

Etude N°2024-01

ACV et matériaux critiques

Rapport Final

Février 2025

Dieuwertje SCHRIJVERS
Emilie GUILVERT
Anish KOYAMPARAMBATH
Guido SONNEMANN
Frédéric LAI
Naeem ADIBI

WeLOOP
WeLOOP
ISM-CyVi
ISM-CyVi
BRGM
WeLOOP

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, ACV et matériaux critiques, 2025, 195, n°2024-01
- 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.

Pour la synthèse en anglais :

- SCORE LCA is an association that has been created to financially support collaborative research on LCA and related topics. It aims to promote and organize cooperation between companies, institutional and scientists in order to support the evolution of LCA methods and its practical implementation at European and international level.
- This work has been supported by ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) www.ademe.fr
- The views and recommendations expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily reflect, unless otherwise stated, the views of all members of SCORE LCA.
- The information and conclusions presented in this document were established on the basis of scientific and technical data and regulatory and normative framework in force at the date of the publication of documents.

RESUME

Les matières premières critiques occupent une place croissante dans les réglementations et les stratégies décisionnelles, tant au niveau politique européen qu'au sein des entreprises. Les impacts environnementaux associés à leur production, évalués à travers l'analyse du cycle de vie (ACV), peuvent constituer un levier important pour l'évaluation de leur criticité. Inversement, en ACV, de nombreuses méthodes permettent d'évaluer les impacts liés à l'utilisation des ressources, incluant celles axées sur la dissipation et les risques d'approvisionnement à court terme. Ce projet vise à intégrer davantage la notion de criticité dans les études ACV tout en utilisant les résultats de l'ACV pour enrichir l'analyse environnementale dans les évaluations de criticité, dans le but d'améliorer la prise de décisions stratégiques. L'analyse de l'état de l'art révèle que les méthodes d'évaluation des impacts des ressources, qu'elles concernent la criticité ou l'ACV, partagent un objectif commun : préserver la valeur (socio-)économique des ressources pour les parties prenantes. Ces approches apparaissent ainsi complémentaires dans une perspective de durabilité économique, bien qu'un certain chevauchement puisse exister selon l'objectif et le périmètre de l'étude. Les facteurs de caractérisation en ACV et les indicateurs de criticité montrent généralement des valeurs élevées pour les métaux précieux (or, platinoïdes) et les matériaux produits principalement en tant que sous-produits, en raison de leur risque d'approvisionnement élevé, de leurs faibles impacts environnementaux alloués et de leur forte susceptibilité à la dissipation. L'augmentation des taux de recyclage, réduisant les pertes et la dissipation, peut modifier significativement les résultats pour l'ensemble des approches. Enfin, sept études de cas potentielles ont été identifiées pour explorer la convergence entre l'ACV et la criticité, parmi lesquelles deux seront analysées en détail dans le cadre de ce projet.

MOTS CLES

Analyse du Cycle de Vie, Criticité des matières premières, Ressources, Prise de décision, Risques liés à l'approvisionnement, Durabilité économique

SUMMARY

Critical raw materials are increasingly being taken into account by regulations and strategic decisions, both at (European) political level and by individual companies. Environmental impacts, for example assessed by life cycle assessment, have played a role in the evaluation of critical raw materials in various criticality assessment studies, and from various perspectives. Conversely, various methods are available to assess the sustainability of resource use in LCA, including methods that focus on dissipation and short-term supply risks. This project therefore aims to achieve a better consideration of criticality within LCA studies and thus allow LCAs to contribute to better taking into account the environmental dimension in criticality analyses, in order to better inform strategic decision-making. The analysis of the state-of-the-art shows that the various methods to assess resource use, both in criticality assessment and in LCA, aim to safeguard the (socio-)economic value obtained by specific stakeholders. This makes the methods complementary in an economic sustainability point of view. There may be overlapping interests between resource impact methods and criticality assessment methods, but only in specific study scopes. Assessments following both approaches are strongly affected by precious metals (e.g., gold and platinum group metals) as well as raw materials that are mostly supplied as by-products, due to their relatively high supply risk, their low allocated environmental impacts, and their high risk to be dissipated. Furthermore, increasing recycling rates (hence, reducing losses or dissipation) may affect outcomes of all assessment methods. Seven potential case study topics have been identified that combine the perspectives of LCA and critical raw materials. Two of those will be assessed in two case studies.

KEY WORDS

Life Cycle Assessment, Raw Material Criticality, Resources, Decision-making, Supply risks, Economic sustainability

Table des matières

Table des matières	4
Table des tableaux.....	6
Table des figures	8
Glossaire.....	12
Acronymes.....	13
1. Introduction	14
1.1. Contexte	14
1.2. Objectifs du projet.....	15
1.3. Plan de travail	16
1.3.1. Étape 1 : État de l'art	17
1.3.2. Étape 2 : Synthèse des liens entre la criticité et l'ACV.....	17
1.3.3. Étape 3 : Evaluation des études de cas	18
1.3.4. Étape 4 : Recommandations	18
1.3.5. Étape 5 : Communication des résultats.....	19
2. État de l'art.....	20
2.1. Perspective « criticité ».....	20
2.1.1. Définition des matériaux critiques et stratégiques	20
2.1.2. Cadres réglementaires pertinents	26
2.1.3. Rôle des impacts environnementaux dans les évaluations de criticité	30
2.1.4. Outil d'aide à la décision de l'IRTC.....	31
2.2. Perspective « ACV »	36
2.2.1. Impacts environnementaux de la consommation des ressources	36
2.2.2. L'Aire de protection « ressources » en ACV	39
2.3. Synthèse des perspectives liées à la criticité, les ressources et l'ACV	47
2.3.1. Objectifs et champs d'application des méthodes	47
2.3.2. Indicateurs utilisés dans les méthodes d'évaluation de la criticité	58
2.4. Identification des principaux flux.....	61
2.4.1. Analyse pour les méthodes d'évaluation d'impact des ressources	61
2.4.2. Analyse pour les méthodes de la criticité	65
3. Synthèse des liens entre la criticité et l'ACV	71
3.1. Cartographie des liens.....	71
3.1.1. Sujets de sauvegarde des méthodes d'évaluation.....	71
3.1.2. L'utilisation conjoint des évaluations de criticité et l'ACV pour améliorer la prise de décision stratégique par les décideurs politiques et les entreprises	75
3.1.3. Utilisation des données ACV dans les études de criticité	80
3.2. Formulation des cas d'application	80
3.2.1. Evaluation des matériaux d'intérêt	80
3.2.2. Formulation des cas d'application	82

3.2.3.	Disponibilité des données en interne.....	85
4.	Evaluation des études de cas.....	88
4.1.	Evaluation environnementale de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers » - Cas de l'hydroxyde de lithium.....	88
4.1.1.	Analyse Environnementale : ACV cradle-to-gate	88
4.1.2.	Analyse de criticité.....	94
4.2.	Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et les impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique.....	94
4.2.1.	Description des batteries étudiées	94
4.2.2.	Evaluation Environnementale	98
4.2.3.	Application du cadre IRTC.....	122
4.2.4.	Application de la méthode GeoPolRisk	151
4.2.5.	Application of ESSENZ.....	161
4.3.	Analyse de Sensibilité	166
4.3.1.	Evaluation de la capacité de l'Europe à satisfaire la demande en lithium et cobalt recyclés.....	167
4.3.2.	Résumé de la capacité européenne à respecter les objectifs de recyclage du CRMA.....	170
4.3.3.	Conclusion	171
5.	Synthèse des études de cas et Conclusion	175
5.1.	Synthèse des études de cas	175
5.1.1.	Evaluation environnementale de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers ».....	175
5.1.2.	Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et les impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique.....	175
5.1.3.	Analyse de sensibilité	177
5.2.	Limites liées à l'utilisation des inventaires ACV pour l'évaluation des ressources et de la criticité.....	177
5.3.	Distinction entre les méthodes de criticité et les méthodes d'impact des ressources en ACV.....	180
5.4.	Utilisation conjointe des méthodes d'évaluation de la criticité et d'évaluation des impacts de la l'utilisation des ressources en ACV.....	183
6.	Recommandations.....	185
6.1.	Recommandations sur l'évaluation et la prise de décisions à court-terme - Intégrer une dimension environnementale dans la criticité	185
6.1.1.	Audiences des études de criticité et d'analyses environnementales	185
6.1.2.	Réaliser une évaluation de criticité en utilisant la méthode IRTC pour aider la prise de décision.....	186
6.1.3.	Réaliser une évaluation de criticité en utilisant la méthode GeoPolRisk pour aider la prise de décision	187
6.1.4.	Comparaison des méthodes IRTC, GeoPolRisk et ESSENZ	188

6.1.5. Réaliser une Analyse du Cycle de Vie (ACV) Environnementale pour aider la prise de décisions sur l'utilisation des matières premières	189
6.2. Recommandations sur l'évaluation pour le moyen/long terme des matières premières - Intégrer la criticité dans l'ACV.....	190
6.2.1. ADP (Abiotic Depletion Potential, ou Potentiel d'Épuisement des Ressources Abiotiques), recommandé par la méthodologie EF 3.1	190
6.2.2. L'usage des Inventaires d'ACV	191
6.2.3. Développement de la méthodologie et des données pour la méthode IRTC	192
6.2.4. Développement de la méthodologie et des données pour la méthode GeoPolRisk ...	192
6.2.5. Développement de la méthodologie et des données pour la méthode ESSENZ Plus	193
6.3. Recommandations sur l'atténuation des risques.....	193
7. Références	197
Annexe 1.....	207
Annexe 2.....	213
Annexe 3.....	216
Annexe 4.....	225
Annexe 5.....	228
Annexe 6.....	233
Annexe 7.....	240
Annexe 8.....	244

Table des tableaux

Tableau 1 Indicateurs de risque d'approvisionnement pris en compte dans l'approche OFREMI (données préliminaires) (Boubault et al., 2023)	21
Tableau 2 Indicateurs de vulnérabilité de l'approche (préliminaire) OFREMI (Boubault et al., 2023) ..	22
Tableau 3 Indicateurs de capacité d'adaptation de l'approche OFREMI (préliminaire) (Boubault et al., 2023).....	22
Tableau 4 Identification des matières premières comme critiques et/ou stratégiques par la Commission Européenne (European Commission, 2023a; European Parliament and Council of the European Union, 2024).....	24
Tableau 5 Analyse de la méthode EDP (adapté de l'analyse de Beylot et al., 2024).....	47
Tableau 6 Analyse des méthodes ADR/LPST	48
Tableau 7 Analyse des méthodes JRC-LCI couplée à JRC price-based (adapté de l'analyse de Santillán-Saldivar et al., 2023, Tableau 4, et Beylot et al., 2024)	49
Tableau 8 Analyse de la méthode ARP (adapté de l'analyse de Beylot et al., 2024 et d'Owsianiak et al., 2022).....	49
Tableau 9 Analyse de la méthode EVDP (adapté du tableau 4 de Santillán-Saldivar et al., 2023)	50
Tableau 10 Analyse de la méthode CTI-LCIA (Dewulf et al., 2024)	50
Tableau 11 Analyse de la méthode ADP _{ultimate reserves} (adapté de de Caemel et al., 2022 et van Oers et al., 2020a).....	51
Tableau 12 Analyse de la méthode Future Welfare Loss (adapté de de Caemel et al., 2022 et Huppertz et al., 2019).....	52
Tableau 13 Analyse de la méthode GeoPolRisk (Gemechu et al., 2017; Santillán-Saldivar et al., 2022)	52
Tableau 14 Analyse de la méthode ESSENZ (Bach et al., 2016).....	53
Tableau 15 Analyse de la méthode CS-ESSENZ (Yavor et al., 2021)	54

Tableau 16 Analyse de la méthode SPOTTER (Berr et al., 2022).....	55
Tableau 17 Analyse de la méthode IRTC (IRTC, 2023), (Schrijvers et al. (in preparation)).....	56
Tableau 18 Disponibilité des données sur les matières premières au sein du consortium	86
Tableau 19 Disponibilité des données technologiques au sein du consortium.....	87
Tableau 20 Impacts environnementaux de la production d'1 kg de LiOH.H ₂ O grade batterie pour les trois routes de production considérées, selon les 16 catégories d'impacts de la méthode EF3.1	90
Tableau 21 Comparaison des 5 catégories d'impacts les plus impactantes (représentant 80% des impacts) pour les 3 routes, celles en vert sont communes à toutes les routes de production.....	92
Tableau 22 Interprétation des points chauds environnementaux selon les routes de production et étapes les plus impactantes pour les principales catégories d'impacts PEF identifiées	92
Tableau 23 Facteurs de caractérisation des ressources de l'indicateur "resource use, minerals and metals" (ADP _{ultimate reserves}) de la méthode EF 3.1	98
Tableau 24 Processus les plus impactant pour le score unique, l'indicateur « climate change » et l'indicateur « resource use, minerals and metals » pour la batterie LFP, les procédés en orange sont communs entre score unique et utilisation de minéraux et métaux et ceux en bleu entre score unique et changement climatique.....	100
Tableau 25 Processus les plus impactant pour le score unique, l'indicateur « climate change » et l'indicateur « resource use, minerals and metals » pour la batterie NMC811, les procédés en orange sont communs entre score unique et utilisation de minéraux et métaux et ceux en bleu entre score unique et changement climatique.....	101
Tableau 26 Contribution des ressources extraites du sol des deux batteries à l'indicateur "resource use, minerals and fossils", en gras sont indiqués les contributions supérieures à 5% pour les deux batteries	101
Tableau 27 Contribution des ressources de la cellule LFP à l'indicateur "resource use, minerals and metals"	105
Tableau 28 Contribution des ressources à l'indicateur "resource use, minerals and metals" pour la cathode LFP	107
Tableau 29 Contribution des ressources à l'indicateur "resource use, minerals and fossils" pour une cellule NMC811	110
Tableau 30 contribution des éléments à l'indicateur utilisation des ressources en minéraux et métaux pour la cathode NMC811.....	112
Tableau 31 Masses de composants pour la contribution à l'indicateur choisi	113
Tableau 32 Contributions des matières premières à l'indicateur "resource use, minerals and metals" des composants communs pour la batterie LFP, tronqués à 0.01%	113
Tableau 33 Contributions des matières premières à l'indicateur "resource use, minerals and metals" des composants communs pour la batterie NMC811, tronqués à 0.01%.....	114
Tableau 34 Contribution des éléments à l'indicateur ADR, en pourcentage et tronqué à 0.1%.....	117
Tableau 35 Contribution des éléments à l'indicateur PVLIR, en pourcentage et tronqué à 0.1%	117
Tableau 36 Contribution en pourcentage des 10 éléments les plus impactant pour chaque indicateur pour la batterie LFP, les éléments en vert sont dans tous les indicateurs, ceux en jaune dans 3 indicateurs sur 4 et ceux en orange dans 2 indicateurs sur 4.....	119
Tableau 37 Contribution en pourcentage des 10 éléments les plus contributifs pour chaque indicateur pour la batterie NMC811, les éléments en vert sont dans tous les indicateurs, ceux en jaune dans 3 indicateurs sur 4 et ceux en orange dans 2 indicateurs sur 4.....	120
Tableau 38 Aperçu des indicateurs et des sources de données inclus dans le modèle IRTC	125
Tableau 39 Pourcentage de matières premières évaluées identifiées comme « critiques » sur la base de différentes valeurs seuils	129
Tableau 40 Nombre d'indicateurs pour lesquels chaque matière première utilisée dans les batteries NMC811 ou LFP est considérée comme « critique » via l'outil IRTC et représentativité du score pour l'évaluation des matériaux.	130
Tableau 41 Indicateurs pour lesquels les substances (avec une note de criticité pour le plus grand nombre d'indicateurs) sont considérées comme « critiques » en se basant sur une valeur de seuil de 33 %.....	134
Tableau 42 Lien entre les indicateurs de criticité et les risques pour l'entreprise	139
Tableau 43 Activités incluses dans le processus de production de batteries (NMC811 and LFP).....	155

Tableau 44 Valeurs du Risque Géopolitique d'Approvisionnement pour la production de NMC811 et LFP du point de vue de la France et de l'UE.	156
Tableau 45 Calculs et Hypothèses des quantités de batteries Lithium - ion disponibles au recyclage sur la période 2005-2050 avec les hypothèses prises en compte, Projet Batters	167
Tableau 46 Quantités estimées des déchets (scraps) de production européenne de batteries lithium-ion sur la période 2005-2050, projet Batters	168
Tableau 47 Marché européens des technologies de batteries de véhicules électriques utilisant des batterie Lithium-ion sur l'intervalle 2010-2035, projet Batters	168
Tableau 48 Mix des scraps de batteries européennes sur la période 2025-2050, projet Batters.....	168
Tableau 49 Proportion de lithium et cobalt présents dans les batteries et déchets de batteries Lithium-ion selon la chimie	168
Tableau 50 Quantités estimées de lithium (en tonnes) et cobalts disponibles au recyclage sur la période 2025-2050.....	169
Tableau 51 Matériaux pouvant être recyclés en Europe sur la période 2020-2050 en tonnes	169
Tableau 52 Marché européens des technologies de batteries de véhicules électriques utilisant des batterie Lithium-ion sur l'intervalle 2025-2050, projet Batters	169
Tableau 53 Masses estimées de cobalt et lithium nécessaire à la production des batteries sur la période 2025-2050, projet Batters	169
Tableau 54 Estimation de la demande en cobalt et lithium recyclés sur la période 2025-2050 pour la production de batteries	170
Tableau 55 Part de la demande en matériaux recyclés que l'Europe pourrait satisfaire sur la période 2025-2025.....	170
Tableau 56 Analyse de l'inventaire des batteries NMC811 et LFP, en se concentrant sur les matériaux extraits du sol.....	207
Tableau 57 Couverture d'une liste agrégée de matières premières (basée sur de multiples méthodes d'évaluation des ressources telles que présentées dans ce rapport) par l'outil IRTC	209
Tableau 58 Part des matières premières du Tableau 57 notées dans chaque indicateur de l'outil IRTC (triées par ordre décroissant)	212
Tableau 59 Vue d'ensemble des indicateurs tels qu'ils sont mis en œuvre dans l'outil IRTC (IRTC, 2023) (Schrijvers et al., <i>in preparation</i>).....	216
Tableau 60 Points chauds de la criticité par matière première évalués via l'outil IRTC	225
Tableau 61 Nombre d'indicateurs pour lesquels chaque matière première utilisée dans le NMC811 est considérée comme « critique » via l'outil IRTC, et représentativité du score pour l'évaluation des matériaux, classés par substance associée à la batterie en plus grande quantité.	228
Tableau 62 Nombre d'indicateurs pour lesquels chaque matière première utilisée dans les LFP est considérée comme « critique » via l'outil IRTC, et représentativité du score pour l'évaluation des matériaux, classés par substance utilisée en plus grande quantité.	230
Tableau 63 Description et classification des mesures d'atténuation telles qu'elles figurent dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)(Schrijvers et al. en préparation)	233
Tableau 64 Facteurs de Caractérisation de la méthode ESSENZ Plus pour les indicateurs de criticité (disponibilité socioéconomique/ risque d'approvisionnement)	240
Tableau 65 Facteurs de Caractérisation de la méthode ESSENZ+ pour les indicateurs d'acceptation sociétale.....	242
Tableau 66 Résultats des calculs de l'étude ESSENZ+ pour la batterie NMC811, les éléments en orange sont les éléments les plus critiques avec cette méthode	244
Tableau 67 Tableau de résultats de l'étude ESSENZ+ pour la batterie LFP, les éléments en orange sont les éléments les plus critiques avec cette méthode	248

Table des figures

Figure 1 Aperçu de la distinction et du croisement entre les évaluations de la criticité des matières premières et l'ACV	15
Figure 2 Visualisation de l'objectif de cette étude	16
Figure 3 Synthétique de la méthodologie	16

Figure 4 Résultats de l'évaluation de la criticité de l'UE 2023 (Commission Européenne, 2023)	23
Figure 5 Fréquence d'apparition dans les évaluations de criticité et la détermination de la criticité (élevée, moyenne ou faible) des matériaux (Schrijvers et al., 2020b)	25
Figure 6 Mise en place d'une chaîne de cause à effet pour l'évaluation de la criticité des matières premières au niveau de l'entreprise dans le cadre du projet IRTC (Schrijvers et al., à paraître)	32
Figure 7 Relier les aspects liés aux risques d'approvisionnement aux risques au niveau de l'entreprise par le biais de scénarios au sein du projet IRTC (Schrijvers et al., à paraître). Les cases grises ne sont pas quantifiées dans l'outil d'aide à la décision de l'IRTC.....	34
Figure 8 Relier les aspects liés aux risques d'approvisionnement et les mesures d'atténuation aux risques au niveau de l'entreprise par le biais de scénarios au sein du projet IRTC (Schrijvers et al. à paraître). Les cases grises ne sont pas quantifiées dans l'outil d'aide à la décision de l'IRTC.	35
Figure 9 Voies d'impacts concernant l'utilisation de ressources naturelles identifiées par la Life Cycle Initiative dans le cadre des travaux du GLAM3 (travaux en cours) (Motoshita et al., 2024)	41
Figure 10 Voies d'impact potentiels liés à l'utilisation des ressources minérales et perspectives culturelles auxquelles ils sont les plus pertinents (Charpentier Poncelet et al., 2022a)	42
Figure 11 (Interprétation des) mécanismes de cause à effet pris en compte dans les méthodes d'évaluation de la criticité, et indicateurs associés. Chaque boîte est étiquetée selon la méthode qui la considère. Bleu = IRTC, Rose = CS-ESSENZ, Violet = GeoPolRisk, Jaune = SPOTTER.	59
Figure 12 (Interprétation des) mécanismes de cause à effet pris en compte dans les méthodes d'évaluation de la criticité, et indicateurs associés. Chaque boîte est étiquetée selon la méthode qui la considère. Bleu = IRTC, Rose = CS-ESSENZ, Violet = GeoPolRisk, Jaune = SPOTTER.	60
Figure 13 (partie A) Valeurs des facteurs de caractérisation normalisés pour une sélection de métaux. Les FCs d'ADP2015 et EDP sont les mêmes ; cependant, ces premiers sont appliqués aux flux d'extraction alors que ces seconds sont appliqués aux flux d'émissions. Les FCs de la méthode EVDP sont indiqués uniquement pour deux puits environnementaux : l'eau et les sites d'enfouissement (« landfills »). Les facteurs de caractérisation de la méthode ARP ne sont pas indiqués pour éviter la redondance avec EDP (voir description de la méthode dans le présent rapport, et une description détaillée dans le rapport SCORELCA n° 2020-05). La partie droite de la figure permet de visualiser les facteurs de caractérisation ayant une valeur normalisée inférieure à 0,2.....	63
Figure 14 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières à la fois critiques et stratégiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024) (Figure 1/2). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO ₂	67
Figure 15 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières à la fois critiques et stratégiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024) (Figure 2/2). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO ₂	68
Figure 16 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières critiques mais non stratégiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO ₂	69
Figure 17 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières non critiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO ₂	70
Figure 18 Vue d'ensemble schématique du champ d'application des méthodes orientées ressources. ACVC = Analyse du cycle de vie conséquentielle, ACVA = Analyse du cycle de vie attributionnelle. .	74
Figure 19 Mécanisme de cause à effet sous-jacent des 4 perspectives concernant les impacts environnementaux dans l'évaluation de la criticité des matières premières, leur classification en « outside-in » ou « inside-out », et l'approche ACV correspondante, adaptée de (D. Schrijvers et al., 2021b).....	76
Figure 20 Illustration de la complémentarité de l'ACVA et de l'ACVC pour l'évaluation des impacts environnementaux (D. Schrijvers et al., 2021a)	76
Figure 21 Comparaison des facteurs de caractérisation normalisés pour 9 méthodes d'évaluation des impacts de l'utilisation de ressources, et une sélection d'indicateurs liés à l'évaluation de la criticité. Afin d'améliorer la lisibilité des valeurs, une échelle logarithmique est appliquée à l'ensemble des méthodes	

d'évaluation des impacts pour l'ACV, hormis LPST100 midpoint. Méthodes: ADP=abiotic depletion potential, EDP= environmental dissipation potential, LPST100 = lost potential service time à l'horizon 100 ans, ADR=average dissipation rate, FWL=future welfare loss, EVDP= economic value dissipation potential, JRC price-based= Joint Research Centre price-based. Indicateurs utilisés dans les approches de criticité : HHI=Herfindahl-Hirschmann index et %produit comme co-produit.	81
Figure 22 Frontières du système considérées pour le cas d'étude Li, avec focus sur la production de LiOH.H ₂ O grade batterie – Tiré de International Lithium Association (2024)	89
Figure 23 Comparaison des impacts environnementaux des trois routes de production étudiées, selon les 16 catégories d'impacts de la méthode EF3.1. Les impacts sont normalisés aux impacts de la route de Greenbushes.	91
Figure 24 Comparaison des impacts des 3 routes de production en score unique	92
Figure 25 Diagramme de flux des composants et matières premières utilisés dans la production d'une batterie LFP	96
Figure 26 Diagramme de flux des composants et matières premières utilisés dans la production d'une batterie NMC811	97
Figure 27 comparaison en score unique des deux batteries étudiées	99
Figure 28 Comparaison des impacts pour batteries LFP et NMC811	100
Figure 29 Analyse de points chauds d'une batterie LFP entière	104
Figure 30 Analyses de points chauds d'une cellule de batterie LFP	105
Figure 31 Analyse de points chauds pour la cathode LFP	106
Figure 32 Analyse de points chauds pour la production de matériau active de cathode LFP en production en solution (50% de la production)	107
Figure 33 Analyse de points chauds pour la production de matériau active de cathode LFP en production hydrothermales (50% de la production)	107
Figure 34 Analyse de points chauds d'une batterie NMC811	109
Figure 35 Analyse de points chauds d'une cellule NMC811	109
Figure 36 Analyse de points chauds pour la production de cathode NMC811	111
Figure 37 Analyse de points chauds pour la production d'hydroxyde de NMC811	111
Figure 38 Analyse de points chauds pour la production d'hydroxyde de NMC811	112
Figure 39: Taux globaux de déplétion et de dissipation pour 23 métaux collectés par ecosystem. Les valeurs affichées sont normalisées avec les taux maximaux observés pour chacun d'eux (taux de déplétion maximal (antimoine) : 7,40E-08 ; taux de dissipation maximal (Charpentier et al., 2022) ..	115
Figure 40 Résultats de l'analyses des deux batteries avec la méthode dissipation des ressources, avec les valeurs maximales apportées à 0	116
Figure 41 comparaison des résultats des méthodes EF3.1, dissipation et Recipe 2016 Midpoint (H) avec la plus grande valeur reportée à 100%	119
Figure 42 Comparaison des impacts des deux batteries avec tous les indicateurs avec la plus grande valeur reportée à 100%	122
Figure 43 Orientation étape par étape pour la conception et la communication d'une évaluation de criticité, avec des exemples de choix méthodologiques potentiels (Helbig et al., 2021)	123
Figure 44 Attribution des scores des indicateurs par matière première dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)	127
Figure 45 Aperçu des matières premières notées pour un indicateur spécifique (ici, l'augmentation prévue de la demande dans les technologies énergétiques entre 2020-2050) dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)	128
Figure 46 Capture d'écran de l'« évaluation spécifique » du cobalt, indiquant les points chauds dans la chaîne de valeur du cobalt, dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)	141
Figure 47 Mesures d'atténuation pertinentes pour différents types de risques, pouvant soit prévenir une perturbation de l'approvisionnement, soit empêcher une entreprise de subir des dommages dus à une telle perturbation (Schrijvers et al., article en préparation)	143
Figure 48 Dépendance des flux intermédiaires pour la production de la batterie NMC811 sur une sélection de matières premières. Les flux intermédiaires d'électricité sont exclus de l'analyse	145
Figure 49 Dépendance des flux intermédiaires pour la production de la batterie LFP sur une sélection de matières premières. Les flux intermédiaires d'électricité sont exclus de l'analyse.	146
Figure 50 Diagramme des flux de l'utilisation du cobalt dans les batteries LFP (1/2)	147

