SCORELCA

ETUDE N° 2020-05

METHODES INNOVANTES DE COMPTABILISATION DES RESSOURCES EN ACV

RAPPORT FINAL

Juin 2022

Responsables scientifiques

- **Bernard DE CAEVEL, Tom HUPPERTZ**
RDC Environment, 57, Avenue Gustave Demey
B-1160 Bruxelles, Belgique

- **Antoine BEYLOT**
BRGM, 3, avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans

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.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :

SCORE LCA, METHODES INNOVANTES DE COMPTABILISATION DES RESSOURCES EN ACV, 2022, 147 pages, n°2020-05.

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

- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.

- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de suivi pour Score LCA : Benjamin Jaumard, Marion Pasquier– TOTALENERGIES ; Marie Wouts – ENGIE ; Anne Grau, Denis Le Boulch – EDF ; Yves Babian, Pierre Caillard – RENAULT ; Rafaelle Desplats – ADEME ; Anne-Laure Hettinger, Julio Rivera – ArcelorMittal ; Jeanne Serre – Veolia ; Bénédicte Couffignal – RECORD ; Philippe Osset, Jade Garcia - SCORE LCA

METHODES INNOVANTES DE COMPTABILISATION DES RESSOURCES EN ACV

RESUME

Cette étude a pour but de faire l'état de l'art des méthodes d'évaluation de l'impact associé à l'utilisation des ressources en ACV, pour ce qui est des ressources renouvelables et non renouvelables. Neuf méthodes de caractérisation de l'impact de l'utilisation des ressources non renouvelables ont été présélectionnées pour une analyse plus fine : Abiotic Depletion Potential (ADP) Ultimate Reserve, Environmental Dissipation Potential (EDP), Abiotic Resource Project (ARP), Average Dissipation Rate (ADR) (et Lost Potential Service Time, LPST), Future Welfare Loss, GeoPolRisk, Integrated method to assess resource efficiency (ESSENZ), JRC LCI approach, et JRC price-based characterization approach. L'analyse est faite au regard des critères suivants : concept fondamental, mise en œuvre, opérationnalité et recommandations par des tierces parties. Des cas d'application illustrent cette comparaison pour les ressources non renouvelables. Des recommandations éclairent les praticiens ACV sur les méthodes à utiliser à court-terme (*ad interim*: méthode ADR combinée à la méthode Future Welfare Loss) et les méthodes prometteuses mais non-opérationnelles actuellement (recommandées à terme : méthode JRC-LCI combinée à la méthode Future Welfare Loss).

MOTS CLES

ACV, indicateurs, ressources non-renouvelables, ressources renouvelables, déplétion, dissipation, criticité

SUMMARY

The aim of this study is to review the state of the art of resource use impact assessment methods in LCA for renewable and non-renewable resources. Nine methods for characterising the impact of non-renewable resource use were shortlisted for further analysis: Abiotic Depletion Potential (ADP) Ultimate Reserve, Environmental Dissipation Potential (EDP), Abiotic Resource Project (ARP), Average Dissipation Rate (ADR) (and Lost Potential Service Time, LPST), Future Welfare Loss, GeoPolRisk, the Integrated method to assess resource efficiency (ESSENZ), the JRC LCI approach, and the JRC price-based characterisation approach. The analysis is made against the following criteria: basic concept, implementation, operationality and third-party recommendations. Case studies illustrate this comparison for non-renewable resources. Recommendations are made for LCA practitioners on which methods should be used in the short term (ad interim: ADR method combined with Future Welfare Loss method) and which methods are promising but not currently operational (recommended in the long term: JRC-LCI method combined with Future Welfare Loss method).

KEY WORDS

LCA, indicators, non-renewable resources, renewable resources, depletion, dissipation, criticality

SOMMAIRE (paginé)

1 Méthodologie 5
1.1 Etat de l'art 5
1.1.1 Inventaires publiés 5
1.1.2 Inventaires en cours : travaux du GLAM et du Technical Advisory Board (TAB) de l'EF 5
1.1.3 Synthèses bibliographiques de doctorants et post-doctorants BRGM sur des indicateurs de dissipation des ressources en ACV 6
1.1.4 Projets RDC/BRGM passés et en cours sur les indicateurs ressources en ACV 7
1.2 Analyse détaillée des méthodes 7
1.3 Recommandations 9
2 Résultats 11
2.1 Ressources non-renouvelables 12
2.1.1 Abiotic Depletion Potential (ADP) Ultimate Reserve 12
2.1.2 Environmental Dissipation Potential (EDP) 22
2.1.3 Abiotic Resource Project (ARP) ; suite d'Environmental Dissipation Potential (EDP) 33
2.1.4 Average Dissipation Rate (ADR) and Lost Potential Service Time (LPST) 43
2.1.5 Future Welfare Loss 53
2.1.6 GeoPolRisk 59
2.1.7 Integrated method to assess resource efficiency (ESSENZ) 69
2.1.8 JRC LCI approach 78
2.1.9 JRC price-based characterization approach 87
2.2 Ressources renouvelables 95
2.2.1 LC Impact 95
2.2.2 Impact World+ 102
2.3 Cas d'application 108
2.3.1 Objectifs 108
2.3.2 Méthodologie 108
2.3.3 Résultats et comparaison 114
2.3.4 Approche JRC-LCI : cas d'études « batteries de véhicules électriques » 126
2.3.5 Remarques et difficultés 128
3 Analyse transversale 130
3.1 Concept fondamental 132
3.2 Mise en œuvre 133
3.3 Opérationnalité 134
3.4 Recommandations par des tierces parties 135
3.5 Synthèse de l'analyse transversale 136
4 Conclusions et recommandations 139
Annexe 1 : procédé de production du cobalt Ecoinvent v3.7.1 143
Annexe 2 : Table des facteurs de caractérisation disponibles pour chaque méthode par élément chimique 145
Annexe 3 : Table des facteurs de caractérisation disponibles pour les ressources minérales hors éléments chimiques. 147

1 Méthodologie

1.1 Etat de l'art

L'inventaire des différentes méthodes d'évaluation de l'usage et de l'épuisement des ressources permettra de recenser les méthodes existantes (c'est-à-dire avec au moins un document de référence publié) ou en développement. Ces méthodes seront ainsi répertoriées, en fournissant leurs références complètes (sources, auteurs, publications au format PDF etc.), leurs points méthodologiques clefs, et les sources des données et/ou modèles qu'elles utilisent ou seraient censées utiliser.

Dans ce projet, l'inventaire se basera sur l'approche suivante :

1.1.1 Inventaires publiés

Dans un premier temps, il s'agira de s'appuyer sur les études existantes qui ont déjà fait ce travail d'inventaire dans le passé récent :

- le livrable du projet SCORE-LCA 2012-02
- les travaux de la Task Force Mineral Resources de l'UNEP Life Cycle Initiative, publiés au travers des articles de Sonderegger et al. (2020) et Berger et al. (2020)
- les travaux du JRC publiés en 2019 sur des suggestions de mise à jour des méthodes d'évaluation des impacts (LCIA) dans le cadre de l'Environmental Footprint, et ce notamment en ce qui concerne l'utilisation des ressources (Sala et al., 2019)

Ces travaux constituent un point de départ clé, car ils proposent tous en première étape un inventaire des méthodes existantes, avec une vision exhaustive au moment de la réalisation de l'étude. En particulier, les travaux de la Task Force Mineral Resources ont réuni 23 membres « actifs » : représentants académiques, de bureaux de consultance (dont RDC) et de l'industrie minière et des métaux. Dans ces travaux, 33 méthodes distinctes ont initialement été listées comme étant disponibles dans la littérature ou développées par des membres de la Task Force. Dans les quelques cas d'une même méthode disponible respectivement dans sa version « ancienne » et « actualisée » (par exemple LIME), seule la version actualisée a été conservée et étudiée, de sorte que 27 méthodes ont ainsi été analysées (Sonderegger et al., 2020).

Par définition, les travaux de la Task Force Mineral Resources se sont focalisés sur les ressources minérales. Les travaux du JRC (Sala et al., 2019) sont complémentaires, ayant adopté une vision plus large du concept de ressources, qui inclut aussi les ressources fossiles et les ressources renouvelables. Les documents publiés par la Task Force Mineral Resources (Sonderegger et al., 2020 ; Berger et al., 2020) et le JRC (Sala et al., 2019) contiennent tout ou partie des éléments suivants : références des méthodes, points méthodologiques clefs, sources des données et/ou modèles. De fait, dans cette première étape, il s'agira de retranscrire de façon claire et synthétique les éléments décrits dans ces documents.

1.1.2 Inventaires en cours : travaux du GLAM et du Technical Advisory Board (TAB) de l'EF

Les inventaires existants tels que listés dans la section précédente ont été publiés en 2019/2020, et réalisés avant. De fait les méthodes publiées entre 2018 et aujourd'hui ne sont pas nécessairement toutes listées dans ces documents. Afin de compléter l'inventaire, il s'agira de s'appuyer sur deux types de travaux en cours, sous forme de groupes de travail réunissant des experts à l'échelle internationale, dont le BRGM (via Antoine Beylot) est partie prenante :

a) Les travaux de l'UNEP Life Cycle Initiative portant sur une Global Life Cycle Assessment Method (GLAM).

Le BRGM est membre actif du groupe de travail portant sur les Ressources Naturelles et les Services Ecosystémiques ; et membre actif du sous-groupe de travail associé, portant plus spécifiquement sur le chemin d'impact et les méthodes existantes. Précisément ce dernier groupe de travail vise à définir un chemin d'impact consensuel, qui

- tiendra compte des dernières considérations (et publications) dans la littérature scientifique, notamment en ce qui concerne la dissipation des ressources en ACV et
- permettra de positionner les méthodes existantes à ce jour au vu de ce chemin d'impact.

Dans le cadre de ce sous-groupe de travail, un inventaire des méthodes existantes est en cours de réalisation, préalable à leur positionnement au regard du chemin d'impact. Le document, à l'heure actuelle en cours de circulation à l'attention des (et de modification par les) membres du sous-groupe de travail, inclut des méthodes récentes qui n'étaient pas prises en compte dans les inventaires existants tels que mentionnés plus haut (par exemple IMPACT World+ ; Bulle et al., 2019 ; et GeoPolEndpoint ; Santillán-Saldivar et al., 2020).

b) Les travaux du Technical Advisory Board (TAB) de l'Environmental Footprint.

A la demande de la DG ENV de la Commission Européenne, Antoine Beylot (BRGM) a présenté au TAB Meeting du 10 février 2021 les travaux qu'il a coordonnés sur la dissipation des ressources en ACV/dans le PEF (dans le cadre de ses activités au JRC en 2018-2019). Au cours de cette session du TAB, d'autres développeurs de méthodes ont également présenté leurs travaux :

- Jo Dewulf : professeur à l'Université de Gent, coordinateur du projet SUPRIM cofinancé par l'EIT Raw Materials et qui s'est terminé en 2019 ;
- Alexandre Charpentier-Poncelet : doctorant à l'Université de Bordeaux dans le cadre d'un cofinancement ADEME-BRGM, co-supervisé par Jacques Villeneuve et Stéphanie Muller pour le BRGM. Sa thèse porte sur le « *développement d'un cadre conceptuel et d'un indicateur associé pour la prise en compte de la dissipation des ressources abiotiques non-énergétiques en ACV* »
- Michael Hauschild : professeur à DTU, présentant les travaux réalisés dans le cadre du projet ICMM-ARP : Development of a new Life Cycle Impact Assessment Framework for Assessing Resource Use : The Abiotic Resources Project (notamment financé par l'ICMM - International Council on Mining and Metals).

Les travaux du TAB sur la dissipation des ressources se poursuivent en cette année 2021. Le calendrier pressenti (mais encore à confirmer à ce stade) est le suivant :

- Analyse des méthodes existantes : document de travail actuellement en cours de rédaction par la Commission Européenne (DG ENV/JRC). Antoine Beylot (BRGM) a été invité par la Commission Européenne à partager ses travaux récents (réalisés au BRGM) sur l'application (à plusieurs cas d'études) de l'approche JRC dont il a coordonné les développements en 2019 ;
- Workshop le 30 juin 2021 : discussion de ce document de travail, et choix de cas d'études pour la mise en œuvre de plusieurs méthodes distinctes permettant de prendre en compte la dissipation des ressources en ACV. Antoine Beylot (BRGM) a été invité à participer à ce workshop en tant que développeur de méthodes ;
- Eté 2021 : mise en œuvre des cas d'études ;
- Workshop le 28 octobre 2021 : discussion des résultats des cas d'études ;
- Novembre 2021 : document de conclusions, et prochaines étapes (DG ENV/JRC). A date d'avril 2022, ce document a été circulé auprès des parties prenantes du PEF TAB, et est en cours de révision.

1.1.3 Synthèses bibliographiques de doctorants et post-doctorants BRGM sur des indicateurs de dissipation des ressources en ACV

a) Alexandre Charpentier-Poncelet (doctorant Université de Bordeaux/BRGM ; "*dissipation des ressources en ACV*") a soutenu sa thèse en octobre 2021. L'inventaire et les premiers éléments descriptifs compilés dans cette tâche du projet pourront ainsi s'appuyer sur la synthèse bibliographique du manuscrit de thèse.

b) Jair Santillàn-Saldivar a débuté courant juin 2021 un post-doctorat cofinancé par le BRGM et le CEA sur le développement d'indicateurs pour l'évaluation environnementale des boucles de recyclage avec prise en compte de la dissipation des ressources. La première tâche du post-doctorat consiste en un état de l'art, notamment sur la prise en compte des flux dissipatifs en ACV (fin du post-doctorat : décembre 2022).

1.1.4 Projets RDC/BRGM passés et en cours sur les indicateurs ressources en ACV

Par ailleurs les partenaires s'appuieront sur des projets récent/en cours quant aux indicateurs ressources en ACV :

a) En 2018, le BRGM a contribué au projet MODEXT, dans lequel il a recensé les méthodes d'évaluation d'impacts en ACV qui proposent une monétarisation de la déplétion des ressources. Le BRGM a plus particulièrement passé en revue 6 méthodes pour évaluer leurs forces et faiblesses et produire des recommandations sur de possibles développements qui permettraient de fiabiliser l'évaluation des impacts liés à l'extraction de ressources minérales sur la disponibilité future de ces ressources (https://www.ademe.fr/projet-modext)

b) D'autre part, le BRGM est coordinateur du projet PROPER (« New sustainability metrics to improve recycling PROcess PERformances regarding resource use, environmental impacts and economic benefits »), en partenariat avec RDC Environnement et la société Extracthive. Le projet PROPER est financé dans le cadre de l'Appel à Projets ERAMIN 2. Il vise notamment à des développements quant à la prise en compte de la dissipation des ressources en ACV.

c) Les partenaires pourront au besoin s'appuyer sur les résultats de l'étude sur les « *Impacts environnementaux des activités minières pour quelques matières premières* » réalisée par Vertech, le BRGM et e-Mines pour le compte de SCORE-LCA.

A l'issue de cette étape d'inventaire, une dizaine de méthodologies pertinentes en termes d'évaluation environnementale seront choisies afin d'en réaliser une présentation plus complète. Ce choix de méthodologies pertinentes se basera notamment sur les recommandations telles que déjà formulées par différents groupes de travail :

- 7 méthodes respectivement "recommandées", "recommandées interim" et "suggérées" par la Task Force Resources de l'UNEP
- Une ou plusieurs méthode(s) recommandée(s) par la Commission Européenne respectivement
  - dans l'EF actuel et
  - éventuellement dans le cadre des travaux du TAB sur la dissipation des ressources, à venir en 2021 (tels que mentionnés plus haut dans cette section)

Le choix des méthodologies pertinentes se basera par ailleurs sur l'expertise de RDC Environnement et du BRGM, en concertation avec les membres de SCORE-LCA au regard de leurs attentes quant aux indicateurs ressources en ACV.

1.2 Analyse détaillée des méthodes

Chaque méthode retenue sera décrite et analysée. Comme demandé dans le document d'appel d'offre, cette tâche consistera à détailler :

- le type de méthode ;
- les ressources considérées ;
- les usages appropriés de chaque méthode ;
- les limites et avantages ;

- la maturité et la disponibilité de la méthode et des FC associés (aujourd'hui, court-terme ou moyen-terme) ;
- si la méthode est intégrable aux logiciels existants (SimaPro et GaBi) ou si elle nécessite d'autres données (en plus d'ecoinvent) et paramètres, ou encore des adaptations (notamment pour la nomenclature de flux)[1] ;
- les réglementations ou normes mentionnant la méthode, ainsi que celles qui sont en préparation ;
- la prise en compte de la criticité (économique ou géopolitique) des ressources par les méthodes et les aspects de temporalité de la demande des ressources ;
- la possibilité de faire des évaluations régionales et la facilité de mettre en œuvre la régionalisation dans les logiciels et base de données ;
- la fréquence d'actualisation des facteurs de caractérisations/méthodes et l'impact de l'actualisation sur les résultats.

Cette analyse se basera sur :

1) l'ensemble des documents de synthèse déjà publiés à l'échelle internationale, tels que déjà mentionnés plus haut : en particulier la synthèse et le classement de Sonderegger et al. (2020), les recommandations de Berger et al. (2020) (dans ces deux cas d'articles, à la fois le cœur du texte de l'article et les Supporting Information documents qui s'y rapportent seront particulièrement utiles), et les suggestions de mises à jour de l'EF publiées par le JRC en 2019 (Sala et al., 2019)
2) les documents de synthèse en cours (ou en voie) de circulation dans le cadre des travaux du GLAM (UNEP) et des travaux du TAB (DG ENV/JRC)
3) les documents publiés / en cours de rédaction dans le cadre des travaux des partenaires de ce projet :
    - rapport MODEXT,
    - rapport PROPER,
    - thèse et articles associés d'Alexandre Charpentier,
    - post-doc de Jair Santillàn-Saldivar,
    - méthode développée par le JRC/Antoine Beylot sur la dissipation des ressources en ACV,
    - méthode développée par RDC Environnement sur le coût social de l'utilisation des ressources, etc.
4) l'expertise des partenaires du projet

La structuration générale des méthodes servira de grille d'analyse pour les méthodes sélectionnées (cf. recommandations).

Un entretien vidéo avec 4 développeurs de méthodes pour approfondir l'analyse (par exemple membres du GLAM, JRC, etc.) sera réalisé. Le choix sera fait, en accord avec le Comité de suivi, en fonction des besoins plus particulièrement identifiés dans ce projet.

Cette analyse sera complétée par des cas d'applications qui permettront d'apporter une vision plus pratique. Les méthodes retenues seront appliquées sur quelques inventaires ecoinvent représentatifs (énergie, métaux, transport, agriculture, plastiques, etc.) qui seront définis conjointement entre les partenaires (plus particulièrement RDC Environnement) et le comité de suivi du projet.

[1] Les modifications éventuelles de la méthode originale lors de son application dans un logiciel seront également analysées.

Lors du choix des cas d'application, un arbitrage entre les deux éléments suivants sera effectué :

- Intérêt des membres de SCORE-LCA, en particulier en ce qui concerne les métaux pour la transition énergétique (par exemple les métaux des batteries de véhicules électriques :

  lithium, cobalt, cuivre, nickel, manganèse ; et d'autres métaux tels que l'acier et le platine).

- Pertinence des cas pour mettre en avant les différences des méthodes.

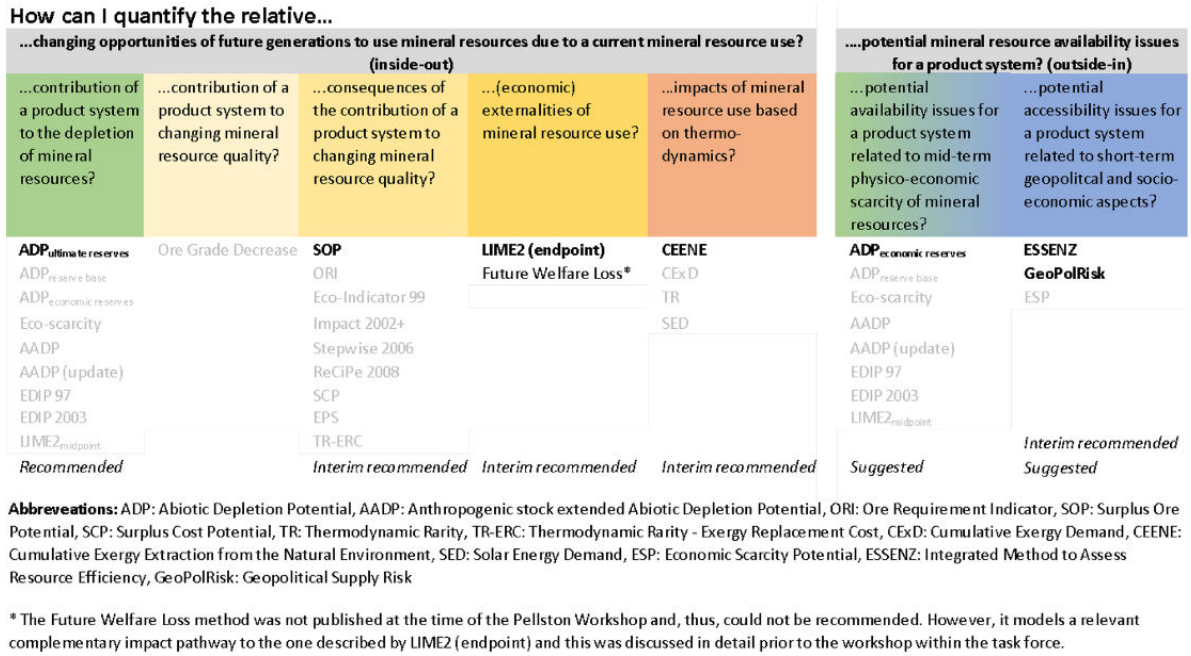
1.3 Recommandations

Par rapport à l'étude de 2012, le contexte méthodologique a beaucoup évolué en ce sens que la Commission Européenne (PEF) et la France (affichage environnemental, Base impacts et Base Carbone qui vont fusionner) sont venues réguler et cadrer nettement plus précisément les choix méthodologiques en ACV.

Par ailleurs une vision plus panoramique des méthodes permet de mieux comprendre la structure des enjeux et donc la complétude et la complémentarité des méthodes. Nous partirons de la structuration de Sonderegger et nous expliquerons dans quelle mesure les méthodes sont à associer et/ou répondent à des besoins/objectifs différents.

Nous inclurons notamment :

- la complémentarité entre les méthodes qui analysent
  - l'importance de la perte de la disponibilité d'une ressource, en fonction des années avant déplétion, de la valeur relative d'utilisation de la ressource en tenant compte de leur substituabilité (future efforts methods) et du stockage de la ressource pour les produits à durée de vie longue (e.g. bâtiments).
  - l'importance de l'augmentation de l'effort à effectuer pour pouvoir récupérer une ressource, selon le degré de dégradation de sa disponibilité (par dilution, mélange difficile à séparer, état chimique) (Dissipation)
- les différents types de question pour un industriel :
  - les enjeux de l'entreprise : risque d'augmentation du prix des ressources ? ; accessibilité des ressources (risque géopolitique) ?
  - les enjeux sociétaux à court terme : risque en termes d'affichage environnemental ou de taxation ?
  - les enjeux sociétaux à long terme : risque en termes d'image ?
- les différents types de question environnementales : le Tableau des recommandations de Berger et al. 2020 complète la Figure sur la classification de Sonderegger



How can I quantify the relative...

...changing opportunities of future generations to use mineral resources due to a current mineral resource use? (inside-out)					....potential mineral resource availability issues for a product system? (outside-in)	
...contribution of a product system to the depletion of mineral resources?	...contribution of a product system to changing mineral resource quality?	...consequences of the contribution of a product system to changing mineral resource quality?	...(economic) externalities of mineral resource use?	...impacts of mineral resource use based on thermo-dynamics?	...potential availability issues for a product system related to mid-term physico-economic scarcity of mineral resources?	...potential accessibility issues for a product system related to short-term geopolitcal and socio-economic aspects?
$ADP_{ultimate\ reserves}$	Ore Grade Decrease	**SOP**	**LIME2 (endpoint)**	**CEENE**	**$ADP_{economic\ reserves}$**	**ESSENZ**
$ADP_{reserve\ base}$		ORI	Future Welfare Loss*	CExD	$ADP_{reserve\ base}$	**GeoPolRisk**
$ADP_{economic\ reserves}$		Eco-Indicator 99		TR	Eco-scarcity	ESP
Eco-scarcity		Impact 2002+		SED	AADP	
AADP		Stepwise 2006			AADP (update)	
AADP (update)		ReCiPe 2008			EDIP 97	
EDIP 97		SCP			EDIP 2003	
EDIP 2003		EPS			$LIME2_{midpoint}$	
$LIME2_{midpoint}$		TR-ERC				*Interim recommended*
Recommended		*Interim recommended*	*Interim recommended*	*Interim recommended*	*Suggested*	*Suggested*

Abbreveations: ADP: Abiotic Depletion Potential, AADP: Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential, ORI: Ore Requirement Indicator, SOP: Surplus Ore Potential, SCP: Surplus Cost Potential, TR: Thermodynamic Rarity, TR-ERC: Thermodynamic Rarity - Exergy Replacement Cost, CExD: Cumulative Exergy Demand, CEENE: Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment, SED: Solar Energy Demand, ESP: Economic Scarcity Potential, ESSENZ: Integrated Method to Assess Resource Efficiency, GeoPolRisk: Geopolitical Supply Risk

* The Future Welfare Loss method was not published at the time of the Pellston Workshop and, thus, could not be recommended. However, it models a relevant complementary impact pathway to the one described by LIME2 (endpoint) and this was discussed in detail prior to the workshop within the task force.

Figure : Questions associées aux impacts de l'utilisation des ressources minérales, méthodes permettant de répondre à ces questions, méthodes recommandées et niveau de recommandation associé (Berger et al., 2020)[2]

Nous analyserons a minima

- les 7 questions auxquelles les méthodes peuvent répondre et
- les 7 méthodes recommandées/suggérées par la Task Force.

Pour les méthodes concernant les ressources renouvelables, les recommandations se focaliseront sur les méthodes innovantes non traitées dans l'étude SCORE-LCA n°2018-05 Indicateurs Ressources Renouvelables[3], et des pistes de réflexions seront proposées. Les réflexions porteront sur des cas concrets de ressources renouvelables (e.g. bois).

Les recommandations permettront aux industriels de se positionner sur les méthodes à court (2-3 ans) et moyen-terme afin d'avoir une vision stratégique des différentes méthodes (notamment les méthodes du TAB).

L'avis « modeste » des consultants sur les forces, faiblesses et l'avenir des méthodes sera développé dans les recommandations.

[2] Berger, M., Sonderegger, T., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., ... & Young, S. B. (2020). Mineral resources in life cycle impact assessment: part II–recommendations on application-dependent use of existing methods and on future method development needs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *25*(4), 798-813.

[3] Les méthodes déjà traitées seront abordées de très façon synthétique et les développements majeurs éventuels seront identifiés.

2 Résultats

Lors d'une réunion de travail, sur base d'une préanalyse, 11 méthodes ont été sélectionnées pour l'analyse détaillée :

- 9 pour les ressources non-renouvelables
- 2 pour les ressources renouvelables

Ces méthodes sont analysées en détail ci-dessous. Dans les tableaux suivants, les colonnes "Critères" et "Question" permettent respectivement de définir

- Les critères de comparaison des méthodes
- La spécification de ces critères au travers d'éléments (notamment de questions) plus détaillées.

2.1 Ressources non-renouvelables

2.1.1 Abiotic Depletion Potential (ADP) Ultimate Reserve

			ADP Ultimate Reserve	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Déplétion	-
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	"Quantifier la contribution relative d'un système produit à la déplétion des ressources minérales"	Cf l'article de Berger et al. (2020) : méthode ADP recommandée pour la question : *How can I quantify the relative contribution of a product system to the depletion of mineral resources?*
	Source la plus récente	-	van Oers, L., Guinée, J.B. & Heijungs, R. Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data. Int J Life Cycle Assess 25, 294–308 (2020). https ://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x	-
	Historiques de développements	-	- Méthode ADP publiée en 1995 (Guinée, 1995) - Mise à jour en 2002 (van Oers et al., 2002), sur la base de données de production annuelle de l'USGS ; et par ailleurs division en 2 sets de FC ADP : respectivement relatifs aux combustibles fossiles (fossil fuels) et aux éléments chimiques (dont métaux : le focus ici) - Mise à jour en 2020 (van Oers et al., 2020) : mise à jour des données de production annuelle et de réserve (càd du contenu de la croûte terrestre en éléments chimiques), qui sont à la base de la formule de calcul des FC de la méthode ADP. Cette mise à jour implique aussi une couverture plus large d'éléments chimiques. Analyse de l'influence des variations (dans le temps) des valeurs de production annuelle sur les FC ; et	Guinée JB, Heijungs R (1995) A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. Environ Toxicol Chem 14 :917–925 Oers L van, Koning A de, Guinée JB, Huppes G (2002) Abiotic resource depletion in LCA - improving characterisation factors for abiotic depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook La mise à jour de 2020 a été financée par l'International Council on Mining and Metals (ICMM). A noter que l'article inclut une discussion sur l'approche de normalisation (avec jeu de données associées) qui n'est pas analysée ici.

			recommandation d'un jeu de FC parmi plusieurs jeux publiés dans cet article.	
Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	La méthode ADP vise à prendre en compte la rareté des ressources minérales, et donc les limites dans la disponibilité de ces ressources pour les générations actuelles et futures (Hauschild et al., 2013). L'extraction de ressources minérales du sol et du sous-sol ("resource from ground") est considérée comme contribuant à l'épuisement de la "réserve" de ces ressources minérales. L'approche ADP Ultimate Reserve considère plus particulièrement la "réserve ultime" comme la réserve qui serait ainsi épuisée (càd qu'il ne s'agit pas ici d'une réserve économique, sur la base de laquelle des FC existent par ailleurs dans la méthode ADP). Le contenu de la croûte terrestre en chaque élément chimique est considéré comme un proxy de la "réserve ultimement extractible" qui serait effectivement à considérer dans l'approche. Les FC de la méthode ADP sont calculés comme le ratio entre la production annuelle mondiale de l'élément (P), avec la réserve ultime de cet élément (R, au carré) ; P/R^2, et ce ramené au même ratio pour une substance de référence (l'antimoine).	Hauschild, MZ, Goedkoop, M, Guinée, J, Heijungs, R, Huijbregts, M, Jolliet, O,Margni, M, de Schryver, A, Humbert, S, Laurent, A, Sala, S, Pant, R (2013) Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. Int J Life Cycle Assess 18 :683–697
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	[FC] = [kg Sb-eq./kg] [Impact] = kg Sb-eq	A titre d'exemple, l'impact d'un système-produit à hauteur de 2.5 kg Sb-éq signifie que l'impact est équivalent à la réduction du stock de ressources ultimement extractibles de Sb à hauteur de 2.5 kg (ce qui contribue à la déplétion , c'est-à-dire à l'épuisement et donc à la raréfaction, du stock de ressources minérales ici exprimés en équivalent Sb).
	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Long-terme	Dans Berger et al. (2020), SI document : ce critère est posé à "long-terme"/"infinité", considéré comme le cadre temporel de référence correspondant à l'exploitation de la réserve (par définition, "ultime")

	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	Déplétion des ressources abiotiques	La méthode s'intitule : "Abiotic Depletion Potential, Ultimate Reserve" (Potentiel de Déplétion des Ressources Abiotiques, Réserve Ultime)
	Dommage adressé	Nom du dommage	-	-
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Non	-
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Impossible	-
	Peer review	oui / partiellement / non	oui	-

Peer review, sources des données	Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	oui	La méthode ADP, Ultimate reserve, est recommandée : - dans le cadre du PEF pour le calcul de l'indicateur : "resource use, minerals, and metals" (cf Zampori and Pant, 2019). A noter que la recommandation concerne jusqu'à présent le set de FC publiés en 2002. Par ailleurs, il est aussi à noter que le niveau de robustesse est posé à III, c'est-à-dire le plus faible associé aux méthodes de caractérisation d'impacts recommandées dans le PEF ; - par l'UNEP (Task Force Mineral Resources), pour répondre à la question relative à la contribution d'un système-produit à la déplétion des ressources minérales. Et ce avec un niveau de recommandation : "Recommandée" (Berger et al., 2020) *Zampori L, Pant R (2019) Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. https :// doi.org/10.2760/42461 3*

	Sources des données	Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Ratio P/R² pour chaque substance : - données de production primaire (c'est-à-dire excluant la production secondaire), principalement issues de l'US Geological Survey (USGS), complétées par des sources complémentaires pour certains éléments chimiques (PGM et titane issues du British Geological Survey - BGS ; cerium, scandium, hafnium, et ruthenium d'un rapport de Deloitte, 2017 ; etc.) - données de réserve ultime (contenu de la croûte terrestre continentale) issues de : Rudnick et Gao (2014) pour ce qui est des concentrations par élément chimique (valeurs considérées comme fiables notamment par Drielsma et al., 2016). Multipliées par 12 km de croûte terrestre (valeur posée par hypothèse, dans un contexte où les mines les plus profondes actuellement ont une profondeur de 4 km ; van Oers et al., 2020) - dans l'article de 2020 : proposition de 3 perspectives temporelles pour la production (càd pour la valeur du paramètre P), et ce au regard de la période 1970-2015 : a) production annuelle pour une année donnée ; b) production annuelle moyennée sur 5 ans, à une année donnée ; c) production cumulée. Les développeurs de la méthode recommandent le jeu de facteurs de caractérisation obtenu en utilisant les productions cumulées sur la période 1970-2015.	La mise à jour de 2020 a été financée par l'ICMM. Les données du BGS relatives à "metal, mine" ont été utilisées (et non "metal, refined" ou "metal, smelter"). Au sujet des concentrations par élément chimique dans la croûte terrestre : Drielsma, J.A., Russell-Vaccari, A.J., Drnek, T. et al. *Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward*. Int J Life Cycle Assess 21, 85–105 (2016). https ://doi.org/10.1007/s11367-015-0991-7 (càd un ensemble d'auteurs représentant pour la plupart l'industrie de la mine et des métaux) *"It is clear by comparing these data element by element that the estimates have not changed significantly over the 90-year time span"* […] *"Thus, while the entire resource has not been directly measured, there is high confidence in its characterization as a result of multiple sampling exercises and calculation methods (Fleischer and Parker 1967 ; Rudnick and Gao 2003). Crustal content is a stable, comprehensive dataset, with which a physical estimate of resource depletion for abiotic resources—if desired and/or useful—could be estimated"* Autres références citées : *- Rudnick R, Gao S (2014) Composition of the continental crust. In : Holland H, Turekian K (eds) Treatise on geochemistry, 2nd edn. Elsevier, Oxford, pp 1–51* *- Deloitte Sustainability, British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Research NO for AS (2017) Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Critical Raw Materials Factsheets. Brussels* Par ailleurs, l'hypothèse sur l'épaisseur de la croûte terrestre pour quantifier la réserve ultime est assez incertaine ; néanmoins les développeurs de la méthode estiment que l'enjeu étant la quantification *relative*de la réserve par élément chimique, l'incertitude associée à cette hypothèse reste acceptable : *"the adopted earth crust's depth, area, and density will not influence the contribution of the elements and thus the value of the ADP as long as within the volume of the compartment (area × depth), the concentration is considered to be homogeneous. This is most likely not entirely reflecting reality but data on concentrations provided by Rudnick and Gao (2014) are given as average data for the upper earth*

				crust and as such considered homogeneous." Enfin, sur le choix du jeu de facteurs de caractérisation à mettre en oeuvre (notamment parmi les 4 jeux présentés dans l'article), les auteurs écrivent : *"If the ADP should reflect how problematic society's use of primary natural resources cumulatively is, the cumulative ADP over time for which we have production data (last column of Table 3) is the most appropriate option to adopt [...]. Since the latter is in line with the original aim of the ADP method, the cumulative option is recommended here."*

Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, non mise en œuvre à ce jour sur les minéraux.
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	aujourd'hui	Avec Facteurs de Caractérisation mis à jour en 2020, disponibles dans la littérature (van Oers et al., 2020)
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	facilement	Bien que les FC publiés en 2020 ne soient pas encore disponibles dans les logiciels ACV.
		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	oui	Néanmoins pour ce qui est de la version mise à jour (van Oers et al., 2020) : pas à ce jour dans SimaPro (version 9.2.0.2)
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	NA	A noter que les FC mis à jour sont disponibles dans un format Excel dans le SI document accompagnant l'article de *van Oers et al.* (2020) ; de fait dans un format qui facilite leur possible importation et utilisation dans un logiciel ACV standard.

