenic aspects: There is a lack of detailed data for assessing or calculating the anthropogenic stock.

#### ► Use of indicator

*According to you, does the use of AADP modify the approach for LCI calculation, notably regarding recycled content and recycling loops?*

The LCI calculation is not influenced.

*Do you confirm that the characterization factors concern only actual elementary flows (i.e. extracted from environment) at this point? Could factors be develop for the characterisation of flows extracted from the technosphere?*

The AADP includes primary and secondary stocks. Thus, the evaluation of primary and secondary material is the same.

#### ► Uncertainties

*Has the uncertainty linked to the AADP factors been investigated?*

The uncertainty linked to the data used to build AADP factors have not been assessed at this point. Due to the fact that data is still very scarce, the priority is identify data on a wider range of resource, before assessing the uncertainty of already identified data.

### ► Normalisation

*Can world normalisation values be calculated based on world extracted quantities, similarly to what could be done for e.g. ADP?*

Yes, you can normalise the AADP of a product or a process to the AADP of e.g. a region or capita. However, no data is available so far.

### ► Integration in tools and database

*Will AADP be integrated to existing LCA software?*

The discussion for the integration in GaBi is on-going.

*Will it be presented as an alternate version of ADP in CML (with a different scope for reserve), or as a "stand-alone" indicator?*

AADP should be used as a stand-alone indicator at this point, in addition to other indicators on resources. The main reasons are the following:

- AADP does not cover as many materials as ADP.
- Though AADP derives from ADP concept, it has been develop independently.

## Economic material availability

*You propose a new AOP "Economic material availability"? According to you, should "economic availability" not be included in the scope of existing resource consumption indicators?*

We propose to include the assessment into the framework of LCA. We include the economic availability AOP in sustainability assessment, but we distinguish it from existing resource AOP in LCA, as the 2 AOP are not linked with the same issues.

- The existing AOP on resources in LCA is based on geological availability of resources and is linked with environmental stakes.
- Economic availability on the other hand translates short term issues, that are not directly linked to geological aspects. Economic availability is however relevant as it provide valuable input to industry for assessing the scarcity of a material/availability of a material for production processes.

*Concerning the economic raw material availability index: How do you define the level for "current situation" and "target"? Did you assess this index for several resources?*

Data on "current situation" have been taken from literature. They represent the state-of-the-art knowledge on each indicator. The "target" levels are on the other hand more flexible. We propose a set of values for these targets, but they can be adapted in order to match with the specific situation and display e.g. an industry perspective/subjective perception of risk of a specific organisation carrying out the assessment.

The article on "Economic resource availability" will be published very soon. We will propose "current situation" and "target" values for 17 materials and explain in detail how they have been calculated. We are in the process of expanding the number of covered material.

*Do you confirm that this index can be used as a "characterization factor" in order to assess the economic raw material availability index of product or service?*

Yes, the "Economic resource availability" indicator can be used as a characterisation method in LCA calculation, and is based on existing characterisation methods within LCA.

## **Recommendations and limits**

*What are your personal recommendations for the use of resource indicators?*

There are multiple resource indicators available. ADP is the indicator we most often use in our LCA projects. We think it is the most advanced in terms of data availability and applicability.

Different resource indicators often present the same results because impacts are dominated by the use of fossil fuels. For instance, this is why ADP has been split into ADP<sub>fossil</sub> and ADP<sub>elements</sub>.

For the assessment of geologic availability, ADP should be used. However, when considering the availability of resources for production processes, additional indicators need to be included.

Currently, not enough data is available to include economic aspects of resource availability. However, we are working on the "data-issue" and the method we develop can be used in the near future, when assessing resource availability within LCA studies.

*What is your opinion on the fact that methods do not consider competitive use?*

It is a relevant aspect to take into account, but the lack of available data makes it difficult to quantify.

*Since each resource provides its own functions, what is your opinion on the fact that different resources are grouped in the same category?*

The current resource indicators assess the physical availability of resources, independently from their functions. The inclusion of the functional aspects in the characterisation factor appears difficult at this point. However, the functionalities of different resources can partly be captured by assessing the "vulnerability" of a country or a company to a given resource.

*What are the main limits of resource depletion indicators?*

Existing resource indicators relate to physical availability. None of them is currently able to take into account the economic availability. This can be illustrated with rare earth metals, which seldom come out as significant contributor when using existing resource indicators, although there are perceived as very critical by companies. The "Economic resource indicator" that we developed is a proposition to overcome this limit, by assessing the supply risk of different materials. The "Economic resource indicator" should be used in addition to existing resources indicators analysing geological availability.