Figure 51 Diagramme des flux de l'utilisation du cobalt dans les batteries LFP (2/2)	147
Figure 52 Diagramme des flux de l'utilisation du tantale dans les batteries NMC811	149
Figure 53 Aperçu du cadre méthodologique GeoPolRisk (Koyamparambath et al., 2024)	152
Figure 54 Potentiel de Risque D'approvisionnement Géopolitique (les facteurs de caractérisation pour l'indicateur de Risque D'approvisionnement Géopolitique) pour la France et l'Union européenne, basé sur les données de 2022.	154
Figure 55 Contribution des différentes activités à l'indicateur de Risque Géopolitique d'Approvisionnement	157
Figure 56 Contribution des différentes matières premières au Risque Géopolitique d'Approvisionnement des batteries NMC et LFP pour l'UE et la France	158
Figure 57 Contribution des différentes matières premières au Risque Géopolitique d'Approvisionnement des batteries NMC et LFP pour l'UE et la France, hors matières premières énergétiques	159
Figure 58 Différences dans le facteur de caractérisation de l'indicateur de Risque Géopolitique d'Approvisionnement et des composantes de la méthode GeoPolRisk (risque d'importation et prix). Les valeurs représentent la différence entre la France et l'UE ; les barres orientées vers la gauche indiquent des valeurs supérieures pour l'UE, tandis que celles orientées vers la droite indiquent des valeurs supérieures pour la France. Les pourcentages indiquent l'ampleur de ces différences	160
Figure 59 Aperçu des dimensions et catégories prises en compte dans ESSENZ+ avec les catégories mises à jour entre ESSENZ et ESSENZ+ encadrés en rouge (Bach et al., 2016)	162
Figure 60 Résultats de l'analyse de la disponibilité socio-économique et de l'acceptabilité sociétale des ressources utilisées dans la batterie NMC811	164
Figure 61 Résultats de l'analyse de la disponibilité socio-économique et de l'acceptabilité sociétale des ressources utilisées dans la batterie LFP	165
Figure 62 Comparaison des batteries NMC811 et LFP basée sur les résultats de criticité socio-économique et d'acceptabilité sociétale.	166
Figure 63 Satisfaction de demande de production de lithium recyclé en Europe	170
Figure 64 Satisfaction de la demande de production de cobalt recyclé en Europe	171
Figure 65 Catégories affectées concernant les produits recyclés, les catégories ajustées dans la méthode ESSENZ+ sont marquées en rouge et celle en grises sont assumées sans importance pour les produits recyclés. (Pelzeter et al., 2022)	173
Figure 66 Comparaison des résultats d'évaluation d'utilisation des ressources avec les méthodes de criticité pour les deux batteries	176
Figure 67 Exemple d'allocation économique du cuivre et du tellure (basée sur la valeur économique (prix hypothétiques du Tellure : Environ 77,71 \$ par kilogramme et Cuivre : Environ 8,85 \$ par kilogramme) provenant du minerai sulfuré d'entrée vers les produits finaux	178
Figure 68 Exemple d'allocation des composants du minerai de cobalt entre les deux co-produits, sulfate de nickel et sulfate de cobalt, basée sur les valeurs économiques respectives de Cobalt et Nickel (60 % pour le sulfate de cobalt et 40 % pour le sulfate de nickel).	179
Figure 69 Opposition entre les approches « outside-in » de la criticité, et « inside-out » des méthodes d'évaluation des impacts de la consommation de ressources en ACV.	180
Figure 70 Synthèse des chemins d'impact menant à un impact sur l'aire de protection Ressources en ACV	182
Figure 71 Effets potentiels des stratégies d'économie circulaire sur les résultats d'une ACV et des scores d'impacts d'indicateurs ressources. ACV-A = ACV attributionnelle, ACV-C = ACV conséquentielle.	196
Figure 72 Analyse de points chauds pour l'emballage de la batterie	213
Figure 73 Analyse de points chauds des composants électroniques	213
Figure 74 Analyse de points chauds pour le système de gestion de la batterie	214
Figure 75 Analyse de points chauds pour le système d'interface	214
Figure 76 Analyse de points chauds du système de courant faible	215

Glossaire

Terme	Définition
ACV attributionnelle	Approche ACV qui vise à identifier la part des charges globales qui peut être associée à un produit (et à son cycle de vie)
ACV conséquentielle	Approche ACV qui vise à identifier les impacts environnementaux causés par une décision, qui se manifestent souvent par une demande accrue pour un produit
Matières premières critiques	Matière première dont la probabilité que l'approvisionnement soit perturbé (souvent appelée « risque d'approvisionnement ») et la vulnérabilité d'un système spécifique à une telle perturbation (également appelée « importance ») sont relativement élevées
Matières premières stratégiques	Matière première pertinente pour des secteurs stratégiques, la transition verte et numérique, et les applications de défense et aérospatiales.
Méthode "inside-out"	Méthode d'analyse qui évalue l'impact de l'utilisation des ressources sur des autres systèmes
Méthode "outside-in"	Méthode d'analyse qui évalue des risques associés à l'utilisation des ressources sur le système qui utilise la ressources (le système étudié)

Acronymes

Acronyme	Définition
ACCV	Analyse du Coût du Cycle de Vie
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ACVA	ACV Attributionnelle
ACVC	ACV Conséquentielle
ADCV	Analyse de Durabilité de Cycle de Vie
ADP	<i>Abiotic Depletion Potential</i>
AdP	Aire de Protection
ADR/LPST	<i>Average Dissipation Rate (ADR) et Lost Potential Service Time (LPST)</i>
ARP	<i>Abiotic Resource Project</i>
BDD	Base De Données
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CRM	<i>Critical Raw Materials</i> (par exemple, dans la loi CRM, ou "CRM act")
CRMA	<i>Critical Raw Materials Act (loi européenne)</i>
CSDDD	Corporate Sustainability Due Diligence Directive
CTI-LCIA	<i>Contribution To Inaccessibility - Life Cycle Impact Assessment</i>
EPI	<i>Environmental Performance Index</i>
EVDP	<i>Economic Value Dissipation potential</i>
FC	Facteur de Caractérisation
FWL	<i>Future Welfare Loss</i>
GES	Gaz à Effets de Serre
GLAM	<i>Global guidance for Life cycle impact Assessment indicators and Methods</i>
HHI	<i>Herfindahl-Hirschman Index</i>
ICA	International Copper Association
ICV	Inventaire de Cycle de Vie
IHH	Index Herfindahl-Hirschman
IRTC	<i>The International Round Table on Materials Criticality</i>
JRC	<i>Joint Research Center</i>
JRC-LCI	<i>Joint Research Centre – Life Cycle Inventory</i>
MGP	Métaux du Groupe du Platine
MPC	Matière Première Critique
NZIA	<i>Net-Zero Industry Act</i>
OFREMI	Observatoire Français des REssources Minérales pour les filières Industrielles
PEPR	Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche
UE	Union Européenne
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
WGI	<i>World Governance Indicator</i>

1. Introduction

1.1. Contexte

Les ressources dites “critiques” sont celles qui sont cruciales pour une chaîne de valeur ou une économie, et qui présentent un risque d’approvisionnement dans un contexte spécifique. Plusieurs métaux critiques en Europe ou en France sont vitaux pour la transition énergétique (par exemple, le lithium, le cobalt, et les terres rares) et pour d’autres technologies stratégiques (par exemple, le gallium utilisé pour la fabrication de semi-conducteurs) (Carrara et al., 2023b). Les enjeux préoccupent de plus en plus de pays, régions ou industries, notamment à cause de la dépendance de ces technologies sur un grand nombre de métaux pour lesquels la demande s’accroît exponentiellement et globalement.

Le risque d’approvisionnement des ressources critiques provient typiquement d’une dépendance forte sur les imports d’une ressource depuis un pays spécifique pour lequel divers facteurs contribuent à l’incertitude sur la capacité d’approvisionnement : une instabilité politique, des conflits internes, etc. D’autres facteurs de risque qui sont souvent pris en compte dans les évaluations de la criticité des matières premières sont les dépendances des sous-produits, les temps d’épuisement (bien que très débattus), la forte croissance de la demande, la volatilité des prix et la substituabilité (Schrijvers et al., 2020b). De plus, les impacts environnementaux sont parfois considérés comme des facteurs de risque. Les matières premières associées à des impacts environnementaux élevés peuvent être affectées par des réglementations, des taxes ou peuvent entraîner une atteinte à la réputation. Cette perspective sur la pertinence des impacts environnementaux a été particulièrement pertinente parmi les différents experts de l’industrie au sein de la Table Ronde Internationale sur la Criticité des matériaux (IRTC, The International Round Table on materials Criticality), telle qu’elle a été exprimée lors d’ateliers et de tables rondes (Hool and Schrijvers, 2024). Tels qu’intégrés dans l’outil d’aide à la décision de l’IRTC, développé par WeLOOP, ces impacts environnementaux peuvent être quantifiés à l’aide de l’« Environmental Performance Index » (EPI) ou par des études d’Analyse du Cycle de Vie (ACV) (IRTC, 2023).

En même temps, la production de métaux contribue significativement aux impacts environnementaux globaux (Schenker et al., 2022; Watari et al., 2021) et parfois sociaux (voir par exemple Young, 2018 sur les minéraux de conflits). En émerge un paradoxe, puisque les besoins exponentiels en matières premières pour les technologies centrales aux transitions écologique et énergétique (par exemple, pour la production d’énergie renouvelable ou les technologies bas-carbone), ayant comme objectif un monde plus durable, engendre par le fait même des externalités socio-environnementales supplémentaires. Et ces externalités, combinées aux risques liés à la gouvernance, peuvent contribuer à leur tour à augmenter les risques d’abandon de nouveaux projets miniers dans différentes régions (Lèbre et al., 2019), limitant par le fait même la sécurité d’approvisionnement en matériaux nécessaires à la transition énergétique (Lèbre et al., 2020).

Ces phénomènes peuvent être interprétés depuis les points de vue de l’ACV, de l’analyse de durabilité de cycle de vie (ADCV) ou de criticité :

- En ACV, les impacts environnementaux sont pris en compte par de nombreux indicateurs (aire de protection des écosystèmes). Les impacts sur la santé humaine et sur les ressources sont aussi pris en compte dans les aires de protection « santé humaine » et « ressources ». Concernant cette dernière aire de protection, des impacts sont associés à l’extraction, la consommation ou la dissipation de ressources. L’impact « social » se limite quant à lui à celui sur la santé humaine. De plus, les impacts évalués en ACV sont généralement marginaux et globaux ; ils ne prennent pas en compte les risques environnementaux, sociaux ou économiques associés au système étudié.
- En ADCV (selon l’approche cumulant l’ACV, l’analyse sociale du cycle de vie et l’analyse du coût de cycle de vie), les impacts sociaux sont élargis à un lot d’indicateur sociaux incluant les conditions de travail, les salaires, la corruption, etc. Les impacts économiques sont aussi pris en compte.

- En analyse de criticité, les risques contextuels des régions ou pays desquels proviennent les matières premières, qu'ils soient sociaux ou politico-économiques (liés notamment à la gouvernance), et parfois environnementaux (dans certaines approches), sont considérés.

La Figure 1 illustre les superpositions possibles entre les thématiques liées à la quantification des impacts liés à l'utilisation des ressources en ACV, et celles liées à la criticité. On peut noter que même dans les approches ADCV et de criticité telles que pratiquées aujourd'hui, les impacts environnementaux sont uniquement évalués par une approche ACV plutôt que par une étude d'impact locale, alors que c'est a priori cette dernière qui aura une incidence sur le risque réel d'abandon d'un projet minier (en plus des risques de gouvernance et sociaux, voir Lèbre et al., 2019 à ce sujet). Ce risque d'abandon pourrait contribuer en criticité à un risque d'approvisionnement et en ADCV à un risque pour la durabilité d'un système étudié.

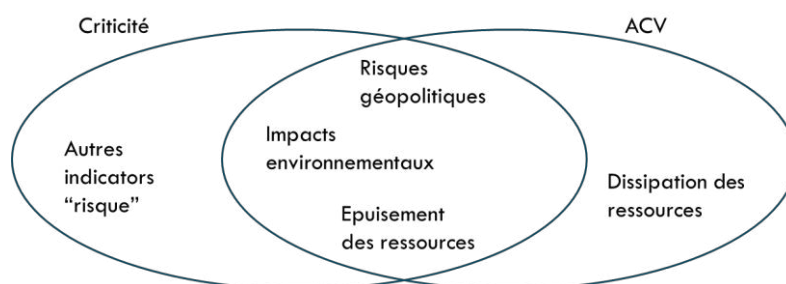


Figure 1 Aperçu de la distinction et du croisement entre les évaluations de la criticité des matières premières et l'ACV

1.2. Objectifs du projet

Comme le soulignent les éléments contextuels, de multiples liens entre la criticité des matières premières et les impacts environnementaux peuvent être observés. Les travaux menés pour clarifier les liens ont été limités jusqu'ici, alors que les chercheurs, acteurs industriels et décideurs politiques sont de plus en plus conscients de la pertinence d'une évaluation jointe de ces aspects. Ce projet a donc pour objectif d'améliorer la prise en compte de la criticité au sein des études d'ACV, et de permettre aux ACV de contribuer à mieux prendre en compte la dimension environnementale dans les analyses de criticité, dans le but de mieux éclairer la prise de décision stratégique. Cet objectif est visualisé dans la Figure 2.

Sous-objectifs :

- Comprendre **comment les pratiques ACV pourraient évoluer pour intégrer les notions de disponibilité et de risques géopolitiques**, donc de criticité ;
- **Compléter les méthodes d'évaluation et la pratique ACV** en améliorant l'utilisation des résultats en appui de l'évaluation d'un indicateur pas complètement inclus dans l'ACV et de plus en plus considéré ;
- Analyser **comment les impacts environnementaux de la production peuvent compléter l'analyse** et la prise de décisions concernant la gestion des matières premières critiques.

Ces objectifs seront atteints via un plan de travail détaillé dans le chapitre suivant.

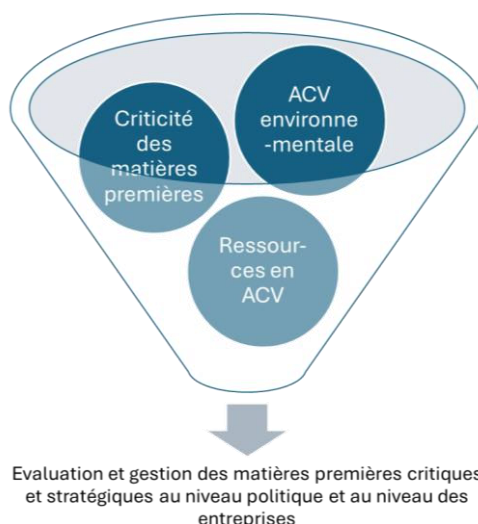


Figure 2 Visualisation de l'objectif de cette étude

1.3. Plan de travail

Le programme de travail comprend cinq étapes, ce qui est présenté de manière synthétique dans la Figure 3.

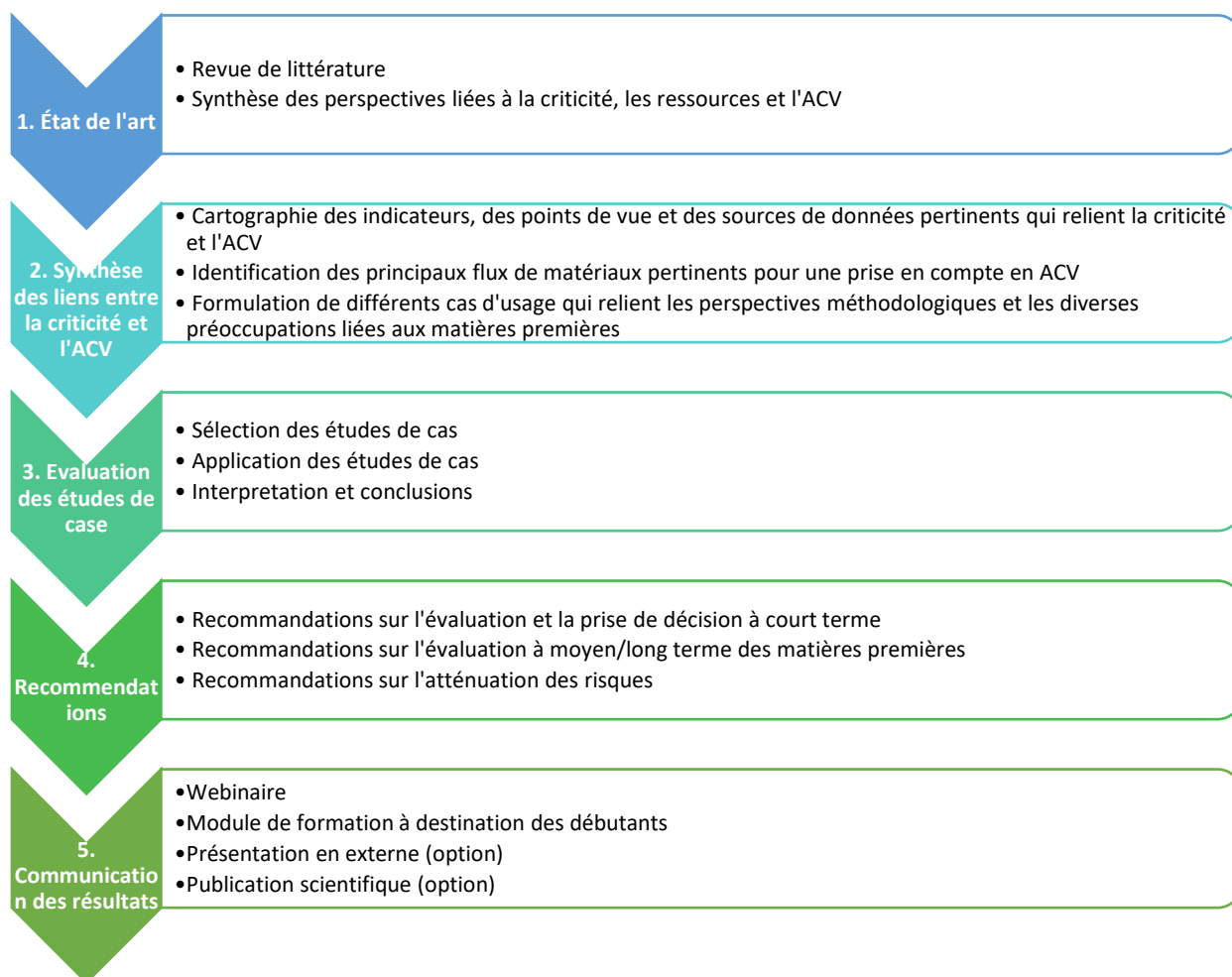


Figure 3 Synoptique de la méthodologie

1.3.1. Étape 1 : État de l'art

L'objectif de l'étape 1 est d'établir un état de l'art bibliographique sur les matériaux critiques et stratégiques et évaluation des matières premières en ACV.

1.1. Revue de littérature

Un état de l'art bibliographique sera établi sur les matériaux critiques et stratégiques.

Les corpus de littérature suivants seront évalués :

- Définition des matériaux critiques et stratégiques
- Cadres réglementaires pertinents
- Le rôle des impacts environnementaux dans l'évaluation de la criticité
- Évaluation des ressources en ACV
- Le rôle de la criticité dans l'ACV
- La relation entre l'utilisation des ressources et les limites planétaires

1.2. Synthèse des perspectives liées à la criticité, les ressources et l'ACV

De chaque point de vue (criticité, ACV environnementale, ressources en ACV, etc.) une vue d'ensemble des aspects suivants est proposée :

- Objectifs et champs d'application couverts (p. ex., produit, pays/région, entreprise, court/long terme, durabilité environnementale/économique)
- Indicateurs utilisés
- Choix méthodologiques pertinents (méthode d'allocation, classification des sous-produits, etc.)
- Voies d'impact ("impact pathways") sous-jacentes
- Sources de données disponibles/utilisées

Une sélection de matières premières sera utilisée pour illustrer les différentes perspectives.

1.3.2. Étape 2 : Synthèse des liens entre la criticité et l'ACV

L'objectif de l'étape 2 est d'analyser des croisements et liens entre l'évaluation des matières premières critiques et l'ACV.