	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	76	76 dans la version de 2020, contre 48 dans la version de 2002
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Couverture large et suffisante	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	0	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Pas de couverture des minéraux, uniquement les éléments chimiques	-
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	oui	Les FC sont à multiplier par les masses de ressources extraites du sol (flux élémentaires : *"resources from ground"*) telles que répertoriées dans les ICVs.
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Une mise à jour en 2020	En 2020 : données de production annuelle (paramètre P) cumulées ou moyennées sur plusieurs années. A noter aussi en 2002 la division en 2 jeux de FC ADP : respectivement relatifs aux combustibles fossiles (fossil fuels) et aux éléments chimiques (dont métaux : le focus ici).
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	2 mises à jour (2002 et 2020)	- Mise à jour en 2002 (van Oers et al., 2002), sur la base de données de production annuelle de l'USGS ; - Mise à jour en 2020 (van Oers et al., 2020) : mise à jour des données de production annuelle et de réserve (càd du contenu de la croûte terrestre en éléments chimiques), qui sont à la base de la formule de calcul des FC de la méthode ADP. Cette mise à jour implique aussi une couverture plus large d'éléments chimiques. Analyse de l'influence des variations (dans le temps) de production annuelle sur les FC ; et recommendation sur un jeu de FC.

	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	Fort	La mise à jour sur les valeurs de contenu de la croûte terrestre a eu un effet assez limité sur les FC. Au contraire, la mise à jour sur les données de production annuelle, dont cumulées sur plusieurs années, a eu un effet plus important (changements importants de la production sur certains métaux ces dernières années, du fait de la demande de certains secteurs utilisateurs). Par exemple, pour les métaux particulièrement d'intérêt dans le cadre de cette étude (cf rapport de lancement) : - lithium : facteur 2 d'écart entre le FC publié dans la version ADP de 2002, et le FC recommandé dans la version publiée en 2020 (avec ADP 2020 > ADP 2002 ; vrai pour l'ensemble des éléments chimiques ci-dessous) - cobalt : facteur 16 ; - cuivre : facteur 15 ; - nickel : facteur 13 ; - manganèse : facteur 10 ; - fer : facteur 13 ; - platine : facteur 441 ; - or : facteur 26. On note une variation semblable pour plusieurs éléments chimiques (Cu, Ni, Fe, etc.) qui aura donc peu d'influence sur l'analyse des contributions de ces éléments (en relatif) dans l'ACV ; mais dans le même temps des variations très différentes pour les éléments Pt, Li, et dans une moindre mesure Au. Enfin, passage de FC pour 48 éléments chimiques dans la version de 2002, à 76 éléments chimiques dans cette version de 2020. Cette extension implique notamment la couverture de la quasi-totalité des éléments Terres Rares (dont néodyme, praséodyme, dysprosium, etc.)
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	partiellement	Bien que cet indicateur soit couramment mis en œuvre dans les études ACV
Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages		Les + : - méthode qui permet d'évaluer la contribution d'un système-produit à l'épuisement des ressources minérales en considérant le stock géologique total ;	Les - : - la réserve ultimement extractible ("ultimately extractable reserve"), qui serait effectivement à considérer dans la logique d'une approche stock (réservoir), est inconnue. Par exemple, la quantité de cuivre (et d'autres éléments chimiques) qui pourra être effectivement utilisée

		- se base sur des données relativement robustes, validées par l'industrie ; - mise en oeuvre éprouvée : de très nombreux cas d'études ACV mettent en oeuvre cette approche dans la littérature ; - mise en oeuvre facile avec les bases de données d'ICV et les logiciels ACV classiques ; - excellente couverture sur les éléments chimiques (76 éléments chimiques) ; - méthode recommandée dans le cadre du PEF de la Commission Européenne, et par la Task Force Mineral Resources de l'UNEP (Berger et al., 2020) pour quantifier la contribution relative d'un système produit à la déplétion des ressources minérales. A noter que le niveau de recommandation par l'UNEP est "recommandée", alors que pour les autres questions le niveau de recommandation est moindre ("interim recommandée" au mieux)	par l'humanité (par définition de la "réserve ultimement extractible") sera plus faible que ce qui est contenu dans la croûte terrestre ; sans qu'on en connaisse la valeur ; - la "réserve ultime" ne représente pas la réserve ultimement extractible. Rien ne démontre aujourd'hui que réserve ultime et réserve ultimement extractible auraient la même valeur, et plus important encore, seraient proportionnelles (par ressource) ; - les FC ADP se basent par conséquent, en proxy, sur la quantité totale de ressources minérales (dont métaux) dans la croûte terrestre ("réserve ultime" d'après les auteurs) ; or cela n'est pas l'enjeu clé quant à la "rareté" (et, par opposition, la "disponibilité") des ressources minérales : au rythme de production actuel, il resterait par exemple 84 millions d'années de production de cuivre devant nous sur la base de cette "réserve ultime". Devrait donc se poser la question de l'intérêt d'orienter des décisions sur la base de critères ACV (ici, ressources) dans une logique de durabilité à si long terme ; - la mise à jour des FC (en 2020 par rapport à la version de 2002) a eu un effet très important pour certains FC. Influence à nuancer toutefois pour ce qui est des futures mises à jour : la recommandation par les auteurs des FC maintenant basés sur les productions cumulées sur la période 1970-2015 limite la sensibilité à de futures mises à jour *à court terme* ; - malgré la recommandation dans le cadre du PEF et des travaux de l'UNEP, tant la Commission Européenne que la Task Force Mineral Resources de l'UNEP recommandent cette méthode uniquement *jusqu'à ce que la prise en compte de la dissipation soit opérationnalisée en ACV* (voir notamment : EC, 2018 et Berger et al., 2020). La méthode ADP permet la prise en compte i) de la dissipation globale sur le cycle de vie du système-produit (perte égale à : ce qui est extrait moins ce qui est recyclé fonctionnellement, à l'échelle du cycle de vie total), et ii) la contribution de cette dissipation à la déplétion du réservoir ultime de ressources minérales. Mais cette méthode ne permet pas de distinguer les phases du cycle de vie qui contribuent à la dissipation des ressources minérales (de fait, pas de possibilité d'analyse des contributions à la dissipation, par phase du cycle de vie d'un système-produit), ce qui est très limitant pour l'aide à la décision que peut apporter l'ACV (notamment dans le cadre du PEF).

2.1.2 Environmental Dissipation Potential (EDP)

			EDP	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Dissipation (on/off)	Dissipation vers l'environnement uniquement
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	« Quantifier la perte d'accessibilité/la dissipation des ressources minérales induites par le système produit"	Cf l'article de van Oers et al. (2020) : les auteurs définissent le problème auquel la méthode répond, de la façon suivante : "*We started from the following definition of the problem of using resources : the decrease of accessibility on a global level of primary and/or secondary elements over the very long term or short term due to the net result of compromising actions*"
	Source la plus récente	-	van Oers, L., Guinée, J.B., Heijungs, R. et al. Top-down characterization of resource use in LCA : from problem definition of resource use to operational characterization factors for dissipation of elements to the environment. Int J Life Cycle Assess 25, 2255–2273 (2020). https ://doi.org/10.1007/s11367-020-01819-4	-
	Historiques de développements	-	Méthode EDP publiée en 2020, dans le cadre du projet SUPRIM (co-financé par l'EIT Raw Materials)	Voir : http ://suprim.eitrawmaterials.eu/project-results Par ailleurs, à noter que la méthode ARP publiée en 2021 se base sur la méthode EDP opérationnalisée dans SUPRIM, afin d'en améliorer certains aspects.

Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	L'approche présentée par van Oers et al., 2020 distingue d'une part i) un cadre théorique général (définition des concepts et objectif de l'approche, structure conceptuelle de la méthode de caractérisation), et d'autre part ii) une mise en oeuvre pratique, avec un jeu de FC opérationnels. *Cadre conceptuel* L'approche développée dans le contexte de SUPRIM vise à évaluer le "problème" induit par l'utilisation (*présente*) des ressources pour les générations *futures*. L'équipe de SUPRIM définit ce problème de la façon suivante : *La réduction de **l'accessibilité des éléments chimiques** (primaire, ou secondaires, càd dans la technosphère), à l'échelle globale, et ce à une échelle très long-terme ou court-terme (25 ans) du fait **d'actions compromettantes** ("compromising actions")* 4 actions compromettantes sont distinguées : i) exploration, ii) dissipation vers l'environnement (environmental dissipation), iii) hibernation dans la technosphère, et iv) occupation en utilisation. Les auteurs définissent le flux en hibernation comme le flux de ressources dans des stocks de la technosphère qui ne sont plus utilisés, et qui ne sont pas récupérés du fait de l'absence de "drivers" économiques dans l'horizon temporel considéré. Les auteurs mentionnent par ailleurs quelques exemples de stocks en hibernation : produits abandonnés, centres d'enfouissement, et dépôt final de déchets de la minéralurgie. Le modèle de caractérisation prend en compte : i) le stock accessible global et ii) la variation de ce stock sur l'horizon temporel considéré, du fait d'actions compromettantes, pour une ressource donnée. L'inventaire permet de prendre en compte la contribution du système-produit étudié à cette variation de l'accessibilité. Enfin, les auteurs distinguent 3 catégories d'impacts (qui seraient associées à des FC différents) : 1) dissipation vers l'environnement, 2) hibernation dans la technosphère et 3) occupation en utilisation ; et ce du fait - selon les auteurs - du caractère irréversible (émissions), potentiellement réversible (hibernation) ou irréversible (occupation en utilisation) de l'inaccessibilité. *Opérationnalisation de l'approche : méthode EDP*	-

			Le cadre conceptuel est opérationnalisé uniquement pour un *horizon temporel de très long-terme*, et ce pour des raisons de disponibilité des données (selon les auteurs). L'opérationnalisation se base notamment sur les hypothèses suivantes : - le contenu de la croûte terrestre est supposé comme un proxy du stock accessible de l'environnement et de la technosphère ; - l'hibernation est supposée négligeable : hypothèse selon laquelle les développements économiques et technologiques rendront les stocks "en hibernation" accessibles sur le très long terme. Par ailleurs, exploration et occupation en utilisation sont aussi considérées comme négligeables. -> seule la dissipation vers l'environnement est quantifiée. Le développement des FC se base ensuite sur un certain nombre d'autres hypothèses, dont : - la variation du stock de ressource i sur l'horizon temporel (de très long terme), du fait de la dissipation vers l'environnement (action compromettante), est calculée en supposant qu'à long terme l'extraction (P) d'aujourd'hui sera entièrement émise (dissipée) vers l'environnement ; càd production primaire (en masse) = émissions vers l'environnement (à très long-terme) - la "sévérité" associée au fait de rendre 1 kg d'une ressource i inaccessible à un horizon temporel donné est quantifiée via le ratio Pi / Ri² (aussi utilisé dans ADP). Les auteurs mentionnent que d'autres indicateurs pourraient être utilisés (exergie, prix, quantités de stocks, taux d'émissions, etc.) In fine, ces hypothèses impliquent que les FC EDP sont (quasi) identiques aux FC ADP dans le cas des éléments (à la nuance près qu'EDP est exprimé en Cu-éq, et ADP en Sb-éq ; facteur 36,41 d'écart), et avec facteur de correction dans le cas des substances. La différence majeure entre ADP et EDP réside dans les flux élémentaires à utiliser dans les calculs d'impacts : **émissions vers l'environnement dans EDP, flux élémentaires de ressources extraites dans ADP.**	
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	[FC] = [kg Cu eq./kg] [Impact] = kg Cu-eq	Il s'agit ici de kg Cu-équivalent *émis*. A noter que l'indicateur calculé sur la base de la méthode ADP est exprimé en kg Sb-équivalent *extrait*. Cf van Oers et al. (2020) : *"While the ED indicator*

				result is expressed in copper equivalents emitted (Cu-eq), the AD indicator results are expressed in antimony equivalent extracted (Sb-eq)." A titre d'exemple, l'impact d'un système-produit à hauteur de 2.5 kg Cu-éq signifie que l'impact des flux d'émissions dissipatives sur le stock de ressources minérales ultimement extractibles est équivalent à celui de 2.5 kg de Cu émis vers l'environnement.
	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Long-terme	Contrairement à d'autres approches, les auteurs ne posent pas d'horizon temporel précis : ils considèrent un horizon temporel à très long terme, définissent un "scénario" et supposent que ce scénario aura lieu à moment donné dans le futur. *Van Oers et al., 2020 : "for the very long term, in the "Impact category indicator and general equation" section,* ***we have defined a qualitatively described future, i.e., assuming some conditions for technological and economic developments*** *necessary to be able to simplify the modeling. Only in this way has it so far been possible to derive an operational set of characterization factors.* ***We don't predict when the envisaged scenario will happen (100 years, 1000 years, or even more)****, but to pragmatically achieve our purpose of assessing relative differences in impacts of resource use,* ***we assume that it will happen at some point in the far future****."*
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	ED : Environmental Dissipation (Dissipation vers l'environnement) Quantifiée via des FC du Potentiel de Dissipation vers l'environnement (EDP : Environmental Dissipation Potential)	-

	Dommage adressé	Nom du dommage	-	-
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Non	-
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Impossible	-
Peer review, sources des données	Peer review	oui / partiellement / non	oui	-
	Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	non	Approche récente, de fait non recommandée antérieurement. Mais considérée dans les travaux : - du TAB de l'EF en 2021 ; - de l'UNEP (task force “natural resources” of the GLAM3) en 2021-2022 Les conclusions de ces travaux sont attendues courant/fin 2022.

	Sources des données	Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Du point de vue des FC : les FC EDP sont très semblables aux FC ADP. Les données sources associées à la construction des FC ADP sont rappelées ici : *Ratio P/R² pour chaque substance :* *- données de production primaire (c'est-à-dire excluant la production secondaire), principalement issues de l'US Geological Survey (USGS), complétées par des sources complémentaires pour certains éléments chimiques (PGM et titane issues du British Geological Survey ; cerium, scandium, hafnium, et ruthenium d'un rapport de Deloitte, 2017 ; etc.)* *- données de réserve ultime (contenu de la croûte terrestre continentale) issues de : Rudnick et Gao (2014) pour ce qui est des concentrations par élément chimique (valeurs considérées comme fiables notamment par Drielsma et al., 2016). Multipliées par 12 km de croûte terrestre (valeur posée par hypothèse, dans un contexte où les mines les plus profondes actuellement ont une profondeur de 4 km ; van Oers et al., 2020)* Les développeurs de la méthode recommandent le jeu de facteurs de caractérisation obtenu en utilisant la production sur l'année 2015 (année la plus récente disponible). Du point de vue de l'ICV : les FC sont à multiplier par les flux d'émissions vers l'environnement, qui sont classiquement reportés dans les bases de données et utilisés pour les calculs d'impacts sur d'autres catégories (contribution à la toxicité, éco-toxicité, etc. en ce qui concerne les métaux). - les émissions vers l'environnement sont reportées sous forme de substances émises, et donc non pas uniquement sous forme d'éléments chimiques. Les FC de la méthode ADP ont donc été adaptés dans la méthode EDP, via un facteur de conversion, afin de couvrir les substances classiquement émises vers l'environnement telles que compilées dans les	van Oers et al., 2020 : *- "The unit process data in LCI databases should be extended with more emission data in order to be able to assess dissipative losses of more resources (elements) to the environment. In general, the LCI databases (e.g., ecoinvent) are far from complete when reporting the emissions of a unit process. [...]."* *- "Emissions in LCI databases are mostly not provided as elementary emissions, but rather as substance emissions : emissions of configurations representing a chemical composition of elements. Of course, the LCIA model and LCI model should align in this respect. One way of doing this is by deriving characterization factors for substance emissions based on the characterization factors for elements and using the chemical composition of the substances to derive conversion factors"* *- "one should ideally distinguish between dissipative and non-dissipative emissions. For simplicity, we have now assumed in the characterization model that all emissions are dissipative, irrespective of the level of concentration of the element before it gets emitted. However, in the LCI, it might be possible to make a distinction between emissions of elements from inflows that were already dissipated (e.g., traces of metals in fossil fuels) and emissions of elements from inflows from a concentrated resource (e.g., metals in ores)."*

				bases de données d'ICV ; - l'incomplétude des ICV en termes d'émissions vers l'environnement affecte donc l'indicateur d'ED, à l'instar des autres indicateurs d'impacts ; - la méthode ne fait pas la distinction entre émissions de ressources vers l'environnement, et émissions d'éléments chimiques qui ne sont pas des ressources. Or, par définition, seules les ressources peuvent être des ressources dissipatives (voir à ce sujet Beylot et al., 2020 ; et l'article de van Oers et al., 2020 décrivant la méthode EDP). A noter qu' Owsianiak et al. (2021) ont développé par la suite une approche permettant d'améliorer la méthode EDP sur la distinction flux d'émissions dissipatives/non-dissipatives (méthode ARP, cf section 2.1.3)	
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Non	L'approche a été développée en se focalisant sur les éléments chimiques émis vers l'environnement (dont contenus dans des substances). Il n'y a pas d'émissions de graphite, quartz, calcaire, bauxite, etc. recensées dans les bases de données d'ICV.

	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	aujourd'hui	
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	partiellement	Les FC publiés en 2020 ne sont pas encore disponibles dans les logiciels ACV. Nécessité de charger ces FC et de les intégrer au logiciel de calculs ACV. Il s'agit de FC pour les substances émises vers l'environnement (pour lesquelles la nomenclature dans les logiciels ACV - types Simapro, GaBi - et les bases de données - type ecoinvent - peuvent varier)
		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	non	-
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	pas à notre connaissance	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	76	Dans la méthode EDP, les FC sont appliqués aux substances émises vers l'environnement. Les FC pour 76 éléments chimiques de la méthode ADP ont été recalculés pour plus de 900 flux élémentaires de substances émises vers 3 compartiments : air, eau et sol.
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Couverture large et suffisante	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	0	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Pas de couverture des minéraux, uniquement les éléments chimiques	-

	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie	Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	oui	Les FC sont à multiplier par les masses de substances émises vers l'environnement
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	NA	-
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	partiellement	Peu de recul à ce jour sur l'utilisation de cette approche. Mais il est attendu que l'indicateur (de pertes vers l'environnement) soit relativement facilement communicable.

Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages	Les + : - permet de répondre à la question de la quantification de la perte d'accessibilité/de la dissipation des ressources minérales induites par le système-produit via l'ACV ; càd la question clé à considérer dans le cadre du PEF ou des travaux de l'UNEP lorsqu'une méthode opérationnelle sera à disposition ; - FC disponibles, basés sur des données relativement fiables (à l'instar de la méthode ADP : concentration du contenu de la croûte terrestre notamment) ; - approche utilisable avec les ICV actuels. Les FC sont à multiplier par les flux élémentaires d'émissions : EDP a un niveau très satisfaisant d'opérationnalisation (les FC sont disponibles) et de complétude des données d'ICV (comparable à d'autres méthodes de calculs d'impacts classiquement utilisées en ACV, par ex. sur l'indicateur "toxicité") - méthode qui se base sur un cadre conceptuel applicable à un horizon temporel moins long, à condition que les données nécessaires soient disponibles	Les - : - la méthode EDP se base sur un nombre relativement important d'**hypothèses et de simplifications**, visant à opérationnaliser l'approche (càd permettant de calculer et de mettre à disposition des FC relativement facilement applicables avec les ICV actuels). Toutefois, ces hypothèses et simplifications sont pour certaines très **douteuses, et fragilisent grandement l'approche et la fiabilité des résultats** issus de l'indicateur d'ED. Les hypothèses les plus discutables sont résumées ci-dessous : i) l'hypothèse selon laquelle l'hibernation serait négligeable grâce aux développements technologiques et économiques (qui rendraient les stocks en hibernation accessibles, sur le très long-terme), n'est pas justifiée, et très probablement fausse. On pourrait citer une multitude d'exemples "d'hibernation" pour lesquelles il est très improbable que les ressources soient un jour récupérées fonctionnellement, quand bien même les technologies et les prix de ces ressources évoluent favorablement : par exemple, métaux des mâchefers d'incinération utilisés en techniques routières ; laitiers de la métallurgie déposés en centre d'enfouissement final, qui contiennent certains "petits métaux" non recyclés (par ex. terres rares des aimants permanents de disques durs) ; petits métaux d'acier spéciaux recyclés non-fonctionnellement dans des aciers ordinaires ; etc. De façon générale, la pratique de l'exploitation de centres de stockage de déchets ménagers ou de déchets de la minérallurgie, pour l'extraction de métaux (landfill mining, tailings reprocessing) est relativement peu répandue en Europe *à ce jour*, bien qu'elle existe (Blengini et al., 2019). L'hypothèse selon laquelle l'entiéreté des ressources que ces stocks contiennent sera récupérée sur le très long-terme apparaît donc particulièrement incertaine, et particulièrement improbable, au regard des capacités actuelles ; ii) la construction des FC (càd le modèle de caractérisation) se base sur une hypothèse contradictoire avec la modélisation de l'inventaire. D'un côté, dans le calcul des FC, il est supposé par simplification que l'ensemble des ressources extraites à une année donnée seront émises vers l'environnement (et donc rendues irréversiblement inaccessibles) sur le très long terme ("primary extraction at present [...] equals the very-long-term emission to the environment") ; d'un autre côté, dans l'inventaire à l'échelle d'un système-produit, il est considéré au contraire que les ressources contenues dans les stocks en hibernation seront

			un jour accessibles (et non pas rendues irréversiblement inaccessibles) ; et que donc seule une partie de la masse de ressources extraites du sol par un système-produit (les émissions sur le cycle de vie du produit) est considérée inaccessible ; iii) une autre contradiction entre ICV et calcul de l'impact (FC) dans cette approche : dans l'ICV, les émissions vers l'environnement sont considérées comme irréversiblement inaccessibles (flux élémentaire considéré pour le calcul d'impact de dissipation vers l'environnement) ; dans le même temps, la croûte terrestre continentale (sur une épaisseur de 12 km) est considérée comme base au calcul de la réserve ultime (qui sert au calcul des FC). Or une part significative des émissions ("inacessibles" dans l'ICV) atteindra le sol, càd la croûte terrestre continentale (soit directement émis dans le sol, soit in fine déposé dans le sol après passage via un autre compartiment - eau ou air) et ferait donc partie de ce que les auteurs appellent la réserve ultime ("accessible" dans les FC) ; iv) le choix du contenu de la croûte terrestre continentale en proxy de la réserve ultimement extractible est très incertain (voir à ce sujet la discussion dans le cadre de la méthode ADP). On notera que les auteurs estiment que c'est un proxy acceptable en relatif (càd qu'entre éléments chimiques, il y aurait proportionnalité entre contenu de la croûte terrestre et réserve ultimement exctractible) ; mais aujourd'hui aucune référence, preuve, chiffre, etc. ne permet de justifier une telle hypothèse ; v) seule une partie des émissions vers l'environnement sont des émissions de ressources dissipatives (par exemple le cuivre émis lors de la combustion de charbon n'est pas une ressource, et par définition n'est pas dissipé ; Beylot et al., 2020) - peu de recul sur l'utilisation de la méthode car encore peu appliquée à des cas d'études

2.1.3 Abiotic Resource Project (ARP) ; suite d'Environmental Dissipation Potential (EDP)

			ARP	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Dissipation (on/off)	Dissipation vers l'environnement uniquement
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	« Quantifier la perte d'accessibilité/la dissipation des ressources minérales induites par le système produit"	
	Source la plus récente	-	Owsianiak, M, van Oers, L, Drielsma, J, Laurent, A, Hauschild, MZ. Identification of dissipative emissions for improved assessment of metal resources in life cycle assessment. J Ind Ecol. 2021 ; 1– 15. https ://doi.org/10.1111/jiec.13209	-
	Historiques de développements	-	Méthode ARP publiée en 2021, construite comme une "suite"/"amélioration" de l'approche EDP en ce qui concerne les émissions vers l'environnement considérées "dissipatives" ou non. Développements financés par l'ICMM (International Council on Mining and Metals) dans le cadre du projet ARP *("Development of a new Life Cycle Impact Assessment Framework for Assessing Resource Use : The Abiotic Resources Project" ; https ://www.sustainability.man.dtu.dk/english/research/qsa/research/research-projects/icmm-arp)*	-

Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	Méthode qui concerne uniquement l'inventaire de flux élémentaires, et non la caractérisation de l'impact (pas de FC). Néanmoins, l'approche est combinée aux FC de la méthode EDP, à titre d'exemple sur des cas d'études (avec fourniture des FC ajustés associés). L'approche permet de différencier les émissions effectivement "dissipatives" des émissions "non-dissipatives" qui, pour une ressource et un cadre temporel donnés, ne contribuent pas à la perte d'accessibilité. Selon les auteurs, l'approche ARP permet de déterminer, dans l'ICV, les émissions dissipatives de ressources, càd : - (1) si un flux d'émission reporté dans un ICV contribue effectivement à une perte d'accessibilité d'un élément donné, ou si au contraire l'élément ainsi émis sera accessible ; - et (2) s'il s'agit d'une émission d'une "ressource", càd si l'élément provient d'une source qui serait considérée comme une ressource minérale à un horizon temporel donné (pour toute génération vivant entre le présent et l'horizon temporel de l'évaluation). Pour ce faire, deux critères sont proposés dans l'approche : - critère A qui permet de déterminer si un flux d'émission contribue effectivement à la perte d'accessibilité de cet élément. Le paramètre suivi est "la concentration de l'élément dans le stock". Le Critère A permet de définir si une ressources est accessible, ou non. Il est posé comme *: "la concentration des émissions à l'environnement, une fois à l'état d'équilibre dans les compartiments, est en-dessous d'une certaine concentration reflétant ce qui est accessible dans l'horizon temporel considéré"*. Les auteurs ont choisi de poser le seuil de ce critère comme la concentration moyenne dans la croûte terrestre : en dessous de ce seuil, les ressources minérales "peuvent être considérées comme inaccessibles", selon les auteurs. Le critère est appliqué aux émissions anthropogéniques globales ; - critère B qui permet de déterminer si un flux élémentaire est une ressource ou non. Pour que le flux élémentaire soit considéré comme ressource, sa concentration dans la source (minerai, combustible, etc.) doit être supérieure à une concentration de référence, laquelle est considérée comme reflétant ce qui est accessible aux humains dans l'horizon temporel défini. Cette concentration de référence est là encore posée comme la teneur moyenne dans la croûte terrestre. Ce calcul de ratio est complété par certaines hypothèses ; par exemple tout élément chimique dans un minerai est considéré comme une ressource, quelle que soit sa concentration (et donc valable aussi pour des métaux non-exploités, à faible concentration) La mise en oeuvre du Critère A sur 23 éléments chimiques implique que de façon générale : les émissions de métaux vers les sols naturels (natural soil) seraient potentiellement "non-dissipatives" (caractère "non-dissipatif" ensuite confirmé ou non via le Critère B) ; au contraire les émissions vers l'eau, les sols agricoles et la majorité des émissions vers l'air seraient dissipatives. Concrètement, plus une émission tendrait à concentrer un métal dans l'environnement (en particulier, dans les sols), plus cela serait pertinent du point de vue de son accessibilité (avec "non-dissipation" dans le cas où la concentration serait considérée comme "satisfaisante"). La mise en oeuvre du Critère B implique que toutes les émissions de métaux issues de la combustion du pétrole, et la plupart issues de la combustion du charbon, seraient potentiellement non-dissipatives (car "non-ressources"), et toutes les émissions issues des minerais seraient potentiellement "dissipatives" (car "ressouces" ; et ce par hypothèse pour tous les éléments des minerais). L'approche est initialement développée pour 23 éléments chimiques, et étendue (extrapolée) à 42 éléments supplémentaires via une approche "stepwise". Cette approche requiert un certain	Les auteurs écrivent : *"Occupation in use and technosphere hibernation are seen as relatively short-term phenomena (acting at time scales of less than a year to decades), while environmental dissipation is considered relevant for both short- and long-term time horizons (time scales of centuries)."* -> la définition de l'hibernation dans la technosphère comme ayant lieu à des temporalités comprises entre l'année et des décennies est très discutable pour certains flux dans la technosphère (par ex. en centre d'enfouissement ; recyclage non-fonctionnel dans la technosphère ; etc.)

			nombre d'hypothèses supplémentaires (en l'absence d'informations suffisamment précises sur les compartiments d'émissions et la concentration dans la source d'émissions pour ce qui concerne ces éléments supplémentaires), relativement acceptables (en comparaison des autres hypothèses précédemment listées).	

	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	NA	Pas de FC. L'approche ARP peut néanmoins être mise en œuvre avec une méthode de caractérisation des impacts ; par exemple dans l'article, test de l'approche ARP en combinaison des FC de la méthode EDP. L'interprétation des résultats est alors à faire comme dans le cas de la méthode EDP présentée plus haut. A titre d'exemple, l'impact d'un système-produit à hauteur de 2.5 kg Cu-éq signifie que l'impact des flux d'émissions dissipatives sur le stock de ressources minérales ultimement extractibles est équivalent à celui de 2.5 kg de Cu émis de façon dissipative vers l'environnement. L'utilisation conjointe de la méthode ARP avec la méthode EDP se heurte néanmoins au problème d'incohérences des hypothèses faites dans chaque approche. Concrètement : - les FC d'EDP se basent sur l'hypothèse fondamentale suivante : la variation du stock de ressource i sur l'horizon temporel (de très long terme), du fait de la dissipation vers l'environnement (action compromettante), est calculée en supposant qu'à long terme l'extraction (P) d'aujourd'hui sera entièrement émise (dissipée) vers l'environnement ; càd production primaire (en masse) = émissions vers l'environnement (à très long-terme) - Or, précisément le coeur de l'approche ARP consiste à revenir sur l'hypothèse selon laquelle une émission vers l'environnement est un flux dissipatif de ressources ; en classant des émissions non-dissipatives et des émissions dissipatives. EDP ne met pas en oeuvre le Critère A ; ARP le fait, et l'article d'Owsianiak et al. 2021 vise précisément à démontrer la pertinence de le faire (cf la comparaison des émission "non-filtrées" versus "filtrées" dans l'article) *"Using the classification framework and*

				analysis presented above we have demonstrated that not all emissions occurring in product life cycles are truly dissipative. This finding negates the default assumption that any elementary flow to the environment is dissipative (e.g., Helbig et al., 2020), and importantly should not be modeled as such in LCA"
	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Long-terme	*"The dissipation criteria were developed specifically for the very long-term (infinite) time horizon. […] Note, that taking the infinite time horizon as the starting point does not mean that the time frame of the impact assessment is equal to true infinity. It depends on which environmental compartment is considered and on the residence time of an element in this environmental compartment, which is finite"*
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	NA	Méthode à l'échelle de l'ICV. Avec possibilité d'être combinée à une méthode de caractérisation d'impacts type EDP (impact à mi-chemin ainsi calculé)
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	NA	Non Applicable car approche à l'échelle de l'ICV. Néanmoins, quand combinée à l'approche EDP, l'impact à mi-chemin est : ED : Environmental Dissipation (Dissipation vers l'environnement)
	Dommage adressé	Nom du dommage	-	-

	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	L'ICV se base sur des calculs de "fate" des émissions, possiblement régionalisés ; néanmoins, les critères (A et B) sont globaux (concentration moyenne de la croûte continentale supérieure)
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	Voir commentaire ci-dessus
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Non	Voir commentaire ci-dessus
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Impossible	-
Peer review, sources des données	Peer review	oui / partiellement / non	oui	-
	Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	non	Approche récente, de fait non recommandée antérieurement. Mais considérée dans les travaux : - du TAB de l'EF en 2021 ; - de l'UNEP (task force “natural resources” of the GLAM3) en 2021-2022 Les conclusions de ces travaux sont attendues courant/fin 2022.
	Sources des données	Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	- Les données de concentration moyenne des éléments dans la croûte terrestre continentale supérieure sont issues de Rudnick and Gao (2014) ; càd la même référence de données que celles utilisées dans les approches ADP (ultimate reserve, mise à jour) et EDP publiées par van Oers et al., 2020 ; *Approche pour 23 éléments chimiques* - Critère A : Les concentrations à l'état d'équilibre dans l'environnement résultant des émissions globales (au taux d'émissions annuelles) on été calculées via le module de devenir multimédia USEtox® 2.1 (version LC-Impact) ; - Critère B : concentrations de métaux dans le pétrole non raffiné et dans le charbon sur la base de données de la littérature (Rauch and Pacyna (2009) ; par ailleurs tous les métaux contenus dans les minerais extraits sont supposés être	A noter que les données d'émissions anthropogéniques globales sont des données *actuelles* ; sans différentiation spatiale dans les calculs. Par ailleurs se pose la question des émissions non directement issues de minerais ou de combustibles fossiles : par exemple de l'incinération?

				accessibles, quelle que soit la concentration associée ; *Extrapolation à 42 éléments chimiques supplémentaires (approche "stepwise") sur la base des résultats pour les 23 éléments chimiques et d'hypothèses complémentaires (cf la description du chemin d'impact plus haut)*	
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, non mise en œuvre à ce jour sur les minéraux.
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	aujourd'hui	Facteurs de Caractérisation disponibles dans la littérature (Owsianiak et al. ; 2021), en SI document, pas à proprement parler pour ARP (qui est une approche à l'échelle de l'ICV), mais pour l'approche combinant ARP (critère A uniquement) et FC EDP. Pour 65 métaux et métalloïdes.