## Annexe 2 : Calcul des facteurs de caractérisation de l'indicateur minéral depletion potential de la méthode ReCiPe

L'objectif est de quantifier la valeur suivante pour chaque ressource minérale :

$$\text{Valeur actuelle des surcoûts} = \sum_{t=1}^T MCI_{r,kg} \times P_{r,t} \times \frac{1}{(1+d)^t} \quad (\text{rappel de l'équation A})$$

### ► Sources de base

Les auteurs se basent sur une source de l'USGS (Singer et al. (1997)) qui liste les différents types de minerais existant sur la planète (environ 3000 mines répertoriées). Cette source indique notamment :

- les types de ressources contenus dans chaque gisement
- Pour chaque ressource, la contribution de chaque gisement à la production mondiale de cette ressource
- les tonnages produits par chaque gisement
- la teneur des minerais contenu dans chaque gisement.

Les auteurs utilisent également des données des données de coûts, provenant des sources suivantes :

- CostMine
- World Mine Cost Data Exchange

### ► Etape 1

Les auteurs modélisent le fait qu'une extraction marginale au sein d'un gisement engendre une réduction marginale de la teneur du minerai du gisement.

Ils expriment ainsi :

- $Y_{v,d}$  la valeur totale produite par un gisement  $d$ , exprimée monétairement (\$)

*en fonction de*

- $g_{v,d}$  la teneur du minerai, exprimée monétairement pour un gisement  $d$ , évaluée à partir de la valeur des différentes ressources qui le compose (\$/kg).

Une régression linéaire leur permet d'exprimer cette relation sous la forme d'une fonction affine décroissante.

$$Y_{v,d} = M_d \times g_{v,d} + c_d \quad (\text{équation 1.1})$$

Avec **M<sub>d</sub>** la pente de la droite (homogène à des kg) et **c<sub>d</sub>** une constante (homogène à des \$).

Ensuite, les auteurs expriment une variation marginale de la teneur du minerai ( $\partial g_{v,d}$ ) en fonction d'une variation marginale d'une production, autrement dit d'une extraction ( $\partial Y_{v,d}$ ), en calculant l'inverse de la dérivée de l'équation 1.1 :

$$\frac{\partial g_{v,d}}{\partial Y_{v,d}} = \frac{1}{M_d} \quad (\text{équation 1.2})$$

## ► Etape 2

Les auteurs modélisent le fait qu'une baisse marginale de la teneur du minerai (exprimée en valeur) engendre une hausse marginale du coût d'extraction :

Ils expriment ainsi :

- **C<sub>d,\$</sub>** le coût pour extraire un dollar de valeur d'un gisement d (\$/\$)  
*en fonction de*
- **g<sub>v,d</sub>** la teneur du minerai, exprimée monétairement pour un gisement d (\$/kg)
- et de **x**, le coût d'extraction d'une ressource par kg (\$/kg).

Les auteurs l'expriment ainsi :

$$C_{d,\$} = \frac{x}{g_{v,d}} \quad (\text{équation 2.1})$$

Etant donné la disponibilité limitée des données de coût d'extraction par kg extrait, les auteurs utilisent une unique valeur **x**, et l'appliquent à l'ensemble des gisements. Cette valeur **x** étant une constante, l'expression de **C<sub>d,\$</sub>** en fonction de **g<sub>v,d</sub>** est homogène à la fonction inverse.

Ensuite, les auteurs expriment une variation marginale du coût d'extraction ( $\partial C_{d,\$}$ ) en fonction d'une variation marginale de la teneur du minerai ( $\partial g_{v,d}$ ) en dérivant l'équation 2.1 :

$$\frac{\partial C_{d,\$}}{\partial g_{v,d}} = -\frac{x}{g_{v,d}^2} \quad (\text{équation 2.2})$$

L'équation 2.1 n'étant pas linéaire, l'équation 2.2 qui en est dérivée n'est pas une constante. Autrement dit, la variation marginale du coût d'extraction dépend de la teneur du minerai. Les auteurs se placent arbitrairement à une valeur correspondant à la teneur médiane du minerai. La variation entre la teneur du minerai et la valeur totale produite par un gisement étant linéaire et décroissante (selon l'équation 1.1), la valeur médiane est obtenue lorsque **Y<sub>v,d</sub> = c<sub>d</sub>/2** (équation 2.3).