2.1. Cartographie des indicateurs, des points de vue et des sources de données pertinents qui relient la criticité et l'ACV

Dans cette étape, une synthèse des croisements entre les pratiques sera produite. Les questions suivantes seront abordées, entre autres :

- Comment les évaluations de criticité et l'ACV peuvent être utilisées conjointement ou combinées pour améliorer la prise de décision stratégique par les décideurs politiques et les entreprises (par exemple, en se référant à (Hackenhaar et al., 2024; D. Schrijvers et al., 2021a)
- Comment les méthodologies et les données d'ACV peuvent-elles être utilisées pour améliorer les évaluations de criticité ?
- Comment l'évaluation de la criticité complète l'ACV avec une perspective de l'extérieur vers l'intérieur (ou "outside-in"), c'est-à-dire, comment l'environnement socio-économique risque d'affecter le procédé, service ou produit étudié dans l'ACV via un risque d'approvisionnement (Cimprich et al., 2019) ?
- Comment les stratégies de circularité affectent les résultats de l'ACV et les déterminations de criticité (voir par exemple (Hool et al., 2022; Santillán-Saldivar et al., 2021; Tercero Espinoza et al., 2020)

2.1. Identification des principaux flux de matériaux pertinents pour une prise en compte en ACV

Sur la base de l'étape précédente, les principales caractéristiques des matériaux seront identifiées. Les matériaux seront classés en fonction de caractéristiques sélectionnées, afin que les études de cas ultérieures représentent une sélection diversifiée de caractéristiques sur leur cycle de vie. Ces caractéristiques peuvent englober les éléments suivants :

- Importance faible/élevée dans les technologies à faible émission de carbone
- Impacts environnementaux faibles/élevés liés à l'extraction/au raffinage
- Niveau de criticité / importance stratégique faible/élevé selon la Commission Européenne
- Etc.

2.2. Formulation de différents cas d'usage qui relient les perspectives méthodologiques et les diverses préoccupations liées aux matières premières.

Les résultats de l'étape 2.1 et de l'étape 2.2 sont combinés dans la formulation des cas d'utilisation (en plus des deux études de cas présentées à l'étape 3). Ces cas incarnent différents types de questions liées aux matières premières que les décideurs politiques et les acteurs industriels peuvent se poser, dans lesquelles la « boîte à outils » telle que présentée à l'étape 2.1 peut servir.

1.3.3. Étape 3 : Evaluation des études de cas

L'objectif de l'étape 3 est de démontrer l'évaluation conjointe/combinée de la criticité et des impacts environnementaux via des études de cas

3.1. Sélection des études de cas

Deux études de cas sont prévues pour évaluer conjointement la criticité des matières premières et les impacts environnementaux, qui démontrent chacune les liens croisés entre ces aspects sous différents angles. Les études de cas peuvent être affinées en fonction des résultats de l'étape 2. Les matières premières évaluées dans les études de cas sont sélectionnées à l'étape 2.2. Ainsi, **les deux études de cas seront sélectionnées**, avec la contribution de SCORE LCA, parmi les études de cas proposées à l'étape 2 et les 3 propositions initiales suivantes qui appliquent des perspectives différentes :

1. Evaluation environnementale ACV de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers ».
2. Evaluation environnementale (ACV) comparative des usages d'un même matériau critique prenant en compte les possibilités ou non de substitution.
3. Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et des impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique

3.2. Application de deux études de cas

Les études de cas sont développées à l'aide des dernières versions de SimaPro et ecoinvent.

3.3. Interprétation et conclusions

Les études de cas seront analysées en fonction des perspectives adoptées et de leur lien avec la criticité et/ou la communauté de l'ACV, des utilisations potentielles de ces perspectives (par exemple, par les entreprises et/ou les décideurs), de l'applicabilité de ces analyses (par exemple, en ce qui concerne les besoins en données et la maturité des modèles) et des actions potentielles qui peuvent être éclairées par les résultats des études de cas.

1.3.4. Étape 4 : Recommandations

L'objectif de l'Étape 4 est de formuler des recommandations aux entreprises et décideurs lors des choix stratégiques.

Des recommandations seront formulées sur la base de l'analyse de l'état de l'art, de la synthèse méthodologique et des études de cas. Les recommandations préciseront les aspects suivants :

4.1 Formulation des recommandations sur l'évaluation et la prise de décision à court terme

Utilisation recommandée des méthodes d'évaluation actuelles des matières premières pour éclairer la prise de décision stratégique dans les entreprises exposées aux risques liés aux matières premières et dans les gouvernements nationaux/européens à niveau de l'écoconception de produits et à niveau de la stratégie d'entreprise. L'accent sera mis sur l'appariement des différents cas d'application avec des choix méthodologiques appropriés et une interprétation correspondante des résultats.

4.2 Formulation des recommandations sur l'évaluation pour le moyen/long terme des matières premières

Des recommandations seront formulées en ce qui concerne les travaux à réaliser pour effectuer des évaluations pertinentes des matières premières pour le moyen et long terme en lien avec l'analyse du cycle de vie. Ces recommandations pourraient concerner les développements méthodologiques, la prise en compte des lacunes en matière de données, les facteurs de caractérisation, la différenciation spatiale, etc.

4.3 Formulation des recommandations sur l'atténuation des risques

Une liste de mesures d'atténuation de la criticité (basée sur (IRTC, 2023)) sera présentée à la fois aux industries et aux décideurs. L'accent sera mis sur les stratégies de circularité, telles que celles abordées dans (Cimprich et al., 2023 ; Hool et coll., 2022 ; Tercero Espinoza et al., 2020).

1.3.5. Étape 5 : Communication des résultats

L'objectif de l'Étape 5 est de rendre les résultats accessibles à un public plus large.

La capitalisation des apprentissages retenus grâce à l'étude permet de mettre en valeur le travail effectué et de faire avancer le sujet afin de le rendre plus accessible.

5.1. Webinaire (janvier 2025)

Présentation des résultats détaillés de l'étude à l'ensemble des membres actifs, des membres partenaires, et de toute personne que SCORE LCA souhaitera inviter

5.2. Module de formation à destination des débutants (janvier 2025)

Un matériel didactique sera développé pour une formation de 1 à 3 heures, y compris une présentation PPT, un exercice et un manuel d'enseignement. Cela permettra à SCORE LCA de former les parties intéressées internes et externes. Les objectifs d'apprentissage seront définis en accord avec SCORE LCA.

• Présentation des résultats en externe (option)

Possibilité de présenter les résultats dans une conférence (inter)nationale, e.g. LCM, MCV, SETAC, ou autre.

• Rédaction d'une publication scientifique (option)

Possibilité de rédiger un article scientifique pour présenter (une partie) des résultats du projet.

2. État de l'art

Cette section donne un aperçu de l'état de l'art de la criticité des matières premières, des matières premières stratégiques et de l'évaluation des matières premières dans l'analyse du cycle de vie.

2.1. Perspective « criticité »

2.1.1. Définition des matériaux critiques et stratégiques

Matières premières critiques

Les matières premières sont critiques si elles ont un score relativement élevé sur deux dimensions, souvent présentées comme les deux axes d'une matrice : la probabilité que l'approvisionnement d'une matière première soit perturbé (souvent appelée « risque d'approvisionnement ») et la vulnérabilité d'un système spécifique à une telle perturbation (également appelée « importance »).

Cette « approche à deux axes » s'inscrit dans la théorie classique du risque, considérant que l'approvisionnement d'une matière première n'est « à risque » que si la probabilité de rupture d'approvisionnement et la vulnérabilité à cette perturbation sont élevées (Glöser et al., 2015)

Dimension du risque d'approvisionnement

La probabilité d'une rupture d'approvisionnement est évaluée par des « indicateurs de risque d'approvisionnement ». Ces indicateurs couvrent les risques d'origine économique, géologique, géopolitique, environnementale et sociale. Comme l'ont examiné (Schrijvers et al., 2020b), les indicateurs de risque d'approvisionnement les plus souvent utilisés sont la diversité de l'approvisionnement (qui peut être évaluée au niveau des réserves, de l'extraction, du raffinage et/ou de l'importation), la stabilité politique des pays fournisseurs, la recyclabilité ou le contenu recyclé, le temps d'épuisement potentiel ou une mesure similaire de l'ampleur des réserves, le fait qu'une matière première soit principalement fournie en tant que sous-produit, et les réglementations environnementales et/ou sociales potentielles. Les indicateurs de substituabilité, de croissance attendue de la demande, de restrictions commerciales, de dépendance à l'égard des importations et de volatilité des prix sont également souvent pris en compte dans l'évaluation des risques d'approvisionnement, bien que certaines études les prennent en compte dans leur évaluation de la vulnérabilité (Schrijvers et al., 2020b).

Évaluation des risques d'approvisionnement dans l'évaluation de la criticité de l'UE

L'évaluation de la criticité de l'UE évalue les indicateurs de risque d'approvisionnement suivants : diversité de l'exploitation minière, du raffinage et des importations, dépendance à l'importation, taux de recyclage en fin de vie, stabilité politique des pays fournisseurs, restrictions commerciales et substituabilité. Dans la dimension du risque d'approvisionnement, la substitution est évaluée en fonction des niveaux de production, de la détermination de la criticité des substituts et du fait que les substituts sont produits en tant que coproduits les uns des autres (Commission Européenne, 2023).

Évaluation des risques d'approvisionnement dans l'approche OFREMI

La dimension risque d'approvisionnement de l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI) prend en compte les sous-dimensions et leurs indicateurs de risque correspondants, tels que présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 Indicateurs de risque d'approvisionnement pris en compte dans l'approche OFREMI (données préliminaires) (Boubault et al., 2023)

Dimension de risque	Risque	Indicateurs
Risques économiques	Une concurrence croissante	Évaluation du prix moyen
	Augmentation des prix	Volatilité des prix
Risques politiques	Contexte politique instable	L'instabilité politique pondérée par la production de minerais/métaux Une instabilité réglementaire pondérée par la production de minerai/métal
	Restriction aux échanges commerciales	Dépendance vis-à-vis des importations de minerai ou de métaux en provenance de pays instables ou hostiles
Risques socio-environnementaux	Réglementations environnementales	Exposition à des événements environnementaux ou à des réglementations entravant la production Empreinte environnementale (en kg de minerai/métal) Empreinte environnementale (production totale de minerai/métal)
	Réglementations sociales	Exposition à des événements sociaux ou à des réglementations entravant la production
Risques techniques	Disponibilité réduite	Évaluation des réserves minières
		Années de ressources ultimes
		Production en tant que sous-produit
		Exposition aux pénuries de matières premières (matériaux, énergie, eau)
		Production de minerai/métal dans les pays éloignés
		Exposition aux aléas logistiques Problèmes de sécurité sur les sites de production de minerai ou de métal

Dimension de vulnérabilité

L'évaluation de la dimension de la vulnérabilité dépend fortement des parties prenantes. La formulation du « système à risque » est l'un des éléments clés de la définition de l'objectif et du champ d'application d'une évaluation de la criticité (Schrijvers et coll., 2020b). Les études de criticité des matières premières se concentrent souvent sur les économies régionales, telles que l'économie européenne, que la Commission Européenne a étudiée. D'autres types de parties prenantes peuvent inclure des utilisateurs mondiaux, un secteur ou une technologie spécifique, une entreprise spécifique ou même un système de produit.

D'autres indicateurs typiques pour évaluer la vulnérabilité d'un système aux ruptures d'approvisionnement sont la part des revenus d'une entreprise impactée, la demande interne et la capacité à répercuter les augmentations de coûts (Schrijvers et al., 2020b).

Évaluation de la vulnérabilité dans l'évaluation de la criticité de l'UE

Le « système à risque » dans l'étude de criticité de la Commission Européenne est l'économie européenne. L'évaluation de la criticité de l'UE évalue l'importance économique des matières premières en fonction 1) de la part des différents secteurs (NACE à 2 chiffres) qui dépendent de la matière première, 2) de l'évaluation de la valeur ajoutée brute générée par chacun de ces secteurs, et 3) de la substituabilité actuelle des matières premières, compte tenu du coût et de la performance des produits de substitution (Blengini et al., 2017; Commission Européenne, 2023).

Évaluation des vulnérabilités dans l'approche OFREMI

Le « système à risque » dans l'approche OFREMI est l'économie, l'État et la population française (Boubault et al., 2023). La vulnérabilité à une rupture d'approvisionnement est évaluée à l'aide d'un certain nombre d'indicateurs, comme le présente le Tableau 2. Outre une évaluation de vulnérabilité, l'approche OFREMI prend en compte la capacité d'adaptation du système à travers les indicateurs présentés dans le Tableau 3.

Tableau 2 Indicateurs de vulnérabilité de l'approche (préliminaire) OFREMI (Boubault et al., 2023)

Dimension de risque	Risque	Indicateurs
Économique	Perte de revenus	Taille du marché
Ethique	Perte de réputation	Approvisionnement à partir de sites dangereux/mauvaises pratiques
Sociétal	Perte de sécurité	Utilisation dans les secteurs fondamentaux (défense, énergie, habitat, alimentation)
Politique	Perte de souveraineté/indépendance	Nombre et santé économique des producteurs européens et nationaux
Économique	Perte d'accès aux produits nécessaires	Evolution de l'écart offre-demande sur les 5 prochaines années
		Prix de la substance
		Importance des fonctionnalités délivrées par la substance
Santé	Perte de santé socio-environnementale	Toxicité de la substance

Tableau 3 Indicateurs de capacité d'adaptation de l'approche OFREMI (préliminaire) (Boubault et al., 2023)

Dimension de risque	Risque	Indicateurs
Industriel	Sources primaires alternatives	Disponibilité d'autres sources primaires
	Sources secondaires	Taux de recyclage en fin de vie
	Stockage industriel	Stockage industriel
	Substituabilité	Substituabilité
Politique	Stockage stratégique d'État	Stockage stratégique d'État
	Pouvoir politique sur les marchés	Capacité d'intervention de l'État sur les marchés

Liste des matières premières critiques

La Figure 4 présente la notation des matières premières évaluées dans l'étude de criticité de la Commission Européenne en 2023 (Commission Européenne, 2023). Les deux axes (importance économique et risques d'approvisionnement) ne sont pas agrégés. Au lieu de cela, deux valeurs seuils distinguent les matières premières critiques des matières premières non critiques. La liste des matières premières critiques pour l'économie européenne qui en résulte est présentée dans le Tableau 4. L'approche OFREMI est encore en cours de développement et aucune liste de matières premières critiques n'a encore été rendue publique.

En raison de la diversité dans les périmètres des différentes études de criticité (c'est-à-dire le « système à risque ») et de la diversité des indicateurs de risque d'approvisionnement disponibles, les études produisent des listes divergentes de matières premières critiques ; il n'existe pas de liste universelle des matières premières critiques. Outre les différences mentionnées dans le champ d'application et l'indicateur, la distinction entre matériaux critiques et non critiques est plutôt subjective. Par exemple, elle peut être basée sur une valeur de seuil politiquement établie (comme c'est le cas dans les études de la Commission Européenne) ou sur un pourcentage de matières premières étudiées ayant obtenu le score le plus élevé. Enfin, la sélection initiale des matières premières dans le cadre de l'évaluation affecte bien sûr les résultats possibles des études. Cette sélection est souvent basée sur la disponibilité des données, c'est-à-dire que seules les matières premières sont incluses dans une étude pour laquelle

des données sont disponibles pour tous les indicateurs évalués, et vice versa – seuls les indicateurs de risque d'approvisionnement sont inclus dans l'étude pour laquelle des données sont disponibles pour toutes les matières premières sélectionnées (Schrijvers et al., 2020b). Outre ces aspects de la conception de l'étude, l'identification d'une matière première comme « critique » dépend fortement du temps en raison de l'évolution des structures de la chaîne d'approvisionnement et des conditions du marché au fil du temps. Par conséquent, plusieurs études, dont l'évaluation de la Commission Européenne, sont répétées régulièrement. Comme on peut l'observer à partir du Tableau 4, certaines matières premières perdent leur statut de « critiques » au fil du temps (par exemple l'indium), tandis que d'autres (par exemple l'hélium) sont considérées comme critiques dans une étude ultérieure.

Sur la base d'un examen de plus de 40 études de criticité, (Schrijvers et al., 2020b) ont donné un aperçu de la fréquence d'inclusion d'une matière première dans une étude de criticité, et si cette matière première était considérée comme critique (Figure 5). On peut conclure de la figure qu'une affirmation telle que « le cobalt est une matière première critique » ne peut être faite sans fournir des informations supplémentaires sur le contexte de cette évaluation car sa fréquence d'inclusion n'est pas toujours élevée.

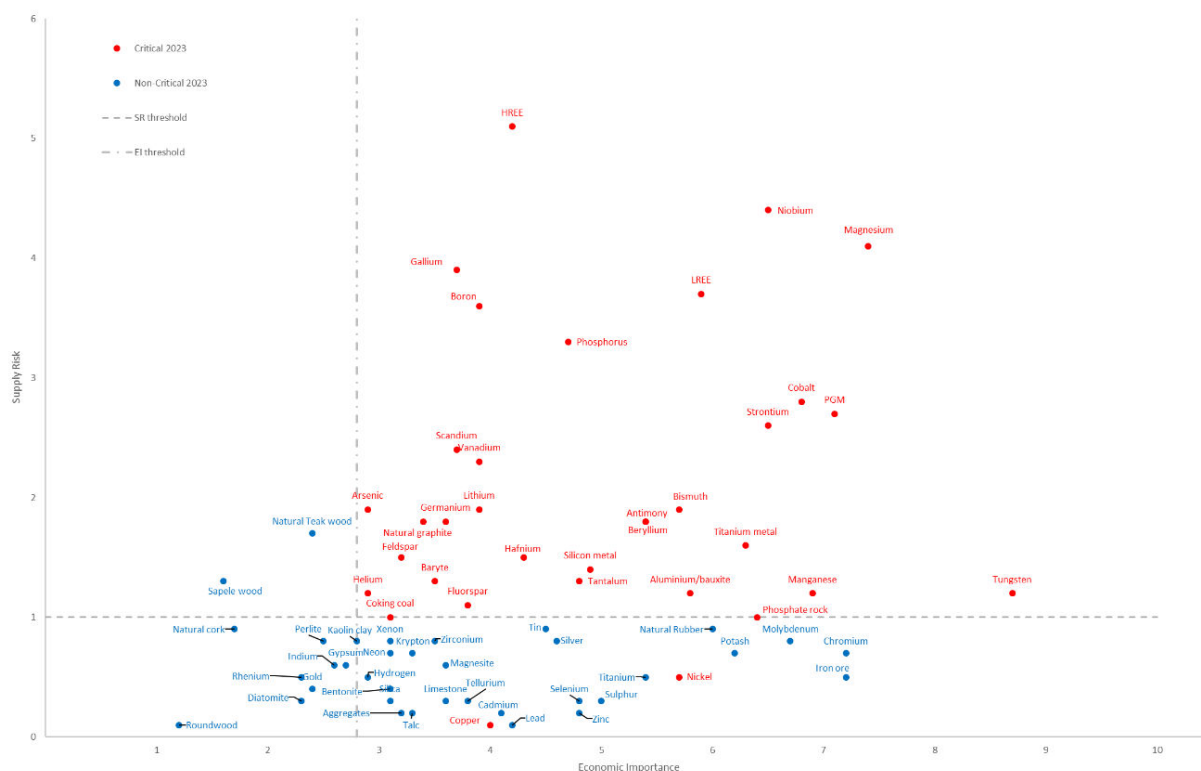


Figure 4 Résultats de l'évaluation de la criticité de l'UE 2023 (Commission Européenne, 2023)

Tableau 4 Identification des matières premières comme critiques et/ou stratégiques par la Commission Européenne (European Commission, 2023a; European Parliament and Council of the European Union, 2024)

<i>Matière première</i>	Critique en 2020	Critique en 2023	Stratégique en 2024
<i>Aluminium/bauxite</i>	X	X	X*
<i>Antimoine</i>	X	X	
<i>Arsenic</i>		X	
<i>Baryte</i>	X	X	
<i>Béryllium</i>	X	X	
<i>Bismuth</i>	X	X	X
<i>Bore/borate</i>	X	X	X (Bore, qualité métallurgique)
<i>Cobalt</i>	X	X	X
<i>Charbon à coke</i>	X	X	
<i>Cuivre</i>			X
<i>Feldspath</i>		X	
<i>Spath fluor</i>	X	X	
<i>Gallium</i>	X	X	X
<i>Germanium</i>	X	X	X
<i>Hafnium</i>	X	X	
<i>Hélium</i>		X	
<i>Éléments de terres rares lourdes</i>	X	X	X (pour aimants permanents)
<i>Indium</i>	X		
<i>Lithium</i>	X	X	X (qualité batterie)
<i>Éléments de terres rares légers</i>	X	X	X (pour aimants permanents)
<i>Magnésium</i>	X	X	X (métal)
<i>Manganèse</i>		X	X (qualité batterie)
<i>Graphite naturel</i>	X	X	X (qualité batterie)
<i>Caoutchouc naturel</i>	X		
<i>Nickel</i>			X (qualité batterie)
<i>Niobium</i>	X	X	
<i>Platinoïdes</i>	X	X	X
<i>Roche phosphatée</i>	X	X	
<i>Phosphoreux</i>	X	X	
<i>Scandium</i>	X	X	
<i>Silicium métal</i>	X	X	X
<i>Strontium</i>	X	X	
<i>Tantale</i>	X	X	
<i>Titane métal</i>	X	X	X
<i>Tungstène</i>	X	X	X
<i>Vanadium</i>	X	X	

* L'aluminium n'a pas été considéré comme stratégique selon (Commission Européenne, 2023), mais il a été inclus dans la liste (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024).

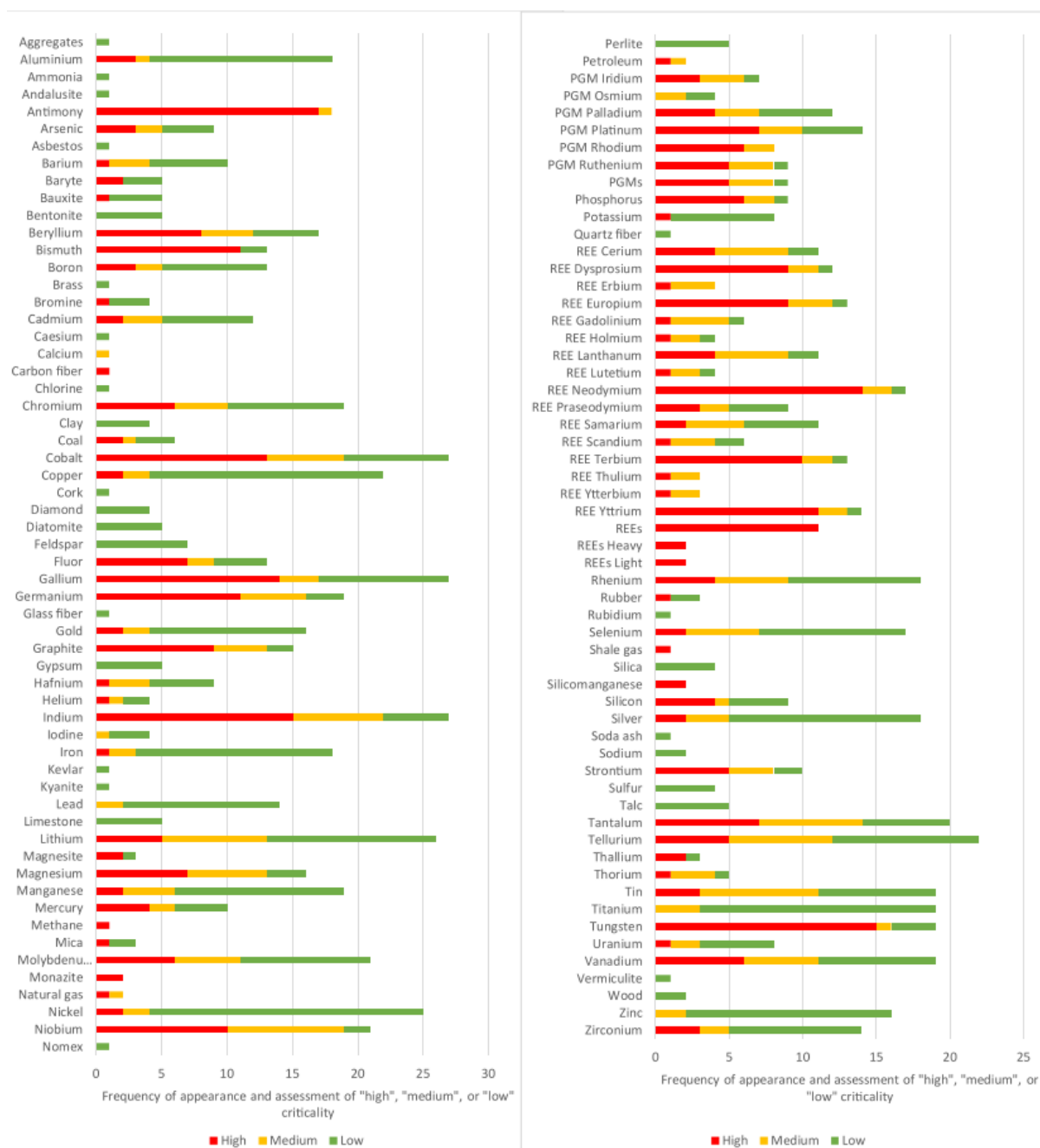


Figure 5 Fréquence d'apparition dans les évaluations de criticité et la détermination de la criticité (élevée, moyenne ou faible) des matériaux (Schrijvers et al., 2020b)

Matériaux stratégiques

En 2023, la Commission Européenne a introduit le concept de « matières premières stratégiques » dans ses précédentes propositions de loi sur les matières premières critiques, en plus des matières premières critiques.