		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	partiellement	Facteurs de Caractérisation disponibles dans la littérature (Owsianiak et al. ; 2021), en SI document, pas à proprement parler pour ARP (qui est une approche à l'échelle de l'ICV), mais pour l'approche combinant ARP (critère A uniquement) et FC EDP. Pour 65 métaux et métalloïdes.
		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	non	Pas à ce jour dans SimaPro (version 9.2.0.2)
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	pas à notre connaissance	Néanmoins Facteurs de Caractérisation disponibles dans la littérature (Owsianiak et al. ; 2021), en SI document, pour l'approche combinant ARP (critère A uniquement) et FC EDP. Pour 65 métaux et métalloïdes. Sous la forme de fichiers importables dans respectivement SimaPro et GaBi.
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	65	65 métaux et métalloïdes couverts pour l'approche combinant ARP (critère A uniquement) et FC EDP. Comme dans le cas de la méthode EDP : les FC sont appliqués aux substances émises vers l'environnement. Les FC pour 65 éléments chimiques ont été recalculés pour les flux élémentaires de substances émises vers l'environnement.
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Couverture large et suffisante	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	0	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Pas de couverture des minéraux, uniquement les éléments chimiques	-
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	partiellement	L'approche vise précisément à comptabiliser uniquement les émissions vers l'environnement dites "dissipatives"

Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Pas de mise à jour	Méthode publiée fin 2021. Construite comme une "suite"/"amélioration" de l'approche EDP en ce qui concerne les émissions vers l'environnement considérées "dissipatives" ou non.
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	NA	-
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	partiellement	Peu de recul à ce jour sur l'utilisation de cette approche. Mais il est attendu que l'indicateur (de pertes vers l'environnement) soit relativement facilement communicable.
Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages		Les + : - permet de répondre à la question de la quantification de la perte d'accessibilité/de la dissipation des ressources minérales induites par le système produit via l'ACV ; càd la question clé à considérer dans le cadre du PEF ou des travaux de l'UNEP lorsqu'une méthode opérationnelle sera à disposition ; - permet effectivement d'améliorer la méthode EDP sur un aspect en particulier : via la mise en oeuvre du Critère B, qui permet de déterminer si un élément chimique est une ressource ou non (potentiellement dissipative ou non). Car seule une partie des émissions vers l'environnement sont des émissions de "ressources" dissipatives (par exemple le cuivre émis lors de la combustion de charbon n'est pas une "ressource", et par définition n'est pas dissipé ; Beylot et al., 2020) - FC disponibles en combinant ARP avec EDP, basés sur des données relativement fiables (à l'instar de la méthode ADP : concentration du contenu de la croûte terrestre notamment) ; - méthode partiellement utilisable avec les ICV actuels. Des FC sont disponibles, à multiplier par les flux élémentaires d'émissions (*package "ARP/Critère A uniquement + EDP"* à un niveau d'opérationnalisation et de complétude des données d'ICV comparable aux autres méthodes de calculs d'impacts, càd un niveau très satisfaisant) ; - FC disponibles dans un format importable dans SimaPro ou GaBi	Les - : - la méthode ARP se base sur certains choix et certaines hypothèses extrêmement discutables. En particulier les 2 suivants : i) le focus sur la dissipation vers l'environnement implique de négliger "l'hibernation dans la technosphère", comme dans la méthode EDP. Or on pourrait citer une multitude d'exemples "d'hibernation" pour lesquelles il est très improbable que les ressources soient un jour récupérées fonctionnellement, quand bien même les technologies et les prix de ces ressources évoluent favorablement (se référer à la discussion de la méthode EDP) ; ii) le seuil posé pour le Critère A (qui permet de définir si une ressources est accessible, ou non) est extrêmement discutable. L'utilisation de la concentration moyenne dans la croûte terrestre est une hypothèse pour laquelle le niveau de confiance est extrêmement faible. Une multitude d'autres hypothèses sur ce seuil auraient pu être faites, toutes aussi (peu) valables que l'hypothèse faite par les auteurs. Très concrètement, personne ne connaît le

			seuil de concentration en-dessous duquel un métal peut être considéré inaccessible à un horizon temporel infini. Or, ce faible niveau de confiance s'accompagne d'une importance fondamentale du Critère A dans l'approche ARP ; - le Critère B est plus difficilement opérationnalisable que le Critère A. Les FC combinant méthode ARP et FC EDP ne sont disponibles que pour le Critère A (et pas le B). Le Critère B n'a par ailleurs pas été appliqué dans tous les cas d'études présentés par les auteurs dans leur article (2 sur 4 seulement) ; - la mise en oeuvre de l'approche sur des cas d'études peut impliquer une interprétation fortement contre-productive du point de vue des impacts environnementaux et des enjeux ressources. Par exemple, dans un cas d'études présenté par les auteurs, les émissions de mercure vers l'air sont considérées "non-dissipatives" au regard du Critère A, ce qui est à la fois : i) extrêmement discutable au regard du choix de la concentration de la croûte terrestre comme seuil des ressources "accessibles" à l'infini, comme discuté plus haut ; et donc probablement infondé du point de vue de "l'accessibilité des ressources" ; et ii) problématique du point de vue environnemental, car cela tendrait à soutenir de plus fortes concentrations de polluants dans l'environnement. Donc *in fine* ARP tendrait à soutenir des solutions perdantes du point de vue "ressources" et "environnement", a minima à un horizon temporel de plusieurs dizaines / centaines d'années (car à cet horizon temporel là, les métaux émis vers l'environnement pollueront et ne seront pas des ressources accessibles).

2.1.4 Average Dissipation Rate (ADR) and Lost Potential Service Time (LPST)

			ADR et LPST	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Dissipation (on/off)	-
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	« Quantifier la perte d'accessibilité/la dissipation des ressources minérales induites par le système produit"	Voir sur ce point (non publié à ce jour ; extension des FC à 61 métaux) : *"the midpoint ADR method could address the question "How can I quantify the relative contribution of a product system to the dissipation of mineral resources?" and the LPST method, "How can I quantify the relative contribution of a product system to the inaccessibility of mineral resources due to dissipation?".*

	Source la plus récente	-	Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A., Sonnemann, G., 2021. Life cycle impact assessment methods for estimating the impacts of dissipative flows of metals. J. Ind. Ecol. jiec.13136. https ://doi.org/10.1111/jiec.13136	A noter également la thèse d'Alexandre Charpentier-Poncelet, soutenue le 30/11/2021. http ://www.theses.fr/s212733
	Historiques de développements	-	- Méthode publiée en 2021 (avec Facteurs de Caractérisation pour 18 métaux) ; - Article soumis fin 2021 à l'International Journal of LCA : extension à 61 métaux, et application à l'ensemble des processus de la base de données ecoinvent.	-
Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	Le chemin d'impact se base sur les concepts suivants : - temps de service (TS) des ressources : durée au cours de laquelle les ressources fournissent un service dans l'économie, dans les stocks en utilisation, et ce après extraction de l'écosphère et jusqu'à dissipation après une ou plusieurs utilisations. Le temps de service *total* (TS TOT) correspond à la durée de vie en utilisation des métaux dans l'anthroposphère ; - TS dépend des Flux Dissipatifs générés à chaque étape du cycle de vie. - La définition de la dissipation est identique à celle du JRC ; reprise de Beylot et al. (2021) - Les compartiments de dissipation sont également ceux considérés dans l'approche JRC : stocks de déchets finaux, émissions vers l'environnement, recyclage non-fonctionnel ; - Les Flux Dissipatifs sont calculés via une approche d'Analyse de Flux de Matières (MFA) dynamique sur la base des paramètres suivants : rendements de procédés, utilisations dissipatives, durée de vie des applications/produits, taux de collecte et de recyclage fonctionnel. LPST (Lost Potential Service Time) : approche "distance à l'objectif". Temps de service perdu, en comparaison d'une hypothétique absence de dissipation sur une perspective temporelle donnée (25, 100 ou 500 ans) pour laquelle par définition le Temps de Service serait de 25, 100 ou 500 ans. Il est à noter que cette « distance à l'objectif » n'a pas de "réalité physique" ; elle constitue un choix fait par l'équipe qui a développé la méthode (càd avec introduction de choix	-

			de "valeurs", par définition subjectif, de "l'objectif idéal"). Pour clarifier : on pourrait faire le parallèle avec les approches de "distance à l'objectif" qui sont classiquement mises en œuvre dans le développement de méthodes de pondération des impacts en ACV. ADR (Average Dissipation Rate) : Taux de dissipation annuel (inverse du temps de service total TS TOT)	
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	LPST et ADR : [FC] = [kg Fe-eq./kg] [Impact] = kg Fe-eq	Dans le cas de LPST, à titre d'exemple, l'impact d'un système-produit à hauteur de 2.5 kg Fe-éq signifie que le temps de service perdu induit par la dissipation sur le cycle de vie de ce système-produit est équivalent au temps de service perdu induit par l'extraction de 2.5 kg de fer dans les conditions actuelles (de production et d'utilisation dans l'économie). Dans le cas d'ADR, à titre d'exemple, l'impact d'un système-produit à hauteur de 2.5 kg Fe-éq signifie que le taux de dissipation induit par le système-produit est équivalent au taux de dissipation associé à l'extraction de 2.5 kg de fer dans les conditions actuelles (de production et d'utilisation dans l'économie).

	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Court-terme (<10 ans) à Long-terme (> 100 ans)	Approche "intégrative" qui englobe le court-terme et le long-terme. Les calculs de temps de service des ressources minérales se basent sur des MFA dynamiques pour chaque élément chimique, à un horizon temporel de 1000 ans. - ADR : le calcul permet un "constat du présent", sans hypothèses sur les évolutions dans les applications/performances du recyclage (donc un TS constaté sur les flux/performances d'aujourd'hui, extrapolé sur plusieurs centaines d'années). - LPST : le Temps de service perdu est calculé sur la base d'une comparaison avec une hypothétique absence de dissipation sur une perspective temporelle donnée (25, 100 ou 500 ans) pour laquelle par définition le Temps de Service serait de 25, 100 ou 500 ans.
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin	Par ailleurs, des FC pour la quantification du dommage sont proposés par Charpentier-Poncelet et al. dans un article soumis fin 2021 (voir plus bas)
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	LPST : Lost Potential Service Time (Temps de Service Potentiel Perdu) ADR : Average Dissipation Rate (Taux de Dissipation Moyen)	-

	Dommage adressé	Nom du dommage	Impact socio-économique dû à la dissipation de ressources minérales	Une extension possible au dommage est proposée par Charpentier-Poncelet et al. dans un article soumis fin 2021 à l'International Journal of LCA (non publié à ce jour). L'approche se base sur les prix des 61 métaux : les FC LPST et ADR sont pondérés par un indice de prix (ratio entre le prix du métal étudié et le prix d'un métal de référence). Ces "indices de prix" sont conceptuellement très semblables aux FC "basés sur les prix" tels que publiés par le JRC ; la différence principale étant dans leur mode d'utilisation. Prix : valeur moyenne sur 10 ans, entre 2006 et 2015 dans la majeure partie des cas, sur la base de données USGS. Les FC endpoint ainsi calculés seront disponibles dans l'article (Excel de SI document) soumis pour publication fin 2021. Ces FC permettent ainsi de répondre à la question : *"How can I quantify the relative contribution of a product system to the lost potential value due to the dissipation of mineral resources?".*
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Non	Il pourrait être envisageable de baser les calculs des FC sur des MFA régionaux, mais cela serait difficilement réalisable. Exclu ici.
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Impossible	-
	Peer review	oui / partiellement / non	oui	-

Peer review, sources des données	Recommandations		Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	non	Approche récente, de fait non recommandée antérieurement. Mais considérée dans les travaux : - du TAB de l'EF en 2021 ; - de l'UNEP (task force “natural resources” of the GLAM3) en 2021-2022 Les conclusions de ces travaux sont attendues courant/fin 2022.
	Sources des données		Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Les valeurs de temps de service sont calculées via des MFA dynamiques pour chaque élément chimique. Les FC publiés par Charpentier-Poncelet et al. (2021) pour 18 métaux se basent sur les MFA dynamiques (et plus particulièrement, sur les valeurs de flux dissipatifs) tels que modélisés par Helbig et al. (2020). Le modèle de MFA dynamique est présenté dans cet article, ainsi que les valeurs des paramètres associés. Les données utilisées dans le MFA dynamique incluent notamment : la distribution des métaux dans 29 secteurs d'utilisation, les durées de vie des produits propres à chacun de ces secteurs, les rendements de procédés, les taux de collecte et de recyclage fonctionnel. Les valeurs associées sont issues de la littérature. L'extension des FC à 61 métaux se base sur la mise en oeuvre de l'approche de MFA dynamique développée par Helbig et al. (2020), cette fois-ci sur ces 61 métaux. Ces nouveaux MFA dynamiques ont fait l'objet d'un article scientifique soumis fin 2021 dans le journal *Nature Sustainability* (actuellement en révision). L'article est accompagné d'un SI Document qui liste l'ensemble des données sources, pour chacun des paramètres (et ce pour chacun des métaux).	Helbig, C., Thorenz, A., & Tuma, A. (2020). Quantitative assessment of dissipative losses of 18 metals. Resources, Conservation and Recycling, 153, 104537. https ://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104537
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicable à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, très large mise en œuvre à ce jour (61 éléments chimiques)

		La méthode est applicable à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, non mise en œuvre à ce jour sur les minéraux.
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	aujourd'hui	Facteurs de Caractérisation disponibles pour 18 métaux (Charpentier-Poncelet et al., 2021). Extension à 61 éléments chimiques en tout, dans le cadre d'un article soumis fin 2021, a priori disponible courant 2022.
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	facilement	Les méthodes LPST et ADR sont directement compatibles avec les ICV existants actuellement (type ecoinvent). A l'heure actuelle, la difficulté réside dans le fait que les FC ne sont pas encore directement disponibles dans les logiciels ACV classiques. Néanmoins, une fois les FC intégrés dans un logiciel ACV (après avoir été récupérés dans les articles associés), le calcul d'impact est facile. A noter par exemple que l'article d'extension des FC à 61 éléments chimiques (soumis par Charpentier-Poncelet et al. fin 2021) intègre l'utilisation de ces FC à 6,000 cas d'études (ICVs ecoinvent).

		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Non	-
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Non, mais éventuellement au-delà	A noter que l'Université de Bordeaux a entamé des discussions avec OpenLCA pour l'intégration des FC ADR et LPST dans le logiciel. Par ailleurs, les FC pour 61 éléments chimiques sont disponibles dans un format Excel dans le SI document accompagnant l'article soumis par Charpentier-Poncelet et al. fin 2021. ; de fait dans un format qui facilite leur possible importation et utilisation dans un logiciel ACV standard.
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	61	18 FC publiés dans le cadre de l'article de Charpentier-Poncelet et al. (2021) : fer (Fe), aluminium (Al), nickel (Ni), cuivre (Cu), argent (Ag), chrome (Cr), zinc (Zn), plomb (Pb), rhénium (Re), étain (Sn), tantale (Ta), tungstène (W), cobalt (Co), indium (In), tellure (Te), sélénium (Se), gallium (Ga), germanium (Ge) Extension à 61 éléments chimiques au total dans l'article soumis par Charpentier-Poncelet et al. fin 2021.
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	L'extension à 61 éléments chimiques permet dès à présent une couverture très significative.	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	0	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Pas de couverture des minéraux, uniquement les éléments chimiques (métaux)	-

	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie	Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	oui	C'est l'un des avantages clés de cette approche : les FC LPST et ADR sont directement utilisables avec les bases de données d'ICV actuelles. Les FC sont à multiplier par les masses de ressources extraites du sol (resources from ground) telles que répertoriées dans les ICVs.
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Pas de mise à jour depuis la création	-
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Une mise à jour	Extension de 18 à 61 métaux (l'article relatif aux 18 métaux a été publié en 2021, celui relatif aux 61 métaux est attendu pour 2022). Pas de future mise à jour complémentaire prévue, à l'heure actuelle.
	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	Fort	Fort car 43 nouveaux métaux couverts. A relativiser car l'extension à 61 métaux a été réalisée peu de temps après la publication des 18 métaux. Par ailleurs, comme pour d'autres méthodes, la mise à jour des données de base (ici, servant au calcul des MFA dynamiques) pourrait avoir un effet important sur les FC. Néanmoins, effet non étudié à ce jour.
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	Partiellement	Peu de mise en œuvre sur des cas d'études à ce jour, ce qui implique peu de recul sur la facilité de compréhension de l'indicateur par les parties prenantes. Néanmoins, on peut penser que le concept de dissipation/pertes de ressources tel que capté par les approches LPST et ADR soit facilement compréhensible et communicable. Les concepts de temps de service total (utilisé dans ADR) et surtout de temps de service perdu (utilisé dans LPST) sont probablement plus abstraits et moins accessibles que le concept de pertes de ressources.

Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages	Les + : - deux méthodes qui permettent de répondre à la question de la quantification de la perte d'accessibilité/de la dissipation des ressources minérales induites par le système produit via l'ACV ; càd la question clé à considérer dans le cadre du PEF ou des travaux de l'UNEP lorsqu'une méthode opérationnelle sera à disposition. Et ce sur la base de données moyennes, représentatives des mécanismes de dissipation des ressources minérales à l'oeuvre dans la technosphère à l'heure actuelle ; - directement exploitable avec les bases de données d'ICV classiques (type ecoinvent) : les FC sont à multiplier par les masses de ressources extraites (flux élémentaires des ICV) ; - excellente couverture sur les métaux : les FC sont disponibles pour 61 métaux ; - se basent sur une vision conservatrice de l'inaccessibilité des ressources dans certains compartiments de dissipation (centres d'enfouisssement par exemple), certes discutable (voir sur ce point la colonne de droite) mais qui apparaît plus pertinente que la vision extrêmement optimiste des approches SUPRIM et ARP ; - les FC LPST et ADR permettent de quantifier un impact à mi-chemin. Par ailleurs, en complément, des FC seront disponibles prochainement afin de prendre en compte le dommage induit par cette dissipation (approche "prix") ; - la plupart des données de base utilisées dans le calcul des FC sont massives, représentatives, fiables et récentes ; - bien que non disponibles aujourd'hui dans les logiciels ACV classiques, les FC ADR et LPST sont accessibles dans les articles (respectivement publié et soumis), dans un format pratique (Excel) importable dans des logiciels ACV. L'équipe développeuse de la méthode est actuellement en discussion avec OpenLCA pour l'intégration de ces FC dans ce logiciel.	Les - : - pas de cas d'études d'utilisation de cette méthode publiés à ce jour. De fait, peu de retours d'expériences ; - les FC LPST et ADR se basent sur un ensemble de paramètres dont la valeur est fixée sur la base d'une moyenne à l'échelle de la technosphère globale, alors que le système produit étudié pourrait avoir des performances différences pour ces mêmes paramètres (notamment : rendements de procédés, dissipation en utilisation, durée de vie, taux de recyclage). Cela pourrait impliquer des incohérences dans les analyses ; plus de cas d'études seraient nécessaires pour comprendre et analyser ce point ; - les FC LPST et ADR sont à multiplier directement par la masse de ressources extraites, dans les ICVs, ce qui est à la fois i) un point extrêmement positif (cf colonne de gauche sur la facilité de mise en oeuvre de ces FC avec les bases de données d'ICV actuelles) mais aussi ii) une limite dans l'analyse des résultats d'ACV, en ce qui concerne l'identification des phases du cycle de vie les plus contributrices à la dissipation des ressources minérales (qui n'est pas possible avec les FC ADR et LPST). C'est une limite particulièrement importante dans certains contextes : par exemple dans le contexte de l'EF, pour lequel l'identification des phases du cycle de vie les plus contributrices est fondamentale ; - ADR se base sur le constat d'un TS « potentiel » selon les conditions d'usages et les technologies d'aujourd'hui. Les valeurs utilisées dans les MFA dynamiques se basent sur des données récentes, figées pour des calculs à long terme (calcul de dissipation des métaux dans l'économie sur 1000 ans). Il s'agit pour certains paramètres (rendements, taux de recyclage, etc.) d'une approximation assez grossière. Au-delà de ces paramètres, certaines hypothèses sous-jacentes sur les compartiments de dissipation sont probablement trop conservatrices à une échelle temporelle aussi longue. ADR est donc à

			utiliser dans un contexte d'identification de "hotspot" de dissipation au regard des technologies et des connaissances d'aujourd'hui ; - LPST se base sur l'introduction de choix de valeurs sur un "objectif idéal", qui n'a pas de réalité physique. De fait, les FC ADR sont à privilégier plutôt que les FC LPST ; - bien que la couverture sur les métaux soit excellente, il n'y a à ce jour pas de FC disponibles pour les minéraux (FC uniquement à l'échelle d'éléments chimiques), ce qui peut être problématique pour certains cas d'études

2.1.5 Future Welfare Loss

			The social cost of the sub-soil resource use	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Géopolitique, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.?	Valeur instrumentale	Cette méthode quantifie le coût pour les générations futures de la consommation/dissipation des ressources non-renouvelables.

	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	Cette méthode basée sur les prix de marché avec une correction basée sur le différentiel de taux d'actualisation (de marché et social) permet de prendre en compte les générations futures pour les enjeux sur les ressources non-renouvelables dans le cadre d'analyse de cycle de vie et d'analyses coût-bénéfice.	-
	Source la plus récente		Huppertz, Tom, Bo P. Weidema, Simon Standaert, Bernard De Caevel, and Elisabeth van Overbeke. 2019. "The Social Cost of Sub-Soil Resource Use" Resources 8, no. 1 : 19. https ://doi.org/10.3390/resources8010019	
	Historiques de développements		Avant la publication en 2019. La méthode draft avait été présentée au SETAC en 2012 et 2017.	-
Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	La valeur de marché est prise comme point de départ car elle incorpore les informations des agents économiques (anticipations sur les applications futures des ressources, potentiels de recyclage, évolution des réserves et des coûts d'extraction…). Un correctif est appliqué car le marché utilise un taux d'actualisation qui ne prend pas en compte les générations futures : le taux d'actualisation du marché est supérieur au taux d'actualisation social. La méthode aboutie donc à un prix de marché corrigé des ressources.	-
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	EUR2017	-

	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Pour le cas de base, c'est infini. Remarque : les facteurs d'actualisation du marché et social converges vers 300 ans.	Il existe 2 analyses de sensibilité : - une qui prend en compte un taux avant épuisement spécifique aux ressources (réserves connues et exploitables économiquement et estimation des réserves non-découvertes divisées par la production minière) - une qui prend 50 années comme valeur majorante comme valeur avant épuisement en faisant l'hypothèse qu'au-dessus de 50 ans les ressources n'ont pas de rente de rareté.
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Dommage.	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	Aucun	-
	Dommage adressé	Nom du dommage	La perte pour la société, exprimée en valeur monétaire, de l'indisponibilité de la ressource pour les générations futures.	-
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Global	-

	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)		Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Impossible	Logique de "prix de marché mondial" sur les ressources : de fait la "régionalisation" semble peu pertinente dans ce cas.
Peer review, sources des données	Peer review		oui / partiellement / non	Oui	-
	Recommandations		Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	Non	Approche récente, de fait non recommandée antérieurement. Mais considérée dans les travaux de l'UNEP (task force “natural resources” of the GLAM3) en 2021-2022. Les conclusions de ces travaux sont attendues courant/fin 2022.
	Sources des données		Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	US Geological Survey, World Bank, IMF[4], FRED[5], LPPM[6] et Eurostat.	-
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-

[4] International Monetary Fund.
[5] Federal Reserve Bank of St. Louis.
[6] London Platinum and Palladium Market.

	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	Aujourd'hui	-
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	Facilement	-
		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Facilement applicable mais pas implémentée dans Simapro et GABI.	Quelques ressources pour lesquelles il faut faire des conversions (similaire à d'autres méthodes) : - éléments de flux élémentaires mais méthode couvrant un composé - minerai dans flux élémentaire mais méthode qui couvre la ressource économique et non le minerai.
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	47	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Aucun	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	90	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Aucun	-

	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie	Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	Oui	-
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	-	-
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	Facilement	Le concept de prix des ressources minérales est probablement l'un des plus compréhensibles pour les praticiens ACV (notamment en comparaison d'autres concepts utilisés dans d'autres méthodes ; par ex. approches thermodynamiques) Le prix des matières premières est par ailleurs déjà classiquement utilisé en ACV en ce qui concerne l'allocation comme approche de résolution de la multifonctionnalité. Par contre, les praticiens ACV ne sont pas familiers avec les concepts d'actualisation (i.e. taux d'actualisation du marché et taux d'actualisation social) mobilisés par la méthode.
Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages		Les + : - méthode qui permet de quantifier la perte de valeur des ressources minérales induite par un système produit ; la "valeur" étant un concept clé à capter dans la quantification du dommage à l'Aire de Protection Ressources Naturelles, selon les travaux de l'UNEP (publication de Berger et al., 2020 ; et travaux du GLAM 3 en cours) ; - se base sur des données (de prix des métaux et des matières minérales) avec un bon niveau de qualité (complétude, précision, représentativité, avec données actualisées régulièrement) ;	Les - : - les coûts d'extraction sont supposés constants dans la méthode ; - le coût d'extraction est supposé être égal à 75 % du prix (valeur par défaut basé sur une moyenne d'Eurostat) car peu de données empiriques sur le coût d'extraction spécifique par ressources ; - pas encore directement exploitable dans les logiciels ACV Simapro et Gabi (déjà mis en œuvre dans le logiciel RangeLCA et utilisé par RDC Environment), bien que relativement facile à mettre en œuvre.

		- prise en compte des générations futures en prenant en compte la différence entre le taux d'actualisation de marché et le taux d'actualisation social ; - nombre relativement restreint d'hypothèses dans la méthode (en comparaison d'autres méthodes), peu de "couches de données" dont l'incertitude se superposerait ; - méthode relativement simple à comprendre pour les praticiens ACV peu familiers des enjeux associés aux ressources minérales ; - très bonne couverture des métaux et des minéraux (nombreux FC disponibles) ; - FC disponibles dans l'article publié.	

2.1.6 GeoPolRisk

			GeoPolRisk	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Risque géopolitique d'approvisionnement	-
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	« Quantifier les problèmes potentiels d'accessibilité d'un système-produit liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques à court-terme (criticité) »	-

	Source la plus récente	-	Koyamparambath, A., Santillán-Saldivar, J., McLellan, B., Sonnemann, G., 2022. *Supply risk evolution of raw materials for batteries and fossil fuels for selected OECD countries (2000–2018).* Resources Policy 75, 102465. https ://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102465	-
	Historiques de développements		*Contrairement à la plupart des autres méthodes, la méthode GeoPolRisk a connu une évolution relativement importante de ses fondements méthodologiques (qui s'est matérialisée par des changements dans l'approche de calculs des FC ; souvent des ajouts dans la formule de calcul).* <u>Historique :</u> - Développements initiaux par Gemechu et al. (2016). Puis améliorations successives par : - Helbig et al. (2016) : prise en compte de la production domestique, indépendante des imports et donc non à risque ; et désaggrégation de la chaîne de production des matières premières (mine, métallurgie, raffinage) - Cimprich et al. (2017) : prise en compte de la vulnérabilité dans le calcul du "risque" ; et reconnaissance que les travaux précédents faisaient référence aux "risques" alors qu'ils quantifiaient plutôt la probabilité de rupture d'approvisionnement, uniquement (dans un contexte où risque = Probabilité x Vulnérabilité) - Cimprich et al. (2018) : utilisation d'un indice de substituabilité, avec application à un cas d'études, pour la prise en compte de la vulnérabilité. Approche abandonnée par la suite par l'équipe de développement, car jugée pas assez robuste - Santillan- Saldivar et al. (2021) : prise en compte de la vulnérabilité via l'élasticité du prix des ressources (changement de prix en fonction du changement de l'accessibilité des ressources), dans GeoPolEndpoint. C'est-à-dire accroissement du coût des matières premières du fait du risque géopolitique. L'approche GeoPolEndpoint n'est pas analysée dans ce tableau de synthèse, qui se focalise sur GeoPolRisk - Santillan- Saldivar et al. (2021) : prise en compte de la mitigation permise par le recyclage - Koyamparambath et al. (2022) : calculs des FC par pays (de l'OCDE), avec analyse de l'évolution temporelle (sur 2000-2018).	Références : Cimprich, A., Young, S.B., Helbig, C., Gemechu, E.D., Thorenz, A., Tuma, A., Sonnemann, G., 2017. Extension of geopolitical supply risk methodology : Characterization model applied to conventional and electric vehicles. Journal of Cleaner Production 162, 754–763. https ://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.063 Cimprich, A., Karim, K.S. & Young, S.B. Extending the geopolitical supply risk method : material "substitutability" indicators applied to electric vehicles and dental X-ray equipment. Int J Life Cycle Assess 23, 2024–2042 (2018). https ://doi.org/10.1007/s11367-017-1418-4 Helbig, C., Gemechu, E.D., Pillain, B., Young, S.B., Thorenz, A., Tuma, A., Sonnemann, G., 2016. Extending the geopolitical supply risk indicator : Application of life cycle sustainability assessment to the petrochemical supply chain of polyacrylonitrile-based carbon fibers. Journal of Cleaner Production 137, 1170–1178. https ://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.214 Koyamparambath, A., Santillán-Saldivar, J., McLellan, B., Sonnemann, G., 2022. Supply risk evolution of raw materials for batteries and fossil fuels for selected OECD countries (2000–2018). Resources Policy 75, 102465. https ://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102465 Santillán-Saldivar, J., Cimprich, A., Shaikh, N., Laratte, B., Young, S.B., Sonnemann, G., 2021. How recycling mitigates supply risks of critical raw materials : Extension of the geopolitical supply risk methodology applied to information and communication technologies in the European Union. Resources, Conservation and Recycling 164, 105108. https ://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105108 Santillán-Saldivar, J, Gaugler, T, Helbig, C, et al. Design of an endpoint indicator for mineral resource supply risks in life cycle sustainability assessment The case of Li-ion batteries. J Ind Ecol. 2021 ; 25 : 1051– 1062. https ://doi.org/10.1111/jiec.13094

Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	Permet de quantifier le risque géopolitique d'approvisionnement en ressources minérales pour un produit. Le calcul intègre les dimensions suivantes : - 1) concentration de la production ; c'es-à-dire concentration des pays producteurs au regard de la production mondiale totale ; - 2) composition de la chaîne d'approvisionnement : % d'imports versus production domestique ; - 3) "stabilité géopolitique", c'est-à-dire stabilité politique et absence de problématiques de violence et de terrorisme dans les pays exportateurs des commodités concernées ; GeoPolRisk retranscrit un indicateur de la probabilité de rupture d'approvisionnement (dimension géopolitique). Par ailleurs la vulnérabilité du système étudié relativement à cette rupture est prise en compte dans GeoPolEndpoint ("risque" = "probabilité" x "vulnérabilité")	-
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	[FC] = [1/kg] [Impact] = adimensionnel (valeur entre 0 et 1)	L'impact calculé pour le système-produit analysé permet de retranscrire la probabilité de rupture d'approvisionnement associée. Mais modification à venir prochainement (thèse de Jair Santillan, 2021 ; https ://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03619199) : FC : GeoPolRisk*Prix ($/Kg) [Impact] : [$]
	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Court-terme (<10 ans)	Valide pour 1 an (la plupart des informations doivent être actualisées tous les ans).
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin (GeoPolEndpoint en complément)	La "vulnérabilité" est maintenant prise en compte via GeoPolEndpoint

	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	outside-in	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	Risque géopolitique d'approvisionnement	-
	Dommage adressé	Nom du dommage	Accroissement du coût des matières premières dû au risque géopolitique	-
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Pays	L'échelle "régionale" (OCDE, UE) a aussi été mise en œuvre.
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Pays	GeoPolRisk : données à l'échelle pays : volumes de production, volumes d'import-export, et "stabilité politique" (hors "vulnérabilité" donc, qui est prise en compte via GeoPolEndpoint)
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Nationale	-
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Difficilement faisable	FC pas mis en œuvre dans les logiciels ACV à ce jour. Cf les éléments dans les cellules ci-dessous.
	Peer review	oui / partiellement / non	oui	

Peer review, sources des données	Recommandations		Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	Oui 1) Recommandation par la "Task Force" de l'Initiative Cycle de Vie du Programme Environnemental des Nations Unies. Pour ce qui est de la question : "Comment puis-je quantifier les potentiels enjeux d'accessibilité pour un système produit, en lien avec les aspects géopolitiques de court-terme et socio-économiques?" Niveau de Recommandation : Suggérée 2) Identifiée par le projet ORIENTING comme une méthode d'intérêt pour capter les enjeux de criticité dans l'Analyse de la Durabilité sur le Cycle de Vie (LCSA)	Références : Task Force Mineral Resources : Berger et al., 2020 et projet ORIENTING : *https ://pre-sustainability.com/articles/orienting-project-methods-and-tools-for-life-cycle-sustainability-assessment/*
	Sources des données		Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Production : ex, USGS Concentration de la production : Herfindahl-Hirschman Index (HHI) Import-export : ex, UN Comtrade Stabilité politique : ex, Worldwide Governance Indicators (WGI-PV) Listing des composants matières (Bill of Materials) des produits : sources de données variables ; bases de données ICV combinées à des spécifications produits, références de la littérature, etc.	
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, dépend de la disponibilité des données (production, échanges commerciaux, etc.)

		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, dépend de la disponibilité des données (production, échanges commerciaux, etc.)
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	A court terme (2-3 ans)	A ce jour : pas d'intégration dans les logiciels ACV. Besoin de manipulation de données dans des fichiers annexes. Mais une publication a été récemment soumise à l'IJLCA avec FC à multiplier par les inventaires : - avec mise en œuvre possible dans les logiciels ACV. Au maximum, intégration dans OpenLCA d'ici fin 2022 ; - mise à disposition d'un outil en ligne associé à ces CFs, prochainement. Pas de plan à ce jour pour intégration dans SimaPro et GaBi, mais on peut imaginer que cela sera fait d'ici 2-3 ans. Eventuellement, les FC pourraient être intégrés à SimaPro et GaBI directement par les utilisateurs avant. L'intégration dans OpenLCA fait partie de la thèse d'Anish Koyamparambath (Univ. Bordeaux, en cours)
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	Difficilement	La mise en œuvre de l'approche GeoPolRisk en complément de l'ACV nécessite actuellement l'utilisation de logiciel (codé en Python) et de lourdes feuilles de calculs annexes. De fait la mise en oeuvre nécessite plusieurs expertises (programmation, manipulation des données ICV dans des feuilles de calculs hors logiciels ACV, etc.) Mais à court-terme : mise à dispositions de FC, via un outil en ligne dans un premier temps, puis

					intégration directe aux logiciels ACVs, qui rendrait l'approche beaucoup plus facile à mettre en oeuvre.
		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Non	-
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Non, mais éventuellement au-delà	L'opérationnalisation de la méthode est un élément clé sur lequel l'équipe qui a développé GeoPolRisk se penche sérieusement : - Discussions en cours sur la mise en œuvre de GeoPolRisk dans OpenLCA - Développement en cours d'un outil en ligne simplifié de mise à disposition et de calcul de FC
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	25	D'après Berger et al., 2020. Par ailleurs, d'autres chiffres (pour les ressources minérales au global, pas seulement par élément) : - Gemechu et al, 2017 : (14 ressources) * (12 pays + UE) * (1 an) = 182 FC individuels - Cimprich et al, 2017 : (49 ressources) * (UE) * (1 an) = 49 FC individuels - Santillán-Saldivar et al, 2021 : (13 resources) * (EU) * (1 an) = 13 FC individuels - Koyamparambath et al, 2022 : (17 ressources) * (5 countries + EU) * (18 ans) = 1836 FC individuels Sachant que les FC de l'année la plus récente doivent être utilisés (sauf si analyse pour un produit dans le passé).