Enfin, en exprimant  $g_{v,d}$  tel qu'exprimé dans l'équation 1.1, et  $Y_{v,d}$  tel qu'exprimé dans l'équation 2.3, on peut écrire :

$$\frac{\partial C_{d,\$}}{\partial g_{v,d}} = -\frac{x}{\left(\frac{Y_{v,d}-c_d}{M_d}\right)^2} = -\frac{xM_d^2}{(-0.5c_d)^2} \quad (\text{équation 2.4})$$

### ► Etape 3

La combinaison des étapes 1 et 2 permet d'exprimer la variation marginale du coût d'extraction (par \$ extrait) ( $\partial C_{v,d}$ ) en fonction d'une variation marginale d'une production, autrement dit d'une extraction ( $\partial Y_{v,d}$ ). Cette fonction correspond au l'augmentation marginale du coût d'extraction ( $MCI_{d,\$}$ ) du fait d'une extraction au sein d'un gisement d, exprimée en valeur. Celle-ci s'exprime donc :

$$MCI_{d,\$} = \frac{\partial C_{d,\$}}{\partial Y_{v,d}} = \frac{\partial C_{d,\$}}{\partial g_{v,d}} \times \frac{\partial g_{v,d}}{\partial Y_{v,d}} = -\frac{xM_d^2}{(-0.5c_d)^2} \times \frac{1}{M_d} = -4x \frac{M_d}{c_d^2} \quad (\text{équation 3.1})$$

Avec :

- $MCI_{d,\$}$  l'augmentation marginale du coût d'extraction du fait d'une extraction au sein d'un gisement d, pour une extraction exprimée en valeur (\$/\$<sup>2</sup> soit 1/\$)
- $x$  le coût d'extraction par kg (valeur commune pour tous les gisements) (\$/kg)
- $M_d$  (kg) et  $c_d$  (\$) respectivement le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine de la fonction liant la valeur totale produite par un gisement d à la teneur du minerai, exprimée monétairement pour un gisement d (cf. équation 1.1)

### ► Etape 4

Les auteurs déclinent l'augmentation marginale du coût d'extraction  $MCI_{d,\$}$  telle qu'exprimée dans l'équation 3.1 de manière à l'exprimer pour chaque ressource individuelle. Pour cela, ils utilisent les données de l'USGS, qui indique la contribution de chaque gisement à la production mondiale de chacune des ressources couvertes.

Les termes  $M_d$  (kg) et  $c_d$  (\$) sont calculés au niveau de la ressource pour donner  $M_r$  (kg) et  $c_r$  (\$).

Ils obtiennent ainsi  $MCI_{r,\$}$ , l'augmentation marginale du coût d'extraction, pour chaque ressource r, pour une extraction exprimée en valeur.

### ► Etape 5

Les auteurs convertissent l'augmentation marginale du coût d'extraction  $MCI_{r,\$}$  obtenue à l'étape 4, afin de l'exprimer par kilogramme extrait pour chacune des ressources (et non pas en valeur). Pour cela, ils utilisent la valeur de chaque ressource r, appelée  $V_r$ .

Ils obtiennent ainsi  $MCI_{r,kg}$ , l'augmentation marginale du coût d'extraction, pour chaque ressource  $r$ , pour une extraction exprimée en masse.

► **Calcul des facteurs**

Finalement, les auteurs sont en mesure de calculer les facteurs de caractérisation tels qu'exprimés dans l'équation A :

$$CF_{r,kg,end} = MCI_{r,kg} \times \sum_T \frac{P_{r,kg}}{(1+d)^t} = -4x \frac{M_r}{c_r^2} \times V_r^2 \times \sum_T \frac{P_{r,kg}}{(1+d)^t} \quad (\text{équation B})$$

- $CF_{r,kg,end}$ : facteur de caractérisation endpoint d'une ressource  $r$ , pour une extraction en kg (\$/kg) ;
- $MCI_{r,kg}$  en \$/kg<sup>2</sup> : l'augmentation marginale du coût d'extraction, pour chaque ressource  $r$ , pour une extraction exprimée en masse, telle qu'obtenue à l'étape 5 ;
- $V_r$  la valeur de chaque ressource  $r$  (\$/kg)
- $M_r$  (kg) et  $c_r$  (\$), coefficients propre à la ressource  $r$ , obtenus à l'étape 4 ;
- $P_{r,kg}$  en kg la production annuelle de la ressource  $r$  ;
- $d$  le taux d'actualisation.

Les auteurs calculent les facteurs en testant plusieurs taux d'actualisation, et choisissent un taux de 3% par défaut.