L'importance stratégique d'une matière première est déterminée en fonction de la pertinence d'une matière première pour les secteurs stratégiques, la transition verte et numérique, et les applications de défense et aérospace. La pertinence est déterminée par 1) le nombre de technologies stratégiques utilisant une matière première comme intrant, 2) la quantité de matières premières intrants dans la fabrication des technologies stratégiques et 3) la demande mondiale attendue pour les technologies stratégiques pertinentes (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne, 2024). L'identification

des matériaux stratégiques semble moins quantifiée que celle des matières premières critiques, et plus sujette à des décisions politiques. Tableau 4 donne un aperçu des matières premières identifiées comme « stratégiques » par la Commission Européenne. On peut observer que tous les matériaux stratégiques sont également critiques, à l'exception du cuivre et du nickel qui ne sont que stratégiques.

2.1.2. Cadres réglementaires pertinents

Cette section présente une sélection de réglementations pertinentes qui répondent à des objectifs politiques concernant les matières premières critiques. Ces réglementations témoignent de l'inquiétude croissante concernant l'utilisation de matières premières critiques au niveau politique, des actions politiques prévues et des implications que l'utilisation de matières premières critiques peut avoir pour les entreprises qui en dépendent.

Green Deal Industrial Plan

Le Plan industriel du pacte vert, présenté par la Commission Européenne en février 2023, est une initiative stratégique visant à accélérer la transition vers une économie verte. Il se concentre sur le renforcement de la compétitivité de l'industrie européenne à zéro émission nette et sur le soutien à la transition vers la neutralité climatique.

Le plan met l'accent sur quatre piliers clés : l'établissement d'un cadre réglementaire prévisible et simplifié, la facilitation de l'accès à un financement suffisant, la promotion du développement des compétences nécessaires et la promotion d'un commerce ouvert pour des chaînes d'approvisionnement résilientes. Cette approche à plusieurs volets vise à positionner l'UE comme un leader mondial des technologies propres tout en garantissant son autonomie stratégique (European Commission, 2023b).

Le document décrit une série d'initiatives visant à renforcer davantage ce cadre afin d'améliorer spécifiquement la compétitivité des industries vertes de l'UE en garantissant l'approvisionnement en matières premières et les faibles coûts des énergies renouvelables (Commission Européenne, 2023b):

- **The Net-Zero Industry Act** simplifie les processus d'autorisation et encourage la production de technologies vertes essentielles (panneaux solaires, éoliennes, etc.), accélérant ainsi la transition de l'UE vers une économie carboneutre.
- **The Critical Raw Materials Act** vise à diversifier l'approvisionnement et à promouvoir le recyclage des matières premières critiques afin d'assurer la stabilité de la chaîne d'approvisionnement des technologies vertes et de réduire la dépendance vis-à-vis des fournisseurs non européens.
- **Reform on electricity market design** vise à accroître la résilience du marché de l'énergie de l'UE et à accroître l'indépendance des consommateurs et des entreprises européens en matière de coûts de l'énergie vis-à-vis du prix de l'électricité sur le marché à court terme.

Le champ d'application du plan couvre divers secteurs, notamment l'énergie, l'industrie manufacturière, les transports et la construction, en mettant l'accent sur les innovations et les investissements dans les technologies vertes, les sources d'énergie renouvelables et les processus industriels durables.

Dans l'ensemble, le plan industriel du pacte vert est conçu pour favoriser un secteur industriel robuste et durable en Europe, garantissant des avantages environnementaux, économiques et sociaux à long terme.

Net-Zero Industry Act

La Commission a présenté la loi sur la neutralité carbone dans l'industrie (Net-Zero Industry Act, NZIA) en mars 2023 (European Commission, 2023c). La NZIA vise à développer la fabrication de technologies propres en Europe. Il s'agira d'accroître la production de technologies qui contribuent à atteindre la neutralité climatique tout en attirant des investissements et en améliorant l'accès au marché pour ces technologies. L'objectif est que l'UE fabrique au moins 40 % des technologies propres dont elle a besoin d'ici 2030. La loi augmentera également la capacité de stockage des émissions de CO₂. Cette initiative devrait accélérer les progrès vers la réalisation des objectifs climatiques de l'UE, renforcer l'industrie européenne, créer des emplois et rendre l'UE moins dépendante des sources d'énergie étrangères.

La NZIA reconnaît huit technologies propres cruciales pour atteindre les objectifs climatiques d'ici 2030 et 2050. Il s'agit notamment de 1) technologies solaires photovoltaïques et solaires thermiques ; 2) l'éolien terrestre et les énergies renouvelables offshore ; 3) les batteries et le stockage ; 4) pompes à chaleur et géothermie ; 5) électrolyseurs et piles à combustible ; 6) le biogaz/biométhane ; 7) le captage et le stockage du carbone (CSC) ; 8) les technologies de réseau (qui incluent également les véhicules électriques, la recharge intelligente et rapide) (European Commission, 2023d).

Pour faciliter leur développement et leur adoption, l'UE prévoit de rationaliser les processus d'autorisation, de leur accorder une grande importance nationale et d'offrir un soutien financier supplémentaire. Plus précisément, il accélérera la réalisation de projets importants, s'attaquera aux goulets d'étranglement de la fabrication grâce à des permis simplifiés et encouragera le captage du CO₂. La loi investit dans une main-d'œuvre compétente par le biais d'académies de formation spécialisées et encourage les technologies propres dans les marchés publics afin de développer un marché florissant. De plus, les « bacs à sable réglementaires » pour tester les nouvelles technologies favorisent l'innovation. La NZIA vise à mettre en relation les investisseurs et les parties prenantes afin de permettre le financement et de promouvoir la collaboration internationale par le biais de partenariats.

La loi souligne également l'importance de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, en complément de la loi sur les matières premières critiques, afin de garantir un système énergétique sûr et résilient pour l'avenir.

Critical Raw Materials Act

La loi sur les matières premières critiques (Critical Raw Materials Act - CRMA) représente une étape cruciale pour répondre aux préoccupations croissantes concernant la sécurité d'approvisionnement et la gestion durable des matières premières critiques essentielles pour des secteurs stratégiques tels que les énergies renouvelables, le numérique, l'aérospatiale et la défense et les technologies modernes. La législation vise à renforcer l'autonomie de l'Union européenne, à réduire la dépendance vis-à-vis des pays tiers et à promouvoir des pratiques d'approvisionnement et de recyclage durables (European Commission, 2023e).

La proposition de loi sur les matières premières critiques a été présentée pour la première fois en mars 2023 par Ursula von der Leyen, présidente de la Commission Européenne, dans le cadre du plan industriel du pacte vert en réponse à la concurrence mondiale croissante pour les matières premières essentielles. Le Parlement européen a adopté la loi CRM en mai 2024, marquant une étape législative importante pour garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques. Les mesures discutées s'appuient sur l'évaluation de la criticité de 2023, un rapport de prospective axé sur les technologies stratégiques, ainsi que sur les actions initiées dans le cadre du plan d'action de 2020 sur les matières premières critiques (European Commission, 2024a).

La CRMA définit la « matière première » comme toute substance, transformée ou non, utilisée comme intrant pour la fabrication de produits intermédiaires ou finis. Cela exclut les substances principalement utilisées pour l'alimentation, l'alimentation animale ou le combustible de combustion. Les matières premières critiques (MPC) sont une liste de matières premières définies à l'annexe II, section 1, de la loi sur les MPCs. Cette liste comprend 34 MPCs identifiés comme critiques en fonction de leur importance économique et de leurs risques d'approvisionnement. En outre, 16 CRM ont été identifiés comme des « matières premières stratégiques », mettant en évidence la plus haute importance stratégique, la croissance prévue de la demande et la difficulté d'augmenter la production (European Parliament and Council of the European Union, 2024).

La CRMA établit des références pour la diversification et la localisation des fournisseurs européens de CRM, notamment en fixant des objectifs d'extraction nationale (10 %), de traitement (40 %) et de recyclage (25 %) des matières premières critiques d'ici 2030. En outre, pas plus de 65 % de la consommation annuelle de MPC ne devrait provenir d'un seul pays tiers.

La CRMA rationalise également les procédures d'autorisation pour les projets de matières premières critiques, garantissant la protection environnementale et sociale et simplifiant les processus administratifs. Il fournit un soutien financier et réglementaire pour des projets d'importance stratégique,

avec des délais d'obtention de permis plus rapides pour l'extraction, le traitement et le recyclage. En outre, le CRMA établit une coordination stratégique des stocks, des tests de résistance et un suivi de la chaîne d'approvisionnement des matières premières. Il impose la préparation aux risques pour les grandes entreprises manufacturières qui produisent des technologies stratégiques afin de garantir la résilience de la chaîne d'approvisionnement. Il encourage également les pays de l'UE à améliorer la collecte et le recyclage des matières premières critiques, en particulier celles qui proviennent des déchets. De plus, la CRMA fixe des exigences de recyclage pour les aimants permanents.

La CRMA reconnaît la valeur du commerce mondial dans le maintien d'une chaîne d'approvisionnement diversifiée. En mettant l'accent sur la durabilité, elle promeut l'utilisation d'accords commerciaux et d'alliances stratégiques. En utilisant l'initiative Global Gateway, la loi investit également dans des projets d'infrastructure qui améliorent la connectivité mondiale et gèrent la chaîne de valeur des matières premières. En outre, elle suggère la mise en place d'un mécanisme de crédit à l'exportation de l'UE afin de réduire les risques liés aux investissements étrangers dans la production de matières premières critiques. La loi exige en outre que les pratiques commerciales déloyales relatives aux matières premières soient abordées et que les réglementations en vigueur soient strictement appliquées (European Commission, 2024a).

La loi sur les matières premières critiques (CRMA) établit un Conseil européen des matières premières critiques afin de garantir une mise en œuvre efficace. Ce conseil, qui comprend des délégués de la Commission européenne et des États membres de l'UE, fournira des orientations et supervisera l'exécution. En outre, il jouera un rôle essentiel dans la supervision des alliances stratégiques de l'UE avec d'autres pays (European Commission, 2024a).

La promotion de la durabilité et de la circularité est un autre aspect clé de la loi CRM. Elle habilite la Commission Européenne à réglementer l'empreinte environnementale des matières premières critiques. Cela permettra aux consommateurs de faire des choix éclairés sur les produits contenant des MPCs (European Commission, 2024a).

La législation sur la gestion de la relation client complète les efforts existants visant à promouvoir les solutions de gestion de la relation client durables dans l'UE. Elle s'appuie sur le règlement sur les batteries, en élargissant son champ d'action à tous les CRM placés sur le marché de l'UE. Elle soutient également la directive sur le devoir de diligence en matière de durabilité des entreprises (Corporate Sustainability Due Diligence Directive - CSDDD) en exigeant des informations sur l'empreinte environnementale des CRM. La Commission a pour mandat d'élaborer un système de calcul de cette empreinte, garantissant ainsi la transparence pour les consommateurs et les entreprises.

La Loi précise que l'empreinte environnementale doit être fondée sur des méthodes scientifiques et des normes d'évaluation du cycle de vie établies, y compris un processus de vérification. Les méthodes de l'empreinte environnementale constituent une base pertinente pour l'élaboration des règles de calcul. La transparence concernant l'empreinte environnementale des CRM a plusieurs objectifs. Cela permet aux consommateurs de faire des choix éclairés et aux décideurs politiques d'élaborer des incitations ciblées ou des critères d'approvisionnement écologique. Ce règlement, ainsi que les mesures existantes et futures, visent à créer un marché qui privilégie les pratiques durables tout au long de la chaîne d'approvisionnement des matières premières critiques (European Parliament and Council of the European Union, 2024).

La législation sur les matières premières critiques représente une approche stratégique et respectueuse de l'environnement pour garantir la sécurité des matériaux essentiels à l'avenir technologique et industriel de l'UE, en équilibrant les besoins économiques et les objectifs de durabilité. La loi sur la gestion de la relation client vise à établir une chaîne d'approvisionnement plus résiliente et plus durable pour les matériaux critiques et stratégiques en fixant des critères clairs et en encourageant les approches innovantes, soutenant ainsi la transition de l'UE vers une économie plus durable et indépendante.

Réglementation des batteries (UE)2023/1542

Les batteries lithium-ion (LiBs, pour « *lithium-ion batteries* ») font partie des secteurs clés visés par la Commission Européenne pour une autonomie régionale accrue dans les décennies à venir. En effet, ces batteries sont composées des matériaux stratégiques ou critiques en Europe (lithium, cobalt et graphite), pour lesquels le règlement relatif aux batteries et aux déchets de batteries (Commission Européenne, 2023) fixe des objectifs pour améliorer l'efficacité du recyclage des LiBs en fin de vie. Les taux de collecte de LiBs doivent ainsi atteindre plus de 65% d'ici 2025 et 70% d'ici 2030. En outre, il est précisé que d'ici fin 2027, la récupération du cobalt, du cuivre et du nickel devra dépasser 90%, et celle du lithium, 50%. D'ici fin 2031, ces objectifs augmentent respectivement à 95% et 80%. Le règlement impose aussi que les LiBs des véhicules électriques manufacturés en Europe devront contenir des parts croissantes de matériaux recyclés en tant que matériaux actifs, fixées par le règlement à >6% de lithium et nickel recyclés et >16% de cobalt recyclé d'ici 2031, et >12% de lithium recyclé, >16% de nickel recyclé et >26% de cobalt recyclé d'ici 2036. Finalement, la réglementation impose aussi que les matières premières critiques présentes dans les batteries à une concentration supérieure à 0,1% masse pour masse soit indiquées (Commission Européenne, 2023).

Corporate Sustainability Due Diligence Directive (CSDDD)

La directive sur le devoir de diligence en matière de durabilité des entreprises (Corporate Sustainability Due Diligence Directive - CSDDD) représente une étape importante vers l'intégration de la durabilité dans la gouvernance et les opérations d'entreprise, dans le but de promouvoir des pratiques commerciales plus éthiques et plus respectueuses de l'environnement dans l'UE et au-delà. L'objectif de la CSDDD est de créer un cadre juridique obligeant les entreprises à rendre compte des impacts négatifs de leurs opérations et de leurs activités de la chaîne d'approvisionnement sur les droits de l'homme et l'environnement. Les impacts négatifs comprennent les questions de droits de la personne telles que le travail forcé, le travail des enfants, la santé et la sécurité inadéquates au travail, l'exploitation des travailleurs et les impacts environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre, la pollution ou la perte de biodiversité et la dégradation des écosystèmes.

Le 23 février 2022, la Commission a présenté une CSDDD au Conseil et au Parlement européen. L'acte législatif a été adopté le 24 mai 2024. Pour se conformer à la directive, les États membres disposeront de deux ou trois ans pour intégrer les règles et procédures administratives nécessaires (European Commission, 2024b).

Dans deux ans, la CSDDD sera appliquée aux entreprises de l'UE de plus de 500 employés et à un chiffre d'affaires de 150 millions d'euros ou aux petites entreprises de l'UE dans des secteurs à fort impact (par exemple, le textile, l'agriculture et les mines) de plus de 250 travailleurs et d'un chiffre d'affaires de 40 millions d'euros. Les entreprises non européennes ayant un chiffre d'affaires significatif dans l'UE (150 millions d'euros ou 40 millions d'euros dans les secteurs à fort impact) seraient également couvertes. Dans trois ans, la directive sera appliquée aux entreprises de l'UE de plus de 250 salariés dans des secteurs à fort impact (chiffre d'affaires supérieur à 40 millions d'euros) et à toutes les entreprises non européennes dans des secteurs à fort impact dont le chiffre d'affaires dépasse 40 millions d'euros dans l'UE. La CSDDD permet aux États membres de l'UE d'imposer aux entreprises des amendes pouvant aller jusqu'à 5 % du chiffre d'affaires mondial en cas de non-conformité, ainsi que des dénonciations publiques et des poursuites civiles de la part des victimes (KPMG, 2024).

La directive étend les réglementations en matière de devoir de diligence au-delà du secteur des batteries pour englober les matières premières critiques. En ce qui concerne les matières premières non couvertes par le règlement sur les batteries, la CSDDD ajoutera une diligence raisonnable à la chaîne de valeur (sans exiger de certification) avant que les produits puissent être vendus dans l'UE. Le règlement s'applique aux entreprises des secteurs à fort impact qui dépendent de matières premières critiques, comme l'exploitation minière, les textiles et l'industrie manufacturière. Elle les oblige à suivre les impacts sur l'environnement et les droits humains tout au long de leur chaîne d'approvisionnement, de l'extraction des matières premières à l'élimination. Cela est particulièrement important pour les matières premières critiques, qui peuvent être liées à des violations des droits de l'homme et à un impact environnemental (European Commission, 2022).

Conformément au socle européen des droits sociaux, la CSDDD aborde des préoccupations telles que le travail forcé et les conditions de travail injustes tout en faisant progresser les droits de l'homme et les normes du travail dans toute l'UE. De plus, la CSDDD va au-delà de la directive existante sur la responsabilité environnementale en imposant aux entreprises des processus complets de diligence raisonnable en matière de droits de l'homme et d'environnement. Pour ce faire, les entreprises doivent identifier et traiter de manière proactive les impacts environnementaux potentiels tout au long de leurs opérations et de leurs chaînes d'approvisionnement, et ce, tout au long du cycle de vie. Contrairement aux règles existantes en matière de responsabilité environnementale qui se concentrent sur la réparation des dommages après qu'ils se sont produits, la CSDDD met l'accent sur les mesures préventives et intègre les considérations environnementales et les droits de l'homme dans les politiques commerciales de base et les systèmes de gestion des risques. Cet accent mis sur la prévention vise à minimiser les dommages environnementaux et à garantir des pratiques commerciales plus durables tout au long de la chaîne d'approvisionnement (European Commission, 2022).

EN 45558

La norme EN 45558 est une norme européenne qui décrit une méthode de déclaration de l'utilisation des MPCs dans les produits liés à l'énergie. Cette norme facilite le suivi et le partage d'informations sur les MPCs tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Ces informations sont cruciales pour évaluer l'empreinte environnementale de ces produits, car les MPC peuvent avoir des impacts environnementaux importants lors de leur extraction et de leur traitement (European Standards, 2019).

2.1.3. Rôle des impacts environnementaux dans les évaluations de criticité

Les impacts environnementaux ont joué un rôle, bien qu'il ne soit pas prédominant, dans les études antérieures d'évaluation de la criticité.

Comme présenté à la section 2.1.1, la méthodologie de criticité de la Commission Européenne ne considère pas les impacts environnementaux comme une source de risque. Cependant, la méthode de la Commission Européenne a évolué depuis sa première évaluation de criticité en 2011. Lors de la première évaluation en 2011, les impacts environnementaux (basés sur l'Environmental Performance Index - EPI) ont été considérés comme une source potentielle de risque (European Commission, 2010). Cependant, dans des évaluations ultérieures, il a été constaté que cet indicateur ne reflétait pas une estimation représentative des risques réels (European Commission, 2014). Par conséquent, les impacts environnementaux ont été retirés de l'évaluation de la criticité dans les évaluations ultérieures de la Commission Européenne. Les impacts environnementaux restent un facteur important à prendre en compte en ce qui concerne les matières premières critiques, comme l'exprime par exemple la loi sur les matières premières critiques (CRMA) qui souligne l'importance de l'empreinte environnementale¹.

L'approche criticité d'OFREMI prend cependant en compte les aspects environnementaux (et sociaux). Comme le montre le Tableau 1, les matières premières associées à des impacts environnementaux élevés devraient être soumises à des réglementations environnementales, ce qui contribue au risque d'approvisionnement.

Des réflexions similaires ont été appliquées dans d'autres études de criticité dans le passé, mais d'autres interprétations du lien entre les impacts environnementaux et les matières premières critiques peuvent également être observées. Schrijvers et al. ont identifié 4 perspectives qui soutiennent la prise en compte des impacts environnementaux dans les évaluations de criticité (Schrijvers et al., 2020b) :

- *Perspective 1* : Les impacts environnementaux entraînent une probabilité élevée ou faible de rupture de l'approvisionnement d'un matériau en raison d'une réglementation potentielle (telle qu'appliquée par (European Commission, 2010)).

¹ <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-16127-2023-INIT/en/pdf>

- *Perspective 2* : L'utilisation d'un matériau à fort impact environnemental ou social affecte la réputation d'une entreprise (tel qu'appliqué par (Bach et al., 2016) dans la méthode ESSENZ). Ce risque est également pris en compte dans le rapport de (Barber et al., 2023).
- *Perspective 3* : L'utilisation d'un matériau a un impact faible ou élevé sur l'environnement (comme l'a considéré (Graedel et al., 2012), qui évalue l'impact environnementale des matières premières sur une troisième dimension, à côté des dimensions « risque d'approvisionnement » et vulnérabilité)
- *Perspective 4* : La perturbation de la disponibilité d'un matériau a un impact élevé ou faible sur l'environnement (comme mentionné par (Frenzel et al., 2017))

Ces différentes perspectives ne sont pas toujours explicitement appliquées dans les évaluations de criticité précédentes. La plupart des évaluations de criticité précédentes sont basées sur une sélection d'indicateurs de risque d'approvisionnement, qui sont combinés via une formule d'agrégation pour obtenir un score final. La sélection de ces indicateurs est souvent basée sur la disponibilité des données, mais aussi sur un « risque anticipé » sous-jacent, c'est-à-dire une trajectoire supposée de perturbations de la chaîne d'approvisionnement et des conséquences ultérieures pour le système évalué (Schrijvers et al., 2020b). Cette voie est rarement formulée explicitement, et l'absence de chaînes de cause à effet établies a été mise en évidence comme une lacune de la recherche dans le domaine de la criticité (Schrijvers et coll., 2020b).

Les impacts environnementaux ont été quantifiés soit par l'indice de performance environnementale (EPI), soit par les résultats de l'ACV. L'EPI est un indicateur au niveau national qui évalue dans quelle mesure chaque pays se rapproche des objectifs établis en matière de politique environnementale. L'EPI est composé de 58 indicateurs de performance, dont la performance en matière de changement climatique, la santé environnementale et la vitalité de l'écosystème (Wendling et coll., 2020). L'EPI a, par exemple, été appliqué dans les évaluations de criticité de (Bach et al., 2017, 2016 ; Commission Européenne, 2010 ; Roelich et al., 2014), où il suit soit la perspective 1, soit la perspective 2. Les résultats de l'ACV sont utilisés pour évaluer la dimension environnementale de (Graedel et al., 2012), en appliquant la perspective 3. (Bastein et al., 2015) utilisent les résultats de l'ACV dans leur évaluation de la criticité de l'économie néerlandaise pour évaluer les risques de réputation des entreprises, c'est-à-dire en appliquant la perspective 2.

2.1.4. Outil d'aide à la décision de l'IRTC

Pour remédier à l'absence de mécanismes de cause à effet explicitement appliqués dans les études de criticité antérieures et pour sensibiliser les entreprises aux risques d'approvisionnement, des chaînes de cause à effet ont été développées dans le cadre du projet IRTC Business, financé par EIT RawMaterials. Sur la base d'une série d'ateliers auxquels ont participé diverses parties prenantes, telles que des développeurs de méthodologies d'évaluation de la criticité, des entreprises et des instituts gouvernementaux, il a été identifié que les préoccupations des entreprises concernant les matières premières critiques sont triples : 1) les problèmes potentiels d'accessibilité physique, 2) les fortes fluctuations de prix et 3) l'atteinte à la réputation. Sur la base de ces trois types de risque, une chaîne de cause à effet est établie à la Figure 6.