		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Uranium, vanadium, zirconium, etc.	D'après Berger et al., 2020
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	7	D'après Berger et al., 2020
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Graphite, flurospar, calcaire, etc. Le focus est actuellement plutôt sur les éléments chimiques	D'après Berger et al., 2020
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	Partiellement	Enjeux sur les données d'imports exports pour quelques commodités. L'enjeu principal concerne le Bill of Materials des produits, qui doit inclure la composition complète du produit en matières (ce qui n'est pas nécessairement le cas dans les données ICV, dont méta-données)
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Plus de 2 mises à jour	Dont récemment : intégration du recyclage, et application pour plusieurs pays de l'OCDE (UE, USA, Corée du Sud, Japon, Canada et Australie).
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Plus de 2 mises à jour	Dont récemment : intégration du recyclage, et application pour plusieurs pays de l'OCDE (UE, USA, Corée du Sud, Japon, Canada et Australie). Au-delà de la mise à jour sur la méthode, l'objectif est la mise à jour annuelle des FC (via un outil Python)

	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	- Faible pour ce qui est de l'intégration du recyclage (sauf si une dimension prospective est prise en compte) - Importante pour la régionalisation (par exemple des pays producteurs de matières premières, comme le Canada et le Japon, seront moins soumis à un risque d'approvisionnement ; c'est reflété dans les facteurs GeoPolRisk)	
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	Partiellement	Résultats relativement simples à interpréter : valeur GeoPolRisk entre 0 (faible risque) et 1 (fort risque) Valeur GeoPolRisk pour un produit fini est la somme des valeurs GeoPolRisk pour chaque commodité : des produits plus complexes, avec une plus grande variété d'intrants matières, seront associés à un risque plus élevé ; ce qui fait sens, intuitivement. Néanmoins, l'approche qui consiste à ne pas considérer la masse de matières (l'approche est ici sur la présence/absence) est contre-intuitive en ACV. Deux produits A et B contenant une matière (un métal m par exemple) auront le même GeoPolRisk pour cette matière, peu importe la quantité dans le produit. -> Mais des développements récents (thèse de Jair Santillan, Université de Bordeaux), et publiés prochainement, résolveront le problème : mise à disposition de FC à multiplier par les flux élémentaires de ressources minérales des ICVs (FC sous la forme : GeoPolRisk * prix)

Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages	Les + : - méthode qui permet de prendre en compte la **probabilité** de rupture d'approvisionnement des matières premières, qui est une dimension importante du **risque** d'approvisionnement qui pèse sur un produit (qui elle-même est une dimension importante de la **criticité** des matières premières) ; - la "vulnérabilité" à la rupture d'approvisionnement (càd l'autre dimension du risque) peut-être prise en compte via la méthode complémentaire GeoPolEndpoint ; - les données de base utilisées dans le calcul des FC sont relativement fiables et récentes ; - la méthode a connu des développements importants ces dernières années, par plusieurs groupes de recherche, et continuera d'être développée dans les années à venir ; - en particulier, la régionalisation (par pays) a été développée récemment, ce qui améliore encore la qualité de l'approche ; - il est attendu l'amélioration de la mise en oeuvre (opérabilité) de l'approche en ACV : des développements sont en cours sur ce sujet, qui permettraient de rendre disponibles des FC pour utilisation dans les logiciels ACV standard possiblement d'ici 2-3 ans - méthode qui fait partie des méthodes recommandées par l'UNEP (Task Force Mineral Resources), pour ce qui est de la question associée aux enjeux de criticité ; - méthode qui suscite l'intérêt dans le cadre d'initiatives plus récentes encore (notamment dans le cadre du projet UE ORIENTING, qui vise au développement d'une approche d'Analyse de la Durabilité sur le Cycle de Vie)	Les - : - méthode encore très complexe à mettre en pratique en ACV : besoin d'utiliser des outils spécifiques en dehors du cadre des logiciels ACV classiques ; et besoin d'une expertise sur la méthode en elle-même ; - en particulier, **aujourd'hui** la mise en oeuvre sort du cadre classique de calcul de l'impact en ACV (ICV x FC). Les données d'ICV doivent être extraites pour répondre aux besoins de l'approche, ce qui pose des questions du point de vue opérationnel (mise en oeuvre en dehors des outils ACV) et de la qualité des données ICV existantes (notamment : besoin de données ICV régionalisées sur les chaînes de production, dans une nomenclature géographique qui corresponde aux facteurs GeoPolRisk) ; - assez peu de cas d'études d'utilisation de cette méthode publiés à ce jour, en comparaison d'autres méthodes de calculs d'impacts. De fait, peu de retours d'expériences ; - si la probabilité de rupture d'approvisionnement est prise en compte dans la méthode, avec une qualité intéressante, la vulnérabilité est à ce jour moins bien représentée ; cela limite de fait la bonne représentation du risque associé à l'approvisionnement en matières premières - le niveau de recommandations de l'UNEP est uniquement : "suggérée" - l'approche se base sur un certain nombre limité d'indicateurs, ce qui permet de délivrer un message simplifié eu égard à la probabilité de rupture d'approvisionnement ; mais elle ne se substitue pas à une analyse fine des risques d'approvisionnements, et plus généralement de la criticité, à l'échelle d'une entreprise par exemple (que la méthode ESSENZ essaie d'approcher)

2.1.7 Integrated method to assess resource efficiency (ESSENZ)

			ESSENZ	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Risque d'approvisionnement et vulnérabilité associée	"Vulnérabilité" intégrée dans CS-ESSENZ, publiée en 2021. Voir ci-dessous. A noter aussi qu'il ne s'agit pas ici uniquement du risque géopolitique d'approvisionnement, mais d'un risque d'approvisionnement qui prend aussi en compte une dimension socio-économique (par exemple : volatilité des prix, occurrence en tant que co-produit, etc.)
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	« Quantifier les problèmes potentiels d'accessibilité d'un système-produit liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques à court-terme (criticité) »	Recommendation "interim" par Berger et al., 2020, pour aborder la question : *"How can I quantify the relative potential accessibility issues for a product system related to short-term geopolitical and socioeconomic aspects?"*
	Source la plus récente	-	Yavor, K.M. ; Bach, V. ; Finkbeiner, M. Adapting the ESSENZ Method to Assess Company-Specific Criticality Aspects. Resources 2021, 10, 56. https ://doi.org/10.3390/resources10060056	-
	Historiques de développements		- Développements initiaux dans le cadre de l'ESP (Economic Scarcity Potential ; Schneider et al., 2014) - La méthode ESSENZ a été développée comme une extension et mise à jour d'ESP (Bach, 2016) - Mise à jour des FC en 2019 sur la base de données plus récentes (Bach et al., 2019) - Développement de l'approche CS-ESSENZ (company-specific ESSENZ) en 2021 (Yavor et al., 2021)	Références : Bach, V. ; Berger, M. ; Henßler, M. ; Kirchner, M. ; Leiser, S. ; Mohr, L. ; Rother, E. ; Ruhland, K. ; Schneider, L. ; Tikana, L. ; et al. Integrated method to assess resource efficiency—ESSENZ. J. Clean. Prod. 2016, 137, 118–130. Bach, V. ; Berger, M. ; Finogenova, N. ; Finkbeiner, M. Analyzing Changes in Supply Risks for Abiotic Resources over Time with the ESSENZ Method—A Data Update and Critical Reflection. Resources 2019, 8, 83. https ://doi.org/10.3390/resources8020083 Yavor, K.M. ; Bach, V. ; Finkbeiner, M. Adapting the ESSENZ Method to Assess Company-Specific Criticality Aspects. Resources 2021, 10, 56. https ://doi.org/10.3390/resources10060056

Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	La méthode ESSENZ quantifie 11 indicateurs associés aux contraintes (géopolitiques et socioéconomiques) d'accessibilité : concentration des réserves dans un nombre plus ou moins restreint de pays ; concentration de la production minière ; (in)stabilité politique des pays producteurs ; capacité d'extraction actuelle ; concentration de l'extraction minière au travers d'un nombre restreint d'entreprises ; faisabilité des projets d'exploration ; occurence en tant que co-produit (et donc dépendance au métal hôte, et aux contraintes qui peuvent peser sur son extraction) ; part du primaire vs secondaire ; volatilité des prix ; croissance de la demande ; barrières commerciales. Pour ces 11 catégories de contraintes d'accessibilité, un indicateur quantitatif est déterminé et mis en perspective avec (divisé par) une valeur objectif (approche "distance-to-target") : si le ratio est < 1, pas de contrainte d'accessibilité ; si ce ratio est > 1, il y a contrainte d'accessibilité (plus ou moins forte, telle que représentée par la valeur)	Certaines de ces dimensions sont communes à GeoPolRisk (concentration de la production dans certains pays, instabilité politique des pays producteurs) ; mais la plupart des contraintes d'accessibilité considérées dans ESSENZ ne sont pas prises en compte dans GeoPolRisk (volatilité des prix, capacité d'extraction actuelle, co-production, etc.) En outre, les deux approches prennent en compte l'instabilité politique de façon différente : - dans GeoPolRisk : uniquement via l'indicateur "political stability and absence of violence" du WGI - dans ESSENZ : en prenant en compte aussi les autres indicateurs du WGI : voice and accountability, political stability and absence of violence and terrorism, government effectiveness, regulatory quality, rule of law, and control of corruption A noter enfin que : - l'approche CS-ESSENZ quantifie plus de 11 indicateurs ; dont des indicateurs associés à la "vulnérabilité" (voir ci-dessous) - l'approche originale ESSENZ intègre aussi des indicateurs environnementaux et sociaux à l'évaluation de l'utilisation efficace des ressources. Les dimensions environnementales et sociales ne sont pas considérées dans la suite de cette analyse (focus sur le risque d'approvisionnement, et dans une moindre mesure la vulnérabilité)
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	[FC] = [1/kg] [Impact] = adimensionnel	Pas de calcul d'impact où les FC sont multipliés par des masses de ressources de l'inventaire. Càd approche différente de l'approche classique ACV (FCi x mi). Résultats sous forme de "hotspots" (ressources) par catégorie d'impacts.
	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Court-terme (<10 ans)	Valide pour des périodes assez courtes (voir plus bas la sensibilité aux mises à jour avec des données plus récentes)

	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	outside-in	La méthode ESSENZ (comme GeoPolRisk) mesure les impacts d'une rupture d'approvisionnement sur le système-produit (ou plus précisément, sur le producteur du produit). Elle vient en complément des approches ACV classiques qui quantifient l'impact du système-produit sur l'environnement, dont les ressources naturelles (via des méthodes "inside-out"). Voir sur ce point par exemple Cimprich et al. (2019) *"product-level supply risk assessment concerns potential "outside-in" impacts (Porter&Kramer, 2006) of raw material supply disruptions on a product system (or, perhaps more accurately, the manufacturer of the product system) - for example, impaired product performance, increased production costs, and/or lost revenue due to production shutdowns. The "outside-in" impact mechanism of supply risk is the main reason why we consider supply risk as a complement to environmental LCA."* *Cimprich, A, Bach, V, Helbig, C, et al. Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment : Examining methods for product level supply risk assessment. Journal of Industrial Ecology. 2019 ; 23 : 1226– 1236. https ://doi.org/10.1111/jiec.12865*
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	Risque de rupture d'approvisionnement	A noter qu'il ne s'agit pas ici uniquement du risque *géopolitique* d'approvisionnement, mais d'un risque d'approvisionnement qui prend aussi en compte une dimension socio-économique (par exemple : volatilité des prix, occurrence en tant que co-produit, etc.) L'enjeu en termes de "Vulnérabilité" est intégré dans l'approche CS-ESSENZ publiée en 2021.
	Dommage adressé	Nom du dommage	NA	-

	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	Voir notamment Cimprich et al., 2019 : *"the ESP and ESSENZ methods aim to provide global-level CFs that can be applied by multinational companies having operations all over the world"* Cimprich, A, Bach, V, Helbig, C, et al. Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment : Examining methods for product-level supply risk assessment. Journal of Industrial Ecology. 2019 ; 23 : 1226– 1236. https ://doi.org/10.1111/jiec.12865
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Global	-
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	difficilement faisable	Régionalisation pas mise en œuvre dans l'approche (FC à une échelle globale). En théorie pourrait être faisable. Dimension "company-specific" par ailleurs ajoutée dans le cadre de la mise à jour (CS-ESSENZ) en 2021, avec utilisation de données spécifiques à l'entreprise ; mais à ce stade uniquement mise en oeuvre sur un cas d'études (preuve de concept).
Peer review, sources des données	Peer review	oui / partiellement / non	oui	-
	Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	Oui : recommandation par la "Task Force" de l'Initiative Cycle de Vie du Programme Environnemental des Nations Unies. Pour ce qui est de la question : "Comment puis-je quantifier les potentiels enjeux d'accessibilité pour un système-produit, en lien avec les aspects géopolitiques de court-terme et socio-économiques?" Niveau de Recommandation : Recommandée "interim"	Référence : Task Force Mineral Resources : Berger et al., 2020

	Sources des données	Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Les données associées aux 11 indicateurs sont issues des sources suivantes : 1) Stabilité politique : les 6 indicateurs Worldwide Governance Indicators (World Bank, 2016), pondérés par les parts de production de chaque pays (issues de l'USGS, 2017) 2) Faisabilité des projets d'exploration : Policy Perception Index (Jackson and Green, 2016) 3) Croissance de la demande : % de croissance de la demande annuelle globale, sur les 5 dernières années (USGS, 2017) 4) Capacité de production : Ratio : Réserve / production annuelle (USGS, 2017), considérant la "réserve" technologiquement et économiquement exploitable à ce jour (et donc non pas la "réserve ultime" d'ADP par exemple). L'idée de cet indicateur est d'identifier des éléments chimiques pour lesquels le temps de réserve est proche du temps de développement de nouvelles mines (10-15 ans), et donc pour lesquels il y a un risque sur la capacité de production à un horizon 10-15 ans ; 5) Barrières commerciales : Enabling Trade Index (Hanouz et al. 2014) 6) Concentration des réserves : Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) associé aux réserves à une échelle globale ; 7) Concentration de la production minière dans un nombre restreint de pays : Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) associé à la production minière à une échelle globale ; 8) Concentration de la production au travers d'un nombre restreint d'entreprises : HHI associé aux entreprises vendant des minerais dans le monde ; 9) Occurence en tant que co-produit : échelle issue de Kroop et al. (2014) 10) Part du primaire vs secondaire : valeur issue de Graedel (2011) 11) Volatilité des prix sur les 5 dernières années : Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (2014) Dans l'approche CS-ESSENZ, ces indicateurs sont par ailleurs complétés (par ex. avec l'ajout d'un indicateur	Sont listées ici les sources de données telles que mises en œuvre dans le cadre de la mise à jour de 2019 (Bach et al., 2019) Voir aussi le Tableau S1-1 du SI document de Cimprich et al., 2019. (voir directement dans ces documents pour ce qui est des références listées en cellule E21)

				"d'importance économique", qui est une dimension de la vulnérabilité) et évalués sur la base de données spécifiques aux entreprises.	
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. En pratique, dépend de la disponibilité des données.
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	En théorie, oui. Dans les faits, pas mis en pratique.
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	aujourd'hui	-
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	Difficilement	D'après Berger et al., 2020, au sujet de ESSENZ et GeoPolRisk : *"Both methods are usually applied outside an LCA software because the elementary flows reported in LCI datasets do not necessarily reflect the intermediate flows or the material composition of products."*

		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Non	-
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	Non	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	36	D'après Berger et al., 2020. Les FC sont reportés dans le Supplementary Material de l'article "*Integrated method to assess resource efficiency – ESSENZ*" (Bach et al., 2016), en section 6. De nombreux métaux "clés" sont couverts dans ces 36 éléments, ainsi que 4 ressources fossiles (charbon, gaz naturel, etc.) en complément.
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Terres Rares notamment	D'après Berger et al., 2020. Voir aussi Cimprich et al., 2019 : une valeur globale pour les Terres Rares, et non par élément individuel.
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	0	Mise en œuvre de l'approche avec focus sur les éléments chimiques, pas les minéraux
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	Le focus est actuellement sur les éléments chimiques	-
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	Partiellement	Données de Bill of Materials notamment nécessaires

Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Une mise à jour	Développement de l'approche CS-ESSENZ (Company Specific ESSENZ) en 2021. Cette mise à jour : 1) reprend certains indicateurs déjà présents dans ESSENZ, pour certains en les adaptant au calcul spécifique à l'entreprise ; par exemple sur : - l'utilisation de matière première primaire : *"Share of recycled content in products (internal production data) divided by the global average share of recycled content"* - la croissance de la demande : *"Percentage of a company's internal demand growth divided by the percentage of global production trends"* - *etc.* 2) propose de nouveaux indicateurs (sur la vulnérabilité notamment) : importance économique, dépendance aux imports, etc. En partie évalués sur la base de données spécifiques à l'entreprise, et sur la base de données moyennes régionales (UE, pays) ou globales. Référence : Yavor, K.M. ; Bach, V. ; Finkbeiner, M. *Adapting the ESSENZ Method to Assess Company-Specific Criticality Aspects*. Resources 2021, 10, 56. https ://doi.org/10.3390/resources10060056
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Une mise à jour	Mise à jour des données de base servant au calcul des FC, au travers de l'article : *Bach, V. ; Berger, M. ; Finogenova, N. ; Finkbeiner, M. Analyzing Changes in Supply Risks for Abiotic Resources over Time with the ESSENZ Method—A Data Update and Critical Reflection. Resources 2019, 8, 83. https ://doi.org/10.3390/resources8020083* et ce pour 6 des 11 catégories évaluées dans l'approche, sur la base de données relatives à la période 2011-2015 plutôt que 2009-2013 (intervalle considéré dans la méthode originale de 2016).

	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	Fort	L'approche Company-Specific (CS-ESSENZ), publiée récemment, modifie de façon importante le calcul des aspects criticité sur un système-produit (données spécifiques aux entreprises versus approche globale dans ESSENZ, et ajout de nouveaux indicateurs - dont sur la "vulnérabilité"). L'influence de la mise à jour des données (valeurs 2011-2015 vs 2009-2013 ; Bach et al., 2019) est variable selon les catégories et les ressources. Il est toutefois à noter qu'elle est forte dans de nombreux cas de catégories/ressources (plusieurs dizaines de % de variations entre la version mise à jour et l'ancienne version "originale"). Cela appelle à la mise à jour régulière des FC de l'approche ESSENZ, d'après les auteurs, pour refléter au mieux les évolutions des enjeux de criticité des matières premières.
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	avec difficulté	D'après Berger et al., 2020
Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages		Les + : - méthode qui permet de prendre en compte les contraintes (géopolitiques et socioéconomiques) d'accessibilité qui pèsent sur un produit. Intègre à la fois les enjeux de **Risque d'approvisionnement** et de **Vulnérabilité** dans sa version la plus récente (CS-ESSENZ), au travers d'un ensemble d'indicateurs qui offrent ainsi une vision plus complète que celle offerte par GeoPolRisk et GeoPolEndpoint sur l'enjeu de **criticité** ; - les données de base utilisées dans le calcul des FC sont relativement fiables et récentes ; - la méthode a connu des développements importants ces dernières années ; - fait partie des méthodes recommandées par l'UNEP (Task Force Mineral Resources), pour ce qui est de la question associée aux enjeux de criticité. Niveau de recommandations : recommandée interim ;	Les - : - méthode encore complexe à mettre en pratique en ACV : i) pas de calcul d'impact comme classiquement réalisé en ACV et ii) mise en oeuvre en dehors du cadre des logiciels ACV classiques ; - enjeux associés aux données : 1) dans le cas de CS-ESSENZ, besoin de données spécifiques à l'entreprise qui sortent du cadre classique des données d'ICV ; 2) au contraire, dans le cas d'ESSENZ (méthode originale) : approche qui se base sur des données "globales", de fait ne permettant pas de prendre en compte la dimension régionale de la criticité qui est pourtant clé (et ce contrairement à GeoPol) ; - assez peu de cas d'études d'utilisation de cette méthode publiés à ce jour, en comparaison d'autres méthodes de calculs d'impacts. De fait, peu de retours d'expériences ; - l'approche se base sur un certain nombre d'indicateurs, ce qui offre une couverture de l'enjeu "criticité"

		- utile pour l'analyse des "hotspots" en termes de ressources nécessaires à un système-produit (identification de ressources "critiques" au regard de diverses dimensions de la criticité)	particulièrement pertinente, mais dans le même temps complexifie beaucoup l'interprétation des résultats (par exemple dans CS-ESSENZ : 15 indicateurs relatifs au seul enjeu de "criticité", à analyser individuellement)

2.1.8 JRC LCI approach

			JRC LCI	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Dissipation (on/off)	-
	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	« Quantifier la perte d'accessibilité/la dissipation des ressources minérales induites par le système produit"	-
	Source la plus récente	-	Beylot, A., Ardente, F., Sala, S., Zampori, L. 2021. Mineral resource dissipation in life cycle inventories. Int J Life Cycle Assess 26, 497–510 (2021). https ://doi.org/10.1007/s11367-021-01875-4	Méthode aussi présentée dans le rapport JRC : Beylot, A., Ardente, F., Penedo De Sousa Marques, A., Mathieux, F., Pant, R., Sala, S. and Zampori, L., Abiotic and biotic resources impact categories in LCA : development of new approaches, EUR 30126 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-17227-7, doi :10.2760/232839, JRC120170.
	Historiques de développements	-	Méthode publiée en 2020	-

Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	L'approche vise à quantifier la dissipation des ressources minérales induite par un système-produit. Les flux dissipatifs sont définis comme des flux de ressources abiotiques qui ne sont pas accessibles à de futurs utilisateurs du fait de différentes contraintes, qui empêchent l'utilisation des fonctions que ces ressources pourraient fournir dans la technosphère. L'approche consiste en la prise en compte des flux dissipatifs à l'échelle des procédés unitaires, en unité de masse. Cette comptabilisation doit se faire sur la base d'une liste prédéfinie de flux dissipatifs vers un certains nombres de compartiments. Dans l'approche, il est suggéré de considérer une approche de court-terme (25 ans). Dans ce contexte, il est suggéré que tout flux de ressources vers i) l'environnement, ii) les centres de stockage final de déchets (centres d'enfouissement de déchets ménagers, centre de stockage de déchets de la minérallurgie ("tailings"), etc.) et iii) recyclés non-fonctionnellement dans la technosphère (et plus généralement ne fournissant pas de fonction significative) soit reporté comme "dissipatif" (càd non accessible à de futurs utilisateurs dans un horizon temporel de 25 ans) à l'échelle du procédé unitaire. Le fait de considérer comme "dissipées" les ressources minérales (notamment les métaux) contenues dans les déchets (ménagers ou de la minérallurgie notamment) déposés en stockage final, se base sur les capacités techniques actuelles (telles que reportées par exemple par Blengini et al., 2019), extrapolées sur un horizon de 25 ans. La mise en oeuvre de l'approche JRC à l'échelle de l'inventaire se décompose en deux étapes : 1) analyse des flux de ressources (RFA) à l'échelle des procédés unitaires (càd un bilan équilibré des ressources entrant et sortant des procédés unitaires, qui permet de distinguer les "ressources", fournissant une fonction dans le produit, des "non-ressources") ; et 2) identification et reporting des flux dissipatifs dans l'ICV (sous forme d'émissions, de ressources contenues dans les déchets, etc.). Les flux	La définition de la "dissipation" considérée dans cette méthode est issue de Beylot et al., 2020 : Beylot, A., Ardente, F., Sala, S., Zampori, L., 2020. Accounting for the dissipation of abiotic resources in LCA : Status, key challenges and potential way forward. Resources, Conservation and Recycling 157, 104748. https ://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104748 *"Dissipative flows of abiotic resources are flows to sinks or stocks that are not accessible to future users due to different constraints. These constraints prevent humans to make use of the function(s) that the resources could have in the technosphere. The distinction between dissipative and nondissipative flows of resources may depend on technological and economic factors, which can change over time."* Sur le fait de considérer que les métaux contenus dans les centres de stockage finaux sont dissipés sur un horizon temporel de 25 ans, Beylot et al. (2021) soulignent notamment : *"The recovery of critical and other raw materials from extractive waste is not a widely diffused practice in the European Union yet, despite some notable exampless [...] Blengini et al., 2019)* *Blengini GA, Mathieux F, Mancini L, Nyberg M, Viegas HM (Editors) ; Salminen J, Garbarino E, Orveillon G, Saveyn H, Mateos Aquilino V, Llorens González T, García Polonio F, Horckman, L, D'Hugues P, Balomenos E, Dino G, de la Feld M, Mádai F, Földessy J, Mucsi G, Gombkötő I, Calleja I (2019) Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills : State of play on existing practices, EUR 29744 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978–92–76– 08568–3, https ://doi.org/10.2760/60077 5* Il est à noter que : - le cadre générique de cette approche (flux dissipatifs quantifiés à l'échelle des procédés unitaires, dans l'ICV) peut être mis en oeuvre dans

			dissipatifs peuvent être des flux élémentaires et des flux dans la technosphère.	un cadre temporel de plus long terme (par exemple plusieurs centaines d'années) pour lequel les flux dissipatifs (non accessibles aux futurs utilisateurs) sont différents. Beylot et al. (2020 et 2021) testent ainsi le cadre temporel "très long terme", en supposant qu'à très long terme seules les émissions de ressources vers l'environnement sont dissipatives (approche qui devient alors proche de celle adoptée dans la méthode EDP, en ce qui concerne l'inventaire des flux dissipatifs) ; tout en suggérant de mettre en oeuvre l'horizon temporel "court-terme" (25 ans), car plus adapté au soutien à l'aide à la décision dans le contexte des politiques publiques, et beaucoup moins incertain ; - l'occupation des ressources en utilisation est considérée comme n'étant pas une forme de dissipation (par définition) ; et de fait non comptabilisée dans cette approche qui se focalise sur les flux dissipatifs ; - de façon classique en ACV, les échanges avec l'écosphère et la technosphère sont intégrés sur la durée de vie du produit, et considérés comme ayant lieu au moment de l'analyse (et non de façon dynamique sur la vie du produit). De fait, l'approche convient également dans le contexte d'application à des cas d'études de systèmes-produits avec des durées de vie > 25 ans.
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	NA	Approche à l'échelle de l'inventaire. L'approche permet de quantifier les flux dissipatifs le long du cycle de vie du système-produit étudié, en unité de masse.

	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Moyen-terme (25 ans ; appelé "court-terme" dans l'approche)	Le cadre temporel suggéré est de 25 ans. Néanmoins, l'approche est applicable pour d'autres cadres temporels (très long terme par exemple)
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	Resource Dissipation : dissipation des ressources	Dissipation ou "perte" des ressources minérales
	Dommage adressé	Nom du dommage	-	-
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	NA	Pas de FC dans cette approche.
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Difficilement faisable/impossible	Conceptuellement, on pourrait distinguer des flux "dissipatifs" et "non dissipatifs" en fonction de leur localisation géographique. En pratique, cela ajouterait un niveau de complexité à ce jour difficilement envisageable au regard des bases de données d'ICV existantes, et des besoins de développement de ces bases de données qui sont déjà nécessaires pour la mise en oeuvre de l'approche JRC globale, non-régionalisée.

Peer review, sources des données	Peer review	oui / partiellement / non	oui	Beylot et al., 2021
	Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	non	Approche récente, de fait non recommandée antérieurement. Mais considérée dans les travaux : - du TAB de l'EF en 2021 ; - de l'UNEP (task force “natural resources” of the GLAM3) en 2021-2022 Les conclusions de ces travaux sont attendues courant/fin 2022.
	Sources des données	Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	L'approche se base en premier lieu sur les bases de données d'ICV existantes (par ex. en termes d'émissions vers l'environnement), à compléter pour prendre en compte les flux dissipatifs vers certains compartiments (en ce qui concerne notamment les flux de ressources dans la technosphère, à ce jour non reportés dans les ICV). Les données nécessaires au RFA (1ère étape dans l'approche JRC LCI) sont pour un certain nombre déjà reportées : - dans les ICV (par ex. émissions vers l'environnement), - ou dans les documents support des bases de données d'ICV, car utilisées dans la modélisation de l'ICV (par exemple, dans les rapports ecoinvent : c'est par exemple le cas pour les données de composition de produits, ou des déchets des centres de stockage, dont la composition en métaux est utilisée pour le calcul des émissions associées, de long-terme). Dans l'application de l'approche JRC LCI à des cas d'études, ces données déjà existantes dans les inventaires ont été complétées par des données de la littérature et des hypothèses. Au-delà d'une meilleure prise en compte des flux de ressources (et de l'indicateur d'impact de l'utilisation des ressources), l'Analyse des Flux de Ressources en préambule de l'approche JRC LCI permet ainsi une plus grande complétude et une plus grande cohérence des flux élémentaires (complétude : plus de flux couverts, aussi en	-

				ce qui concerne les émissions ; cohérence : bilans matières/substances cohérents à l'échelle des procédés unitaires, ce qui n'est classiquement pas le cas dans les ICV actuels, par exemple dans ecoinvent)	
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	NA	Pas de Facteurs de Caractérisation. Approche à l'échelle de l'inventaire ici. Néanmoins compatible avec les FC basés sur les prix développés par le JRC, pour quantification de la "perte de valeur".
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	NA	Pas de Facteurs de Caractérisation. Approche à l'échelle de l'inventaire ici. Néanmoins compatible avec les FC basés sur les prix développés par le JRC, pour quantification de la "perte de valeur".

		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	NA	NA
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	NA	NA
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	NA	A noter néanmoins que l'approche (à l'échelle de l'ICV) est en théorie applicable à l'ensemble des flux élémentaires 'ressources' (éléments chimiques et minéraux)
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	NA	NA
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	NA	A noter néanmoins que l'approche (à l'échelle de l'ICV) est en théorie applicable à l'ensemble des flux élémentaires 'ressources' (éléments chimiques et minéraux)
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	NA	NA
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	partiellement	L'approche se base en premier lieu sur les bases de données d'ICV existantes, à compléter pour prendre en compte les flux dissipatifs vers certains compartiments (types centres d'enfouissement). Au-delà d'une meilleure prise en compte des flux de ressources (et de l'indicateur d'impact de l'utilisation des ressources), l'Analyse des Flux de Ressources en préambule de l'approche JRC permet aussi une plus grande complétude et une plus grande cohérence des flux élémentaires. Mais à ce jour l'approche n'a pas été mise en oeuvre dans les bases de données d'ICV standard (type ecoinvent)

Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Pas de mise à jour	Création récente (2020)
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)	Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	NA	Pas de FC dans cette approche
	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	NA	-
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	partiellement	Peu de recul à ce jour, dans un contexte où le concept de dissipation est récent. Néanmoins, il peut être traduit sour le terme "pertes" qui probablement sera facilement communicable.

Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages	Les + : - permet de répondre à la question de la quantification de la perte d'accessibilité/de la dissipation des ressources minérales induites par le système produit via l'ACV ; càd la question clé à considérer dans le cadre du PEF ou des travaux de l'UNEP lorsqu'une méthode opérationnelle sera à disposition ; - se base sur un concept simple : pour prendre en compte la dissipation en ACV, il faut prendre en compte (quantifier et reporter) les flux dissipatifs dans les ICV (à l'échelle des procédés unitaires). Evite ainsi les limites d'autres méthodes qui se basent sur les ICV actuels pour prendre en compte la dissipation : notamment, i) dans EDP et ARP : prise en compte uniquement de la dissipation vers l'environnement, et non d'autres formes de dissipation potentiellement significatives en masse et en "sévérité" ; et ii) dans les approches ADR et LPST : FC qui se basent sur des moyennes de taux de dissipation dans l'économie (en possible contradiction avec le système-produit étudié), à multiplier par l'inventaire des ressources extraites ; - l'horizon temporel à court terme est particulièrement d'intérêt dans certains contextes d'aide à la décision : par exemple le soutien aux politiques publiques ; en comparaison d'un horizon temporel à très long terme (par ex. réserve à plusieurs millions d'années dans ADP et EDP) ; - cet horizon temporel permet par ailleurs de s'affranchir de l'incertitude caractéristique d'approches à plus long terme : à court terme (horizon de 25 ans), l'approche se base sur les capacités actuelles d'extraction de matières premières, bien connues et référencées ; - approche qui permet l'identification des phases du cycle de vie les plus contributrices ("hotspots") à la dissipation des ressources minérales ; enjeu particulièrement important dans certains contextes d'application de l'ACV (par exemple dans le contexte de l'EF) ; - l'Analyse des Flux de Ressources en préambule de l'approche JRC permet une meilleure qualité de l'ICV, en ce qui concerne les ressources minérales et plus généralement l'ensemble des flux élémentaires et de la	Les - : - peu de cas d'études existants (une dizaine à ce jour), avec un focus sur les flux dissipatifs dans le premier plan ; - approche pas (encore?) mise en oeuvre dans les bases de données ICV standard à ce jour (par ex. ecoinvent) ; - l'amélioration de la qualité des ICV permise par cette approche (meilleure complétude et cohérence des données d'ICV) va de pair avec des efforts (potentiellement significatifs) de compilation de données, qui sont pour certaines seulement utilisées dans des modèles support aux ICV (par exemple stockage de déchets dans ecoinvent), voire non reportées à ce jour ; - nécessite la création de nouveaux flux (élémentaires et dans la technosphère) dits "dissipatifs" : enjeux d'extension des ICV (plus "lourds") et de nouvelle nomenclature ; - l'horizon temporel (25 ans) mis en oeuvre dans l'approche, bien que compatible avec l'approche classique de compilation des ICV qui intègre les flux sur la durée de vie des produits, peut engendrer une incompréhension des praticiens ACV lorsque la durée de vie du produit est supérieure à 25 ans ; - approche de la dissipation "on/off" et non pas continue : ne prend pas en compte la sévérité de la perte d'accessibilité dans les compartiments (par ex. dans certains cas : émission vers l'environnement plus dissipée qu'un métal dans un centre de stockage de déchets) ; - les matières premières contenues dans les centres de stockage de déchets pourraient pour certaines être récupérées et recyclées fonctionnellement d'ici à 25 ans, alors qu'en proxy dans cette approche elles sont entièrement considérées dissipées (ce qui reste valable dans la majeure partie des cas, au regard des connaissances sur les capacités d'extraction actuelles)

		technosphère (plus grande complétude et plus grande cohérence des flux)	

2.1.9 JRC price-based characterization approach

			Price-based characterization factors	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Risque géopolitique d'approvisionnement, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.	Valeur instrumentale	-

	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	"Quantifier la contribution relative d'un système produit aux externalités économiques de l'utilisation des ressources minérales"	Considérant l'article de Berger et al. (2020) et la question : *How can I quantify the relative (economic) externalities of mineral resource use?*
	Source la plus récente	-	Beylot, A., Ardente, F., Penedo De Sousa Marques, A., Mathieux, F., Pant, R., Sala, S. and Zampori, L., Abiotic and biotic resources impact categories in LCA : development of new approaches, EUR 30126 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-17227-7, doi :10.2760/232839, JRC120170.	-
	Historiques de développements	-	Méthode publiée en 2020	-
Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	Les flux dissipatifs de ressources minérales impliquent que ces ressources ne sont plus accessibles pour de futurs utilisateurs, à un horizon temporel donné (par définition du concept de "dissipation") ; de fait la dissipation implique la perte de la valeur que ces ressources constituent (ou pourraient constituer) dans la technosphère. Les ressources minérales ont une valeur intrinsèque (*"per se"*) limitée pour les humains ; elles ont une valeur au regard de leurs fonctions/des services qu'elles peuvent leur rendre. Dans l'approche JRC basée sur les prix, le prix de marché des ressources minérales est utilisé comme représentatif de leur valeur, associée à l'utilisation des fonctions qu'elles peuvent rendre (dans différents secteurs : électronique, automobile, bâtiment, etc.) Cette méthode de caractérisation, combinée à l'approche de prise en compte des flux dissipatifs dans l'ICV telle que développée par ailleurs par le JRC, permet de quantifier la perte de valeur (économique) des ressources minérales induite par le système-produit sur son cycle de vie. Les FC sont calculés comme le ratio entre le prix moyen (sur un intervalle de temps donné) d'une ressource i avec le prix moyen d'une ressource de	5 intervalles de temps : 10, 15, 20, 30 et 50 ans

			référence (cuivre, or ou antimoine), sur ce même intervalle de temps.	
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	[FC] = [kg Sb.€eq/kg] [Impact] = kg Sb.€eq	Beylot et al., 2020 : *"an hypothetical impact of RD equal to 2.5 kgCu.€eq. would mean that, along the whole life cycle of the system under study, the overall amount of all the resources dissipated is equivalent, in economic terms, to 2.5 kg of copper"* Deux autres substances de référence sont proposées : or et antimoine. Le choix des substances possiblement "de référence" est argumenté ainsi (Beylot et al., 2020) : - antimoine : analogie avec l'approche ADP - or : ressource à prix élevé, en comparaison de laquelle les autres ressources ont un prix inférieur (et donc FC < 1). [FC] = [kg Au.€eq/kg] - cuivre : valeur de prix médiane (distribution équirépartie des FC respectivement < 1 et > 1). [FC] = [kg Cu.€eq/kg]

	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Court-terme ou moyen-terme	FC disponibles pour 5 intervalles de temps : 10, 15, 20, 30 et 50 ans
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Dommage	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	-	-
	Dommage adressé	Nom du dommage	Resource Dissipation dans le rapport JRC (Beylot et al., 2020).	Renommé "Value loss" (perte de valeur) dans un article en cours de rédaction
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global	Prix du marché à une échelle mondiale
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global	-
	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Non	-
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Impossible	Logique de "prix de marché mondial" sur les ressources minérales : de fait la "régionalisation" semble peu pertinente dans ce cas. Néanmoins la régionalisation à l'échelle de l'UE, voire à des échelles territoriales plus fines, pourrait être pertinente pour certaines ressources (prix spécifiques pour l'UE?). Et ce notamment pour certaines ressources minérales non métalliques spécifiques. A ce jour, cette question n'a pas été abordée. Dans le rapport du JRC (Beylot et al., 2020), il est écrit : *"It is highlighted that these CF have been developed for the purpose of illustrating the proposed impact*

				assessment method. CF for relevant resources and representative for the EU should be investigated in further research."
Peer review, sources des données	Peer review		oui / partiellement / non	non	A ce jour, l'approche JRC sur les Facteurs de Caractérisation n'a pas fait l'objet de publication scientifique avec peer review. Un article est en cours de rédaction. Mais aujourd'hui seule l'approche à l'échelle de l'ICV (flux dissipatifs dans les ICV) a fait l'objet d'une publication scientifique avec peer review.
	Recommandations		Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	non	Approche récente, de fait non recommandée antérieurement. Mais considérée dans les travaux : - du TAB de l'EF en 2021 ; - de l'UNEP (task force "natural resources" of the GLAM3) en 2021-2022 Les conclusions de ces travaux sont attendues courant/fin 2022.
	Sources des données		Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Données statistiques de prix de l'USGS (United States Geological Survey). Pour 5 intervalles de temps : 10, 15, 20, 30 et 50 ans	Beylot et al., 2020 : *"The Historical Statistics for Mineral and Material Commodities of the United States Geological Survey (USGS) can represent a comprehensive archive for resources' prices. These have been used here to illustrate the method."*
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-

		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	Oui	-
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	aujourd'hui	Facteurs de Caractérisation disponibles dans le rapport du JRC (antimoine en ressource de référence ; moyenne des prix sur 50 ans). FC complémentaires disponibles à la demande auprès du JRC.
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	facilement	Bien que les FC publiés en 2020 ne soient pas encore disponibles dans les logiciels ACV.
		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	non	Pas à ce jour
			Il est attendu que la méthode soit applicable prochainement (d'ici 2 ans) avec : Simapro, GABI or Simapro and GABI	pas à notre connaissance	A noter que les FC sont disponibles à la demande dans un format Excel, auprès du JRC ; de fait dans un format qui facilite leur possible importation et utilisation dans un logiciel ACV standard. Une partie des FC est aussi directement accessible dans le rapport JRC (Beylot et al., 2020) : Tableau 4 page 26, rassemblant les FC pour 45 éléments chimiques, avec l'antimoine comme substance de référence et un horizon temporel de 50 ans (pour calculer le prix moyen). Les FC des autres ressources minérales, considérant des horizons temporels (10, 15, 20, 30 ou 50 ans) et des substances de référence

					(cuivre ou or) distincts, sont disponibles dans l'Excel mentionné plus haut.
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	45	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	Terres Rares couverts, mais aggrégés (un seul FC)	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	21	Sable, graphite, argiles, gypse, calcaires, bauxite, etc. : couverture de ressources minérales relativement "hétérogènes"
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	-	Relativement large couverture en comparaison des autres méthodes.
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	partiellement	Dans l'approche développée par le JRC, ces FC sont à multiplier par les flux dissipatifs compilés dans l'ICV (cf fiche relative à l'approche JRC LCI). A ce jour, l'approche JRC LCI n'a été que peu mise en œuvre (une dizaine de cas d'études) ; en particulier les bases de données d'ICV n'incluent pas les flux dissipatifs. Néanmoins, ces FC basés sur les prix peuvent aussi être utilisés dans le contexte de l'approche classique de prise en compte des ressources minérales en ACV ; càd que ces FC peuvent être multipliés par la masse totale de ressources extraite du sol (moins la masse sauvée du fait du recyclage), à l'échelle du système produit étudié.
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour / Pus de 2 mises à jour	Pas de mise à jour	Création récente (2020)
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	Création récente (2020)

	Impact de l'actualisation sur les résultats	Fort/Moyen/Faible	NA	Pas analysé à ce jour. Sera lié aux changements observés sur les marchés des ressources minérales.
Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	facilement	Le concept de prix des ressources minérales est probablement l'un des plus compréhensibles pour les praticiens ACV (notamment en comparaison d'autres concepts utilisés dans d'autres méthodes ; par ex. approches thermodynamiques) Le prix des matières premières est par ailleurs déjà classiquement utilisé en ACV en ce qui concerne l'allocation comme approche de résolution de la multifonctionnalité.
Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages		Les + : - méthode qui permet de quantifier la perte de valeur des ressources minérales induite par un système produit ; la "valeur" étant un concept clé à capter dans la quantification du dommage à l'Aire de Protection Ressources Naturelles, selon les travaux de l'UNEP (publication de Berger et al., 2020 ; et travaux du GLAM 3 en cours) ; - se base sur des données (de prix des métaux et des matières minérales) avec un bon niveau de qualité (complétude, précision, représentativité, avec données actualisées régulièrement) ; - nombre restreint d'hypothèses dans la méthode (en comparaison d'autres méthodes), peu de "couches de données" dont l'incertitude se superposerait ; - méthode relativement simple à comprendre pour les praticiens ACV peu familiers des enjeux associés aux ressources minérales ; - très bonne couverture des métaux et des minéraux (nombreux FC disponibles) ; - FC disponibles en format Excel à la demande, et dans le rapport publié par le JRC.	Les - : - bien que se basant sur peu d'hypothèses, l'approche repose sur une hypothèse fondamentale : le prix représenterait la valeur des ressources minérales. La méthode JRC est récente, et il y a encore peu de recul sur l'existence d'un consensus (ou non) dans la communauté ACV sur cette hypothèse. En particulier, dans un contexte où le prix des métaux est conditionné, du point de vue de la production, par des paramètres tels que la consommation d'énergie (et le coût associé), la rareté, etc., se pose la question de la représentativité de ce même prix pour ce qui est de la valeur (fonctionnelle) des ressources minérales ; - l'approche se base sur le prix des métaux raffinés pour quantifier la valeur des métaux dissipés, quand bien même certains sont dissipés en amont de leur raffinage (par exemple lors de l'extraction du minerai, lorsque les éléments métalliques sont à des teneurs bien plus faibles qu'une fois raffinés). Le prix des métaux raffinés est majorant de la valeur des métaux dissipés au global sur le cycle de vie des produits-systèmes ; - non prise en compte des générations futures dans la formation des prix - pas encore directement exploitable dans les logiciels ACV, bien que disponible en format Excel ; - approche développée pour prendre en compte la perte de valeur des ressources minérales, et ce en considérant leur dissipation à chaque étape du cycle

			de vie (des procédés unitaires) : à ce jour les bases de données ICV ne sont pas adaptées ; - peu de cas d'études à ce jour.