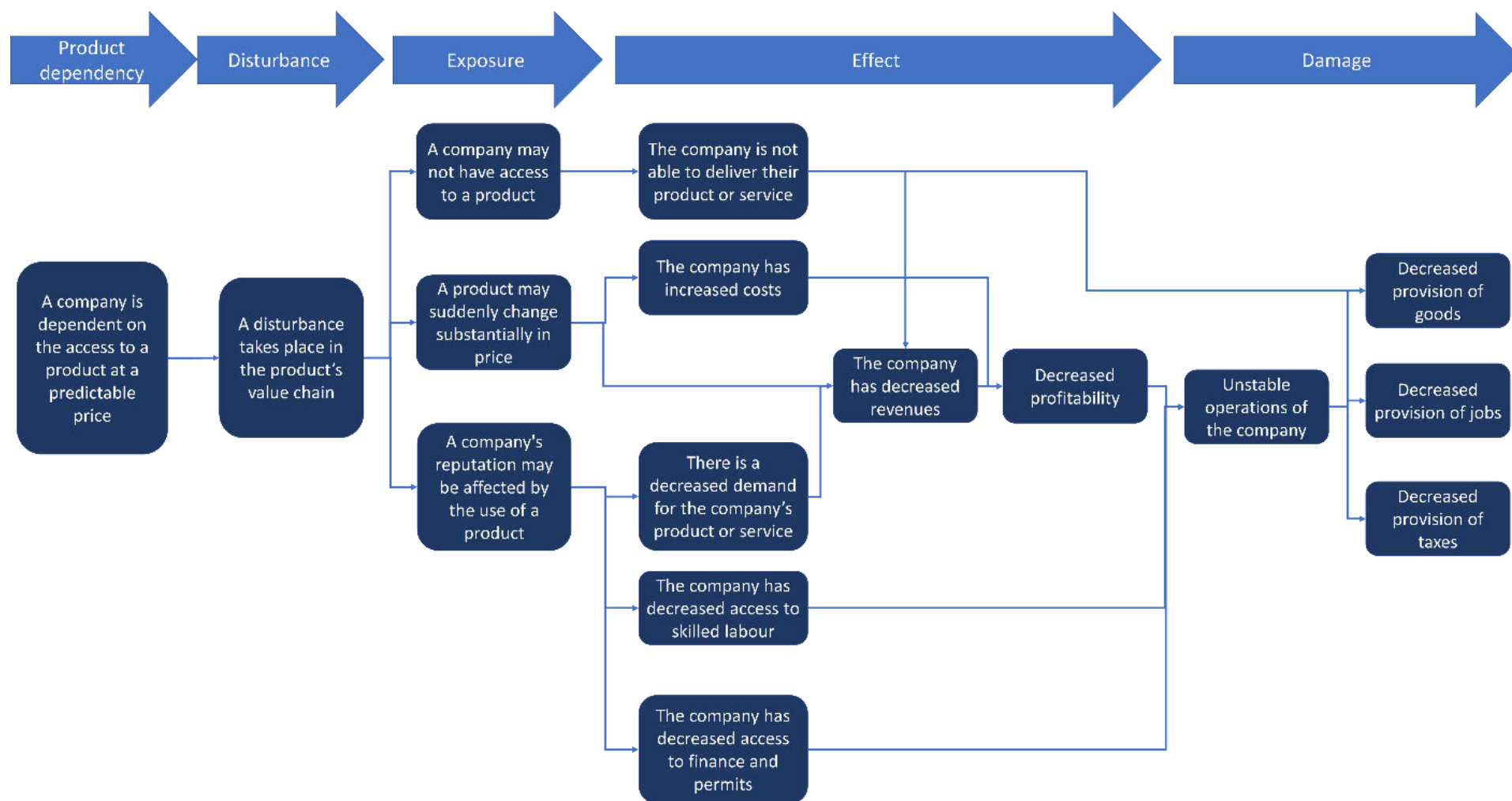


Figure 6 Mise en place d'une chaîne de cause à effet pour l'évaluation de la criticité des matières premières au niveau de l'entreprise dans le cadre du projet IRTC (Schrijvers et al., à paraître)

Les aspects de risque d'approvisionnement sont liés à cette chaîne de cause à effet par la formulation des scénarios (Figure 7). De plus, les mesures d'atténuation sont liées à la chaîne de cause à effet, selon qu'elles peuvent atténuer la source d'un risque, l'exposition potentielle d'une entreprise au risque ou les dommages subis par l'entreprise (Figure 8). Le modèle de cause à effet est mis en œuvre dans l'outil d'aide à la décision de l'IRTC (IRTC, 2023), un outil Web disponible gratuitement qui permet aux utilisateurs de naviguer dans le modèle en dépliant le récit étape par étape. Une notation relative sur les indicateurs retenus pour mesurer les aspects de risque d'approvisionnement est fournie pour plus de 50 matières premières. De plus, l'outil fournit des considérations pratiques concernant les mesures d'atténuation.

Le modèle IRTC tient compte de deux des quatre perspectives environnementales présentées à la section 2.1.3 :

- *Perspective 1* : Les impacts environnementaux entraînent une probabilité élevée ou faible de rupture de l'approvisionnement d'un matériau en raison d'une réglementation potentielle (telle qu'appliquée par (European Commission, 2010))
- *Perspective 2* : L'utilisation d'un matériau à fort impact environnemental ou social affecte la réputation d'une entreprise (tel qu'appliqué par (Bach et al., 2016) dans la méthode ESSENZ)

Les perspectives 3 et 4 dépassent le cadre de l'outil d'aide à la décision de l'IRTC. La performance environnementale des perspectives 1 et 2 est évaluée à la fois par l'indice de performance environnementale (EPI) et les résultats de l'ACV du berceau à la porte, qui permettent aux entreprises de réaliser des analyses de sensibilité en comparant différents indicateurs possibles.

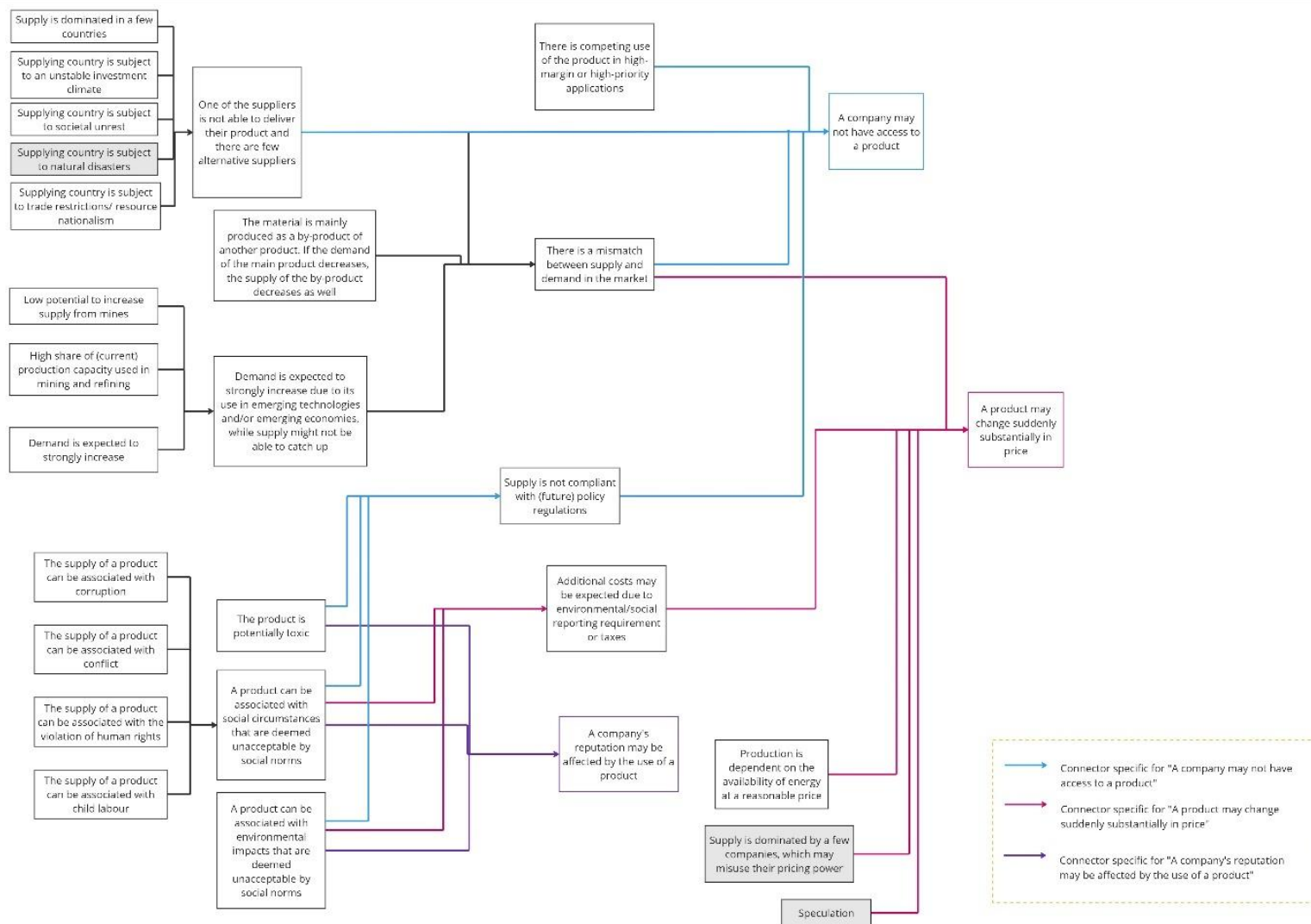


Figure 7 Relier les aspects liés aux risques d'approvisionnement aux risques au niveau de l'entreprise par le biais de scénarios au sein du projet IRTC (Schrijvers et al., à paraître). Les cases grises ne sont pas quantifiées dans l'outil d'aide à la décision de l'IRTC.

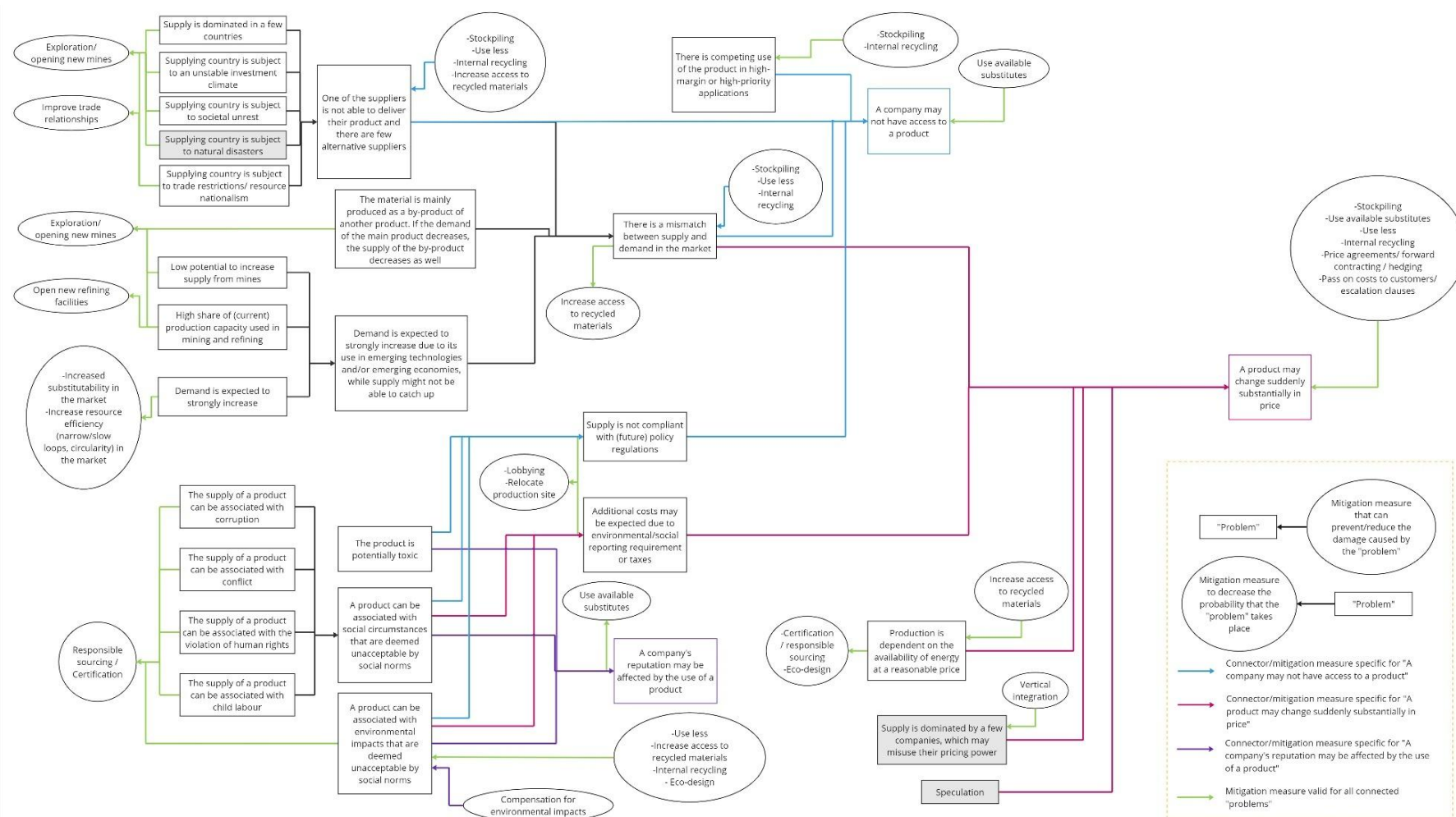


Figure 8 Relier les aspects liés aux risques d'approvisionnement et les mesures d'atténuation aux risques au niveau de l'entreprise par le biais de scénarios au sein du projet IRTC (Schrijvers et al. à paraître). Les cases grises ne sont pas quantifiées dans l'outil d'aide à la décision de l'IRTC.

2.2. Perspective « ACV »

2.2.1. Impacts environnementaux de la consommation des ressources

ACV attributionnelle et conséquentielle

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode largement appliquée et reconnue pour évaluer les impacts environnementaux de la production et/ou de l'utilisation des matières premières.

Les matières premières sont souvent produites sous forme de coproduits ou même de sous-produits d'autres extrants de processus. Pour voir ce que cela implique pour l'évaluation de leurs impacts environnementaux, il est pertinent de faire la distinction entre l'ACV attributionnelle et l'ACV conséquentielle.

ACV attributionnelle

Une ACV attributionnelle (ACVA) a pour but d'identifier la part des charges globales qui peut être associée à un produit (et à son cycle de vie) (Sonnemann et Vigon, 2011). Une ACVA se déroule selon les étapes suivantes :

- Les processus nécessaires au cours du cycle de vie d'une matière première sont identifiés (par exemple, en suivant la chaîne d'approvisionnement d'une matière première)
- Les impacts environnementaux de ces processus sont évalués
- Il est déterminé quelle part de ces impacts environnementaux peut être attribuée à la matière première étudiée

L'attribution des impacts environnementaux aux sorties spécifiques d'un processus se fait par partitionnement, souvent appelé « allocation », sur la base d'une clé d'allocation normative (Sonnemann et Vigon, 2011). Le critère d'allocation peut être basé sur la masse des différents extrants du procédé, mais le plus souvent, l'allocation économique est prédéfinie, par exemple parce que le revenu économique relatif généré par chaque co-produit peut représenter la part de « responsabilité » que ce co-produit porte sur l'existence, et donc les impacts environnementaux, du processus (Guinée et al., 2004; D. L. Schrijvers et al., 2021).

Plusieurs matières premières critiques sont principalement produites en tant que sous-produits d'autres métaux. C'est par exemple le cas des terres rares, qui sont souvent produites comme des sous-produits du fer, et toujours comme des coproduits les uns des autres. D'autres sous-produits typiques sont l'indium, le rhodium, le gallium, le germanium, le rhénium et le cobalt. Le fait que ces matières premières soient souvent considérées comme un sous-produit, et non comme un coproduit, implique que les revenus qu'elles génèrent ne couvrent pas les coûts opérationnels des activités d'extraction ou de raffinage. Leur contribution relativement faible aux revenus économiques obtenus par les processus de production se traduit par une attribution relativement faible des impacts environnementaux à ces produits. Par conséquent, **les impacts environnementaux des matières premières critiques peuvent être estimés faibles via une ACV attributionnelle, en raison de ce processus d'allocation.**

ACV conséquentielle

Une ACV conséquentielle (ACVC) vise à évaluer les impacts environnementaux causés par une décision, qui se manifestent souvent par une demande accrue pour un produit (Sonnemann et Vigon, 2011). Les étapes de base d'une ACVC sont les suivantes :

- Identification des processus concernés par la décision (par exemple, la demande accrue d'une matière première)
- Evaluation des impacts environnementaux causés par les processus concernés
- Modélisation des effets indirects subséquents et des impacts environnementaux correspondants, tels que la production de coproduits, qui peuvent remplacer d'autres procédés de production.

Le fournisseur le plus susceptible de répondre à un changement de la demande d'une matière première est appelé le **fournisseur marginal**. Parmi un mélange de fournisseurs sur un marché où la demande pour un produit augmente, le fournisseur marginal est celui qui peut augmenter son offre avec les coûts d'exploitation marginaux les plus bas, en appliquant souvent une technologie moderne (en tenant compte des effets à long terme sur les investissements en capital) (Consequential-LCA, 2015).

Si le produit à l'étude concerne un sous-produit, il est peu probable que la demande accrue pour ce sous-produit augmente son approvisionnement en provenance des mines (car les revenus générés par ce sous-produit ne couvrent pas les coûts de production). Dans ce cas, l'offre est limitée. Les conséquences d'une demande supplémentaire pour ce sous-produit dépendent de *la contrainte de la demande*, c'est-à-dire de l'offre excédentaire (l'offre est supérieure à la demande) ou de l'étroitesse du marché. Si le sous-produit est fourni en surplus, une demande supplémentaire peut être satisfaite par l'approvisionnement à partir du stockage. Dans le cas d'un marché tendu, la demande supplémentaire pour cette matière première affecte son **utilisateur marginal**, qui est l'utilisateur de la matière première qui est le plus susceptible de cesser d'utiliser le sous-produit spécifique et de substituer cette matière première à un autre matériau, produit ou technologie (Schrijvers et al., 2022). Les impacts environnementaux liés à cette substitution sont évalués comme les impacts causés par la demande supplémentaire pour le sous-produit.

Pour illustrer cela, on peut imaginer que la demande accrue de praséodyme, un élément de terre rare, n'entraîne pas l'extraction supplémentaire de ce métal. Au lieu de cela, une demande accrue peut détourner l'utilisation du praséodyme d'un autre utilisateur capable d'utiliser une matière première ou une technologie différente à la place. S'il est difficile de substituer le praséodyme, par exemple, dans les éoliennes, on peut s'attendre à ce que la substitution ait lieu au niveau technologique, c'est-à-dire qu'une éolienne à « gearbox » est utilisée à la place d'une éolienne à aimants permanents. Les incidences environnementales liées à cette substitution devraient englober l'ensemble du cycle de vie des technologies substituées.

Les études ACVC nécessitent des analyses de marché et, éventuellement, l'évaluation de différents scénarios, si différents utilisateurs marginaux ou fournisseurs marginaux peuvent être identifiés. Les étapes subséquentes de l'analyse peuvent toutefois être utiles pour mettre l'accent sur les impacts environnementaux potentiels ou les avantages liés à des décisions spécifiques telles que le recyclage accru d'une matière première.

Données ACV : disponibilité de l'extraction des ressources

Trois grandes sources de données peuvent aujourd'hui être distinguées pour les ICV (Inventaires du cycle de vie) relatifs à la production de matières premières minérales (extraction minière + métallurgie):

- Les bases de données (BDD) ICV telles qu'ecoinvent, Sphera (anciennement GaBi) ou encore la LCDN (Life Cycle Data Network, BDD européenne associée au PEF).
- La littérature scientifique.
- Les rapports des associations industrielles de métaux (ex : Nickel Institute, International Zinc Association, etc.).

En considérant ces différentes sources, des données ICV sont disponibles pour la grande majorité des métaux (cf. Nuss and Eckelman, 2014, bien que la liste n'est plus tout à fait à jour actuellement). Les principaux manques de données d'ICV sont observés pour des petits métaux tels que le germanium, les terres rares ou platinoïdes mineurs (par ex : osmium, iridium) (Charpentier Poncelet et al., 2022c, suppl. information section 3).

Il convient de noter que certaines limites peuvent parfois être identifiées dans les ICV existants dans les BDD (Fiorletta et al., 2020) :

- Sphera : Un niveau d'agrégation et un manque de transparence importants dans les ICV et les métadonnées associées (problématique de la « boîte noire »). Ainsi, il peut parfois être compliqué d'analyser les sources de données d'origine qui ont permis le développement des

datasets. Dans certains cas de figure, les données proviennent directement de l'industrie (associations industrielles), tandis que, pour le reste, les ICV s'appuient sur la littérature.

- Ecoinvent : les ICV relatifs aux métaux sont généralement développés à partir de données de la littérature. A partir de celles-ci, les données sont souvent "extrapolées" afin de représenter la production mondiale de métaux (cf. Les datasets "Rest-of-the-world – RoW"). Cela peut parfois ainsi induire un certain manque de représentativité géographique et technologique. Ce manque de représentativité s'applique également aux données relatives à la gestion des déchets miniers (« *tailings* ») qui peuvent générer des émissions vers l'environnement dont la quantification au travers du modèle ecoinvent s'avère relativement incertaine (Muller et al., 2022). Enfin, les ICV relatifs aux métaux dans ecoinvent révèlent également des incohérences au niveau des bilans matières, dans la mesure où les bilans de masse au niveau des substances/ressources ne sont pas forcément équilibrés (Beylot et al., 2021; Lai and Beylot, 2023).

La littérature scientifique constitue une source importante de données ICV (Rachid et al., 2023), avec des données pouvant être assez hétérogènes en termes de qualité, représentativité, complétude globale (flux intrants/extrants). Ainsi, bien que des données de bonne qualité peuvent être disponibles, il convient de noter que le périmètre des données est souvent assez limité dans la mesure où les études se focalisent généralement sur des cas d'études bien spécifiques, avec ainsi une bonne représentativité vis-à-vis du site étudié mais une couverture limitée par rapport au marché global du métal étudié. Par ailleurs, les ICV issus de la littérature proviennent généralement de sources diverses : l'industrie, d'autres sources de la littérature, la modélisation/simulation, ou encore des hypothèses/estimations. Ce qui induit une fiabilité des données également relativement hétérogène.

Concernant les données ICV des associations industrielles (parfois également publiée dans la littérature scientifique), celles-ci proviennent généralement de l'industrie mais ont tendance à être présentée de manière très agrégée d'un point de vue géographique et technologique, avec une représentativité pouvant parfois être assez limitée (ex : Van Genderen et al., 2016; Mistry et al., 2016).

Face aux différentes limites identifiées dans les ICV actuellement existants, différents travaux de recherche sont aujourd'hui en cours dans le but d'améliorer les ICV relatifs aux métaux :

- Un groupe de travail international, mené par le BRGM, travaille ainsi à la compilation et l'analyse approfondie (qualité et représentativité des données) des ICV existants (notamment dans la littérature) sur les métaux, ceci dans le but de développer des modèles ACV globaux représentant à la fois les différentes chaînes d'approvisionnement et le marché mondial de chaque métal étudié (entre 50 et 60 métaux considérés). Ce groupe inclut un total de 14 institutions, essentiellement académiques, avec également ecoinvent (Lai et al., 2024b). Les données ICV compilées à l'issue de ce travail seront mises à disposition au travers d'un article scientifique.
- D'autres axes de recherche spécifiques sont également travaillés dans d'autres projets de recherche, afin d'améliorer la qualité globale des ICV métaux :
 - Un groupe de travail mené par l'International Copper Association (ICA) travaille actuellement à une meilleure prise en compte des impacts des déchets miniers (tailings) en ACV, notamment via l'utilisation d'autres approches de modélisation telles que la modélisation géochimique (Muller, 2024);
 - Des travaux autour d'une amélioration des bilans matières dans les ICV métaux sont également en cours, impliquant notamment le BRGM et ecoinvent (ainsi que d'autres partenaires européens ; cf. Projet HiQ-LCA : <https://hiq-lca.eu/>);
 - Enfin, d'autres travaux visant à améliorer la qualité globale des ICV métaux sont également menés, en s'appuyant sur des approches de modélisation (ex : simulation de procédés), ou de télédétection (ex : imageries satellitaires), notamment dans le cadre des projets ciblés des PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche (ANR, 2024)).

La relation entre l'utilisation des ressources et les limites planétaires

La production de métaux contribue significativement aux impacts environnementaux globaux, non seulement en termes de gaz à effets de serre (GES), auxquels elle contribue à hauteur de 7.2 Gt CO₂eq. (environ 5-10% des émissions globales) mais aussi de consommation d'eau douce avec 78.8 km³ consommés annuellement (5% du total global) et d'environ 2% de la contribution à la perte de biodiversité globalement (Schenker et al., 2022). Ces impacts sont actuellement principalement dus à la production de métaux majeurs, soient l'acier, l'aluminium, le cuivre, le plomb, le zinc et l'étain. Cependant, des quantités exponentielles de nombreux autres métaux sont requises par rapport à leur production actuelle pour les technologies promues pour la transition énergétique et écologique.