2.2 Ressources renouvelables

2.2.1 LC Impact

			LC impact	
	Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
Identification de la méthode	A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Géopolitique, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.?	Espèces potentiellement disparues au cours du temps (potentially disappeared fraction of species over time)	-

	Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond ?	-	Quantifier la fraction d'espèces qui potentiellement disparait au cours du temps	Facteurs de caractérisation pour 7 catégories d'impact liées à trois aires de protection (qualité des écosystèmes terrestre, d'eau douce et terrestre)
	Source la plus récente		Verones, F., Hellweg, S., Antón, A., Azevedo, L. B., Chaudhary, A., Cosme, N. M. D., Cucurachi, S., Baan, L.,Dong, Y., Fantke, P., Golsteijn, L., Hauschild, M. Z., Heijungs, R., Jolliet, O., Juraske, R., Larsen, H., Laurent, A., Mutel, C. L., Margni, M., ... Huijbregts, M. A. J. (2020). LCIMPACT : A regionalized life cycle damage assessment method . Journal of Industrial Ecology, 24(6), 1201-1219. https ://doi.org/10.1111/jiec.13018	https ://www.lc-impact.eu/index.html
	Historiques de développements		Développée au travers du projet EU-FP7-"Development and application of environmental Life Cycle Impact assessment Methods for imProved sustAinability" Characterisation of Technologies (LC-IMPACT)"	-
Caractéristiques générales	Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	Pour la qualité des écosystèmes, 3 types d'écosystèmes sont étudiés (terrestre, marin, eau douce). La méthode se concentre sur 7 catégories d'impact pour étudier les aires de protection. CFecosystem quality = VF × EF × XF × FF Facteurs de caractérisation pour la qualité des écosystèmes = facteur de vulnérabilité x facteur d'effet x facteur d'exposition x facteur de devenir	-
	Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	PDF.yr/km Fraction potentiellement disparue des espèces au fil du temps.an par km	-

	Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Long terme, 100 ans et plus	Pour cette méthode 100 ans correspond à un horizon de court terme.
	Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Endpoint, dommage en fin de chaîne de "causes à effet".	-
	"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside out	-
Complétude de l'évaluation	Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin	Autre	Fraction d'épuisement des espèces
	Dommage adressé	Nom du dommage	Autre	Qualité des écosystèmes
	Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global, continental, pays, régional, local	-
	Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global, continental, pays, régional, local	Certaines catégories d'impact couvrent des impacts globaux (e.g. changement climatique) et d'autres catégories d'impact décrivent des impacts qui sont limités à l'échelle régionale ou locale et qui varient donc largement en fonction du lieu de l'intervention (émission/extraction) et de l'impact régional associé.

	Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Global, continental, national, local	Les FC régionalisées ont été rapportées pour quatre niveaux spatiaux différents : le niveau spatial " natif " original (Mutel et al,2018), tel que déterminé par le développeur de la méthode, ainsi que des moyennes par pays, des moyennes continentales et une moyenne mondiale (cette dernière pour une application lorsque le lieu d'émission/d'extraction des ressources est inconnu), afin de faciliter la concordance avec les données standard de l'ICV et l'application pratique. Le end-point de LC-IMPACT vise à quantifier de manière cohérente la PDF globale, c'est-à-dire l'extinction irréversible d'espèces au niveau mondial. Il est important d'avoir une compréhension cohérente de la part d'espèces éteintes au niveau mondial, en raison de la variation de l'irréversibilité et de l'ampleur de l'impact. Si une espèce est éteinte dans une certaine région, elle ne l'est pas automatiquement au niveau mondial. En outre, la perte d'espèces au niveau mondial est irréversible, tandis que la perte régionale ne l'est pas.
	Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales ?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Difficilement faisable	La plupart des outils logiciels d'ACV et des bases de données d'inventaire du cycle de vie actuellement utilisés ne traitent pas bien les données spatialement différenciées et les bases de données d'inventaire du cycle de vie ne traitent pas bien les données différenciées dans l'espace (généralement limitées aux échelles nationales).
Peer review, sources des données	Peer review	oui / partiellement / non	Oui	-
	Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	Non	-

	Sources des données		Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Données spatiales : IUCN Eutrophisation des eaux douces : 2000 Scherer et al. (2015) Acidification terrestre : CIESIN (2005) Stress hydrique : WATCH (2011), Pfister et al. (2011), UN (2011) Stress des terres : Olson et al.(2001) Émissions de particules : Lamarque et al. (2010) Formation photochimique d'ozone : Lamarque et al. (2010)	-
Applicabilité de l'approche	Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	-	Analyse pour les ressources renouvelables
		La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	-	Analyse pour les ressources renouvelables
	Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	Les facteurs de caractérisation sont disponibles aujourd'hui et facilement téléchargeables.	https ://zenodo.org/record/4276133
		Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	Difficile et uniquement par pays (pas par région ou au niveau local)	Il existe des problèmes de nomenclature.

		Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : **Simapro, GABI or Simapro and GABI**	LCA software Brightway 2	Il tient compte des facteurs de caractérisation différenciés spatialement.
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	-	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	-	-
	Flux élémentaires couverts (à l'échelle des minéraux)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	-	-
		Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	-	-
	Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	Partiellement et uniquement au niveau pays	-
Mises à jour	Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	2 mises à jour	Mise à jour impactant la toxicité La dernière mise à jour date du 18 août 2021.
	Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	2 mises à jour	Mise à jour impactant la toxicité
	Impact de l'actualisation sur les résultats		Fort/Moyen/Faible	Non-évalué	-

Compréhensibilité et communicabilité	Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts	Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	Partiellement	L'unité de temps ne signifie pas que l'espèce est perdue pendant une certaine période de temps. Nous devons simplement la comprendre comme un indicateur, où nous mesurons les risques d'extinction au niveau mondial et où nous donnons plus de poids aux interventions à long terme par rapport aux interventions à court terme. Les impacts sur les écosystèmes font référence à la fraction d'espèces qui s'est engagée à s'éteindre au niveau mondial. Par exemple, un PDF de 0,01 signifie que 1 % de la population mondiale d'espèces est vouée à disparaître si la pression persiste. Comme il y a généralement un temps de latence entre la pression et l'effet, la durée de la pression a une influence sur le fait que l'effet de la pression se produise ou non. Les scores d'impact doivent être interprétés comme une augmentation du risque d'extinction globale sur une certaine période d'exposition et non comme une perte instantanée d'espèces globales instantanée d'espèces au niveau mondial.
Commentaires complémentaires	Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages		Les + : - possibilité de régionalisation La force de cette méthode est la possibilité de régionalisation mais l'applicabilité est très limitée ; - les facteurs de caractérisation sont disponibles aujourd'hui et facilement téléchargeables.	Les - : - applicabilité de la régionalisation très limitée étant donné que cette méthode est uniquement applicable avec le logiciel LCA software Brightway 2 ; - la plupart des outils logiciels d'ACV et des bases de données d'inventaire du cycle de vie actuellement utilisés ne traitent pas bien les données spatialement différenciées et les bases de données d'inventaire du cycle de vie ne traitent pas bien les données différenciées dans l'espace ; - la méthode couvre uniquement la fraction d'espèces qui potentiellement disparait au cours du temps et pas les services écosystémiques liées aux ressources renouvelables.

2.2.2 Impact World+

		Impact World +	
Critères	**Question**	**Evaluation qualitative/quantitative**	**Commentaires**
A quel(s) aspect(s) de l'évaluation des ressources la méthode répond	Géopolitique, Valeur intrinsèque, Dissipation (continu et pas on/off), Substituabilité, etc.?	Biodiversité et services écosystémiques (résistance à l'érosion, recharge en eau douce, filtration mécanique et production biotique)	-
Usage approprié : à quelle question est-ce que cette méthode répond?	-	Elle permet de quantifier les impacts sur la biodiversité et les services écosystémiques.	-
Source la plus récente		Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A., Bourgault, G., De Bruille, V., ... Jolliet, O. (2019). IMPACT World+ : a globally regionalized life cycle impact assessment method. The International Journal of Life Cycle Assessment.https ://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0	
Historiques de développements		Mise à jour de trois méthodes précédentes : IMPACT 2002+, LUCAS, EDIP	-
Concept de base et description du chemin d'impact	Décrire le chemin d'impact de la méthode/du modèle, et les impacts qu'elle vise à évaluer	La méthode s'appuie sur un modèle mi-chemin/dommage, elle donne 4 points de vue cohérents et complémentaires pour évaluer le cycle de vie des impacts : - Indicateurs à mi-chemin - Indicateurs de dommage - Dommages sur les aires de protection (santé humaine, qualité des écosystèmes et les ressources et services écosystémiques). - Dommages sur les aires de préoccupation (eau et carbone)	-

Unité	Unité des FC, et de l'impact ainsi calculé	Pour la biodiversité affectant la qualité des écosystèmes, les impacts sont exprimés en PDF en m²*an. Pour les services écosystémiques, les 3 endpoints suivants sont impactés : - DALY[7] - PDF[8] en m²*an. - $	
Cadre temporel	Cadre temporel de l'évaluation : court-terme (<10 ans), moyen-terme (10-100 ans), ou long-terme (> 100 ans).	Court, moyen et long terme.	Moins de 100 ans et plus de 100 ans
Impact à mi-chemin et/ou dommage	Mi-chemin, mi-chemin et dommage, dommage	Mi-chemin et/ou dommage.	-
"Inside-out" ou "outside-in"	La méthode mesure en premier lieu les impacts du système-produit (inside-out), ou les impacts sur le système-produit (outside-in)	Inside-out	-
Mi-chemin adressé	Nom de l'impact à mi-chemin : **depletion, ore grade decrease, surplus ore, other)**	Autre	Transformation des sols, biodiversité et occupation des sols, biodiversité.
Dommage adressé	Nom du dommage (e.g. **surplus energy, (surplus) cost, exergy, other**)	Autre	Santé humaine, qualité des écosystèmes et services écosystémiques.
Cadre géographique du modèle de caractérisation	Global, continent, pays, autres	Global, continental, pays, local	-
Couverture géographique des données utilisées dans le modèle	Global, continent, pays, autres	Global, continental, pays, local	-

[7] Espérance de vie corrigée de l'incapacité (Disability-adjusted life year).

[8] Espèces potentiellement disparues au cours du temps (potentially disappeared fraction of species over time).

Résolution spatiale des FC (possibilité "conceptuelle" de faire des évaluations régionales?)	Décrire le niveau de résolution spatiale? (générique, global, continental, national, régional, local, autres)	Global, continental, pays, local	-
Niveau de complexité de mise en œuvre de la régionalisation dans les logiciels et bases de données (possibilité "pratique" de faire des évaluations régionales?)	Facilement faisable/difficilement faisable/impossible	Difficilement faisable	La plupart des outils logiciels d'ACV et des bases de données d'inventaire du cycle de vie actuellement utilisés ne traitent pas bien les données spatialement différenciées et les bases de données d'inventaire du cycle de vie ne traitent pas bien les données différenciées dans l'espace (généralement limitées aux échelles nationales).
Peer review	oui / partiellement / non	Oui	-
Recommandations	Réglementations ou normes mentionnant la méthode, en application ou en préparation	Non	-
Sources des données	Décrire les données sources utilisées pour les composants du modèle	Pour l'utilisation des terres : - Chaudhary A, Verones F, de Baan L, Hellweg S (2015) Quantifying Land Use Impacts on Biodiversity : Combining Species-Area Models and Vulnerability Indicators Environ Sci Technol 49 :9987-9995 doi :10.1021/acs.est.5b02507 - Curran M et al. (2010) Toward meaningful end points of biodiversity in life cycle assessment Environ Sci Technol 45 :70-79 - de Baan L, Alkemade R, Koellner T (2013) Land use impacts on biodiversity in LCA : a global approach Int J Life Cycle Assess 18 :1216-1230 doi :10.1007/s11367-012-0412-0 - Koellner T et al. (2012) UNEP-SETAC Guideline on Global Land Use Impact Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services in LCA Int J Life Cycle Assess	Détails pour l'ensemble des données sources : https ://www.impactworldplus.org/en/publications.php

Applicabilité théoriques aux éléments chimiques et aux minéraux	La méthode est applicables à tous les éléments chimiques (Cu, terres rares, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	-	Pas pertinent ici
	La méthode est applicables à tous les minéraux (sables, argiles, minéraux, etc.)	Application possible : oui/non/partiellement	-	Pas pertinent ici
Disponibilité et mise en œuvre possible des facteurs de caractérisation	Disponibilité	Les facteurs de caractérisation/la méthode est/sera disponible et utilisable : aujourd'hui, à court terme (2-3 ans), à moyen terme (4-5 ans), à long terme (au-delà de 5 ans)	Disponible aujourd'hui	-
	Mise en œuvre	Les FC peuvent être utilisés par des praticiens ACV via des logiciels ACV : facilement/ partiellement/ difficilement	Partiellement et uniquement par pays (pas par région ou au niveau local)	Il existe des problèmes de nomenclature.
	Logiciels spécifiques	La méthode est actuellement applicable avec : **Simapro, GABI or Simapro and GABI**	Simapro, brightway2	-
		La méthode est actuellement applicable avec : **Simapro, GABI or Simapro and GABI**	Simapro, brightway2	-
Flux élémentaires couverts (à l'échelle des éléments chimiques)	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	-	-
	Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. Terres Rares)	-	-
Flux élémentaires couverts (à	En nombre	Donner le nombre de flux élémentaires couverts	-	-

l'échelle des minéraux)	Flux manquants	Lister les flux élémentaires pertinents non couverts (par ex. granulats)	-	-
Disponibilité des données d'inventaire du cycle de vie		Données d'ICV nécessaires aux calculs : disponibles, à un niveau de qualité suffisant pour l'application des FC (oui/partiellement/non)	Partiellement et uniquement au niveau pays	-
Fréquence d'actualisation de la méthode (càd avec approche de calcul des FC différente)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
Fréquence d'actualisation des FC (valeurs)		Pas de mise à jour depuis la création / Une mise à jour / 2 mises à jour	Pas de mise à jour	-
Impact de l'actualisation sur les résultats		Fort/Moyen/Faible	-	-
Les indicateurs sont facilement communicables et compréhensibles pour des non-experts		Les parties prenantes et utilisateurs comprennent l'indicateur (facilement/partiellement/avec difficulté)	Avec difficultés	La méthode ne propose une méthode recommandée pour la pondération des dommages (DALY, PDF en m^2*an et $). Néanmoins, il existe des méthodes compatibles avec Impact World +. La possibilité d'exprimer les impacts d'un LCIA de 4 manières (à mi-chemin, dommages, dommages sur les aires de protection, dommages sur les aires de préoccupation) apporte de la complexité pour la communication à des non-experts.

Commentaires complémentaires : limites (dont robustesse de l'approche : manques, incertitudes, représentativité des données utilisées, etc.) et avantages	Les + : - l'analyse de la biodiversité et des services écosystémiques est possible avec Simapro ; - 21 impacts à mi-chemin ont été intégrés dans la méthode LCIA ; - prise en compte de services écosystémiques en plus de la fraction d'espèces qui potentiellement disparait au cours du temps (LC Impact).	Les - : - l'interprétation des résultats est compliquée par le fait qu'une méthode de pondération des résultats n'est pas proposée ; - les dommages finaux sont exprimés dans des unités différentes : Espèces potentiellement disparues au cours du temps et valeurs monétaires pour les services écosystémiques ; - 23 autres impacts à mi-chemin sont encore considérés comme immatures et doivent uniquement être utilisés pour des analyses de sensibilité.

2.3 Cas d'application

Application des méthodes d'évaluation de l'épuisement des ressources non-renouvelables.

2.3.1 Objectifs

Dans cette partie, les résultats que fournissent la plupart des méthodes évaluation de l'impact sur les ressources sont étudiés pour 6 cas d'application. Cela permet de :

- Visualiser les ressources les plus contributrices pour chaque méthode.
- Comparer les impacts de 3 couples d'inventaires avec les différentes méthodes.
- Identifier les difficultés de mise en œuvre des méthodes dans le cadre d'une démarche ACV à l'aide d'un logiciel d'ACV.
- Confirmer ou non que la construction des inventaires telle qu'utilisée actuellement dans les bases des données est bien adaptée aux différentes méthodes.

2.3.2 Méthodologie

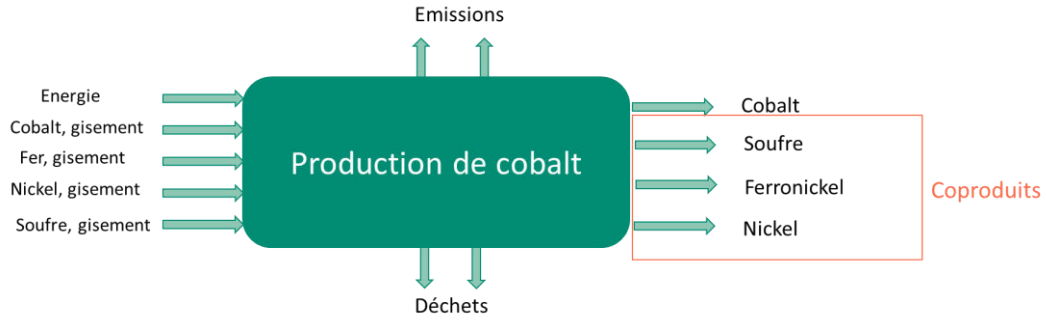
2.3.2.1 CAS ETUDIES

Les cas considérés sont les suivants, avec des données d'inventaire issues de la base Ecoinvent v3.7.1

- Production de deux types de batteries
  - NiMH battery (GLO) [battery production, NiMH, rechargeable, prismatic – GLO]
  - Li-ion battery (GLO) [battery production, Li-ion, rechargeable, prismatic – GLO]
- Deux mix électriques
  - Electricity, medium voltage (FR) [market for electricity, medium voltage – FR]
  - Electricity, medium voltage (EU) [market group for electricity, medium voltage – RER]
- Production de deux circuits imprimés
  - Circuit board (w/o Pb) [printed wiring board production, through-hole mounted, unspecified, Pb free – GLO]
  - Circuit board (w Pb) [printed wiring board production, through-hole mounted, unspecified, Pb containing – GLO]

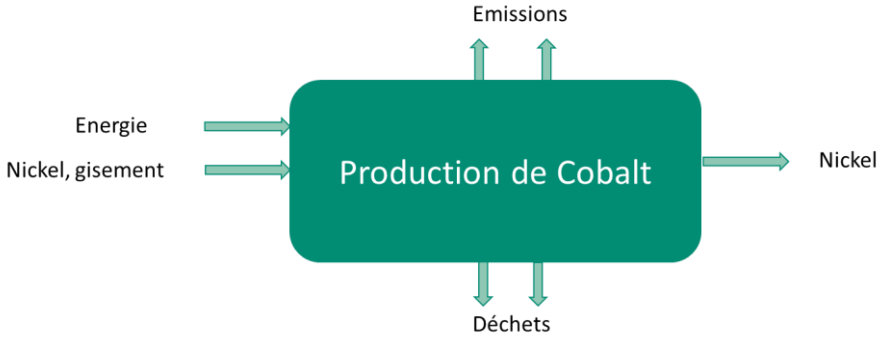
Point d'attention sur la méthode de construction des inventaires avec Ecoinvent v3 :

L'exploitation minière vise à extraire des minerais qui contiennent souvent plusieurs minéraux et métaux. Pour de nombreux inventaires de cycle de vie d'extraction et de transformation des minerais, il y aura donc des co-produits. Par exemple dans le cas de l'activité de production de cobalt dans la base de données Ecoinvent (cobalt production, GLO, Ecoinvent v3.7.1), différentes ressources sont des co-produits de l'extraction comme le soufre, le ferronickel, le nickel, etc (cf. schéma ci-dessous).

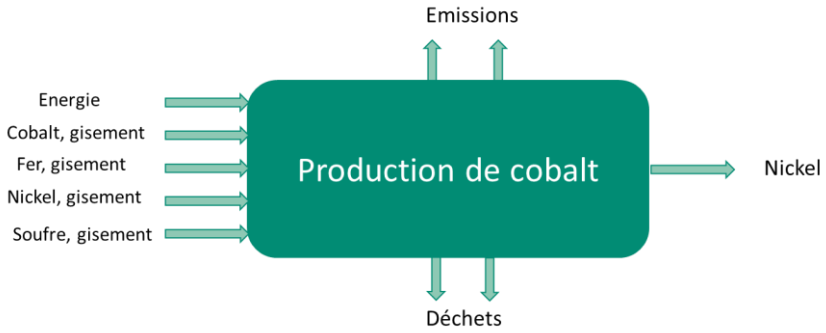


Remarque : ce schéma est simplifié, les entrants et sortants sont plus nombreux (annexe 1).

Afin de distinguer l'inventaire de cycle de vie de chacun des co-produits sortant de l'activité de production de cobalt, la hiérarchie des règles d'allocations des ISO 14040-44 devrait être respectée.
- Les ressources entrantes dans le système peuvent être aisément attribuées à chacun des co-produits sortant (le nickel présent dans la roche peut être attribué au co-produit nickel). L'allocation peut donc être évitée.
- Les consommations énergétiques, les émissions et les déchets ne pouvant pas être distingués selon le co-produit, une allocation (massique, économique ou autre) doit être appliquée :



Or, Ecoinvent applique les allocations de manière indistincte à l'ensemble de l'activité de production de cobalt (ressources entrantes, énergies, émissions, déchets). Ainsi, l'inventaire de production de nickel issu de l'activité de production de cobalt contient des ressources qui ne retrouvent ni dans le nickel produit ni dans les déchets générés par l'activité :



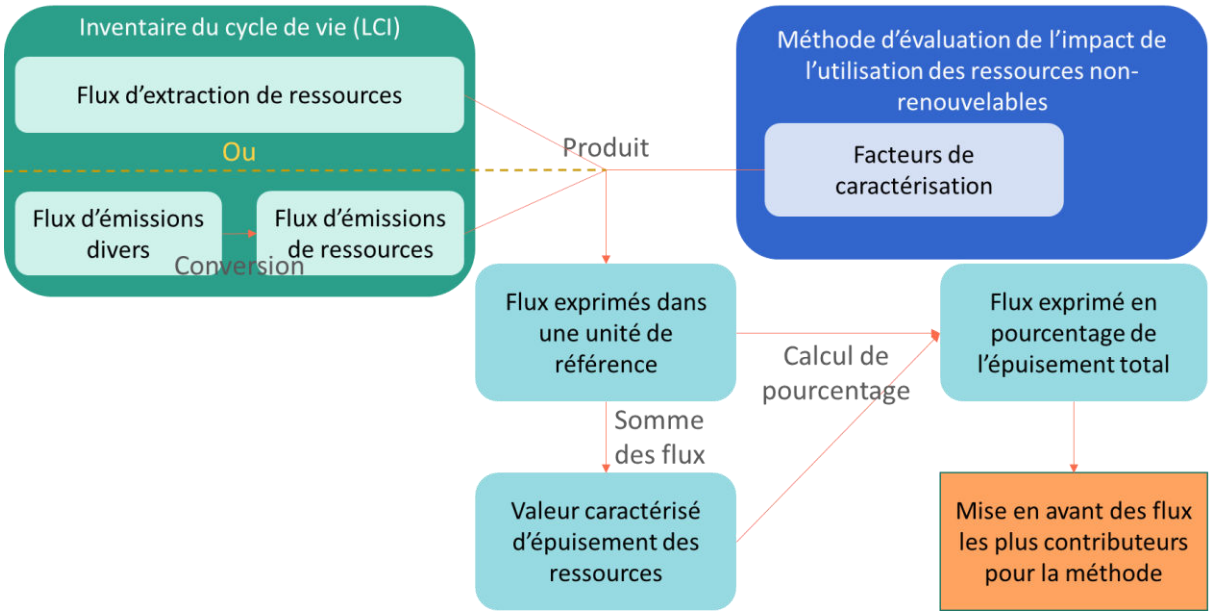
Ainsi, les résultats décrits dans la suite de ce chapitre présentent des limites puisque les ressources consommées dans les différents inventaires étudiés (batteries, cartes électroniques et mix électriques) ne sont pas totalement corrélées aux consommations réelles du fait du système d'allocation appliqué dans la base de données Ecoinvent v3.

2.3.2.2 ETAPES DE MISE EN ŒUVRE

Pour pouvoir être implémentées dans un logiciel ACV, les différentes méthodes d'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources non-renouvelables doivent proposer des listes de facteurs de caractérisation. Ces facteurs de caractérisation (FC) sont à multiplier à différents flux élémentaires des inventaires ceci afin de ramener ces flux dans une unité commune. Dans le cas de la consommation de ressources, cette unité commune peut être une unité monétaire ou de masse d'un élément chimique de référence par exemple.

Ainsi chaque facteur de caractérisation est associé à un ou plusieurs flux élémentaires des inventaires. Il s'agit donc de récupérer les inventaires à étudier et à multiplier les flux concernés par les FC qui sont fournis par chacune des méthodes.
Dans certaines méthodes, les flux élémentaires concernés sont des flux de ressources non-renouvelables extraites de l'environnement principalement des minéraux ou des éléments chimiques.
Dans d'autres méthodes, ces flux sont des flux d'émissions de substances dans l'environnement, ces flux de substances sont alors convertis de manière à retrouver les éléments chimiques du tableau périodique associés.

Ces diverses étapes de calculs (cf. schéma ci-dessous) peuvent être réalisés manuellement ou bien directement implémentées dans des logiciels grâce à des fichiers dédiés.



Une fois ces calculs faits pour chacune des méthodes, il est possible de comparer les résultats (exprimés en pourcentage de la valeur de consommation totale) pour observer les ressources mises en avant par les différentes méthodes et leurs potentielles limites.

2.3.2.3 METHODES CONSIDEREES

Chaque méthode fournit des résultats pour un certain nombre d'éléments chimiques, minéraux, et ressources fossiles, ce nombre varie en fonction de la méthode. Les choix suivants ont donc été faits :

- L'application des méthodes ne concerne pas les ressources fossiles, seulement les ressources minérales et métalliques. Ceci malgré le fait qu'un certain nombre de méthodes proposent aussi une approche sur les ressources fossiles.
- Dans une première partie, pour toutes les méthodes, seuls les FC liés à des éléments chimiques du tableau périodique ont été considérés. Ceci permet de simplifier la comparaison entre les méthodes et de comparer les résultats sur des éléments communs. La liste de tous les éléments chimiques du tableau périodique considérés par chaque méthode est disponible dans l'annexe 2.
- Dans une seconde partie les impacts des méthodes Future Welfare Loss et JRC price-based ont étés recalculés en prenant en compte les éléments chimiques ainsi que les différents minéraux et agrégats pour lesquels des FC sont disponibles. Ceci afin de calculer l'impact total de chacune de ces méthodes avec ces FC supplémentaires et de voir si certaines de ces ressources sont mis en avant par ces méthodes avec les cas d'études considérés. La liste de ces minéraux et agrégats considérés par chacune de ces 2 méthodes est disponible dans l'annexe 3.
- Certaines méthodes présentent des FC spécifiques pour 16 éléments dits « terres rares » tandis que d'autres (ESSENZ, GeoPolRisk et JRC Price based) présentent un seul FC associé au groupe d'éléments, sans spécification pour chaque élément. Pour la méthode JRC price-based mise en œuvre, afin de pouvoir utiliser ce FC en étant cohérent avec les autres méthodes, le choix a été fait de l'utiliser comme FC « générique » pour les 16 terres rares.

Parmi les 9 méthodes présentées, les méthodes ESSENZ et GeoPolRisk n'ont pas été mise en œuvre. Les méthodes EDP et ARP ont été seulement mises en œuvre dans une approche combinant les deux (Owsianiak et a ; 2021) présentée dans le tableau de la partie 2.

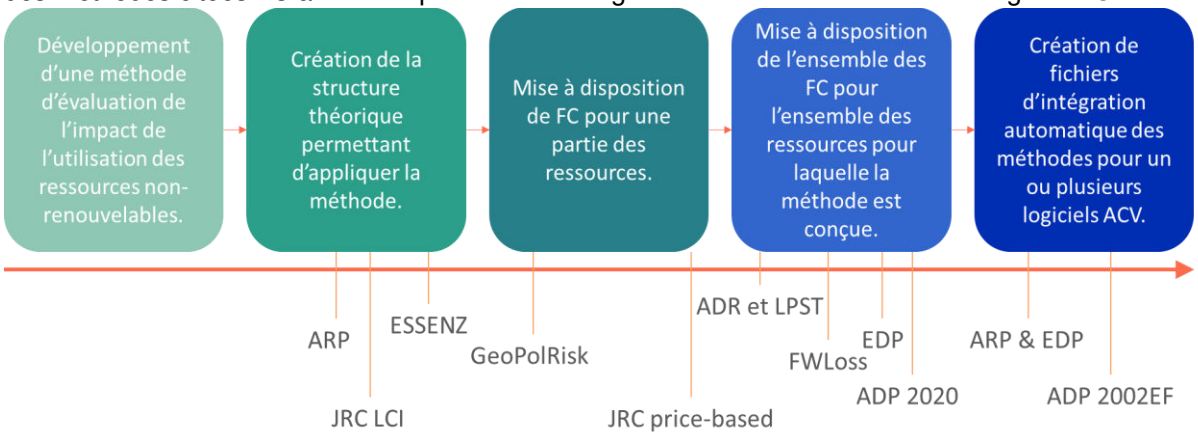
Le tableau suivant liste les points importants pour la mise en œuvre de chacune des méthodes.