De ce fait, bien que les technologies promues pour la transition énergétique puissent potentiellement réduire à terme les émissions de GES, elles dépendent aussi de la production massive de ces métaux ayant un impact cumulatif important sur l'environnement. Ainsi, en plus des considérations liées à la criticité, des enjeux environnementaux ressortent désormais de la production globale de métaux, contribuant au potentiel dépassement de certaines limites planétaires (Schenker et al., 2022). En effet, du fait de leur plus faible concentration dans les minerais en général, leur extraction et raffinage pourraient induire des externalités environnementales importantes, non seulement en termes d'émissions de GES sur le court terme, mais aussi de consommation d'eau douce et de perte de biodiversité. D'autres limites pour lesquelles il existe moins d'information aujourd'hui pourraient aussi être atteintes à cause de cette production (Schenker et al., 2022). Il en va de même pour certaines limites régionales, notamment en termes de consommation d'eau douce (Ridoutt and Pfister, 2010), qui pourrait déjà être dépassée avant même l'ouverture de nouvelles mines. En bref, de façon paradoxale, la production de métaux requis pour la transition énergétique permettant de passer sous un seuil critique d'émissions de GES sur le moyen terme, est elle-même émettrice de GES, et pourrait parallèlement contribuer au dépassement d'autres limites planétaires.

En outre, le Bureau européen de l'environnement estime que la loi CRM est insuffisante sur certains aspects sociaux et environnementaux, notamment en lien avec les limites planétaires (EEB, 2023). Ainsi, le Bureau encourage la poursuite d'objectifs de réduction de la consommation de matières premières, afin de respecter les limites planétaires. Il est incertain à quel point un cadre politique ou réglementaire visant à protéger l'environnement de façon "absolue", par exemple en visant le contrôle de la pollution globale ou régionale sous certains seuils ou limites planétaires, pourrait éventuellement venir limiter la production de métaux, et contribuer ainsi à leur criticité.

2.2.2. L'Aire de protection « ressources » en ACV

Le concept d'aire de protection aide les praticiens de l'ACV or ADCV à définir les sujets de sauvegarde pertinents pour s'assurer de la durabilité des produits et services. Il existe de multiples perspectives sur ce qui devrait être protégé en ce qui concerne l'aire de protection des ressources naturelles (Dewulf et al., 2015). Le groupe de travail du Life Cycle Initiative du PNUE a identifié 27 méthodologies basées sur différentes perspectives pour évaluer les impacts de l'utilisation des ressources minérales (Sonderegger et al., 2020). Neuf méthodes modélisent l'épuisement des stocks naturels, trois se concentrent sur l'extraction en termes d'énergie et douze traitent de la baisse de la teneur du minerai et des besoins supplémentaires, de l'énergie ou des coûts qui en résultent. Les méthodes d'épuisement concernent la réduction de certains stocks (naturels et anthropiques), souvent utilisés comme indicateur pour déterminer la disponibilité des ressources minérales. Les méthodes de comptabilité thermodynamique quantifient l'énergie cumulée utilisée dans un système de produits. Les méthodes quantifiant les efforts futurs visent à évaluer les conséquences de l'utilisation actuelle des ressources minérales sur les efforts futurs nécessaires à l'extraction d'une unité de ressources minérales.

Le problème lié aux ressources, notamment minérales, est aujourd'hui défini comme étant lié à leur accessibilité pour les humains. La *Taskforce mineral resources* de la *Life cycle initiative* ont défini, de façon consensuelle, l'aire de protection pour les ressources minérales (faisant partie de l'aire de protection des ressources naturelles) en ACV comme « le potentiel d'exploiter la valeur que les ressources minérales peuvent avoir pour l'homme dans la technosphère » et ont défini que le dommage sur l'aire de protection « est quantifié comme la réduction ou la perte de ce potentiel provoquée par

l'activité humaine. » (Berger et al., 2020, traduction libre de l'anglais). Partant de cette définition, Charpentier Poncelet et al. (2022a) ont suggéré de distinguer la valeur économique, capitalisée sous formes d'échanges financiers le long de la chaîne de valeur transformant les ressources en produits, et la valeur d'usage, représentant la valeur expérientielle liée à l'usage des produits et services.

Les travaux en cours dans le cadre du « *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Method 3* » (GLAM 3), présentés par un poster à la conférence SETAC 2024, proposent que la question à laquelle doivent répondre les méthodes d'évaluation des impacts pour l'utilisation des ressources minérales est : « *Comment puis-je quantifier les conséquences de la perte temporaire ou permanente des valeurs fonctionnelles des ressources naturelles causée par leur utilisation dans un système de produits ?* », et établissent que les externalités de l'utilisation des ressources sont telles que « *les conséquences peuvent être les efforts supplémentaires requis pour compenser les valeurs perdues, ou alors les valeurs perdues en tant que telles* » (Motoshita et al., 2024, traduction depuis l'anglais). Ces travaux identifient 4 phénomènes menant à un impact sur la valeur instrumentale des ressources, correspondant à priori à ce que les auteurs considèrent comme l'aire de protection : l'occupation, la dégradation, la dissipation, et la déplétion (Figure 9).

Les flux dissipatifs sont définis comme étant ceux rendus inaccessibles par l'activité humaine, pour une durée temporelle déterminée (Beylot et al., 2020). Ainsi, plusieurs méthodes d'évaluation des impacts portant sur la dissipation, décrites dans la prochaine sous-section, visent à quantifier les impacts des flux dissipatifs des ressources minérales sur l'aire de protection ressources naturelles. On peut aussi considérer qu'en dehors de la terminologie de *flux dissipatifs*, certaines activités humaines peuvent rendre inaccessibles les ressources sur une horizon temporelle plus ou moins longue (Dewulf et al., 2021). Ainsi, la méthode CTI-LCIA a pour ambition de quantifier les impacts des activités humaines rendant temporairement inaccessible les ressources minérales (Dewulf et al., 2024). Finalement, d'une façon quelque peu différente, soit par une approche « outside-in » telle que qualifiée dans GLAM2 (Berger et al., 2020; Sonderegger et al., 2020), on peut aussi considérer la criticité comme un problème régionalisé (ou à l'échelle d'une industrie) de risque d'inaccessibilité aux ressources. Ainsi, les différentes méthodes d'évaluation d'impact, passant des méthodes quantifiant la déplétion, la dissipation, ou la criticité, empruntent des visions différentes quant à la temporalité et la régionalité des impacts devant être considéré. Différentes méthodes pourraient donc en théorie être couplées pour quantifier l'impact sur l'aire de protection des ressources naturelles suivant une perspective donnée suivant les perspectives égalitariennes, hiérarchisés ou individualistes (Figure 10) (Charpentier Poncelet et al., 2022a). Selon ces auteurs, au moins 11 chemins d'impacts potentiels peuvent mener à un impact sur l'aire de protection des ressources naturelles.

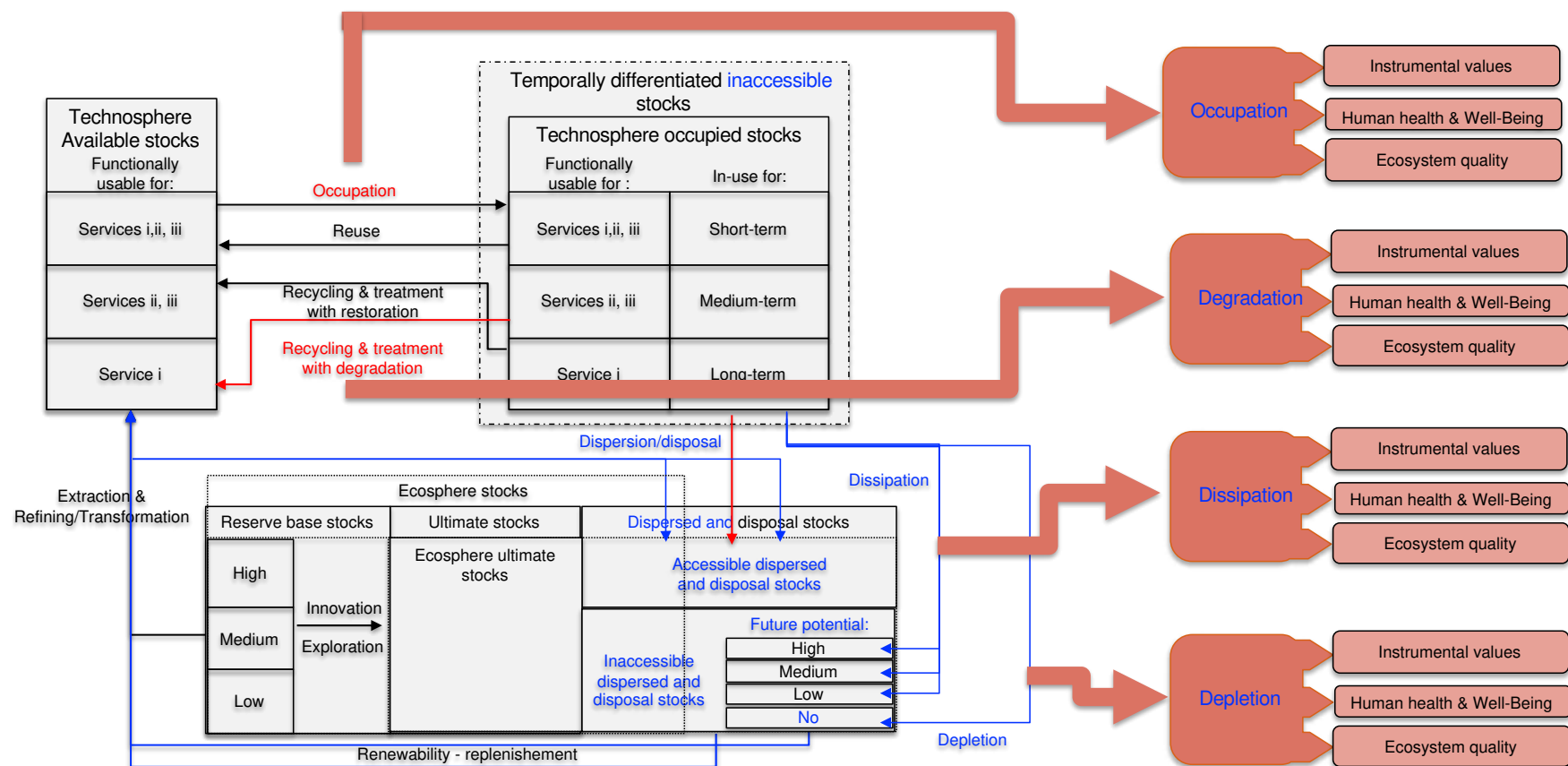


Figure 9 Voies d'impacts concernant l'utilisation de ressources naturelles identifiées par la Life Cycle Initiative dans le cadre des travaux du GLAM3 (travaux en cours) (Motoshita et al., 2024)

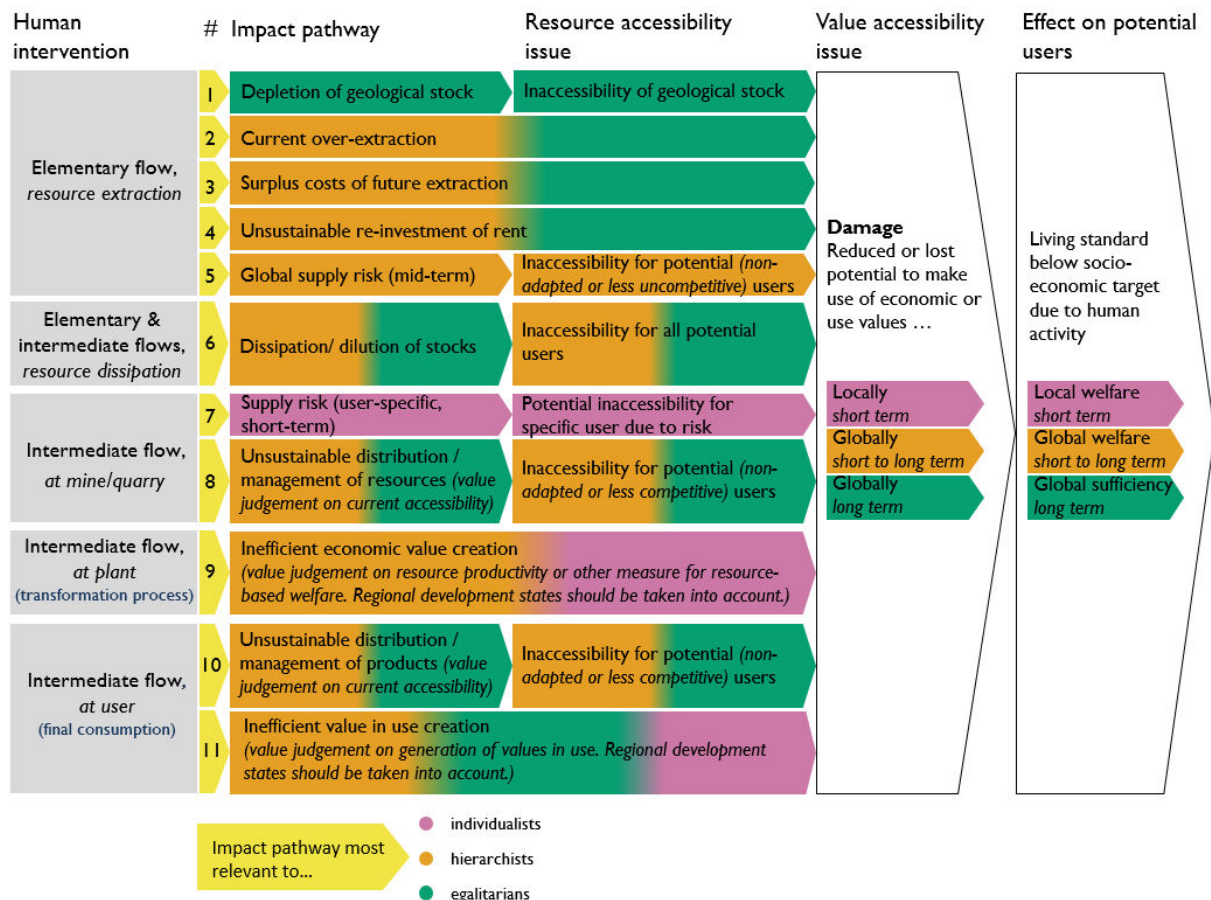


Figure 10 Voies d'impact potentiels liés à l'utilisation des ressources minérales et perspectives culturelles auxquelles ils sont les plus pertinents (Charpentier Poncelet et al., 2022a)

Les méthodes de dissipation et d'inaccessibilité

Depuis l'identification du besoin de développer des approches permettant de quantifier la dissipation par la Task force mineral resources du GLAM2 (Berger et al., 2020; Sonderegger et al., 2020) et le JRC (Zampori and Pant, 2019), la recherche sur la prise en compte de la dissipation des ressources minérales en ACV a été prolifique au cours des cinq dernières années. Beylot et al. (2020) ont défini la dissipation et établi des pistes de recherches à court et long terme pour sa prise en compte en ACV. En résumé, les auteurs ont défini (1) les flux dissipatifs comme étant les flux vers différents compartiments de la technosphère et de l'environnement rendus inaccessibles techno-économiquement pour l'utilisation par l'humain sur une période temporelle définie (par exemple, 25 ou 100 ans); (2) que la prise en compte idéale à long terme serait une quantification des flux dissipatifs au niveau des inventaires de cycle de vie (ICV), et donc une implication des développeurs de bases de données en ACV dans la quantification de ces flux; (3) mais qu'à court terme, la différence entre les matériaux recyclés et extraits (flux élémentaires) pourraient permettre une première quantification de la dissipation, et/ou que des méthodes d'évaluation d'impact simplifiées ou proxy permettant d'estimer la dissipation soient utilisées. Il a aussi été suggéré d'élargir le concept de dissipation afin de couvrir un lot d' « actions compromettantes » rendant inaccessible les ressources pendant une plus ou moins longue période, et représentant un impact sur l'aire de protection des ressources naturelles (Dewulf et al., 2021).

Plusieurs méthodes ont ainsi été développées ces dernières années :

- La méthode **Environmental Dissipation Potential (EDP)** (van Oers et al., 2020b). Cette méthode quantifie la contribution des émissions de métaux vers l'environnement à la dissipation des réserves géologiques ultimes, estimées avec une portion de la concentration des éléments

dans la croûte terrestre. Les développements proposés dans cette méthode s'insèrent dans le point (1) énoncé ci-dessus, mais ne couvrent qu'une portion des flux dissipatifs, soient ceux émis vers l'environnement.

- Les méthodes **Average Dissipation Rate (ADR) et Lost Potential Service Time (LPST)** (Charpentier Poncelet et al., 2022c, 2021). Ces méthodes permettent d'estimer la quantité de métaux dissipés en se basant sur des moyennes globales de dissipation, ainsi que la valeur perdue pour l'humain en utilisant la valeur économique comme proxy pour cette dernière. Il est prévu qu'elle s'applique aux flux d'extraction dans les ICV actuels, suivant le point (3) ci-dessus.
- La méthode **Joint Research Centre – Life Cycle Inventory (JRC-LCI)** (Beylot et al., 2021). Cette méthode permet de quantifier les flux dissipatifs vers différents compartiments à l'échelle des données d'ICV. Celle-ci peut être couplée à la méthode JRC price-based (Ardente et al., 2023) prenant en compte la valeur économique des métaux pour mesurer l'impact des flux dissipatifs sur l'aire de protection ressources.
- La méthode **Abiotic Resource Project (ARP)** (Owsianiak et al., 2021). Cette méthode est en fait un ensemble de deux critères visant à affiner la détermination des flux vers l'environnement pouvant être considérés comme dissipatifs. Ses développements avaient pour but de coupler ces critères à la méthode EDP. Le premier critère vise à isoler les flux élémentaires vers l'environnement dans les ICV provenant d'une ressource (afin de ne pas considérer, par exemple, les émissions de métaux provenant de la combustion de pétrole). Le second critère vise à mesurer les concentrations environnementales cumulées dues aux émissions globales dans différents compartiments, et de les comparer à un seuil au-delà duquel les émissions de métaux s'y concentrant seront considérés comme récupérables dans le futur. Ce seuil est déterminé par la concentration minimale extraite dans les minerais actuellement. Ainsi, si les émissions globales cumulées permettent de dépasser ce seuil dans un compartiment environnemental, les émissions seront considérées non-dissipatives car récupérables dans le futur.
- La méthode **Economic Value Dissipation Potential (EVDP)** (Santillán-Saldivar et al., 2023). Cette méthode est similaire au couplage des méthodes JRC-LCI et JRC price-based, mais se veut une amélioration de celles-ci grâce à l'ajout, pour le calcul des FCs, d'une fonction de récupérabilité des métaux dissipés dans les différents compartiments ainsi que de la considération de la valeur par une fonction couplant le prix des métaux à leur importance économique en Europe (tel que considéré dans les approches d'évaluation de la criticité).
- La méthode « **Contribution to inaccessibility** » (**CTI-LCIA**) (Dewulf et al., 2024) permettant d'opérationnaliser l'identification et la quantification de l'inaccessibilité aux ressources sur une période donnée, suivant l'idée initiale de Dewulf et al. (2021). La méthode quantifie l'inaccessibilité des ressources due à plusieurs actions compromettant l'accessibilité des ressources sur une horizon temporelle définie. Elle prend aussi en compte un degré d'inaccessibilité des ressources en terme de « temps à l'accessibilité », qui est de plus en plus long lorsque la ressource est la moins accessible (par exemple, une inaccessibilité de 500 ans pour les émissions de ressources vers l'environnement). Ce temps à l'accessibilité est spécifié ces aspects pour les principaux « états » possibles des ressources minérales pendant leur cycle de vie : minerais, concentrés, commodités, composants, produits en utilisation, produits en fin de vie, déchets, résidus miniers, et émissions vers l'environnement.

La plupart de ces méthodes ont récemment été analysées sélectivement dans le rapport ScoreLCA 2020-05 (de Caemel et al., 2022) et, plus récemment, par Berger (2024) et Beylot et al. (2024). Il est à noter que tant le rapport ScoreLCA (de Caemel et al., 2022) que l'article de Berger (2024) considèrent dans leur évaluation une version intermédiaire des méthodes ADR et LPST publiée en 2021, plus que la version complète publiée en 2022. Nous recommandons la lecture du rapport ScoreLCA2020-05 et l'analyse critique de Beylot et al. (2024) et/ou de la documentation propre à chacune des méthodes pour une description plus complète de chacune d'entre elles.

Les méthodes de risque d'approvisionnement en ACV

La plupart des méthodologies pour évaluer l'utilisation des ressources en ACV ont été développées dans une perspective où les ressources naturelles en tant qu'actifs sont considérées comme sujet de

sauvegarde, ou visent à évaluer l'impact sur ces actifs. Comme décrit dans la section précédente, la protection des chaînes d'approvisionnement des produits et services, notamment au travers l'accessibilité aux ressources, revêt une importance particulière et a été un sujet de débat dans la communauté ACV (Drielsma et al., 2016). Cette perspective va au-delà des méthodes traditionnelles utilisées en ACV. En raison de l'intérêt considérable pour l'intégration et le développement de cette perspective, plusieurs méthodologies ont été développées sur la base d'un cadre méthodologique pour intégrer le risque d'approvisionnement dans l'ACV (Sonnemann et al., 2015).

Contrairement aux méthodes suivant un chemin d'impact « *inside-out* » utilisées pour caractériser les impacts de l'utilisation des ressources en ACV à partir des flux élémentaires, soit l'épuisement, la comptabilité thermodynamique, ou encore l'effort futur (et plus récemment, la dissipation ou l'inaccessibilité des ressources), le risque d'approvisionnement est caractérisé comme un dommage *midpoint* suivant une trajectoire d'impact « de l'extérieur vers l'intérieur » (Cimprich, 2017). En effet, le risque d'approvisionnement pourrait impacter négativement la performance d'un produit, entraînant une augmentation des coûts de production, et *in fine*, la prospérité humaine (Cimprich et al., 2017). Par conséquent, la plupart des méthodes développées pour prendre en compte le risque d'approvisionnement en ACV évaluent les impacts socio-économiques au niveau *endpoint*.

Dans un premier temps, trois méthodes visaient à fournir des informations sur la criticité des matériaux en complément de l'ACV environnementale en tenant compte des concepts de risque d'approvisionnement : la méthode du risque géopolitique d'approvisionnement (GeoPolRisk), introduite par Gemechu et al. (2015) ; le potentiel de rareté économique (ESP), développé par (Schneider et al. (2014); et la méthode intégrée d'évaluation de l'efficacité des ressources (ESSENZ), qui est une extension et une mise à jour de la méthode ESP (Bach et al., 2016). Ces études ont justifié le lien entre la criticité des ressources et les flux biophysiques dans l'ACV, en présentant la criticité des ressources comme un complément à l'ACV qui traitent des voies d'impact « *outside-in* » (Cimprich et al., 2019; Mancini et al., 2016). Une méthode supplémentaire, SPOTTER, a été développée plus récemment par Berr et al. (2022).

ESSENZ (Bach et al., 2016): Cette méthode complète mesure l'efficacité des ressources des produits et l'intègre dans l'ACV. Il couvre 11 catégories de disponibilités socio-économiques et fournit des valeurs pour 11 indicateurs, fixés par rapport à des valeurs cibles, à l'instar de l'approche de la rareté écologique. Les valeurs cibles par défaut sont basées sur l'avis d'experts et des enquêtes auprès des parties prenantes, normalisées à l'aide de données de production mondiales. Les facteurs de caractérisation (CF) varient de 0 à $1,7 \times 10^{13}$ (sans dimension). Des valeurs CF plus élevées indiquent une restriction potentielle plus élevée de la disponibilité des ressources. La méthode suppose une chaîne d'approvisionnement mondiale et ne reflète pas le risque d'approvisionnement pour des parties prenantes économiques spécifiques telles que les pays ou les entreprises. La méthode ESSENZ est ensuite mise à jour par (Yavor et al., 2021) sous le nom de CS-ESSENZ afin d'appliquer une perspective spécifique à l'entreprise, plutôt qu'une perspective mondiale comme dans la méthode ESSENZ originale.