Nom de la méthode	Abiotic Depletion Potential (ADP) Ultimate Reserve	Environmental Dissipation Potential (EDP)	Abiotic Resource Project (ARP)	ADR (Average Dissipation Rate) et LPST (Lost Potential Service Time)	Future Welfare Loss	GeoPolRisk	ESSENZ	JRC LCI approach	JRC price-based characterization approach
Abréviation	ADP_EF et ADP_2020	EDP	ARP	ADR, LPST	FWLoss	GPRisk_EU_2016	/	JRC_LCI	JRCprice_Cu_50
Angle d'approche	Déplétion de ressources minérales	Perte d'accessibilité / dissipation des ressources minérales	Perte d'accessibilité / dissipation des ressources minérales	Perte d'accessibilité / dissipation des ressources minérales	Externalités économiques de l'utilisation des ressources minérales	Problèmes d'accessibilité liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques	Problèmes d'accessibilité liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques	Perte d'accessibilité / dissipation des ressources minérales	Externalités économiques de l'utilisation des ressources minérales
Versions / dates	1995, 2002 (version utilisée par le JRC pour la méthode PEF), 2020	2020	2021	2021, 2022	2019	2016, 2017, 2018, 2021, 2022	2016, 2019, 2021	2020	2020
Version utilisée	Méthode PEF et 2020	/	2021	2022	2019	2022	/	2020	2020
Flux élémentaires ciblés	Ressources extraites	Emissions	Emissions	Ressources extraites	Ressources extraites	Ressources extraites	Ressources extraites	Ressources dissipées	Emissions mais applicable aux ressources extraites
Etape d'application de la méthode	Flux de l'inventaire	Flux de l'inventaire	Construction de l'inventaire	Flux de l'inventaire	Flux de l'inventaire	Flux de l'inventaire	Construction de l'inventaire et flux de l'inventaire	Construction de l'inventaire	Flux de l'inventaire
Horizon temporel	Long terme	Long terme	Long terme	ADR : court terme ; LPST, 3 possibilités : 25, 100 ou 500 ans	Plutôt Long terme mais analyses de sensibilité possibles sur Court terme	Court terme (<10 ans) , les FC se calculent chaque année	Court terme (<10 ans)	Moyen terme (25 ans)	5 possibilités 10, 15, 20, 30 ou 50 ans
Horizons temporels utilisés	Long terme	Long terme	Long terme	ADR et en analyse de sensibilité, LPST 25 ans	Long terme	Court terme	Court terme	25 ans	50 ans et en analyse de sensibilité, 20 ans
Unité des impacts	kg Sb-eq	kg Cu-eq	/	kg Fe-eq	€	$	Multiples (11 catégories d'impacts)	/	kg Cu.€eq, kg Au.€eq ou kg Sb.€eq

Nombre de ressources considérées	48 éléments chimiques dans la méthode PEF 76 éléments chimiques dans la version 2020	76 éléments chimiques	65 éléments chimiques	61 éléments chimiques	88 (21 minéraux et 67 éléments chimiques) plus des ressources fossiles	45 (4 minéraux, 25 éléments chimiques et une valeur générique pour les 16 terres rares) plus des ressources fossiles	30 (4 éléments chimiques et des valeurs génériques pour les 16 terres rares)	/	93 (29 minéraux, 48 éléments chimiques et une valeur générique pour les 16 terres rares)
FC publiés	76 dans la version 2020	Répartition des ressources dans x sous compartiments d'émissions soit pour plus de 900 flux	Liste de FC à appliquer à plus de 900 flux (sur 76 éléments chimiques) en couplant avec EDP	18 pour la méthode ADR et pour les trois horizons temporels de la méthode LPST	90	Aucun	/	/	45 (pour 45 éléments chimiques) sur 50 ans avec l'antimoine comme substance de référence
Mode d'obtention des FC	Méthode PEF : intégrée dans les logiciels Version 2020 : annexes de la publication (tableur)	Annexes de la publication (tableur)	Annexes de la publication (fichier CSV à intégrer dans SimaPro ou GABI)	Les 61 FC pour les deux méthodes et les 3 horizons temporels, en cours de publication ont été transmis par les auteurs (tableur).	Disponible en interne	Des discussions ont été entamées auprès des auteurs pour obtenir les FC en cours de calcul. Ces derniers étant en cours de finalisation, l'obtention de FC satisfaisants ne correspondait pas avec le planning de l'étude.	/	/ *Méthode appliquée par le BRGM*	Les 78 FC pour chaque substance de référence et chaque horizon temporel créés ont été transmis par les auteurs (tableur).
FC utilisés	Les 48 de la méthode PEF Les 76 de la version 2020	/	L'intégralité des FC disponibles dans le fichier CSV (pour 76 éléments chimiques)	61 FC pour l'ensemble des éléments	Les 65 FC applicables aux éléments chimiques Puis ces 65 FC ainsi que les 21 FC pour minéraux	Aucun	/	/	Les 49 FC applicables aux éléments chimiques (dont FC terres rares) Puis ces 49 FC ainsi que 24 FC pour minéraux

Facilité d'intégration dans les logiciels ACV (Type de fichiers disponibles ou nombre de flux restreint permettant une intégration manuelle rapide)	**Facile** pour les FC diffusés dans le cadre de la méthode PEF (archive ILCD). Pour les FC plus récents : fichier à créer. FC directement applicables aux flux d'extractions des éléments chimiques.	**Difficile** : Pas de fichier directement intégrable dans les logiciels ACV. FC à appliquer à de nombreux flux d'émissions.	**Non applicable** : Des modifications à faire sur l'inventaire. Couplé à EDP, **facile :** un fichier directement intégrable disponible.	Fichier à créer. FC directement applicables aux flux d'extractions des éléments chimiques.	Fichier à créer. FC directement applicables aux flux d'extractions des éléments chimiques.	**Plutôt difficile** : Fichier à créer pour chaque année et chaque géographie considérée. FC directement applicables aux flux d'extractions des éléments chimiques	**Non applicable :** Des modifications à faire sur l'inventaire 11 catégories d'impacts à considérer.	**Non applicable** : Des modifications à faire sur l'inventaire	Fichier à créer. FC directement applicables aux flux d'extractions des éléments chimiques.
Mise en application	Oui	Non	Oui couplée avec EDP	Oui	Oui	Non	Non	Oui, à part pour un autre cas d'étude	Oui
Analyses de sensibilité	Non	/	Non	Oui	Non	Oui	/	Non	Oui

Afin de compléter ce tableau, voici ci-dessous un schéma récapitulatif du positionnement de chaque des méthodes citées vis-à-vis d'un processus d'intégration d'une méthode dans un logiciel ACV.



La création d'un fichier d'intégration correspond ici à la création d'une archive ILCD, d'un fichier CSV pour SimaPro ou GaBi, d'un fichier JSON pour OpenLCA, etc. Ce type de fichier permet à l'utilisateur ou au développeur d'un logiciel ACV d'y intégrer automatiquement la méthode.

2.3.3 Résultats et comparaison

2.3.3.1 RESULTATS

Attention, dans les graphes suivants, les résultats issus de la méthode ARP couplée à EDP sont calculés à partir de flux d'émissions contrairement aux autres méthodes où les flux élémentaires utilisés pour le calcul des impacts sont des flux de matières extraites.

- Batteries rechargeables

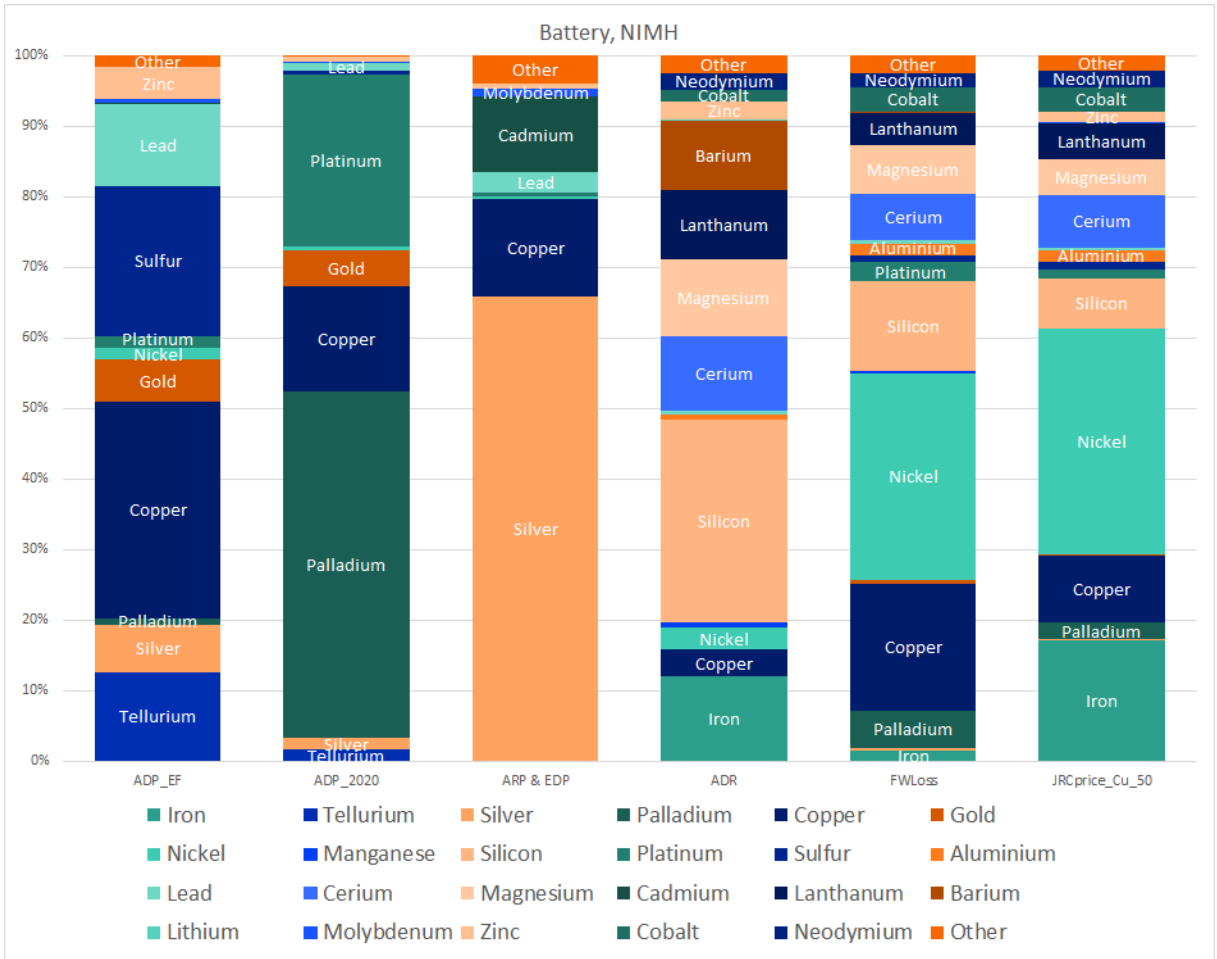


Figure 1 : Flux les plus contributeurs pour chacune des méthodes pour la batterie NIMH

Pour la production de batterie NIMH les éléments mis à avant par les méthodes sont :

- Pour la version ADP recommandée dans le cadre du PEF : le cuivre (31%), le souffre (21%), le tellure (13%) et le plomb (12%).
- Pour la version ADP 2020 : le palladium (49%), le platine (24%) et le cuivre (15%). Ainsi les nouveaux FC de la méthode ADP font grandement ressortir le palladium et le platine qui n'apparaissait pas ou peu avec les FC de 2002. En effet les FC de ces deux éléments ont été augmentés d'un facteur d'un ordre de grandeur de 1000 environ.
- Pour ARP couplée à EDP : l'argent (66%), le cuivre (14%) et le cadmium (11%). A l'exception du cuivre, ces ressources émises dans l'environnement se retrouvent peu dans les résultats des autres méthodes qui se basent sur les flux d'extraction.
- Pour ADR : le silicium (29%) ainsi qu'un un certain nombre d'éléments avec des valeurs d'impacts similaires : le fer (12%), le magnésium (11%), le cérium (11%), le lanthane (10%) et le barium (10%).
- Pour Future Welfare Loss, : le nickel (29%), le cuivre (18%) et le silicium (13%).
- Pour JRC price-based : le nickel (32%) et le fer (17%). De plus, une cohérence avec la méthode Future Welfare Loss aussi fondée sur une approche économique est visible : les éléments qui ressortent ainsi que leurs répartitions sont similaires avec comme exception notable le fer.

- Le cuivre est un élément qui revient dans la plupart des méthodes.
- Les deux versions de la méthode ADP et la méthode ARP & EDP ne mettent pas en avant les mêmes éléments que les autres méthodes. En effet, pour ces dernières, certains éléments sont en communs (nickel, silicium, cérium, magnésium, etc.)
- Le fer, élément le plus important en masse (51%) des flux d'éléments extraits n'est pas mis en avant par les méthodes ADP, Future Welfare loss et ARP couplée à EDP.

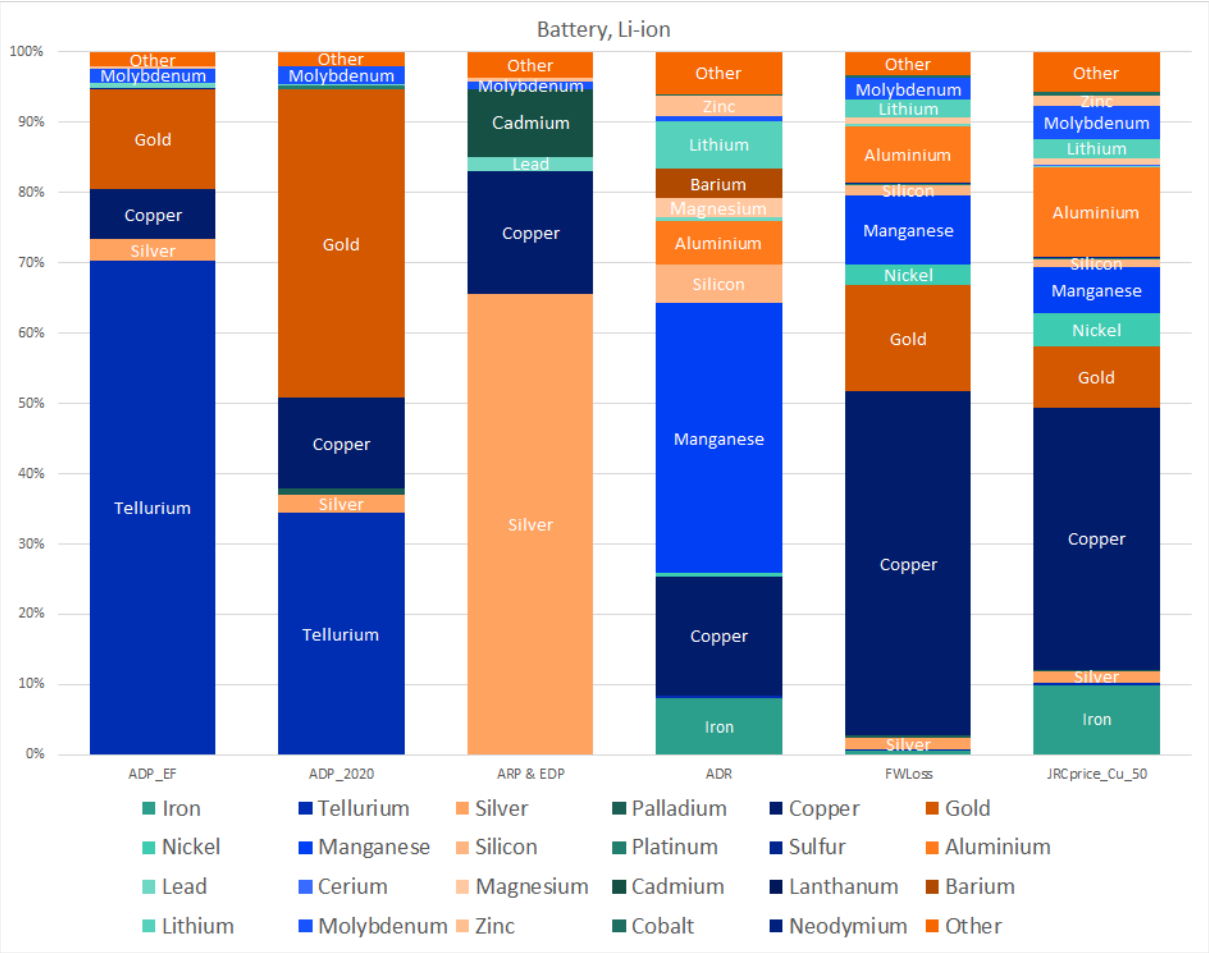


Figure 2 : Flux les plus contributeurs pour chacune des méthodes pour la batterie Li-ion

Pour la production de batterie Li-ion les éléments mis à avant par les méthodes sont :

- Pour la version ADP recommandée dans le cadre du PEF : le tellure (70%) et l'or (14%).
- Pour la version ADP 2020 : l'or (44%), le tellure (34%) et le cuivre (13%). La nouvelle version des FC diminue donc la part du tellure et augmente celle du cuivre et de l'or.
- Pour ARP couplée à EDP : l'argent (66%), le cuivre (17%) et le cadmium (10%).
- Pour ADR : le manganèse (38%) et le cuivre (17%).
- Pour Future Welfare Loss, : le cuivre (49%), l'or (15%) et le manganèse (10%).
- Pour JRC price-based : le cuivre (37%) l'aluminium (13%) et le fer (10%). La cohérence avec la méthode Future Welfare Loss apparait encore avec toujours comme différence principale, la présence du fer.

- Des éléments comme le cuivre ou l'or ressortent dans la plupart des méthodes
- Le tellure est mis en avant par la méthode ADP seulement malgré un FC associé pour toutes les méthodes à l'exception de GeoPolRisk.
- Le fer, élément le plus important en masse (33%) des flux d'éléments extraits n'est pas mis en avant par les méthodes ADP, Future Welfare loss et ARP couplée à EDP.

- Les contributions des éléments aux impacts différent grandement entre la batterie Li-ion et la batterie NIMH.
- Ceci a l'exception de la méthode ADP couplée à ARP pour laquelle les mêmes éléments sont mis à avant avec des répartitions similaires.

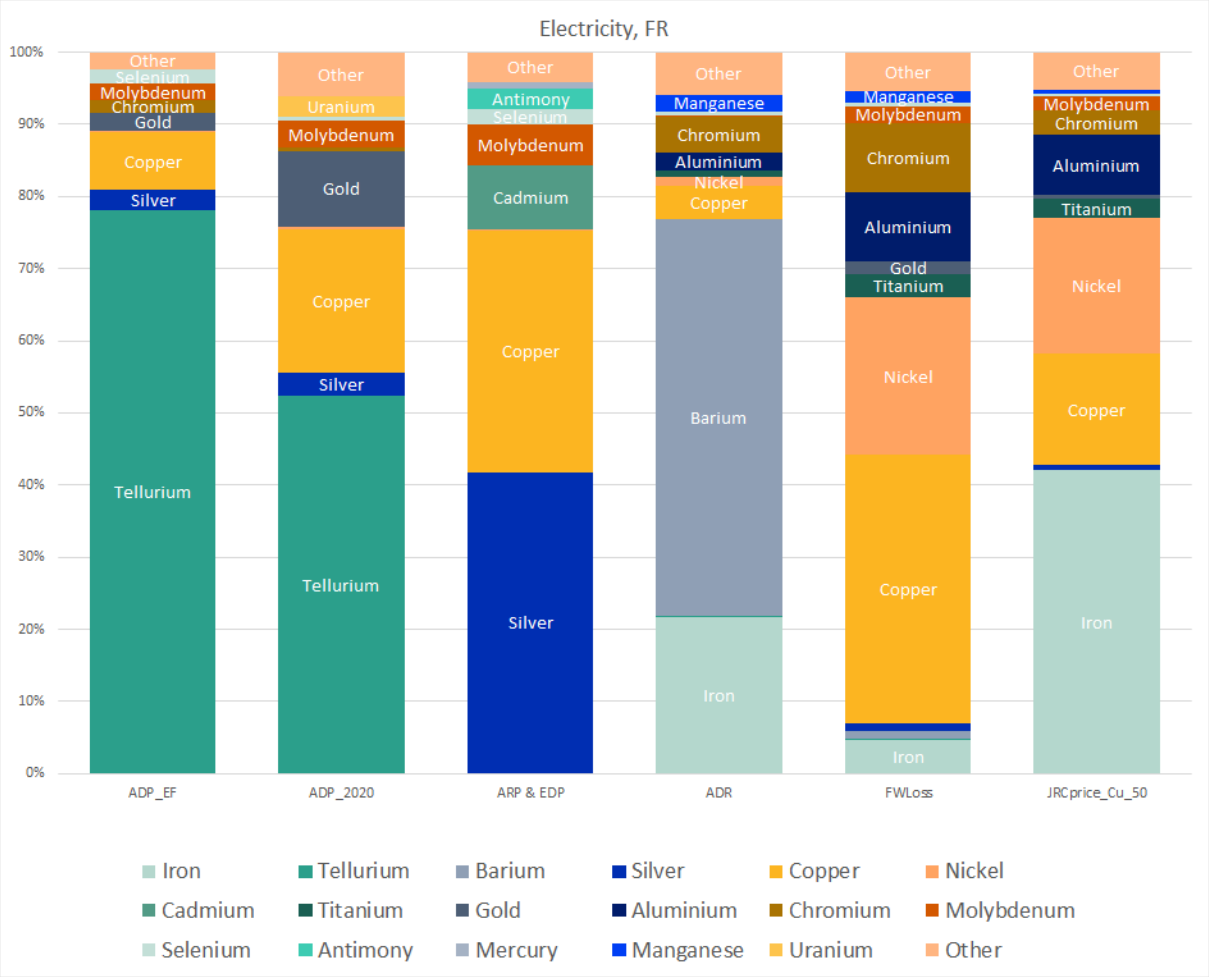
Table 1 : Valeurs d'impact pour chacune des méthodes pour les deux batteries étudiées

	ADP EF (kg Sb eq)	ADP 2020 (kg Sb eq)	ARP & EDP (kg Fe eq)	ADR (kg Fe eq)	FWLoss (€)	JRCprice_50 (kg Cu.€eq)

NIMH battery	1.64E-03	5.21E-02	1.47E-01	3.33E+01	1.76E+01	3.87E+00
Li-ion battery	3.33E-03	2.85E-02	2.22E-01	3.46E+00	3.06E+00	4.62E-01
NIMH/LI-ion (%)	49%	183%	66%	961%	576%	836%

- Pour la plupart des méthodes à l'exception de ADP 2002 et de ARP couplée à EDP, la production d'une batterie NIMH d'un kg présente des valeurs d'impacts plus élevées que la production d'une batterie de Li-ion d'un kg. La singularité des méthodes ADP recommandée dans le cadre du PEF et ARP couplée à EDP à ce sujet est à noter.
- Les différences d'impacts entre les deux inventaires sont très selon les méthodes.

- Electricité



<u>Figure 3</u> : Flux les plus contributeurs pour chacune des méthodes pour l'électricité française

Pour la production d'électricité française les éléments mis à avant par les méthodes sont :

- Pour la version d'ADP recommandée dans le cadre du PEF : le tellure (78%).
- Pour la version ADP 2020 : le tellure (52%), le cuivre (20%) et l'or (11%). La nouvelle version des FC diminue donc la part du tellure et augmente celle du cuivre et de l'or.
- Pour ARP couplée à EDP : l'argent (42%), le cuivre (34%) et le cadmium (9%).
- Pour ADR : le barium (55%) et le fer (22%).
- Pour Future Welfare Loss, : le cuivre (37%), le nickel (22%) l'aluminium (10%) et le chrome (10%).
- Pour JRC price-based : le fer, (42%), le nickel (19%) et le cuivre (15%). La cohérence avec la méthode Future Welfare Loss apparait encore avec toujours comme différence principale, la présence du fer.

- De même que précédemment, le tellure est mis en avant par la méthode ADP seulement.
- Le fer, élément le plus important en masse (78%) des flux d'éléments extraits est mis en avant pas les méthodes ADR, JRC price-based et GeoPolRisk.
- La forte présence du barium seulement avec la méthode ADR est aussi à noter.
- L'uranium apparait (3%) avec la seule méthode pour laquelle il est caractérisé : ADP 2020.

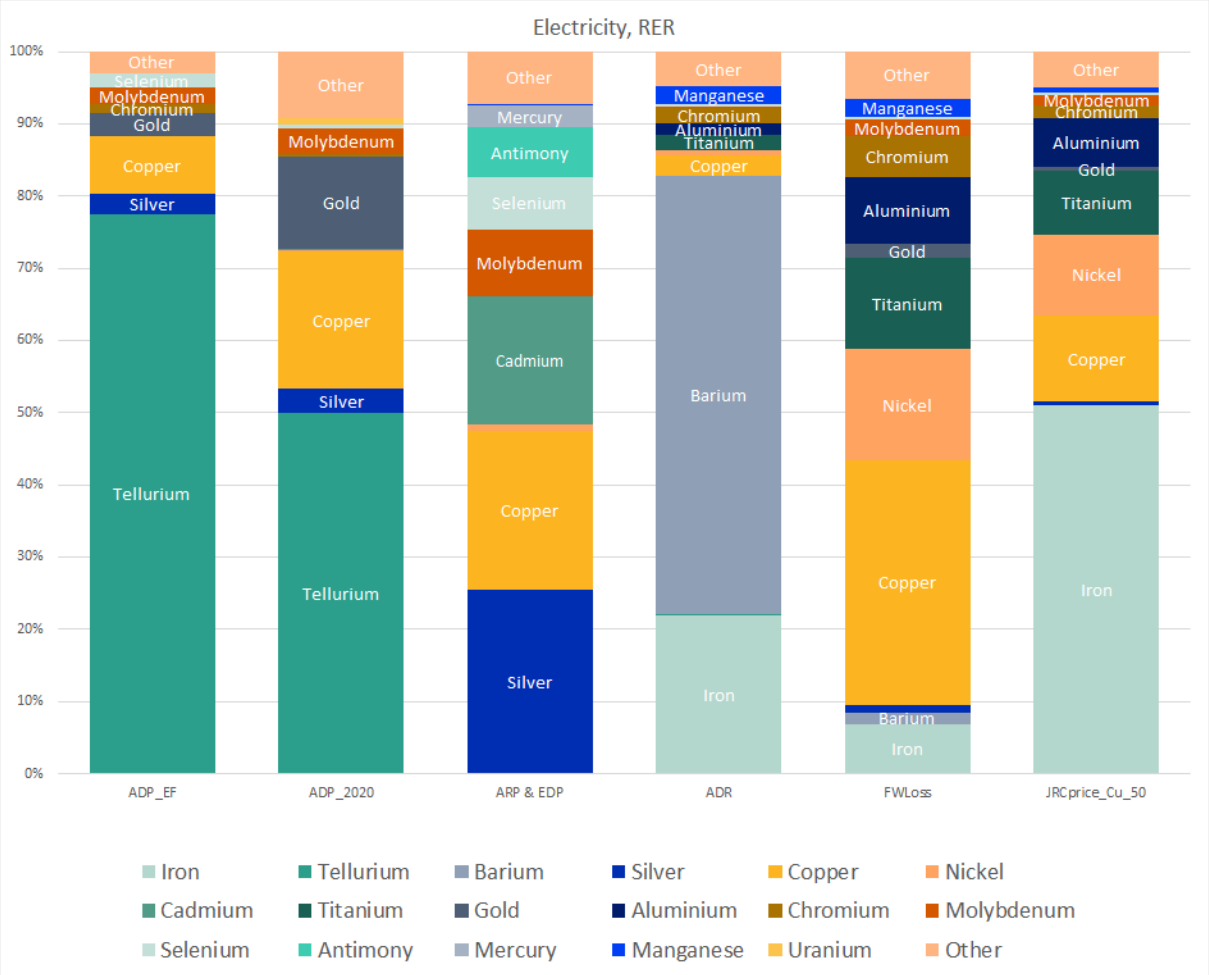


Figure 4 : Flux les plus contributeurs pour chacune des méthodes pour l'électricité européenne

- Pour la production d'électricité européenne, les résultats et la répartition sont très proches de ceux observés avec l'électricité française pour l'ensemble des méthodes à l'exception de la méthode ARP couplée à EDP
- La méthode ARP couplée à EDP met toujours en avant seulement un nombre restreint de flux de ressources émises mais la répartition de ces flux diffère entre les deux sources d'électricité : les impacts de la production d'électricité européenne est plus répartie entre les différents éléments émis : 25% d'argent, 22% de cuivre, 18% de cadmium et 9% de molybdène. A l'exception du cuivre et dans une moindre mesure du molybdène, ces ressources se retrouvent peu dans les résultats avec les autres méthodes qui se basent sur les flux d'extraction.
- A noter aussi la présence du titane et la réduction de la part du nickel dans les méthodes FutureWelfare Loss et JRC price-based toute deux fondées sur une approche économique.

Table 2 : Valeurs d'impact pour chacune des méthodes pour les deux mix électriques étudiés

	ADP EF (kg Sb eq)	ADP 2020 (kg Sb eq)	ARP & EDP (kg Fe eq)	ADR (kg Fe eq)	FWLoss (€)	JRCprice_50 (kg Cu.€eq)
Electricity, FR	8.16E-07	5.10E-06	9.55E-05	3.63E-03	1.11E-03	3.08E-04
Electricity, EU	9.45E-07	6.12E-06	1.83E-04	6.45E-03	1.40E-03	4.57E-04
Elec FR / EU (%)	86%	83%	52%	56%	80%	67%

- Pour toutes les méthodes, la production d'un KWh d'électricité en France présente des valeurs d'impacts moins élevées que la production d'un KWh d'électricité en Europe (RER).

- Circuit imprimé

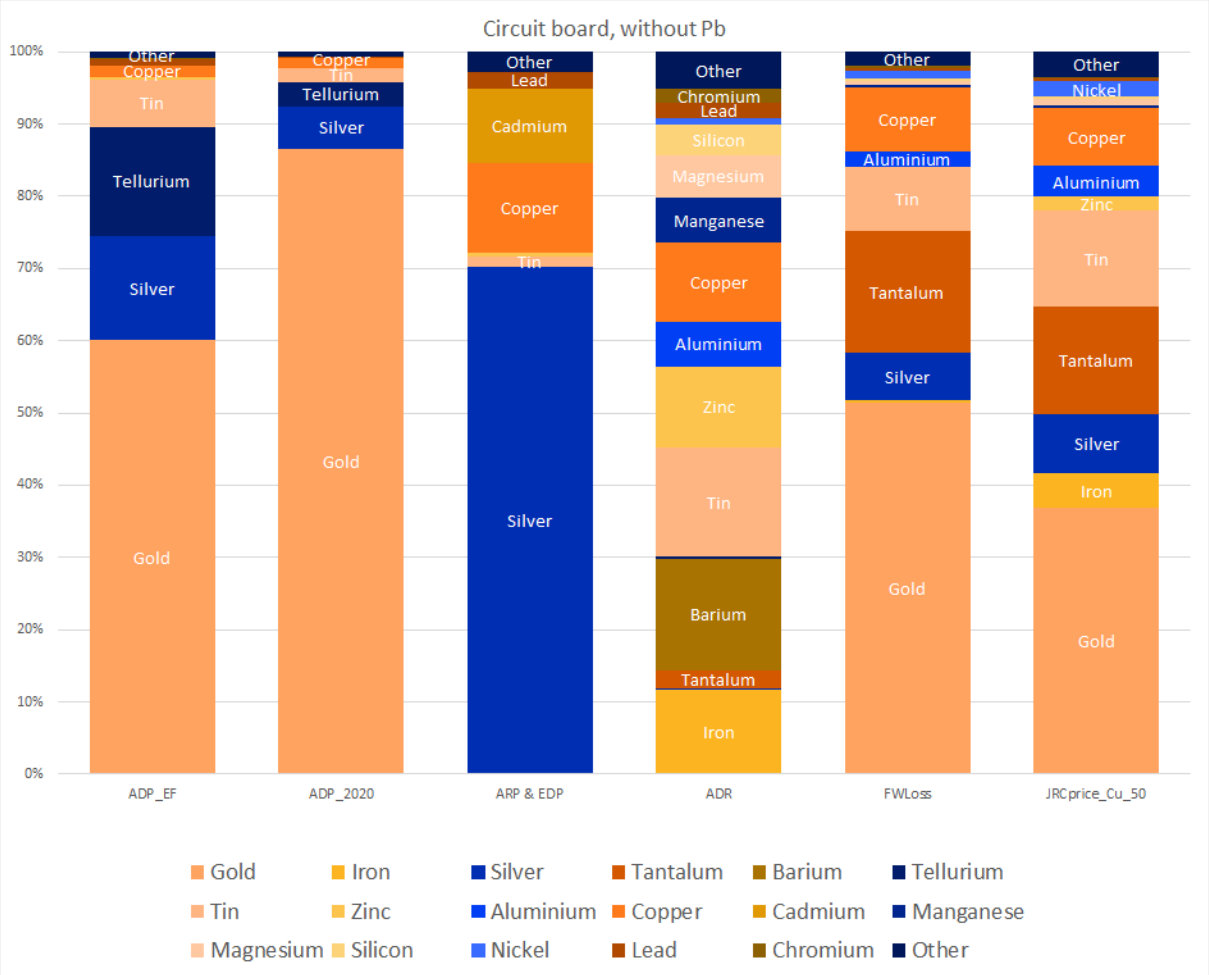


Figure 5 : Flux les plus contributeurs pour chacune des méthodes pour le circuit imprimé sans plomb

Pour la production de circuit imprimé sans plomb les éléments mis à avant par les méthodes sont :

- Pour la version d'ADP recommandée dans le cadre du PEF : l'or (60%), le tellure (15%) et l'argent (14%).
- Pour la version ADP 2020 : l'or principalement (87%).
- Pour ARP couplée à EDP : l'argent (70%), le cuivre (12%) et le cadmium (10%).
- Pour ADR, les consommations de ressources sont relativement équilibrées entre de nombreux éléments mais certains ressortent quelque peu : le barium (15%), l'étain (15%), le fer (12%), le zinc (11%) et le cuivre (11%).
- Pour Future Welfare Loss, : l'or (51 %) et le tantale (17%).
- Pour JRC price-based : l'or (37%), le tantale (15%) et l'étain (11%). La cohérence avec la méthode Future Welfare Loss est encore visible.

➢ L'or fortement présent dans les méthodes ADP, Future Welfare Loss et JRC price-based ne ressort pas dans les méthodes ADP et GeoPolRisk.

➢ Le fer, élément le plus important en masse (78%) des flux d'éléments extraits est seulement mis en avant pas la méthode GeoPolRisk et dans une moindre mesure par la méthode ADR.

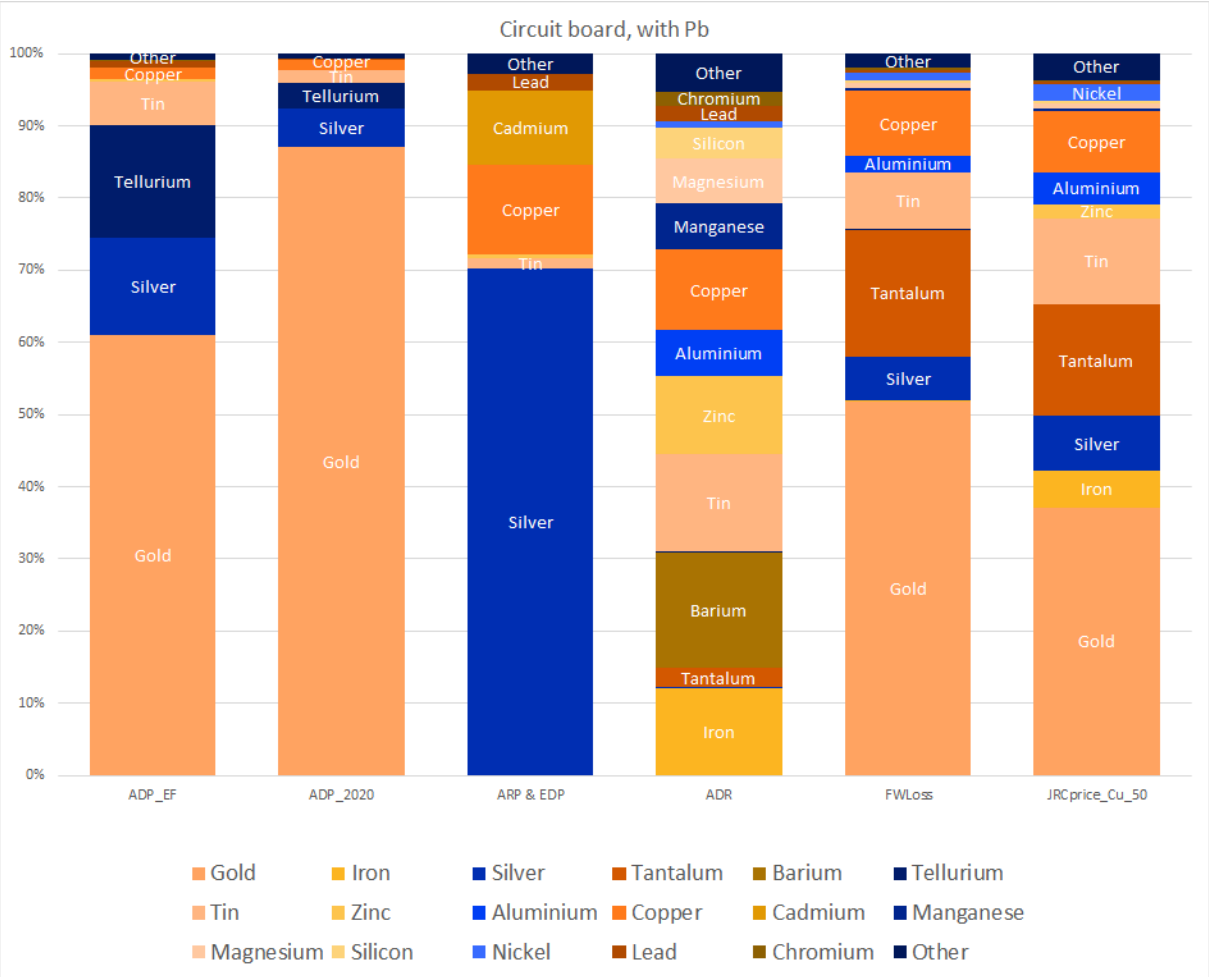


Figure 6 : Flux les plus contributeurs pour chacune des méthodes pour le circuit imprimé avec plomb

- Pour la production de circuit imprimé avec plomb, les résultats et la répartition sont très proches de ceux observés avec le circuit sans plomb pour l'ensemble des méthodes.