SPOTTER (Berr et al., 2022): L'approche SPOTTER évalue les impacts des ruptures d'approvisionnement au sein des LCSA en intégrant la variabilité spatio-temporelle, la distinguant ainsi des autres méthodes qui peuvent ne pas tenir compte de la nature dynamique des ruptures d'approvisionnement entre différentes périodes et régions. SPOTTER évalue de manière unique les impacts à court terme (dans les cinq prochaines années) et à moyen terme (cinq à quinze ans). SPOTTER combine des facteurs de caractérisation de la rupture d'approvisionnement et de la vulnérabilité pour obtenir un facteur de caractérisation agrégé final par flux de matériaux. Un aspect important de l'approche SPOTTER est sa couverture complète de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Alors que certaines méthodes se concentrent uniquement sur l'approvisionnement en matières premières, SPOTTER étend son analyse pour inclure plusieurs étapes, telles que l'extraction des ressources, le traitement, la fabrication et l'utilisation, en effectuant une analyse détaillée des points chauds qui identifie les goulets d'étranglement potentiels au sein du système de produits, c'est-à-dire pour identifier à quelle étape du cycle de vie la criticité est la plus préoccupante. Les risques d'approvisionnement sont considérés comme entraînant une disponibilité

limitée d'une matière première, ainsi qu'une variabilité des coûts, qui sont tous deux évalués avec un facteur de vulnérabilité distinct, avant agrégation. La substitution au niveau des matières premières (et non au niveau du produit final) est envisagée pour atténuer les impacts des perturbations de l'approvisionnement. (Berr et al., 2022) reconnaissent que la méthode est difficile à appliquer en raison du grand nombre de flux de matériaux et d'indicateurs potentiels, de la disponibilité limitée des données et du fait que les facteurs de caractérisation sont spécifiques à l'étude de cas. Pour simplifier l'analyse, ils suggèrent de limiter l'étude aux matières premières critiques telles que définies par la Commission Européenne.

GeoPolRisk (Gemechu et al., 2015a): Cette méthode évalue le risque géopolitique lié à l'approvisionnement en ressources abiotiques (énergétiques et non énergétiques) pour l'ACV. Il évalue le risque d'approvisionnement en matières premières pour un acteur économique au cours d'une année donnée, en fournissant à la fois un score non dimensionnel et un FC pour les flux élémentaires de ressources en ACV, exprimés en kg Cu-eq/kg. Le calcul comprend trois composantes : la concentration de la production minière, la part des importations pondérée par l'instabilité politique (à l'aide de l'indicateur de gouvernance mondiale - dimension de stabilité politique et d'absence de violence), complétée par la production intérieure, et le prix échangé de la matière première. Contrairement à d'autres méthodes, GeoPolRisk propose des FC différenciés spatialement et temporellement, applicables aux écoulements élémentaires de fond en ACV, pour voir la contribution de différentes matières premières au risque global d'approvisionnement. Cette méthode suppose que toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement sont exécutées par un seul acteur économique (par exemple, la France ou l'Europe), ce qui permet de déterminer le risque d'approvisionnement pour chaque matière première impliquée dans la chaîne d'approvisionnement si l'ensemble de la chaîne de processus était déplacé vers l'emplacement de cette partie prenante.

Travaux récents sur la méthode GeoPolRisk

Le "Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Methods" (GLAM) et le projet ORIENTING recommandent tous deux d'utiliser la méthode GeoPolRisk pour l'évaluation des ressources minérales en ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement au niveau du système de produit. ORIENTING est un projet de recherche financé par le programme-cadre "EU Horizon 2020" qui vise à développer une méthodologie opérationnelle pour l'évaluation de la durabilité du cycle de vie des produits, applicable tant aux modèles d'affaires linéaires que circulaires (ORIENTING, 2024). Suivant les recommandations du GLAM, la méthode GeoPolRisk a fait l'objet d'un développement avec un modèle de caractérisation des impacts prenant en compte le risque d'approvisionnement des ressources minérales au niveau midpoint (Koyampambath, 2023; Santillán-Saldivar et al., 2022). Le modèle endpoint de la méthode GeoPolRisk est basé sur l'élasticité du prix de la matière première échangée, en lien avec les dommages économiques associés à la ressource minérale dans un système de produits (Santillán-Saldivar et al., 2020).

En réponse aux recommandations du projet ORIENTING, une bibliothèque basée sur Python permettant d'automatiser le calcul de la méthode GeoPolRisk a été développée (Koyampambath et al., 2023). Ce développement a permis de développer des FCs pour divers pays au cours de différentes années. L'intégration de la méthode GeoPolRisk dans l'ACV a été illustrée par diverses études de cas, accompagnées d'un accompagnement pour interpréter les résultats (Koyampambath, 2023). La bibliothèque Python permet de calculer les FCs et les scores de risque d'approvisionnement spécifiques à une entreprise ou une organisation selon leur mix d'approvisionnement. Les scores de risque d'approvisionnement peuvent être utilisés pour une évaluation comparative des risques, permettant de comparer les scores entre différentes entreprises et matières premières, de manière similaire à l'outil Usetox (Rosenbaum et al., 2008). Les FCs peuvent, quant à eux, être utilisés directement dans des outils d'ACV tels que SimaPro ou OpenLCA, fournissant une évaluation du risque d'approvisionnement du produit évalué, en complément des indicateurs environnementaux. Une tentative d'intégration de la bibliothèque Python dans OpenLCA a été réalisée dans le cadre du projet européen EIT Raw Materials, TripleLink (EIT Raw Materials, 2022). Le développement de cette intégration est en cours, et il est prévu qu'elle soit intégrée dans l'outil d'ACV open-source Brightway.

Le modèle de caractérisation GeoPolRisk

La méthode quantifie le risque d'approvisionnement des matières premières utilisées dans un système de production pour divers acteurs économiques, y compris des pays, des régions ou des groupes de pays. Elle calcule les FCs pour des études ACV en utilisant trois composantes séparées par le symbole de multiplication (*) dans l'Équation 1. IHH_A est l'indice Herfindahl-Hirschman pour la matière première "A", calculé comme la somme des parts de production au carré de tous les pays produisant la matière première "A". Plus l'IHH est élevé, plus l'approvisionnement en matière première est concentré (c'est-à-dire moins diversifié). La deuxième composante de la méthode pondère l'importation (f_{Aic}) de la matière première "A" vers l'acteur économique "c" en provenance de "i" avec l'indicateur de (in)stabilité politique du pays exportateur (g_i). F_{Ac} représente les importations totales de l'acteur économique (par exemple, une région) évalué, tandis que p_{Ac} désigne la production domestique de la matière première "A" pour l'acteur économique "c". Le prix moyen annuel de la matière première, en dollars américains par kilogramme, est représenté par $\bar{p}$ et constitue la troisième composante de la méthode. Les FC sont d'abord calculés selon l'Équation 1, et sont exprimés en unités de USD/kg (Santillán-Saldivar et al., 2022). Le FC est appelé Potentiel de Risque Géopolitique d'Approvisionnement (« Geopolitical Supply Risk Potential », GSP) pour évaluer le Risque Géopolitique d'Approvisionnement (« Geopolitical Supply Risk », GSR) des matières premières consommées dans un produit ou un système de production. L'indicateur GSR vise à quantifier le "risque de problèmes potentiels d'accessibilité relative pour un système de production liés aux aspects géopolitiques et socio-économiques à court terme." Les valeurs du GSP sont obtenues en divisant *GeoPolRisk Midpoint CF_{Act}* par la moyenne *GeoPolRisk midpoint* pour le cuivre dans les pays sur une période de cinq ans (2017 à 2021), comme indiqué dans l'Équation 2. Ici, "A" représente la matière première, "c" représente une unité économique, et "t" désigne la période temporelle (année). Ces valeurs sont différenciées spatialement et temporellement pour 42 ressources abiotiques, ce qui signifie que chaque ensemble de FCs est spécifique à chaque pays à un temps donné.

Équation 1 : Équation pour calculer la valeur des FCs GeoPolRisk midpoint (Santillán-Saldivar et al., 2022)

$$FC \text{ GeoPolRisk Midpoint}_{Act} = IHH_A * \sum_i \left(\frac{g_i * f_{Aic}}{p_{Ac} + F_{Ac}} \right) * \bar{p}$$

Équation 2 : Modèle de caractérisation GeoPolRisk pour calculer le Potentiel de Risque Géopolitique d'Approvisionnement (Koyampambath et al., 2024)

$$Risque \text{ d'approvisionnement géopolitique } (RAG)_{Act} = \frac{GeoPolRisk \text{ midpoint}_{Act}}{GeoPolRisk \text{ midpoint}_{copper}}$$

Il existe trois principales sources de données pour le calcul de la méthode GeoPolRisk : World Mining Data (FMRA, 2023) pour les données de production minière, y compris l'IHH et la production domestique; BACI (Gaulier and Zignago, 2012) pour les données commerciales, y compris la part des importations ; et les Indicateurs de Gouvernance Mondiale sur la Stabilité Politique et l'Absence de Violence (Kaufmann et al., 2011) pour l'indicateur d'instabilité politique. Ces sources de données publiques sont mises à jour avec un retard d'au moins deux ans ; par exemple, les données les plus récentes disponibles en 2024 concernent l'année 2022. Le traitement de cette grande quantité de données pour calculer les CF pour chaque ressource, actuellement disponibles pour 42 ressources abiotiques, est chronophage. Pour faciliter ce processus, une bibliothèque de calcul basée sur le langage de programmation Python, GeoPolRisk-py (Koyampambath et al., 2023), est utilisée. Cet outil permet de calculer les FCs non seulement pour les pays mais aussi pour les entreprises si des données commerciales spécifiques sont fournies.

Hypothèses et limites

En réalité, la chaîne d'approvisionnement d'un produit est complexe, avec des sous-composants fabriqués dans divers lieux géographiques distincts du produit final. Pour l'application de la méthode, les FCs sont appliqués selon la perspective d'un acteur économique, en supposant que la production de tous les sous-composants tout au long de la chaîne de valeur est réalisée par cet acteur économique. L'acteur économique peut être un pays, une région, un groupe de pays ou une entreprise. Dans ce contexte, l'objet de sauvegarde est la valeur économique dérivée de l'utilisation des ressources abiotiques dans le produit pour l'acteur économique.

Dans le cadre de l'ACV, le terme "marchandise échangée" se réfère au flux intermédiaire résultant des activités minières. Cependant, l'ACV évalue les impacts associés aux flux élémentaires, qui incluent à la fois les intrants et les extrants. Par conséquent, appliquer les FCs directement aux flux intermédiaires n'est pas réalisable et, pour surmonter ce défi, la méthode suppose que dans les activités minières dans la plupart des bases de données comme ecoinvent, le flux d'entrée élémentaire du minéral extrait du sol est égal au flux de sortie intermédiaire du minéral produit (Koyamparambath et al., 2024). Cependant, en raison de l'allocation appliquée dans la base de données ecoinvent, les quantités de flux élémentaires extraits ne correspondent pas nécessairement aux quantités de flux intermédiaires générées.

Différentes étapes du traitement des métaux (extraction, fusion, raffinage) peuvent être considérées ; cependant, la disponibilité des données limite l'application pratique de la méthode à différentes étapes du traitement des ressources. Toutes les données considérées sont à l'étape d'extraction, sauf pour les métaux extraits comme sous-produit lors du raffinage d'autres minéraux, tels que le gallium. Pour certains métaux, les données ne sont disponibles qu'à l'étape de raffinage, comme pour les platinoïdes. Dans les développements récents de la méthode (Koyamparambath et al., 2024), les données de prix moyen annuel de marché ont été changées pour des données de prix d'échange, principalement en raison de la facilité de disponibilité des données.

2.3. Synthèse des perspectives liées à la criticité, les ressources et l'ACV

2.3.1. Objectifs et champs d'application des méthodes

Dans cette section, un aperçu détaillé des principales caractéristiques des méthodes sélectionnées pour évaluer les ressources, tant dans le contexte de l'ACV que des évaluations de criticité, est fourni. En plus des méthodes permettant d'évaluer la criticité, nous décrivons dans cette section les méthodes identifiées comme innovantes dans le rapport ScoreLCA 2020-05 (de Caemel et al., 2022), les méthodes orientées sur la dissipation des ressources considérées dans l'analyse critique de Beylot et al. (2024) et la méthode CTI-LCIA (Dewulf et al., 2024), publiée en parallèle de la rédaction de cette dernière analyse critique.

Tableau 5 Analyse de la méthode EDP (adapté de l'analyse de Beylot et al., 2024)

Méthode EDP	
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Accessibilité des ressources minérales dans la technosphère
Dommage sur l'aire de protection	Diminution relative de l'accessibilité des ressources minérales
Périmètre temporel	Très long terme à infini
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Les émissions de ressources minérales uniquement (voir flux caractérisés ci-dessous, et le correctif apporté dans la méthode ARP)

Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Toutes les émissions de métaux vers l'environnement, incluant les émissions provenant de matériaux qui ne sont pas des ressources minérales (par exemple, le cuivre émis lors de la combustion de charbon)	
ICV/indicateur midpoint/indicateur endpoint	Paramètre	Source des données
Midpoint	Emissions sur le très long terme (estimation basée sur production annuelle actuelle)	Production annuelle issue du BGS ou USGS, rapportées par van Oers et al. (2019)
	Réserves ultimes	Calcul basé sur la concentration d'éléments dans la croûte terrestre, rapportées par van Oers et al. (2019)
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Aucune	
Hypothèses/simplifications pertinentes	La production actuelle est égale aux émissions futures sur le très long terme.	

Tableau 6 Analyse des méthodes ADR/LPST

Méthodes ADR/LPST		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Potentiel de faire usage de la valeur que les ressources minérales peuvent avoir pour l'homme dans la technosphère	
Domage sur l'aire de protection	Diminution relative du potentiel de faire usage de la valeur des ressources due aux flux dissipatifs	
Périmètre temporel	ADR : représentatif des flux dissipatifs globaux actuels (pas d'horizon temporel spécifique ; le modèle tourne sur 1000 ans mais la grande majorité des métaux sont déjà complètement dissipés avant 50 ans). Les CFs peuvent être considérés comme plus représentatifs du court terme pour les métaux mineurs pour lesquels les usages et recyclage évoluent rapidement ; alors que pour les métaux majeurs (fer, aluminium) résidant longuement dans l'économie, les CFs peuvent être considérés comme représentatif du moyen-long terme. LPST : court, moyen et long terme (horizon temporelle de 25, 100 et 500 ans)	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Les flux dissipatifs identifiés pour chaque procédé dans les données d'ICV	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Flux d'extraction (utilisation actuelle des FCs)	
ICV/indicateur midpoint/indicateur endpoint	Paramètre	Source des données
Midpoint	Durée de vie des métaux dans l'économie globale (basé sur un lot de paramètres considérés : efficacité des procédés, demande finale par secteur d'activité, durées de vie des produits, etc.)	Résultats issus de l'analyse de flux dynamique (AFMD) pour 61 métaux (Charpentier Poncelet et al., 2022b)
	Valeur économique des métaux	Majoritairement statistiques issues de l'USGS (2005 à 2015) mais aussi d'autres sources (voir détails dans Charpentier Poncelet et al., 2022b)
Endpoint		
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Aucune	
Hypothèses/simplifications pertinentes	On émet l'hypothèse que le prix des ressources représente leur valeur instrumentale.	

Tableau 7 Analyse des méthodes JRC-LCI couplée à JRC price-based (adapté de l'analyse de Santillán-Saldivar et al., 2023, Tableau 4, et Beylot et al., 2024)

Méthode JRC-LCI couplée à JRC price-based		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Potentiel de faire usage de la valeur que les ressources minérales peuvent avoir pour l'homme dans la technosphère	
Dommage sur l'aire de protection	Diminution relative du potentiel de faire usage de la valeur des ressources due aux flux dissipatifs	
Périmètre temporel	Court terme (<25 ans) pour JRC-LCI et médium terme pour JRC-LCIA (<50 ans)	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Les flux dissipatifs identifiés pour chaque procédé dans les données d'ICV (actuellement, ce travail doit être fait manuellement au cas par cas)	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	N/A (méthode prévue pour analyse idéale)	
Indicateurs		
ICV/Midpoint/endpoint	Paramètre	Source des données
ICV	Masse des flux de ressources dissipées	Calculés manuellement à l'échelle d'une donnée d'ICV (méthode JRC-LCI)
Endpoint	Prix moyen des métaux sur 10 ans ou 50 ans (méthode JRC price-based)	Statistiques issues de l'USGS (voir Ardente et al., 2023)
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Aucune	
Hypothèses/simplifications pertinentes	On émet l'hypothèse que le prix des ressources représente leur valeur instrumentale.	

Tableau 8 Analyse de la méthode ARP (adapté de l'analyse de Beylot et al., 2024 et d'Owsianiak et al., 2022)

Méthode ARP		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Accessibilité des ressources minérales dans la technosphère	
Domage sur l'aire de protection	Diminution relative de l'accessibilité des ressources minérales	
Périmètre temporel	Très long terme à infini	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Les flux dissipatifs de métaux vers l'environnement, soit uniquement ceux provenant de ressources minérales (pas ceux provenant d'autres sources e.g. charbon), et uniquement pour les métaux ne se concentrant pas au-dessus de certains seuils dans les différents compartiments environnementaux sur le très long terme (grâce aux émissions globales cumulées)	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	N/A (méthode prévue pour analyse idéale)	
ICV/Midpoint/endpoint	Paramètre	Source des données
ICV (classification des flux dissipatifs) – critère A	Concentration des émissions globales cumulées dans différents compartiments environnementaux	Emissions globales déterminées par des statistiques d'émissions globales détaillées dans l'information supplémentaire de l'article présentant la méthode ARP (Owsianiak et al., 2021), et leur devenir environnemental est déterminé par le module USEtox® 2.1 (version LC-Impact).

	Seuil	Concentration moyenne d'un élément dans la croûte terrestre, telles que rapportées par van Oers et al. (2019)
ICV (classification des flux dissipatifs) – critère B	Concentration de l'élément dissipé dans la source (e.g., concentration du cuivre dans le charbon)	Pour les sources fossiles, données de concentration moyennes (Rauch and Pacyna, 2009). Pour minéraux : hypothèse que tous les éléments présents dans le minerai sont accessibles sur le très long terme (donc pas de données considérées)
	Concentration de référence	Idem à seuil ci-dessus
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Il est considéré qu'une part des métaux émis vers l'environnement sera accessible dans le très long terme grâce aux développements technologiques (voir critères A et B ci-dessus)	

Tableau 9 Analyse de la méthode EVDP (adapté du tableau 4 de Santillán-Saldivar et al., 2023)

Méthode EVDP		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Potentiel de faire usage de la valeur des ressources minérales dans la technosphère. La valeur évaluée est propre au contexte européen.	
Dommage sur l'aire de protection	Diminution relative du potentiel de faire usage de la valeur des ressources due aux flux dissipatifs.	
Périmètre temporel	Court terme (<10 ans)	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Idem que JRC-LCI (se base sur la même méthodologie) : les flux dissipatifs identifiés pour chaque procédé dans les données d'ICV (actuellement, ce travail doit être fait manuellement au cas par cas)	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	N/A (méthode prévue pour analyse idéale)	
ICV/Midpoint/endpoint	Paramètre	Source des données
ICV (même méthode que JRC-LCI)	Masse des flux de ressources à l'échelle d'un procédé unitaire (méthode JRC-LCI)	Calculés manuellement à l'échelle d'une donnée d'ICV
	Récupérabilité	- Statistiques sur la concentration minimale globale d'une ressource extraite dans la base de données S&P (S&P Global Market Intelligence, 2022) - Concentrations dans les différents compartiments de dissipation (détails dans Santillán-Saldivar et al., 2023)
Endpoint	Prix des métaux pour une année donnée	Statistiques issues de l'USGS (USGS, 2022)
	Importance économique en Europe	Rapport sur la criticité en Europe de 2020 (European Commission, 2020a)
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	La récupérabilité future pourrait être considérée comme une mesure d'atténuation.	

Tableau 10 Analyse de la méthode CTI-LCIA (Dewulf et al., 2024)

Méthode CTI-LCIA	
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Accessibilité de la valeur des ressources minérales dans la technosphère
Dommage sur l'aire de protection	Diminution du potentiel de faire usage de la valeur des ressources due à l'inaccessibilité temporaire.
Périmètre temporel	Périmètre continu de 0 à 500 ans (l'inaccessibilité des ressources est différenciée par horizons temporelles plus ou moins longues selon les

	principales matrices dans laquelle elles se trouvent : minerais, concentrés, produits en utilisation, déchets, scories, etc.)	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Ensemble des flux de ressources minérales sur le cycle de vie, chacun étant caractérisé selon son niveau d'accessibilité (ou d'inaccessibilité)	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	N/A (méthode prévue pour analyse idéale)	
ICV/Midpoint/endpoint	Paramètres	Source des données
ICV (méthode JRC-LCI)	Masse des flux de ressources rendus inaccessibles dans divers compartiments	Calculés manuellement à l'échelle d'une donnée d'ICV (méthode JRC-LCI)
Midpoint	Temps restant avant l'accessibilité, ou « <i>time to accessibility</i> » (TTA) pour dix principaux états de la ressource sur son cycle de vie (du minerai au produit en fin de vie)	Dewulf et al. (2021), S&P database (S&P Global Market Intelligence, 2022), et entretiens avec experts du BRGM ; voir l'information supplémentaire 2 et 3 de Dewulf et al. (2024) pour détails
Endpoint	Prix des ressources comme proxy	JRC price-based (Ardente et al., 2023)
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Aucune	
Hypothèses/simplifications pertinentes	Les durées d'inaccessibilité dans différents compartiments techniques (par exemple, les sites d'enfouissement) ou environnementaux (par exemple, l'air) sont estimées grossièrement.	
Limitations	A noter que la méthode CTI-LCIA est en développement et que l'article présente uniquement une démonstration de la méthode pour quelques ressources.	

Tableau 11 Analyse de la méthode ADP_{ultimate reserves} (adapté de de Caemel et al., 2022 et van Oers et al., 2020a)

Méthode ADP _{ultimate reserves}		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Les ressources minérales disponibles dans l'environnement (croûte terrestre)	
Dommage sur l'aire de protection	Déplétion des réserves ultimes dues à l'extraction	
Périmètre temporel	Très long terme à infini	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Extraction (resources, from ground)	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	N/A (méthode prévue pour analyse idéale)	
ICV/Midpoint/endpoint	Paramètre	Source des données
Midpoint	Production primaire annuelle	Principalement issues de l'USGS, et quelques sources complémentaires dont BGS (détails dans l'article de van Oers et al. (2020a)

Endpoint	Réserves ultimes (proxy : concentration dans la croûte terrestre)	Rudnick and Gao (2014)
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Aucune	

Tableau 12 Analyse de la méthode Future Welfare Loss (adapté de de Caemel et al., 2022 et Huppertz et al., 2019)

Méthode Future Welfare Loss		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Le potentiel de faire usage de la valeur des ressources (focus sur le potentiel des générations futures)	
Dommage sur l'aire de protection	La perte de valeur pour la société de l'indisponibilité de la ressource pour les générations futures, due à sa consommation actuelle	
Périmètre temporel	Long terme	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les procédés couverts dans une ACV donnée.	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	L'application aux flux dissipatifs est suggérée dans le rapport Score LCA 2020-05, section 2.1.5, sans plus de discussion. A la connaissance des auteurs du présent rapport, les travaux du GLAM3 (en cours) considéraient aussi une telle combinaison d'une approche dissipation avec les CFs de la méthode Future Welfare Loss.	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Extraction	
ICV/Midpoint/endpoint	Paramètre	Source des données
Midpoint	Valeur de marché des ressources sur 5 ans	USGS, World Bank, International Monetary Fund, Federal Reserve Bank of St. Louis, London Platinum and Palladium Market, et Eurostat (détails dans l'article de Huppertz et al., 2019)
Endpoint	Coût de l'extraction	Estimé par revenu déduit du surplus brut d'opérations (données Eurostat). 75% défini comme valeur moyenne ; voir article de Huppertz et al., 2019 pour détails.
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Aucune	

Tableau 13 Analyse de la méthode GeoPolRisk (Gemechu et al., 2017; Santillán-Saldivar et al., 2022)

Méthode GeoPolRisk Method	
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Partie prenante économique (par exemple, une entreprise, un pays ou un groupe de pays) qui utilise une ressource dans sa chaîne de valeur
Dommage sur l'aire de protection	Augmentation potentielle des coûts due au risque d'approvisionnement d'une ressource
Périmètre temporel	À court terme
Processus inclus dans l'analyse	Tous les processus couverts
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Flux intermédiaires
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Flux élémentaires de ressources (en terre) (42 matières premières caractérisées)

ICV/indicateur midpoint/indicateur endpoint	Paramètre	Source des données
Midpoint	Herfindahl–Hirschman index (HHI)	World Mining Data
	Dépendance à l'importation de la ressource	BACI
	L'instabilité politique du pays fournisseur	World Governance Indicator – Political Stability and Absence of Violence (World Bank)
	Prix des matières premières négociées	BACI
	Production domestique de ressources	World Mining Data
Endpoint	Élasticité par rapport au prix	
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Recyclage et production domestique	
Hypothèses/simplifications pertinentes	Toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement sont réalisées par un seul acteur économique	
Limitations	Disponibilité des données (2 ans de retard). Aucune donnée disponible pour EndPoint	

Tableau 14 Analyse de la méthode ESSENZ (Bach et al., 2016)

Méthode ESSENZ		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Acteur économique (une entreprise) qui utilise des ressources dans sa chaîne de valeur	
Dommage sur l'aire de protection	Disponibilité limitée des ressources	
Périmètre temporel	Moyen et long terme	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les processus	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Flux élémentaires et intermédiaires	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Flux élémentaires et intermédiaires	
ICV/indicateur midpoint/indicateur endpoint	Catégorie	Indicateur de catégorie
Disponibilité physique	Épuisement des ressources abiotiques	Abiotic Depletion Potential indicator
		Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential indicator
Disponibilité socio-économique	Concentration de l'entreprise	Indice Herfindahl-Hirschman calculé en mettant au carré la part de marché de chaque entreprise ou pays en ce qui concerne la production ou les réserves
	Concentration des réserves	
	Concentration de la production minière	
	Capacité de minage	Ratio réserves/production annuelle
	Faisabilité des projets d'exploration	Policy Potential Index
	Occurrence en tant que co-produit	Pourcentage de la production en tant que métal d'accompagnement
	Obstacles au commerce	Enabling Trade Index
	Stabilité politique	World Governance Indicator
	Croissance de la demande	Pourcentage de croissance annuelle basé sur le passé
	Utilisation des matières premières	Pourcentage de contenu en matériaux neufs
	Volatilité des prix	Volatilité

Impacts environnementaux	Changement climatique	CML-IA method – Life Cycle Impact Assessment method for each category
	Eutrophisation	
	Acidification	
	Appauvrissement de la couche d'ozone	
	Smog	
Acceptation sociétale	Respect des normes sociales	Travail des enfants
		Zones de conflit élevé
		Travail forcé
	Respect des normes environnementales	Critical Habitat Protection
		Marine Protected Areas
		Terrestrial Protected Areas
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode		
Hypothèses/simplifications pertinentes	Tous les produits industriels ont une chaîne d'approvisionnement mondiale et un facteur de normalisation mondial est donc choisi.	
Limitations	La limite de la méthode réside dans le réglage des valeurs DtT (Distance-to-Target), qui influencent considérablement l'évaluation de la disponibilité des matériaux. Si les valeurs cibles sont définies trop bas ou trop haut, elles peuvent surestimer ou sous-estimer les contraintes potentielles.	