Table 3 : Valeurs d'impact pour chacune des méthodes pour les deux circuits imprimés étudiés

	ADP EF (kg Sb eq)	ADP 2020 (kg Sb eq)	ARP & EDP (kg Fe eq)	ADR (kg Fe eq)	FWLoss (€)	JRCprice_50 (kg Cu.€eq)
Circuit w/o Pb	2.24E-02	4.10E-01	1.19E+00	7.87E+00	2.55E+01	3.14E+00
Circuit w Pb	2.14E-02	3.96E-01	1.16E+00	7.65E+00	2.46E+01	3.01E+00
Pb free / Pb (%)	105%	104%	103%	103%	104%	104%

- Pour toutes les méthodes, la production d'un circuit imprimé sans plomb d'un kg présente des valeurs d'impacts plus élevées mais très proches de celles de la production d'un circuit imprimé avec plomb d'un kg.

2.3.3.2 ANALYSES DE SENSIBILITE

Dans cette partie, la méthode ADR et la méthode JRC price based font l'objet d'une analyse de sensibilité. :

- Les résultats de la méthode ADR calculés précédemment sont comparés aux résultats de la méthode LPST sur un intervalle de temps de 25 ans.
- Les résultats de la méthode JRC price based calculés précédemment avec le cuivre comme substance de référence et la période de temps de 50 ans sont comparés aux résultats de la même méthode avec la même substance de référence mais avec la période de temps de 20

ans (attention certains FC sont manquants sur cette période de temps : fer, thorium, niobium et brome)

Ci-dessous sont présentés :

- Les résultats de ces comparaisons pour les 6 cas d'études en valeurs absolues d'impacts
- Les graphes des flux les plus contributeurs en pourcentage de la valeur d'impact total pour avec les inventaires de la batterie NIMH, de l'électricité française et du circuit imprimé sans plomb.
- Dans ces graphes, les deux barres de gauches représentent les résultats pour les méthodes ADR et LPST, les deux barres de droites les résultats pour la méthode JRC price based. Pour chacune de ces deux paires, le cas de base calculé plus haut est représenté à gauche, l'alternative à droite.

Table 4 : Analyses de sensibilité, valeurs d'impact pour les deux batteries étudiées.

	ADR (kg Fe eq)	LPST_25 (kg Fe eq)	JRCprice_50 (kg Cu eq)	JRCprice_20 (kg Cu eq)
NIMH battery	3.33E+01	1.13E+01	3.87E+00	3.35E+00
Li-ion battery	3.46E+00	1.58E+00	4.62E-01	4.00E-01
NIMH/LI-ion (%)	961%	715%	836%	837%

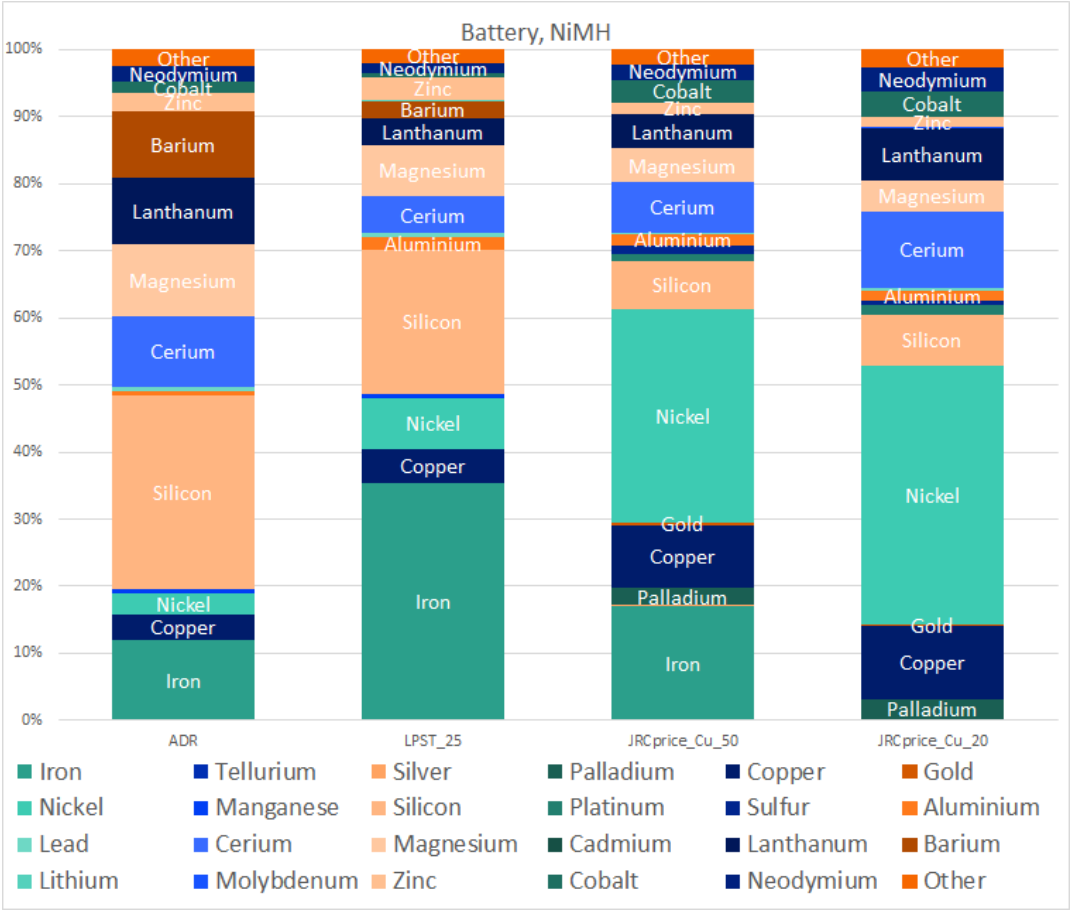


Figure 7 : Flux les plus contributeurs pour les 2 méthodes considérées pour la batterie NIMH

Table 5 : Analyses de sensibilité, valeurs d'impact pour les deux mix électriques étudiés.

	ADR (kg Fe eq)	LPST_25 (kg Fe eq)	JRCprice_50 (kg Cu eq)	JRCprice_20 (kg Cu eq)
Electricity, FR	3.63E-03	1.36E-03	3.08E-04	1.71E-04
Electricity, EU	6.45E-03	2.26E-03	4.57E-04	2.04E-04
Elec FR / Elec EU (%)	56%	60%	67%	84%

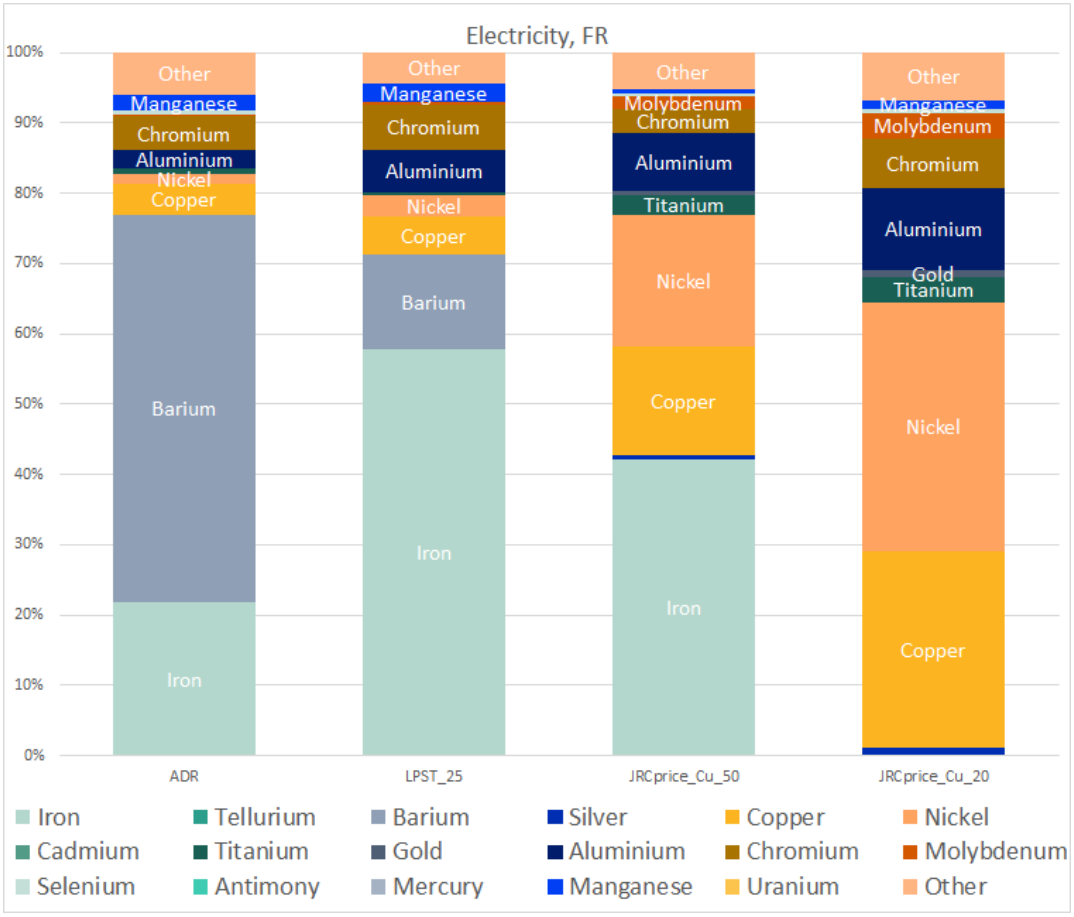


Figure 8 : Flux les plus contributeurs pour les 2 méthodes considérées pour l'électricité française

Table 6 : Analyses de sensibilité, valeurs d'impact pour les deux circuit imprimés étudiés.

	ADR (kg Fe eq)	LPST_25 (kg Fe eq)	JRCprice_50 (kg Cu eq)	JRCprice_20 (kg Cu eq)
Circuit w/oPb	7.87E+00	3.29E+00	3.14E+00	2.94E+00
Circuit w Pb	7.65E+00	3.22E+00	3.01E+00	2.83E+00
Pb free / Pb (%)	103%	102%	104%	104%

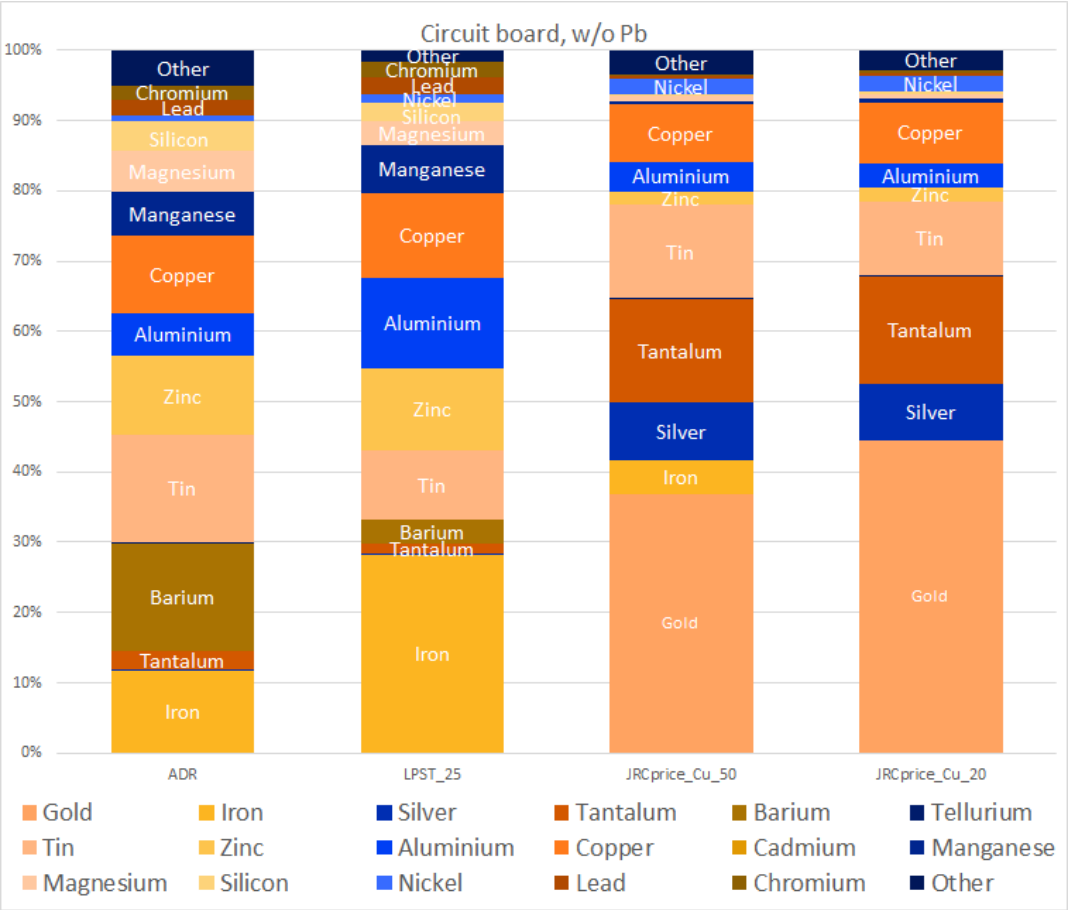


Figure 9 : Flux les plus contributeurs pour les 2 méthodes considérées pour le circuit sans plomb

- ADR et LPST

En comparant les résultats fournis par la méthode ADR et la méthode LPST avec une approche sur 25 ans, les éléments suivants apparaissent :

  - Ce sont les mêmes ressources qui contribuent aux résultats
  - L'importance relative du fer augmente fortement entre ADR et LPST 25. C'est également le cas du nickel et de l'aluminium dans une moindre mesure
  - L'importance relative du baryum diminue

- JRC price-based

En comparant les résultats de la méthode JRC price-based sur deux périodes de temps (20 et 50 ans) avec la même substance de référence (le cuivre) :

  - Le fer apparait seulement sur l'échelle de temps de 50 ans car aucun FC n'est disponible pour le fer sur les autres échelles de temps. Il serait donc judicieux d'utiliser en proxy la valeur à 50 ans pour la période de 20 ans. Notamment au vu de l'influence que peut avoir la ressource fer sur des inventaires de production d'électricité ou de batteries avec cette méthode.
  - Si la contribution relative des autres ressources est réduite en raison de l'apparition du fer dans la méthode JRC price 50 ans, les résultats en valeur absolue pour chacune des ressources changent peu.
  - Tels qu'indiqué dans le rapport du JRC ((Beylot et al., 2020), les FC et donc les impacts sont stables sur des périodes de temps considérés.
  - L'absence de FC pour certains matériaux et notamment le fer pour les périodes de temps 10,15, 20, et 30 ans rend l'utilisation de cette méthode à ces périodes limitées. Toutefois étant donné la stabilité FC quelle que soit l'intervalle de temps considéré, une utilisation des valeurs pour la période de 50 ans comme proxy est recommandée.

2.3.3.3 AUTRES RESSOURCES MINERALES

- Future Welfare Loss

La méthode Future Welfare Loss évalue aussi les impacts de l'extraction de 21 autres ressources minérales : minéraux et granulats (cf annexe 3). Les impacts principaux de la méthode mise en œuvre pour l'intégralité des ressources sont présentés dans le tableau ci-dessous ainsi que la valeur d'impact calculée seulement avec les éléments chimiques, pour comparaison.

NiMH battery		Li-ion battery		Electricity, medium voltage (FR)		Electricity, medium voltage (RER)		Circuit board (w/o Pb)		Circuit board (w Pb)	
Total éléments ($)	1.76 E+01	Total éléments ($)	3.06 E+00	Total éléments ($)	1.11 E-03	Total éléments ($)	1.40 E-03	Total éléments ($)	2.55 E+01	Total éléments ($)	2.46 E+01
Total ressources ($)	6.32 E+01	Total ressources ($)	3.27 E+00	Total ressources ($)	1.53 E-03	Total ressources ($)	2.38 E-03	Total ressources ($)	2.67 E+01	Total ressources ($)	2.58 E+01
clay	71%	copper	46%	copper	27%	calcium carbonate	23%	gold	49%	gold	49%
nickel	8%	gold	14%	nickel	16%	copper	20%	tantalum	16%	tantalum	17%
copper	5%	manganese	9%	calcium carbonate	12%	gravel	12%	tin	8%	copper	9%
silicon	4%	aluminium	7%	gravel	9%	nickel	9%	copper	8%	tin	8%
magnesium	2%	molybdenum	3%	chromium	7%	titanium	7%	silver	6%	silver	6%
cerium	2%	nickel	3%	aluminium	7%	aluminium	5%	aluminium	2%	aluminium	2%

En ajoutant les autres ressources minérales, les impacts calculés avec la méthode Future Welfare Loss changent grandement :

- L'argile a un très grand impact sur la production de la batterie NIMH triplant les impacts calculés seulement avec les éléments chimiques.
- Le carbonate de calcium et le gravier représentent une grande part de l'impact des inventaires de production d'électricité.
- Les impacts de la production des circuits imprimés changent peu
- Les inventaires montrant le plus d'impacts restent les mêmes pour chacune des deux paires.

- JRC price-based

Les FC fournis pour la méthode JRC price-based sont aussi disponibles pour calculer les impacts de 31 ressources minérales supplémentaires : minéraux et granulats (cf annexe 3). Les impacts principaux de la méthode mise en œuvre pour l'intégralité des ressources sont présentés dans le tableau ci-dessous ainsi que la valeur d'impact calculée seulement avec les éléments chimiques, pour comparaison.

NiMH battery		Li-ion battery		Electricity, medium voltage (FR)		Electricity, medium voltage (RER)		Circuit board (w/o Pb)		Circuit board (w Pb)	
Total éléments ($)	3.87 E+00	Total éléments ($)	4.62 E-01	Total éléments ($)	3.08 E-04	Total éléments ($)	4.57 E-04	Total éléments ($)	3.14 E+00	Total éléments ($)	3.01 E+00
Total ressources ($)	8.32 E+00	Total ressources ($)	4.89 E-01	Total ressources ($)	3.68 E-04	Total ressources ($)	6.10 E-04	Total ressources ($)	3.26 E+00	Total ressources ($)	3.13 E+00

clay	53%	copper	35%	iron	35%	iron	38%	gold	35%	gold	36%
nickel	15%	aluminium	12%	nickel	16%	calcium carbonate	19%	tantalum	14%	tantalum	15%
iron	8%	iron	9%	copper	13%	copper	9%	tin	13%	tin	11%
copper	4%	gold	8%	calcium carbonate	10%	nickel	8%	silver	8%	copper	8%
cerium	3%	manganese	6%	aluminium	7%	titanium	7%	copper	8%	silver	7%
silicon	3%	nickel	4%	gravel	4%	aluminium	5%	iron	5%	iron	5%
lanthanum	2%	molybdenum	4%	chromium	3%	gravel	5%	aluminium	4%	aluminium	4%

En ajoutant les autres ressources minérales, les impacts calculés avec la méthode JRC price-based changent grandement :

- De même que pour Future Welfare Loss, l'argile a un très grand impact sur la production de la batterie NIMH doublant les impacts calculés seulement avec les éléments chimiques.
- Le carbonate de calcium et le gravier représentent aussi une grande part de l'impact des inventaires de production d'électricité. Le gravier génère toutefois moins d'impact qu'avec la méthode Future Welfare Loss notamment car le FC du gravier avec JRC price-based n'est pas calculé de façon distincte de celui du sable.
- Les impacts de la production des circuits imprimés changent peu
- Les inventaires montrant le plus d'impacts restent les mêmes pour chacune des deux paires.

2.3.4 Approche JRC-LCI : cas d'études « batteries de véhicules électriques »

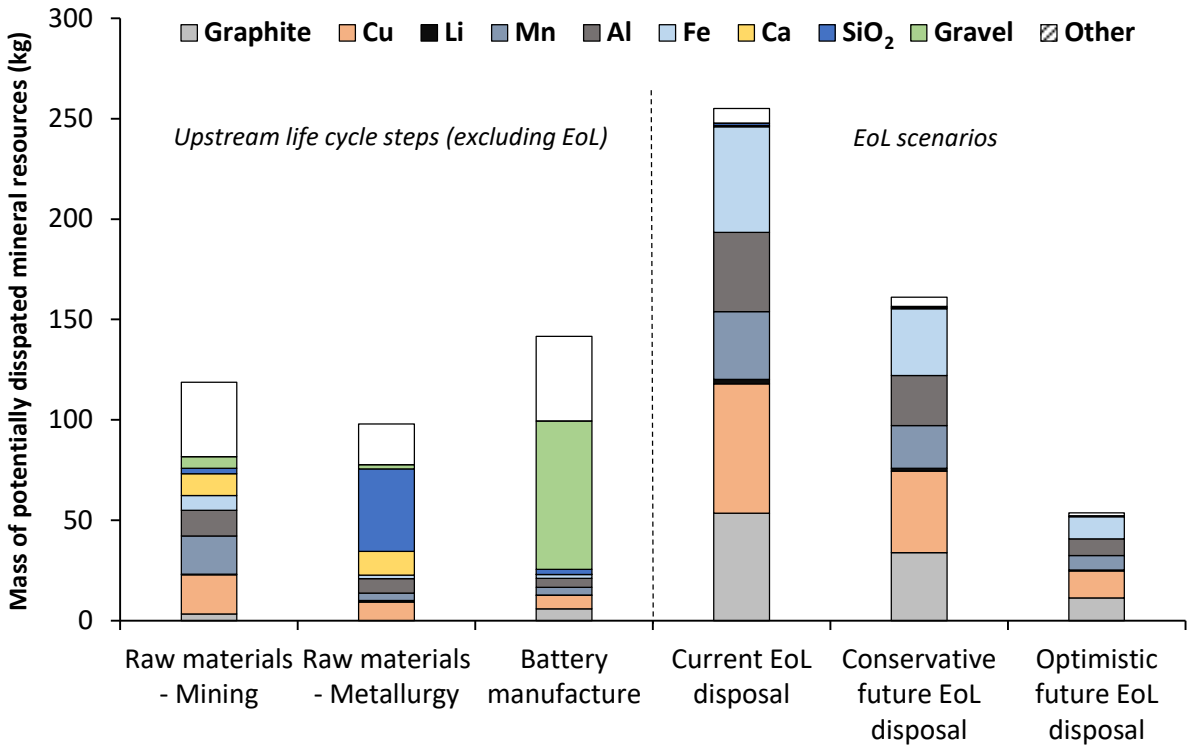
La mise en œuvre de l'approche JRC-LCI nécessite un effort relativement important sur les données d'inventaire. Par conséquent, dans cette étude, elle n'a été mise en œuvre que sur le seul cas de la batterie Li-ion. Comme pour la mise en œuvre des autres approches testées dans ce rapport, la modélisation s'est basée sur le procédé unitaire ecoinvent : Li-ion battery (GLO) [battery production, Li-ion, rechargeable, prismatic – GLO]. La base de données ecoinvent v3.7.1 a été utilisée, dans sa version « undefined » (c'est-à-dire sans modélisation type allocation ou approche conséquentielle). Les résultats présentés ci-dessous sont issus de Lai and Beylot (2022 ; soumis pour publication et disponible à la demande)[9]. Dans cet article, 11 cas d'études sont traités. D'une part, neuf métaux et une matière première minérale non-métallique : aluminium (Al), cobalt (Co), cuivre (Cu), lithium (Li), manganèse (Mn), nickel (Ni), métaux du groupe du platine (PGMs), terres rares (RE), silicium métal (Si) et graphite. D'autre part, le cas d'études d'une batterie Li-ion (lithium dioxyde de manganèse). L'analyse intègre i) la dissipation des ressources minérales directes le long de la chaîne de production (dont production de la cathode, anode, cellules, et assemblage), ii) la dissipation associée au cycle de production des matières premières composant la batterie, avec un focus sur les matières suivantes : $LiMn_2O_4$ et Al de la cathode ; graphite et Cu de l'anode, et iii) la gestion de fin de vie, dont le recyclage (fonctionnel) et l'enfouissement. Concernant le recyclage de fin de vie, trois scénarios ont été analysés (en l'absence d'information spécifique sur ce point dans la base de données ecoinvent). Ces scénarios se basent sur des données de la littérature complétées par des hypothèses. La partie non-recyclée est supposée envoyée en centre d'enfouissement.

[9] Lai, F. and Beylot, A. 2022. *Loss of mineral resource value in LCA : application of the JRC-LCI approach to multiple case studies combined with inaccessibility and value-based impact assessment*. IJLCA. Soumis

- le scénario “current EoL disposal” se base sur les performances actuelles de recyclage des batteries Li-ion, avec un taux de recyclage de 5% (Sommerville et al., 2020)[10]
- le scénario “conservative future EoL disposal” est un scénario conservateur, considérant 40% de taux de recyclage en fin de vie (Ziemann et al., 2018)[11] ;
- le scénario “optimistic future EoL disposal” est un scenario optimiste, considérant 80% de taux de recyclage en fin de vie (Ziemann et al., 2018).

Les résultats du cas d’étude sont présentés dans la figure ci-dessous.

Figure xx : Flux dissipatifs de ressources minérales sur le cycle de vie d’une batterie Li-ion, dans le cas de trois scénarios de fin de vie : contributions par ressource et par étape du cycle de vie (*figure extraite de Lai and Beylot, 2022 ; soumis*).



Sur son cycle de vie, dans le scénario de fin de vie actuel, la batterie Li-ion génère 613 kg de flux dissipatifs directs (en masse de ressources minérales). En comparaison, les scénarios futurs impliquent respectivement 15% (scénario conservateur) et 33% (scénario optimiste) de réduction sur la masse totale dissipée. L’étape de fin de vie représente la plus large contribution dans le cas des scénarios actuel et « futur conservateur » (respectivement 42% et 31% du total dissipé). La dissipation à l’étape de fin de vie est directement dépendante : i) de la composition de la batterie, par ressource, et ii) du taux de recyclage (supposé commun à toutes les matières premières dans les scénarios). Par conséquent, les ressources suivantes contribuent le plus fortement à la dissipation à l’étape de fin de vie : cuivre, graphite, fer, aluminium et manganèse. Par ailleurs, pour ce qui concerne les autres phases (amont) du cycle de vie, la dissipation des ressources minérales est principalement associée : i) aux pertes de cuivre et manganèse des déchets de la minéralurgie (tailings) ; ii) à l’utilisation dissipative de silice comme additif dans l’étape de raffinage du cuivre ; iii) aux granulats mobilisés dans l’infrastructure associée à la production de batteries.

[10] *Sommerville, R., Shaw-Stewart, J., Goodship, V., Rowson, N., Kendrick, E., 2020. A review of physical processes used in the safe recycling of lithium ion batteries. Sustain. Mater. Technol. 25, e00197. https ://doi.org/https ://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00197*

[11] *Ziemann, S., Müller, D.B., Schebek, L., Weil, M., 2018. Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand : A dynamic MFA approach. Resour. Conserv. Recycl. 133, 76–85. https ://doi.org/https ://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.031*

Les flux dissipatifs ainsi inventoriés en unité massique à chaque étape du cycle de vie permettent de prendre en compte la perte de ressources minérales sur le cycle de vie du système-produits. La perte de *valeur* associée peut ensuite être calculée via des facteurs de caractérisation basés sur les prix ; par exemple l'approche JRC price-based (facteurs de caractérisation testés en association avec l'approche JRC-LCI sur deux cas d'études dans Beylot et al., 2020) ou l'approche Future Welfare Loss.

2.3.5 Remarques et difficultés

- Limites des inventaires

Les inventaires eux-mêmes présentent des aspects qui limitent les comparaisons des méthodes :

- Comme cela a été vu plus haut, les ressources consommées dans les différents inventaires étudiés ne sont pas totalement corrélées aux consommations réelles du fait du système d'allocation appliqué dans la base de données Ecoinvent v3.
- Les inventaires des circuits imprimés sans plomb et avec plomb présentent une quantité très proche de plomb extrait. Ce qui est dû au fait que la consommation de plomb ne provient majoritairement pas du plomb déposé sur le circuit mais à d'autres éléments de la production. Cela rend peu pertinente la comparaison des deux inventaires.
- Certains éléments ont des flux référencés dans les logiciels mais ces flux n'apparaissent dans aucun inventaire. Ces éléments présentent toutefois des FC qui peuvent être élevés (par exemple l'indium) rendant l'évaluation biaisée par la composition même de l'inventaire.
- Certains flux peuvent être absents des éléments extraits mais apparaitre dans les éléments émis dans l'environnement et inversement et seront donc comptabilisés ou non selon la méthode.

- Mise en œuvre

Le tableau suivant récapitule les différents aspects particuliers de chaque méthode étudiée lors de la mise en œuvre, notamment les différentes limites rencontrées. Les autres avantages et désavantages de chacune des méthodes (en termes de questions auxquelles ces méthodes permettent de répondre, d'hypothèses sous-jacentes aux modèles, etc.) sont listées dans le tableau de la partie 2. Le tableau suivant est essentiellement une analyse des méthodes du point de vue de l'opérationnalisation/applicabilité, à l'attention des utilisateurs des méthodes.

Méthode	Remarques	Limites	Avantages
ADP	• Nombreux changements entre la version recommandée et la version de 2020. • La méthode met en avant l'élément tantale dans les cas étudiés. • Seule méthode se basant sur les flux extraits prenant en compte l'uranium.	• La plupart des éléments supplémentaires par rapport aux autres méthodes n'apparaissent pas dans les inventaires et de manière plus générale, dans la base de données Ecoinvent v3.	• La dernière version des FC propose de nombreuses corrections. • La méthode est celle qui prend en compte le plus d'éléments chimiques (76), seul le thorium, est laissé de côté par rapport à d'autres méthodes.
ARP couplé A EDP	• Pour tous les cas d'études les mêmes éléments ressortent dans le même ordre : l'argent, le cuivre et le cadmium. Lié principalement à la forte présence de ces éléments dans les flux d'émissions.	• La présence dans les résultats d'un nombre limité d'éléments pour tous les cas d'études laisse à penser qu'Ecoinvent v3 n'est pas adaptée dans sa construction pour comptabiliser les flux de ressources métalliques émises.	• De nombreux éléments chimiques considérés (76).

	• Les éléments présents dans les flux d'émissions sont peu corrélés aux flux extraits. Cela est dû au fait que les flux de ressources utilisés ne sont pas encore dissipés car aucune fin de vie n'est considérée ici.		
ADR et LPST	• Ecarts entre les FC moins prononcés qu'avec les autres méthodes : tend à créer une répartition des impacts plus uniforme.	• Le nombre d'éléments chimiques considéré (61) est plus faible que pour ADP 2020	
Future Welfare Loss	• Cohérence avec la méthode JRC price-based fondée aussi sur une approche économique. • Les granulats ont un poids élevé dans les impacts des cas étudiés.	• Le nombre d'éléments chimiques considéré (67) est plus faible que pour ADP 2020	• Prise en compte d'une vingtaine de ressources minérales en addition des éléments chimiques. Ce qui permet une évaluation plus grande de l'utilisation des ressources notamment les granulats.
JRC price-based	• Cohérence avec la méthode Future Welfare Loss fondée aussi sur une approche économique. • Les granulats ont un poids élevé dans les impacts des cas étudiés • Le facteur de caractérisation du fer utilisé se base sur la valeur de l'acier qui est variable. L'évaluation du prix du fer en tant que gisement minéral est difficile à évaluer, la méthode utilisé pour calculer ce prix doit être calculé	• Le nombre d'éléments chimiques considéré (64) est plus faible que pour ADP 2020. • Certains FC sont manquants (fer, thorium, niobium ou bromine par exemple) pour les horizons temporels 10,51,20 et 30 ans.	• Méthode prévue pour fonctionner avec des flux dissipatifs mais s'applique sans difficultés aux flux d'extraction de ressources. • Prise en compte d'une vingtaine de ressources minérales en addition des éléments chimiques. Ce qui permet une évaluation plus grande de l'utilisation des ressources notamment les granulats.

3 Analyse transversale

Pour l'analyse transversale, nous distinguons quatre principaux critères pour évaluer les méthodes :

- Le concept fondamental
- La mise en œuvre
- L'opérationnalité
- Les recommandations par des tierces parties

Le concept fondamental des méthodes est clé car il détermine la pertinence intrinsèque des méthodes.

La mise en œuvre consiste à faire le pont entre le concept fondamental des méthodes et l'opérationnalité. L'analyse de la mise en œuvre est scindée en deux parties : les hypothèses et les données sous-jacentes. Les hypothèses sont cruciales car elles doivent permettre l'application du concept fondamental tout en le respectant. Au niveau des données, l'enjeu est plutôt l'accès aux données pour les développeurs de méthodes que l'existence de celles-ci dans la majorité des cas.

L'opérationnalité est uniquement un enjeu de court terme car si la méthode s'impose, les logiciels existants s'adapteront et les problèmes de compatibilité seront résolus.

Le critère de recommandation par des tierces parties vise à prendre en considération les recommandations passées (par exemple dans le cadre du PEF) ou en cours de discussion (par exemple dans le cadre du GLAM3) dans l'élaboration des recommandations issues de cette étude.

Ces quatre principaux critères sont subdivisés en sous-critères. Pour chaque méthode, et chacun de ces sous-critères, un « niveau de satisfaction » est associé : satisfaisant, partiellement satisfaisant, partiellement insatisfaisant, ou insatisfaisant. Afin d'être recommandée, une méthode doit être associée à un « niveau de satisfaction » minimum dépendant de chaque sous-critère. Ces seuils ont été définis par avis d'experts par les auteurs de ce rapport, et présentés dans le tableau suivant.

Concept fondamental	Niveau seuil	Commentaire
Dissipation/perte d'accessibilité	Partiellement satisfaisant	Sauf si "Rupture d'approvisionnement" >= "Partiellement satisfaisant"
Valeur de la fonction	Partiellement satisfaisant	
Substituabilité	Insatisfaisant	
Rupture d'approvisionnement	Partiellement satisfaisant	Sauf si "Dissipation/perte d'accessibilité" et "Valeur de la fonction" >= "Partiellement satisfaisant"
Générations futures	Insatisfaisant	
Mise en oeuvre		
Hypothèses	Partiellement insatisfaisant	
Données sous-jacentes	Partiellement insatisfaisant	
Opérationnalité		
Logiciels	Partiellement satisfaisant	
Compatibilité avec BDD ICV standards	Partiellement satisfaisant	
Couverture des ressources	Partiellement satisfaisant	
Interprétation des résultats	Partiellement satisfaisant	
Recommandations par des tierces parties		
Recommandations existantes ou en discussions pour l'avenir (évaluation à mi-février 2022)	Partiellement insatisfaisant	

Tableau 1 : Niveaux seuils par sous-critères pour recommandation

Une méthode notée avec un niveau de satisfaction inférieur au niveau seuil ne peut être recommandée. Dans le choix des niveaux seuils, la priorité a été donnée :

1) au concept fondamental : « dissipation/perte d'accessibilité » et « valeur » ; ou « rupture d'approvisionnement » (qui est une dimension de la criticité) ;
2) au niveau d'opérationnalité.

Pour ces critères, le seuil est « partiellement satisfaisant ».

La « mise en œuvre » et les « recommandations existantes » sont aussi importantes, mais laissées à un niveau seuil inférieur (« partiellement insatisfaisant ») car identifiées, au moins à court terme, comme moins importantes que le concept fondamental et l'opérationnalité.

Enfin, deux sous-critères (« substituabilité » et « générations futures ») sont associés à un niveau seuil non-contraignant (« insatisfaisant »). Ces sous-critères correspondent à une plus-value d'une approche par rapport à une autre, sans que leur réalisation ne soit néanmoins nécessaire pour qu'une méthode soit recommandée.

3.1 Concept fondamental

L'évaluation des ressources peut se faire sous différents angles : environnemental, économique, géopolitique… Dans le cadre de cette étude, nous prenons comme point de départ la définition draft du GLAM3[12], à date de mi-avril 2022 :

« How can I quantify the consequences of temporal or permanent loss of the functional values of natural resources caused by its use in a product system? ».

Cette définition se base sur la perte temporaire ou permanente de la valeur de la fonction suite à l'utilisation d'une ressource naturelle dans un système-produit.

Pour comparer le concept fondamental des méthodes ressources non-renouvelables, nous mobilisons les concepts suivants :

- Dissipation/perte d'accessibilité

  Est-ce que la méthode caractérise la perte d'accessibilité des ressources pour de potentiels futurs utilisateurs, amenant éventuellement à leur dissipation, sur le cycle de vie ?

- Valeur de la fonction

  Est-ce que la méthode prend en compte la valeur de la fonction des ressources, par exemple au travers de leurs valeurs d'usage ou leurs prix ?

- Substituabilité

  Est-ce que la méthode prend en compte la substituabilité des ressources ? (une ressource pouvant éventuellement se substituer à une autre lorsqu'elle peut apporter une fonction similaire).

- Rupture d'approvisionnement

  Est-ce que la méthode prend en compte les risques d'approvisionnements (e.g. géopolitiques) ?

- Générations futures

  Est-ce que la méthode prend en compte la perte de bien-être des générations futures ? Si une ressource est dissipée ou consommée, la valeur de la fonction est perdue. Et ce soit uniquement à court-terme, soit aussi sur un plus long-terme (affectant alors plus durablement les générations futures).

Pour la dissipation/perte d'accessibilité, les méthodes « ADR et LPST » et JRC LCI la prennent en compte de manière satisfaisante. Les méthodes basées sur les prix (Future Welfare Loss et JRC price based) ne prennent en compte la dissipation qu'à travers la modélisation ACV (les matières non recyclées sont perdues). Ce sont des approches de caractérisation des impacts qui permettent de prendre en compte la valeur, néanmoins potentiellement compatibles avec des approches de prise en compte de la dissipation en ICV (permettant ainsi de prendre en compte *la perte* de valeur). Les méthodes EDP et ARP considèrent uniquement la dissipation vers l'environnement, et non pas dans la technosphère. La méthode ADP Ultimate Reserve ne prend pas en compte la dissipation mais bien la contribution de perte totale des ressources (sur le cycle de vie d'un système-produit) à l'épuisement du stock géologique. GeoPolRisk et ESSENZ ne prennent pas du tout en compte la dissipation.

Les méthodes basées sur les prix (Future Welfare Loss et JRC price based) couvrent la valeur de la fonction (en particulier, la « perte de valeur » quand combinée à une méthode de prise en compte de la dissipation). « ADR et LPST » et GeoPolRisk ne couvrent pas la valeur de la fonction à ce jour mais des propositions de facteurs de caractérisation intégrant des prix[13] sont en développement. Les méthodes JRC LCI et ARP sont potentiellement compatibles avec des facteurs de caractérisation qui prennent en compte la valeur de la fonction. ADP Ultimate Reserve, EDP et ESSENZ ne prennent pas en compte la valeur de la fonction.

[12] Global Life Cycle Impact Assessment Method.

[13] Cette proposition est semblable à celle de la méthode JRC price based pour ADR et LPST.

La substituabilité est uniquement prise en compte dans 3 méthodes : les méthodes basées sur les prix (Future Welfare Loss et JRC price based) et ESSENZ. Dans CS-ESSENZ, la vulnérabilité est prise en compte de manière générale. La substituabilité est prise en compte dans les prix pour les méthodes basées sur les prix.

Les risques de rupture d'approvisionnement sont uniquement pris en compte de manière satisfaisante dans GeoPolRisk. La méthode générale ESSENZ analyse ces risques sur base de données globales et donc la dimension régionale du risque de rupture d'approvisionnement n'est pas prise en compte. Néanmoins, cette dimension régionale est prise en compte dans la version CS-ESSENZ. Notons que pour ADP Ultimate Reserve, le stock géologique existant peut être un des éléments de quantification du risque d'approvisionnement mais n'est pas un élément fondamental.

La prise en compte des générations futures est uniquement satisfaisante dans Future Welfare Loss. Dans EDP et ARP, les générations futures sont prises en compte partiellement au regard de certaines hypothèses dans l'approche long-terme.

Pour comparer le concept fondamental des méthodes ressources renouvelables, nous mobilisons les concepts suivants :

- Critère spécifique biodiversité
- Services écosystémiques
- Cadre temporel
- Couverture géographique

LC Impact et Impact World+ ont le même critère de biodiversité spécifique : espèces potentiellement disparues au cours du temps.

Les services écosystémiques sont partiellement couverts par Impact World+ mais pas du tout par LC Impact. Les services écosystémiques couverts par Impact World+ sont la résistance à l'érosion, la recharge en eau douce, la filtration mécanique et la production biotique.

Impact World+ permet de distinguer le court, moyen et long-terme alors que LC Impact uniquement le long-terme.

Au niveau de la couverture géographique, les deux méthodes couvrent global, continental, pays et local. LC Impact couvre également régional contrairement à Impact World+.

3.2 Mise en œuvre

Pour évaluer la mise en œuvre des méthodes ressources renouvelables, nous mobilisons les concepts suivants :

- Hypothèses
- Données sous-jacentes

Les hypothèses associées à la modélisation du chemin d'impact sont partiellement satisfaisantes dans le cas de 5 méthodes :

- Future Welfare Loss et JRC price-based, toutes deux basées sur les prix ;
- GeoPolRisk et ESSENZ, méthodes permettant de capter certaines dimensions de la criticité. Pour ce faire, elles se basent sur un certain nombre de critères acceptables bien qu'avec des niveaux de détails distincts (plus fin dans ESSENZ) ;
- JRC-LCI qui considère un horizon temporel relativement court (25 ans) dans le cadre duquel les hypothèses peuvent être considérées comme relativement robustes au regard du niveau de connaissance actuel.

Au contraire, ADP Ultimate Reserve et « ADR et LPST » sont partiellement insatisfaisantes du point de vue des hypothèses de modélisation. En ce qui concerne ADP Ultimate Reserve, la "réserve ultime" ne représente pas la réserve ultimement extractible (qui est inconnue), ce qui est problématique à la fois en absolu et en relatif (entre ressources). Pour ce qui concerne « ADR et LPST », les hypothèses sont parfois trop conservatrices sur l'inaccessibilité des ressources, à une échelle temporelle longue. Les FC ont été calculés via les résultats de MFA dynamiques, c'est-à-dire basés sur des valeurs moyennes à l'échelle de la technosphère globale. ADR se base sur le constat d'un Temps de Service « potentiel » selon les conditions d'usage et les technologies d'aujourd'hui. LPST se base sur l'introduction de choix de valeurs sur un "objectif idéal", qui n'a pas de réalité physique.
Enfin, EDP et ARP sont associées à des hypothèses de modélisation insatisfaisantes. Le développement d'EDP a nécessité un nombre relativement élevé d'hypothèses et de simplifications discutables, en ce qui concerne notamment

i) l'accessibilité des stocks en hibernation sur le long terme,
ii) l'utilisation de la croûte terrestre continentale comme proxy de la réserve ultimement extractible, et
iii) un certain nombre de contradictions dans les hypothèses faites pour modéliser l'ICV et les FC.

Par ailleurs, dans l'approche ARP le Critère A (qui permet de définir si une ressource est accessible, ou non) est extrêmement discutable. L'utilisation de la concentration moyenne dans la croûte terrestre posée comme seuil d'accessibilité de la ressource dans le futur est une hypothèse pour laquelle le niveau de confiance est extrêmement faible.

Les données sous-jacentes sur lesquelles se basent les méthodes sont fiables pour l'ensemble des méthodes ressources non-renouvelables excepté partiellement pour Future Welfare Loss. Pour Fulture Welfare Loss, peu de coûts d'extraction spécifiques par ressource sont utilisés.

Pour les méthodes ressources renouvelables, Impact World+ s'appuie sur un modèle mi-chemin/dommage, la méthode donne 4 points de vue cohérents et complémentaires pour évaluer le cycle de vie des impacts :

- Indicateurs à mi-chemin
- Indicateurs de dommage
- Dommages sur les aires de protection (santé humaine, qualité des écosystèmes et les ressources et services écosystémiques).
- Dommages sur les aires de préoccupation (eau et carbone)

Pour LC Impact, pour la qualité des écosystèmes, 3 types d'écosystèmes sont étudiés (terrestre, marin, eau douce). La méthode se concentre sur 7 catégories d'impact pour étudier les aires de protection.

3.3 Opérationnalité

Pour évaluer l'opérationnalité des méthodes ressources non-renouvelables, nous mobilisons les concepts suivants :

- Logiciels
- Compatibilité avec base de données ICV[14] standards
- Couverture des ressources
- Interprétation des résultats

Au niveau des logiciels utilisés par les membres de SCORELCA (Simapro et Gabi), uniquement la méthode ADP Ultimate Reserve est déjà mise en place. La mise en œuvre serait relativement facile

[14] Inventaire du cycle de vie.

pour de nombreuses méthodes : ARP, ADR et LPST, Future Welfare Loss, JRC price based et GeoPolRisk. La mise en œuvre serait compliquée pour les méthodes suivantes : EDP et JRC LCI.
Et finalement, pour ESSENZ, uniquement une mise en œuvre en dehors du cadre des logiciels ACV classique est possible car le calcul d'impact n'est pas similaire à l'ACV.

La compatibilité avec des bases de données ICV standards est satisfaisante (ou partiellement satisfaisante pour GeoPolRisk) pour l'ensemble des méthodes sauf ESSENZ et JRC LCI. Dans le cas de CS-ESSENZ, des données spécifiques à l'entreprise qui sortent du cadre classique des données d'ICV ont nécessaires. Finalement pour JRC LCI, des efforts potentiellement significatifs sont à fournir pour compiler des données sur la base des bases de données d'ICV existantes.

La couverture des ressources est satisfaisante pour les méthodes basées sur les prix (Future Welfare Loss et JRC price based). La couverture des ressources est partiellement satisfaisante pour les méthodes suivantes : ADP Ultimate Reserve, EDP, ARP, ADR et LPST et GeoPolRisk. Pour ces méthodes, la couverture est généralement bonne pour les métaux mais pas pour les minéraux. La couverture des ressources est partiellement insatisfaisante pour ESSENZ car elle est seulement « bonne » pour les métaux (en comparaison, la couverture est beaucoup plus large dans les autres méthodes) et partielle pour les minéraux. Etant donné que la méthode JRC LCI s'applique à l'échelle de l'ICV, le critère de la couverture des ressources est non applicable pour cette méthode.

L'interprétation des résultats est satisfaisante pour les méthodes basées sur les prix (Future Welfare Loss et JRC price based). Elle est partiellement satisfaisante pour « ADR et LPST », JRC LCI et GeoPolRisk. « ADR et LPST » est facilement compréhensible et communicable mais peu de mise en œuvre donc il y a peu de recul. Cette méthode est probablement particulièrement utile pour l'identification de hotspots sur l'enjeu dissipation mais ne permet pas d'identifier des phases du cycle de vie les plus contributrices (ce qui est problématique dans le PEF). Pour JRC LCI, le concept de dissipation est assez récent, ce qui implique peu de recul. Mais l'approche est a priori facilement communicable si traduite par "perte". Cette méthode permet l'identification des phases du cycle de vie les plus contributrices ("hotspots") à la dissipation ; ce qui est clé par exemple dans le contexte du PEF. GeoPolRisk est relativement simple à interpréter. Il y a peu de cas d'études d'utilisation de cette méthode publiés à ce jour et de retours d'expérience. La méthode ADP Ultimate Reserve est partiellement insatisfaisante car bien que la mise en œuvre soit éprouvée, le niveau de difficulté est moyen pour l'interprétation. De plus, cette méthode ne permet pas de capter l'enjeu de "disponibilité" (des millions d'années de ressources seraient devant nous). Les méthodes EDP, ARP et ESSENZ sont insatisfaisantes car pour EDP et ARP, il y a peu de recul sur l'utilisation de cette méthode et un risque d'orientation vers des mauvaises pratiques tant du point de vue ressources qu'environnemental. Pour ESSENZ, en plus du manque de retour d'expérience, l'interprétation est complexe du fait du nombre d'indicateurs : 15 indicateurs à analyser individuellement relatifs au seul enjeu de "criticité".

Pour les méthodes ressources renouvelables, Impact World+ est mise en œuvre dans Simapro et dans Brightway 2 alors que LC Impact uniquement dans Brightway 2.

La compatibilité avec des bases de données ICV standards est partielle pour les deux méthodes et uniquement au niveau pays.

Pour l'interprétation des résultats, des nuances spécifiques sont à apporter à l'analyse pour LC Impact. La méthode Impact World+ ne propose pas une méthode recommandée pour la pondération des dommages (DALY, PDF en m²*an et $).

3.4 Recommandations par des tierces parties

Le critère des « recommandations par des tierces parties » permet de prendre en considération les recommandations respectivement passées et en cours d'élaboration. Trois des méthodes étudiées ont été recommandées en 2020 par l'UNEP (Task Force Mineral Resources) :

i) ADP Ultimate Reserves pour répondre à la question relative à la contribution d'un système-produit à la déplétion des ressources minérales (niveau de recommandation : "Recommandée") ;

ii) GeoPolRisk et ESSENZ respectivement « suggérée » et « recommandée interim » sur l'enjeu de criticité (c'est-à-dire pour « quantifier les problèmes potentiels d'accessibilité d'un système-produit liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques à court-terme (criticité) »).

La méthode ADP Ultimate Reserve est aussi recommandée dans le cadre du PEF. Toutefois il est attendu qu'aucune de ces trois méthodes ne soit recommandée dans le cadre des travaux du GLAM 3 actuellement en cours. De fait, ces méthodes sont considérées comme « partiellement satisfaisantes » sur ce critère dans cette étude.

Au contraire, les méthodes ARP, Future Welfare Loss et JRC-LCI n'ont pas été recommandées dans le cadre du GLAM2, car pas encore développées au moment de ces travaux. Au vu des discussions à ce jour (mi-avril 2022), il est possible que les méthodes ARP et Future Welfare Loss soient recommandées pour ce qui concerne l'évaluation à "long-terme" de la dissipation (prise en compte de la dissipation à l'échelle de l'ICV via ARP, et quantification de la perte de valeur associée via Future Welfare Loss). Par ailleurs il est possible que l'approche JRC-LCI soit recommandée pour ce qui concerne l'évaluation à "court-terme" de la dissipation, et ce en combinaison avec des FC basés sur les prix (via une approche encore à définir). Dans ce contexte, le niveau « partiellement satisfaisant » est associé aux méthodes ARP, Future Welfare Loss et JRC-LCI dans cette étude.

Par ailleurs, les méthodes EDP, « ADR et LPST » et JRC price-based sont en cours de discussion dans le cadre des travaux de l'UNEP GLAM3, mais à ce jour il est possible qu'elles ne soient pas recommandées. Pour ce qui concerne l'approche JRC price-based, c'est notamment le fait qu'elle soit à ce jour non-publiée dans un article révisé par les pairs (peer-reviewed) qui fait qu'elle est exclue des méthodes recommandables. Dans ce rapport, ces trois méthodes sont donc considérées comme partiellement insatisfaisantes sur ce critère.

Enfin, à ce jour, aucune des méthodes actuellement en cours de discussion dans le cadre des récents travaux du PEF sur un possible nouvel indicateur d'impact associé à l'utilisation des « ressources minérales » n'a été retenue.

3.5 Synthèse de l'analyse transversale

Le Tableau 2 synthétise l'analyse transversale pour les ressources non-renouvelables.

Le Tableau 3 synthétise l'analyse transversale pour les ressources renouvelables.

	ADP Ultimate Reserve	EDP	ARP	ADR et LPST	Future Welfare Loss	GeoPolRisk	ESSENZ	JRC LCI	JRC price-based
Concept fondamental									
Dissipation/perte d'accessibilité									
Valeur de la fonction									
Substituabilité									
Rupture d'approvisionnement									
Générations futures									
Mise en oeuvre									
Hypothèses									
Données sous-jacentes									
Opérationnalité									
Logiciels									
Compatibilité avec BDD ICV standards									
Couverture des ressources									
Interprétation des résultats									
Recommandations par des tierces parties									
Recommandations existantes ou en discussions pour l'avenir (évaluation à mi-février 2022)									

Tableau 2 : Synthèse de l'analyse transversale pour les méthodes ressources non renouvelables

Satisfaisant
Partiellement satisfaisant
Partiellement insatisfaisant
Insatisfaisant

	LC Impact	Impact World +
Concept fondamental		
Critère spécifique biodiversité		
Services écosystémiques		
Cadre temporel		
Couverture géographique		
Mise en oeuvre		
Données sous-jacentes		
Opérationnalité		
Logiciels		
Compatibilité avec BDD ICV standards		
Interprétation des résultats		

Tableau 3 : Synthèse de l'analyse transversale pour les méthodes ressources renouvelables

Satisfaisant
Partiellement satisfaisant
Partiellement insatisfaisant
Insatisfaisant

4 Conclusions et recommandations

Une méthode est recommandée si :

- Elle atteint le seuil minimum établi pour chacun des sous-critères (seuils définis en préambule du chapitre 3) ;
- Elle obtient un bon score global d'évaluation, basé sur l'évaluation des sous-critères (voir les tableaux de synthèse de l'analyse transversale).

Trois méthodes sont recommandées :

- **deux qui évaluent la perte de valeur des ressources minérales**. Elles calculent un indicateur d'impact ACV classique.

  Une méthode est recommandée à court terme : elle est utilisable avec les bases de données et les logiciels actuels.

  Une autre méthode est recommandée à moyen terme : elle est plus satisfaisante en termes de robustesse et d'aide à la décision, mais pas suffisamment opérationnelle à ce jour.

- **une qui calcule le risque de rupture d'approvisionnement** auquel un système est soumis ; c'est un **indicateur complémentaire** aux indicateurs ACV, ne rendant pas compte de l'impact d'un système sur son environnement mais bien d'un risque auquel le système est soumis.

Question : quantification de la perte de valeur induite par l'utilisation de ressources minérales par un système-produit sur son cycle de vie (c'est-à-dire la question du GLAM[15] 3 en cours : *« How can I quantify the consequences of temporal or permanent loss of the functional values of natural resources caused by its use in a product system? »*)

La "perte de valeur" est le concept clé que l'approche recommandée doit capter. Pour ce faire, la combinaison de deux méthodes est recommandée :

- une méthode permettant de capter la "perte" de ressources minérales induite par un système sur son cycle de vie. Certaines[16] méthodes « dissipation » permettent d'expliquer à quelles étapes du cycle de vie (e.g. pour l'écoconception) ont lieu les pertes de ressources, calculées dans l'ACV par bilan massique des ressources. Dans l'approche classique d'ICV, la consommation nette d'une ressource en ACV est la différence entre la consommation de matière première et l'économie de matière première grâce au recyclage. C'est cette quantité-là de matière qui est alors considérée comme « dissipée ».
- une méthode permettant de capter la "valeur" de la matière perdue.

Méthodes recommandées :

- ***Ad interim*** : **méthode ADR[17] combinée à la méthode Future Welfare Loss ;** dans les faits malheureusement aucun cas d'étude ne teste cette combinaison et il y a donc un risque de difficultés pratiques non-identifiées ; des tests sont donc encore nécessaires pour confirmer cette recommandation
- **A terme** (quand JRC-LCI sera mise en œuvre dans les bases de données d'ICV) **: méthode JRC-LCI[18] combinée à la méthode Future Welfare Loss**

[15] Global Guidance on Life Cycle Impact Assessment Indicators.
[16] Pas ADR et LPST.
[17] Average Dissipation Rate.
[18] Joint Research Centre Life Cycle Inventory

Les facteurs de caractérisation de la méthode ADR sont recommandés plutôt que ceux de la méthode LPST[19]. Les deux méthodes ont été développées par Charpentier-Poncelet et al. et reposent sur un socle méthodologique commun. Néanmoins, comme discuté dans le chapitre 2 de ce rapport, la méthode LPST est une méthode “distance à l’objectif” se basant sur l'introduction de choix de valeurs sur un "objectif idéal" (hypothétique absence de dissipation sur une perspective temporelle donnée). ADR se base au contraire sur le constat d’un Temps de Service « potentiel » selon les conditions d’usages et les technologies d’aujourd’hui. Son usage est recommandé.
L’approche JRC-LCI est intrinsèquement plus satisfaisante que l’ADR car les choix et hypothèses supportant le modèle sont plus satisfaisants. La méthode JRC-LCI considère un horizon temporel relativement court (25 ans) dans le cadre duquel les hypothèses peuvent être considérées comme relativement robustes au regard du niveau de connaissances actuelles. Pour ce qui concerne ADR, les hypothèses sont parfois trop conservatrices sur l'inaccessibilité des ressources, à une échelle temporelle longue. Les Facteurs de Caractérisation ont été calculés via les résultats de MFA[20] dynamiques, c’est-à-dire basés sur des valeurs moyennes à l'échelle de la technosphère globale. La méthode JRC-LCI permet aussi une interprétation des résultats plus fine ; par contre, l’approche ADR permet une meilleure identification de « hotspots ». En pratique, comme l’approche JRC-LCI n’est pas implémentée dans les Logiciels et bases de données d’ICV, elle ne peut pas être recommandée. Quand cette lacune sera comblée, son application sera recommandée (et non plus seulement « suggérée »).
La méthode Future Welfare Loss est préférée à la méthode JRC price-based car elle prend en compte les générations futures. Les méthodes ADP[21] Ultimate Reserve, EDP[22] et ARP[23] sont exclues de cette recommandation car elles ne permettent pas de quantifier de façon satisfaisante la « perte de valeur ». Les méthodes EDP et ARP sont insuffisantes en ce qui concerne les critères Hypothèses et Interprétation des résultats (méthodes « insatisfaisantes » sur ces critères). Le développement d’EDP a nécessité un nombre relativement important d'hypothèses et de simplifications discutables, en ce qui concerne notamment
i) l’accessibilité des stocks en hibernation sur le long terme,
ii) l’utilisation de la croûte terrestre continentale comme proxy de la réserve ultimement extractible, et
iii) un certain nombre de contradictions dans les hypothèses faites pour modéliser l'ICV[24] et les FC[25].
Par ailleurs, dans l’approche ARP le Critère A (qui permet de définir si une ressource est accessible, ou non) est extrêmement discutable. L'utilisation de la concentration moyenne dans la croûte terrestre (posée comme seuil d’accessibilité de la ressource dans le futur) est une hypothèse pour laquelle le niveau de confiance est extrêmement faible.

Question : « Quantifier les problèmes potentiels d'accessibilité d'un système-produit liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques à court-terme (criticité) »

Approche recommandée : méthode GeoPolRisk
Niveau de recommandation : suggérée

L’approche GeoPolRisk est privilégiée par rapport à l’approche ESSENZ, car cette dernière n’atteint pas un niveau de satisfaction suffisant en ce qui concerne les sous-critères Logiciels, Compatibilité avec les bases de données d’ICV et Interprétation des résultats. A ce jour, uniquement une mise en œuvre en dehors du cadre des logiciels ACV classique est possible pour ESSENZ car le calcul d’impact n’est pas similaire à l’ACV. Par ailleurs, des données spécifiques à l'entreprise qui sortent du cadre classique des données d'ICV sont nécessaires. Les FC de GeoPolRisk sont en cours de finalisation (espérés à l’horizon fin 2022 – début 2023) et permettront d’appliquer la méthode relativement facilement.

Pistes de recherches futures

[19] Lost Potential Service Time.
[20] Material Flow Analysis.
[21] Abiotic Depletion Potential.
[22] Environmental Dissipation Potential.
[23] Abiotic Resource Project.
[24] Inventaires de Cycle de Vie.
[25] Facteurs de caractérisations.

Actuellement, les méthodes « dissipation » sont des méthodes on/off : une ressource est dissipée ou elle ne l'est pas. La dissipation est cependant plutôt une notion continue.

La valeur ajoutée sociétale d'une ressource est la différence entre la valeur d'usage d'une ressource et le coût sociétal (économique, environnemental et social) pour la rendre utilisable à partir de sa source initiale (par exemple, le minerai) ou de son lieu final (par exemple, les déchets). La valeur marchande (ou sa valeur à long terme lorsqu'elle est entièrement dissipée) est une limite inférieure de la valeur d'usage d'un matériau directement utilisable. Si le coût sociétal est supérieur à la valeur d'usage de la ressource, celle-ci est dissipée. Si la valeur d'usage est supérieure au coût sociétal, la ressource n'est pas dissipée. Il ne s'agit pas d'une fonction booléenne (on/off) mais plutôt d'une fonction continue de l'étendue de la dissipation ou de la non-dissipation.

La perte de valeur due à la dissipation est plafonnée par la valeur d'usage de la ressource car le coût sociétal pour rendre la ressource utilisable entraînerait un impact sociétal défavorable. Il existe un lien entre le coût sociétal pour rendre la ressource utilisable et la qualité, qui peut être considérée comme un terme générique englobant la qualité, la quantité, l'état chimique, etc. d'une ressource.

Cette approche d'évaluation de la dégradabilité de l'accessibilité permettrait de :

- développer l'approche de la dissipation, car elle devient une évaluation continue de la dissipation (coût sociétal du traitement pour revenir à une forme prête à l'emploi) au lieu d'une analyse on/off (il y a dissipation ou non) des méthodologies actuelles de « dissipation »
- tenir compte de l'importance (valeur ajoutée) du matériau car, en cas de perte définitive (dissipation), la perte est plafonnée à la valeur marchande du matériau
- tenir compte de la substituabilité puisque la valeur d'usage à long terme en prenant en compte les générations futures est prise en compte

La valeur ajoutée ou détruite du matériau par le produit au cours de son cycle de vie est la différence entre :

- le coût sociétal pour le rendre utilisable à partir de sa source d'origine (par exemple, un minerai)
- le coût sociétal pour la rendre utilisable à partir de son lieu final (par exemple, un déchet, une émission)

Notez que l'utilisation de la ressource peut créer de la valeur dans certains cas (par exemple, la bauxite transformée en Al réduit la dissipation car le coût sociétal de l'utilisation de l'Al métal post utilisation est inférieur au coût sociétal de l'utilisation de la bauxite).

En pratique, pour les ressources dissipées aujourd'hui, le coût sociétal est supérieur à la valeur d'usage et le perte de valeur est plafonnée par cette valeur d'usage. Par contre, pour les ressources non-dissipées, il faudrait modéliser le coût sociétal pour rendre ces ressources utilisables. Le coût économique est connu (du moins par les acteurs utilisant ces ressources) et les coûts environnementaux et sociaux peuvent être modélisés.

De plus, la notion d'occupation des ressources en utilisation n'est considérée par aucune méthode à l'heure actuelle. En particulier, Beylot et al. (2021)[26] discutent de ce sujet dans une section dédiée *(« 3.3.3 Occupation-in-use is not a form of dissipation »).* Les auteurs reconnaissent que l'occupation en utilisation pose un enjeu d'accessibilité des ressources pour des utilisateurs actuels et futurs. Mais dans le même temps, par définition de l'occupation en utilisation, les ressources « occupées » sont fonctionnelles pour des utilisateurs ; donc non « dissipées ».

[26] Beylot, A., et al. 2021. Mineral resource dissipation in life cycle inventories. Int J Life Cycle Assess 26, 497–510. https://doi.org/10.1007/s11367-021-01875-4

Il reste nécessaire de réfléchir au niveau de la modélisation de l'inventaire pour aborder ce sujet. Il pourra par exemple être envisagé d'aborder le sujet dans le contexte de la modélisation dynamique des ICV.

Annexe 1 : procédé de production du cobalt Ecoinvent v3.7.1

Cobalt production, GLO (Ecoinvent v3.7.1)				Reference product	
	Name	**Type**	**Unit**	**Undefined**	**Nickel class 1**
Output (reference products, by-products and wastes)	cobalt	allocatable product	kg	1	
	cobalt acetate	allocatable product	kg	0.00464	
	cobalt carbonate	allocatable product	kg	0.00688	
	cobalt hydroxide	allocatable product	kg	0.00542	
	cobalt oxide	allocatable product	kg	0.123	
	ammonia, anhydrous, liquid	allocatable product	kg	0.011	
	ammonium sulfate	allocatable product	kg	0.182	
	blast furnace sludge	Waste	kg	5.74	
	calcium carbonate, precipitated	allocatable product	kg	0.63	
	copper cake	allocatable product	kg	4.19	
	copper concentrate, sulfide ore	allocatable product	kg	37.9	
	copper, anode	allocatable product	kg	6.71	
	copper, cathode	allocatable product	kg	0.374	
	electricity, high voltage	allocatable product	kWh	1.84	
	electrolyte, copper-rich	allocatable product	kg	0.763	
	electrolyte, nickel-rich	allocatable product	m3	0.0758	
	ferronickel	allocatable product	kg	0.365	
	inert waste	Waste	kg	8.36E+02	
	leach residue from copper production	Waste	kg	15	
	nickel concentrate, 16% Ni	allocatable product	kg	0.0808	
	nickel smelter slag	Waste	kg	1.02E+02	
	nickel sulfate	allocatable product	kg	1.15	
	nickel, class 1	allocatable product	kg	5.98	1
	non-sulfidic overburden, off-site	Waste	kg	6.24E+02	
	refinery sludge	Waste	kg	0.757	
	spent solvent mixture	Waste	kg	8.58E-07	
	sulfidic tailings, generic	Waste	kg	1.67E+02	
	sulfur	allocatable product	kg	0.0683	
	sulfuric acid	allocatable product	kg	73.6	
	waste mineral oil	Waste	kg	0.00143	
	wastewater, average	Waste	m3	8.2	
	zinc sulfide	allocatable product	kg	0.065	
Input (Energy)	diesel, burned in building machine		MJ	78	4.7727
	diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW		MJ	13.7	0.83858
	electricity, medium voltage, cobalt industry		kWh	2730	166.98
Input (From Environment)	Aluminium, in ground		kg	9.94	0.60843
	Arsenic, in ground		kg	0.0243	0.0014879
	Calcium, in ground		kg	1.53	0.09374
	Chromium, in ground		kg	3.37	0.20601
	Cobalt, in ground		kg	1.13	0.069017
	Copper, in ground		kg	23.8	1.4574
	Gangue, in ground		kg	4.97E+02	30.419
	Gold, in ground		kg	7.29E-07	4.46E-08
	Iron, in ground		kg	3.35E+02	20.52
	Lead, in ground		kg	0.0243	0.0014879
	Magnesium, in ground		kg	15.7	0.95999
	Manganese, in ground		kg	1.82	0.11119
	Nickel, in ground		kg	12.9	0.79117
	Silicon, in ground		kg	61.2	3.7454
	Silver, in ground		kg	1.31E-05	8.04E-07
	Sulfur, in ground		kg	1.76E+02	10.756
	Water, lake		m3	0.215	0.013164
	Water, river		m3	0.28	0.017124
	Water, salt, ocean		m3	0.00209	0.00012792
	Water, unspecified natural origin		m3	1.13	0.069376
	Water, well, in ground		m3	0.0787	0.0048167

	Zinc, in ground		kg	0.0486	0.0029759

Annexe 2 : Table des facteurs de caractérisation disponibles pour chaque méthode par élément chimique

Eléments chimiques primordiaux			Facteur de caractérisation disponible par méthode								
Nom	Symbole	Nombre atomique	ADP EF	ADP 2020	EDP	ARP & EDP	ADR et LPST	FW Loss	GeoPolRisk (en cours de finalisation)	Essenz	JRC Price based
Hydrogen	H	1	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
Helium	He	2	non	non	non	non	non	oui	non	non	oui
Lithium	Li	3	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Beryllium	Be	4	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Boron	B	5	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Carbon	C	6	non	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non
Nitrogen	N	7	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	oui
Oxygen	O	8	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
Fluorine	F	9	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
Neon	Ne	10	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Sodium	Na	11	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non
Magnesium	Mg	12	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Aluminium	Al	13	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Silicon	Si	14	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Phosphorus	P	15	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	oui
Sulfur	S	16	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	oui
Chlorine	Cl	17	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
Argon	Ar	18	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Potassium	K	19	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	oui
Calcium	Ca	20	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non
Scandium	Sc	21	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Titanium	Ti	22	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Vanadium	V	23	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Chromium	Cr	24	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Manganese	Mn	25	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Iron	Fe	26	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Cobalt	Co	27	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Nickel	Ni	28	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Copper	Cu	29	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Zinc	Zn	30	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui
Gallium	Ga	31	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Germanium	Ge	32	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Arsenic	As	33	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Selenium	Se	34	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Bromine	Br	35	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	oui
Krypton	Kr	36	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Rubidium	Rb	37	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Strontium	Sr	38	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Yttrium	Y	39	oui	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Zirconium	Zr	40	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	oui

Niobium	Nb	41	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Molybdenum	Mo	42	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Ruthenium	Ru	44	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Rhodium	Rh	45	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Palladium	Pd	46	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non
Silver	Ag	47	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Cadmium	Cd	48	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Indium	In	49	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Tin	Sn	50	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Antimony	Sb	51	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Tellurium	Te	52	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Iodine	I	53	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	oui
Xenon	Xe	54	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Cesium	Cs	55	non	oui	oui	oui	non	oui	non	non	oui
Barium	Ba	56	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non
Lanthanum	La	57	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Cerium	Ce	58	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Praseodymium	Pr	59	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Neodymium	Nd	60	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Samarium	Sm	62	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Europium	Eu	63	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Gadolinium	Gd	64	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Terbium	Tb	65	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Dysprosium	Dy	66	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Holmium	Ho	67	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Erbium	Er	68	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Thulium	Tm	69	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Ytterbium	Yb	70	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Lutetium	Lu	71	non	oui	oui	oui	oui	oui	Oui via Rare earth	oui via REE	oui via REE
Hafnium	Hf	72	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Tantalum	Ta	73	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Tungsten	W	74	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Rhenium	Re	75	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Osmium	Os	76	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Iridium	Ir	77	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Platinum	Pt	78	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non
Gold	Au	79	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Mercury	Hg	80	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Thallium	Tl	81	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Lead	Pb	82	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui
Bismuth	Bi	83	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui

Thorium	Th	90	non	non	non	non	non	oui	non	non	oui
Uranium	U	92	non	oui	oui	oui	non	non	non	non	non



Annexe 3 : Table des facteurs de caractérisation disponibles pour les ressources minérales hors éléments chimiques.

En jaune sont indiqués les éléments dont une correspondance dans les flux d'extraction n'a pas pu être identifiée.

Flux de ressource extraite	FC Future Welfare Loss	FC JRC price-based	FC GeoPolRisk
asbestos (white)	asbestos (white)		Asbestos
baryte	baryte	Barite	Barytes
bauxite	bauxite	Bauxite	
calcium carbonate	calcium carbonate	Lime	
		Cement	
carbon	carbon	N. Graphite	Graphite
		Industrial Diamond	
cinnabar	cinnabar		
clay	clay	Clays	
cyanite		Kyanite	
diatomite	diatomite	Diatomite	
feldspar	feldspar	Feldspar	
fluorspar	fluorspar	Fluorspar	
garnet, industrial	garnet, industrial	Garnet	
gravel	gravel	Sand & Gravel	
gypsum	gypsum	Gypsum	
magnesite	magnesite		Magnesite
		Mg comp.	
natural pumice	natural pumice	Pumice	
perlite	perlite	Perlite	
	potassium chloride		
quartz sand		Quartz	
raw pumice	raw pumice	Pumice	
sand		Sand & Gravel	
		Sand Ind.	
		Ti dioxide	
sodium carbonate	sodium carbonate	Soda	
sodium chloride		Salt	
sodium sulfate	sodium sulfate	Sodium S.	
stone	stone	Stone	
		Stone cr.	
talc	talc	Talc	
		Wollastonite	
vermiculite		Vermiculite	
		Fe ore	