Tableau 15 Analyse de la méthode CS-ESSENZ (Yavor et al., 2021)

Méthode CS - ESSENZ		
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Une entreprise qui utilise les ressources de sa chaîne de valeur	
Domage sur l'aire de protection	L'incapacité à livrer les produits, l'augmentation potentielle des coûts de production, l'atteinte à la réputation, la vulnérabilité économique ou la non-conformité sociétale.	
Périmètre temporel	Indéfini	
Processus inclus dans l'analyse	Tous les processus, de l'extraction des ressources à la production	
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaire s, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Nomenclature	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Nomenclature	
Dimension	Catégorie	Indicateur de catégorie
Disponibilité physique	Épuisement des ressources abiotiques	Indicateur de potentiel d'épuisement abiotique
		Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential indicator
Risque d'approvisionnement	Concentration de l'entreprise	Indice Herfindahl-Hirschman calculé en mettant au carré la part de marché de chaque entreprise ou pays en ce qui concerne la production ou les réserves. L'IHH de la structure d'approvisionnement actuelle de l'entreprise est divisé par l'IHH de la structure d'approvisionnement mondiale.
	Concentration des réserves	
	Concentration de la production minière	
	Capacité de minage	Rapport entre les réserves et la production annuelle des pays fournisseurs
	Faisabilité des projets d'exploration	Policy Perception Index
	Occurrence en tant que co-produit	Pourcentage de la production en tant que métal d'accompagnement

	Obstacles au commerce	Enabling Trade Index (Sous-catégories)
	Stabilité politique	World Governance Indicators (tous les WGI ont une pondération égale)
	Croissance de la demande	Pourcentage de la croissance annuelle de l'entreprise basée sur le passé. La demande interne de l'entreprise est divisée par les tendances mondiales de la production (sur la base des études géologiques)
	Utilisation des matières premières	Part de contenu recyclé dans les produits divisée par la part moyenne mondiale de contenu recyclé
	Variation de prix	Volatilité
Vulnérabilité	Importance économique	Pertinence pour la fonctionnalité du Produit noté par le chiffre d'affaires généré avec ce produit et divisé par le chiffre d'affaires total de l'entreprise
	Disponibilité de la stratégie d'achat	Quantité de matière première avec un approvisionnement politiquement sécurisé, sur la base d'une liste de partenaires stratégiques de l'UE et de l'Allemagne
	Dépendance vis-à-vis des importations	Part des matériaux importés
	Substituabilité	Moyenne des deux substituabilités indices de la Commission Européenne
Respect des normes sociales	Violations des droits de l'homme	Le travail des enfants et le travail forcé de la base de données Social Hotspot, et la torture de l'Indice des droits à l'intégrité physique des droits de l'homme Cingranelli-Richards (PIRI)
	Minage à petite échelle	Part de l'approvisionnement provenant des mines artisanales et à petite échelle (OCDE)
Respect des normes environnementales	Sensibilité de la biodiversité locale	Valeurs indicatrices spécifiques à chaque pays en fonction de la rareté des écorégions, de l'état de conservation et du nombre d'espèces endémiques
	Pénurie d'eau	Pfister et al (2009) et Boulay et al. (2011)
	Changement climatique	ACV à l'aide de ReCiPe (santé humaine et environnement) (facultatif)
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Substituabilité, disponibilité d'une stratégie d'achat	
Hypothèses/simplifications pertinentes	n/a	
Limitations	La limite de la méthode réside dans le réglage des valeurs DtT (Distance-to-Target), qui influencent considérablement l'évaluation de la disponibilité des matériaux. Si les valeurs cibles sont définies trop bas ou trop haut, elles peuvent surestimer ou sous-estimer les contraintes potentielles.	

Tableau 16 Analyse de la méthode SPOTTER (Berr et al., 2022)

Méthode SPOTTER	
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Les acteurs économiques tout au long de la chaîne de valeur d'un produit
Domage sur l'aire de protection	Domages économiques dus à la variabilité des coûts et à la disponibilité limitée des matières premières
Périmètre temporel	À court et moyen terme
Processus inclus dans l'analyse	Tous les processus couverts
Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Flux élémentaires et intermédiaires

Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Flux élémentaires et intermédiaires, ne considérant que les matières premières considérées comme critiques par la Commission Européenne.	
ICV/indicateur midpoint/indicateur endpoint	Paramètre	Source des données
Perturbations de l'approvisionnement (à court terme)	Instabilité géopolitique	Non spécifié
	Réglementations sociales	Non spécifié
	Obstacles au commerce	Non spécifié
	Épuisement des ressources économiques	Non spécifié
	Recyclabilité limitée	Non spécifié
	Volatilité des prix	Non spécifié
Perturbations de l'approvisionnement (moyen terme)	Croissance de la demande	Non spécifié
	Dépendance aux co-produits	Non spécifié
	Dépendance aux matières premières primaires	Non spécifié
	Épuisement de la ressource ultime	Non spécifié
Diversité de l'offre	Dépendance à l'importation	BACI est suggéré
	Production nationale	BACI est suggéré
	IHH – concentration du pays producteur	BACI est suggéré
Vulnérabilité à la pénurie physique	Production mondiale de matières premières/minéraux	Non spécifié
	Blocage mondial de la matière première/minéral en cours d'utilisation	Non spécifié
	Performance de la substitute	Non spécifié
Importance économique / dommages	Coût de la matière première	Non spécifié
	Coût global du produit dans lequel une matière première est utilisée	Non spécifié
	Prix de la matière première	Non spécifié
	Chiffre d'affaires total touché par le produit utilisant la matière première	Non spécifié
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Substitution et production nationale	
Hypothèses/simplifications pertinentes	La substitution n'est envisagée qu'au niveau de la matière première, et non au niveau du produit final/de la fonctionnalité. Des combinaisons spécifiques d'indicateurs sont proposées pour les risques à court/moyen terme et les événements à risque spécifiques à un pays/à l'échelle mondiale.	
Limitations	Les facteurs de caractérisation sont spécifiques au cas, ce qui rend l'approche gourmande en ressources	

Tableau 17 Analyse de la méthode IRTC (IRTC, 2023), (Schrijvers et al. (in preparation))

Méthode IRTC	
Sujet de sauvegarde (aire de protection)	Entreprise qui utilise une ressource dans sa chaîne de valeur
Dommage sur l'aire de protection	L'incapacité à livrer un produit, une augmentation potentielle des coûts ou une atteinte à la réputation entraînant une baisse de la demande pour un produit.
Périmètre temporel	À court terme
Processus inclus dans l'analyse	Exploitation minière et raffinage

Flux caractérisés (dans une analyse idéale) (e.g. élémentaires/intermédiaires, processus de la chaîne de valeur, BOM, matériaux auxiliaires)	Des flux intermédiaires à chaque étape de la chaîne de valeur	
Flux caractérisés (dans une analyse pragmatique)	Flux intermédiaires de l'exploitation minière et du raffinage	
ICV/indicateur midpoint/indicateur endpoint	Paramètre	Source des données
Indicateur (non-agrégé)	Concentration des pays miniers (IHH)	USGS
	Concentration des pays de raffinage (IHH)	USGS
	WGI – Political stability & absence of Violence/terrorism	World Bank
	WGI - Government effectiveness	World Bank
	WGI - Regulatory Quality	World Bank
	WGI – Rule of law	World Bank
	WGI – Political stability & absence of Violence/terrorism	World Bank
	WGI – Voice and accountability	World Bank
	WGI – Control of corruption	World Bank
	Fragile States Index	Fund for Peace
	Restrictions à l'exportation entre 2017 et 2020	OCDE
	Enabling trade index	World Economic Forum
	Analyse du cycle de vie du berceau à la porte	(Graedel et al., 2015)
	Environmental Performance Index	(Wendling et al., 2020)
	Human Development Index (HDI)	UNDP
	Global Peace Index	(Institute for Economics & Peace, 2022)
	Corruption Perception Index	(Transparency International, 2021)
	Travail des enfants (% âgés de 5 à 17 ans)	(UNSDG, 2022)
	Liste des substances extrêmement préoccupantes candidates à l'autorisation	(ECHA, 2023)
	Dépendance aux sous-produits	(Nassar et al., 2015a)
	Augmentation prévue de la demande de technologies énergétiques entre 2020 et 2050	(Gregoir and Acker, 2022)
	Augmentation prévue de la demande de technologies émergentes entre 2020 et 2040	(F. Marscheider-Weidemann et al., 2021)
	Augmentation attendue de la demande dans les secteurs stratégiques entre 2020-2030	(Carrara et al., 2023b)
	Policy Perception Index des pays détenant des réserves	USGS
	Demande d'énergie cumulée	(Nuss and Eckelman, 2014)
	Concentration d'entreprises fournisseurs (IHH)	Différentes sources variées
Mesure d'atténuation intégrée à la méthode	Les mesures d'atténuation ne sont pas multipliées par des facteurs de risque, mais sont suggérées en fonction des différentes étapes de la chaîne de cause à effet	
Hypothèses/simplifications pertinentes	L'approvisionnement mondial est pris en compte, plutôt qu'un emplacement spécifique de l'entreprise. L'outil IRTC prend en compte le goulot d'étranglement entre l'étape de l'extraction et celle du raffinage.	

2.3.2. Indicateurs utilisés dans les méthodes d'évaluation de la criticité

Cette section se focalise sur les méthodes d'évaluation de la criticité ou des risques d'approvisionnement en matières premières. Afin de mieux comprendre la différence entre les méthodes de criticité, les mécanismes de cause à effet qui sont pris en compte dans les diverses méthodes de criticité (en se concentrant ici sur l'outil IRTC, GeoPolRisk, SPOTTER et CS-ESSENZ) sont comparés dans la Figure 11, selon le format de la Figure 6 (c'est-à-dire la chaîne de cause à effet développée dans le cadre du projet IRTC). Il convient de noter que les autres méthodes que celle de l'IRTC n'ont pas explicitement formulé de chaînes de cause à effet qui soient dans le même format que la Figure 6. Par conséquent, cette figure doit être considérée comme une interprétation des auteurs du présent rapport. Les développeurs des méthodes originales avaient peut-être d'autres liens de causalité à l'esprit.

La Figure 11 permet d'observer que toutes les méthodes de criticité prennent en compte une **perturbation** dans la chaîne d'approvisionnement d'une matière première donnée, mais que les conséquences de cette perturbation sont divergentes entre les méthodes. Toutes les méthodes prennent en compte un **effet potentiel sur le prix** de la matière première, et par conséquent sur les coûts et l'impact économique sur l'utilisateur de la matière première. L'IRTC, SPOTTER et CS-ESSENZ considèrent également l'**accessibilité physique** de la partie prenante à la matière première comme un problème pertinent, et seuls l'IRTC et le CS-ESSENZ prennent en compte les risques de **réputation** liés à l'utilisation des matières premières (bien que CS-ESSENZ soit moins explicite sur cet aspect).

Les conséquences d'une perturbation pour un acteur économique sont prises en compte par le cadre méthodologique de l'IRTC, mais ne sont pas quantifiées ou mesurées par des indicateurs. Les méthodes GeoPolRisk, SPOTTER et CS-ESSENZ, elles, proposent des indicateurs pour évaluer la vulnérabilité suivant une rupture d'approvisionnement, par exemple en évaluant l'ampleur d'une augmentation potentielle des prix, et la portion relative du chiffre d'affaires d'une entreprise touchée par la perturbation. En outre, les approches de SPOTTER et CS-ESSENZ incluent la substituabilité comme un facteur atténuant.

La Figure 12 présente un zoom sur l'encadré « une perturbation a lieu dans la chaîne de valeur du produit » de la Figure 11 (en anglais dans la figure : « *a disturbance takes place in the product's value chain* »), toujours en se basant sur le cadre de l'IRTC (Figure 7). Ici aussi, il convient de noter que la liaison des indicateurs avec les scénarios de criticité est basée sur l'interprétation des auteurs de ce rapport, et n'est pas explicitement mentionnée par les développeurs de la méthode. La figure vise à exemplifier les types de risques qui sont pris en compte dans les différentes méthodes.

On peut observer sur la Figure 12 que toutes les méthodes de criticité prennent en compte la concentration des pays producteurs de matières premières, mesurée à l'aide de l'indice de Herfindahl-Hirschman (IHH). De plus, toutes les méthodes mesurent l'(in)stabilité politique des pays fournisseurs via le Worldwide Governance Indicator : Political Stability and Absence of violence/terrorism. La méthode IRTC couvre le plus choix d'indicateurs, y compris dans certains cas plusieurs indicateurs permettant d'évaluer le même aspect, ce qui permet de réaliser des analyses de sensibilité. Cependant, la méthode IRTC est aussi la seule méthode qui ne prend pas en compte la dépendance à l'importation d'une matière première, en raison du fait qu'aucun acteur spécifique n'a été défini dans l'évaluation des risques d'approvisionnement. Il est aussi possible d'observer sur la Figure 12 quelques mesures d'atténuation des risques, telles que la production nationale de ressources (SPOTTER et GeoPolRisk), l'utilisation de matériaux recyclés (GeoPolRisk) et la disponibilité d'une stratégie d'achat (CS-ESSENZ).

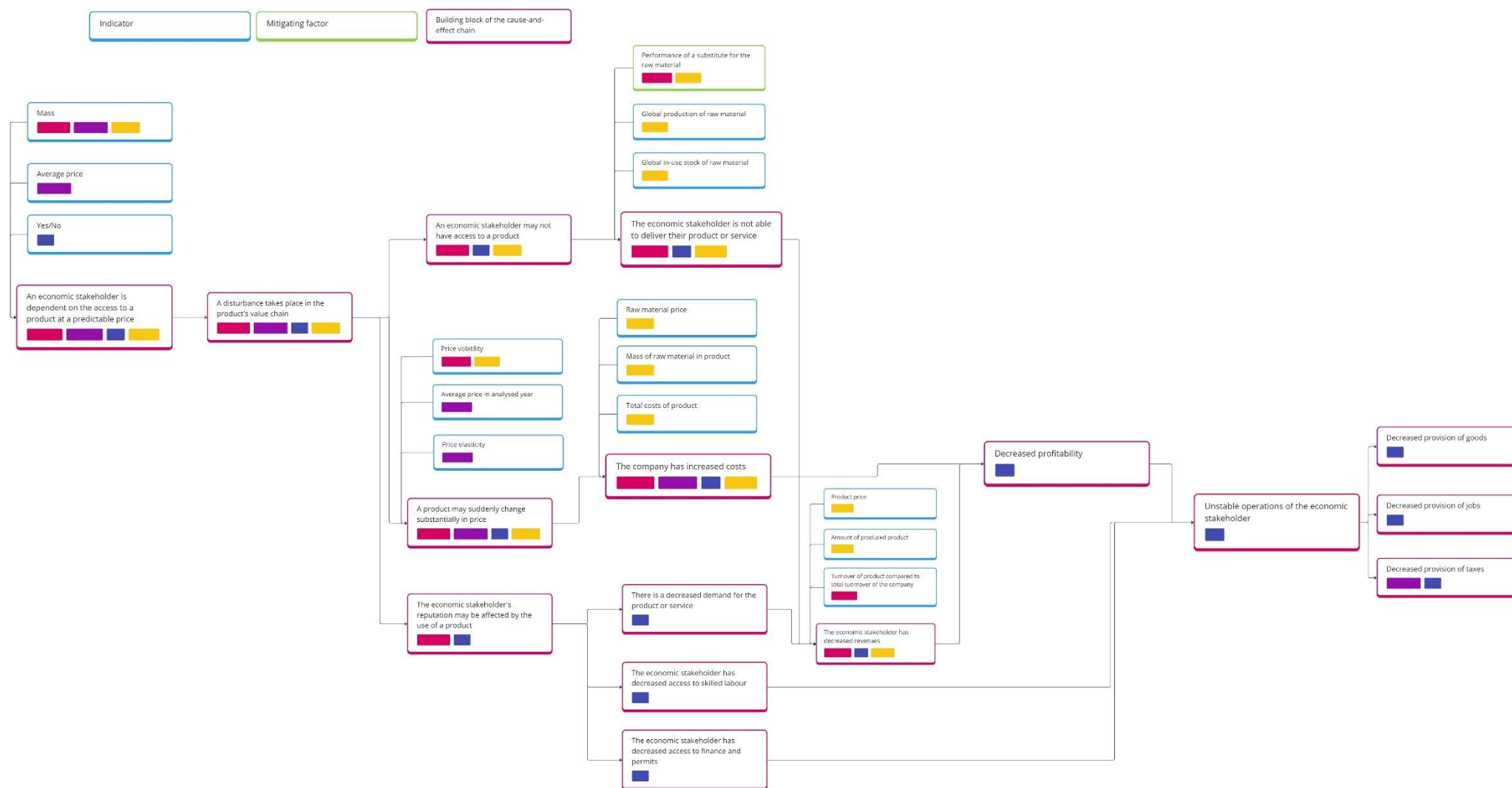


Figure 11 (Interprétation des) mécanismes de cause à effet pris en compte dans les méthodes d'évaluation de la criticité, et indicateurs associés. Chaque boîte est étiquetée selon la méthode qui la considère. Bleu = IRTC, Rose = CS-ESSENZ, Violet = GeoPoIRisk, Jaune = SPOTTER.

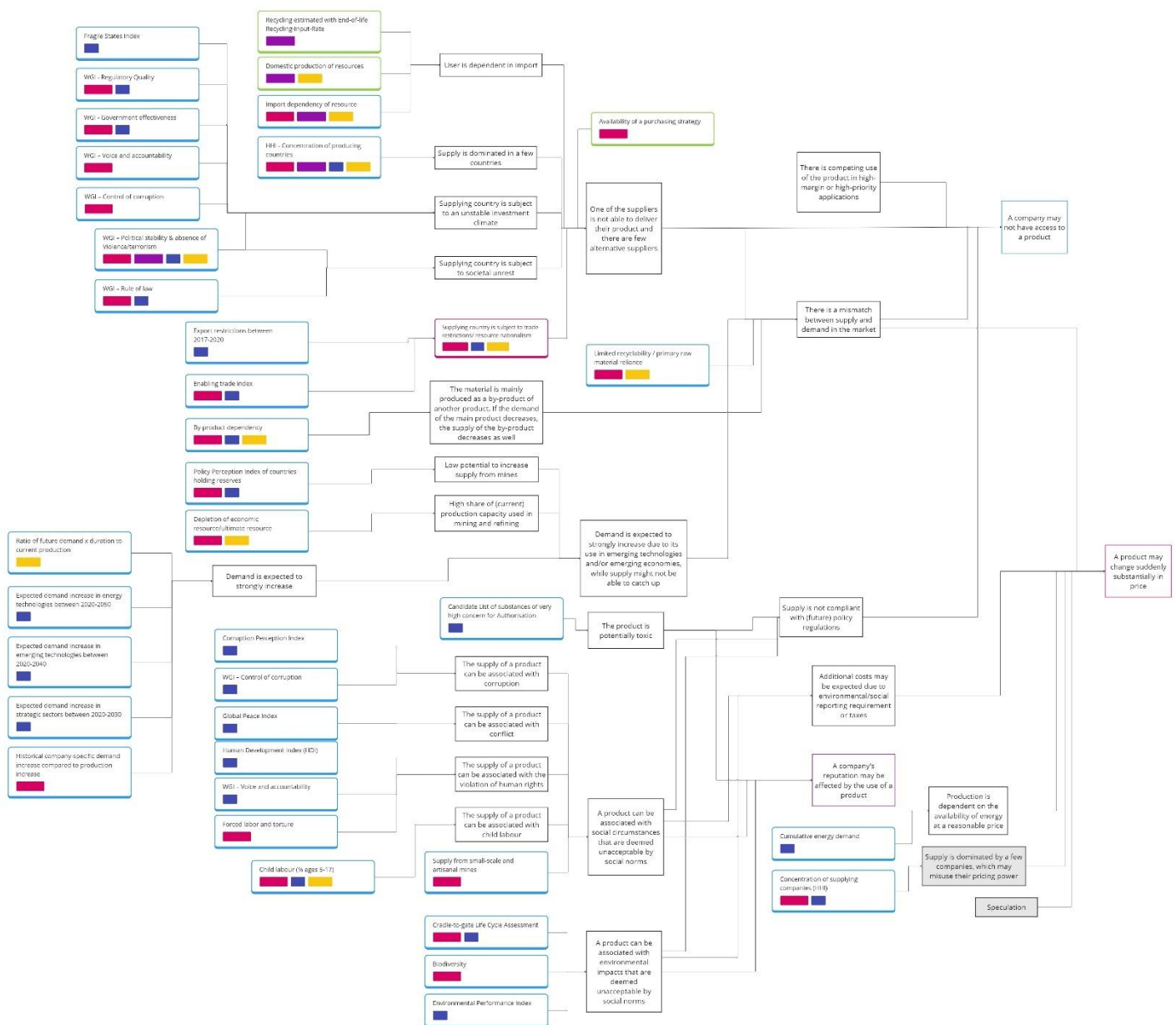


Figure 12 (Interprétation des) mécanismes de cause à effet pris en compte dans les méthodes d'évaluation de la criticité, et indicateurs associés. Chaque boîte est étiquetée selon la méthode qui la considère. Bleu = IRTC, Rose = CS-ESSENZ, Violet = GeoPolRisk, Jaune = SPOTTER.

2.4. Identification des principaux flux

Sur la base de l'étape précédente, les principales caractéristiques des matériaux sont identifiées. Les matériaux sont classés en fonction de caractéristiques sélectionnées, afin que les études de cas ultérieures représentent une sélection diversifiée de caractéristiques sur leur cycle de vie.

2.4.1. Analyse pour les méthodes d'évaluation d'impact des ressources

Une sélection de facteurs de caractérisation sont affichés à la Figure 13. Ces derniers ont été normalisés de telle façon à ce que le plus petit FC pour chaque méthode soit égal à 0, et le plus grand, à 100.

Couverture des matières premières parmi les méthodes

Bien que celles-ci n'apparaissent pas sur la figure, plusieurs substances minérales (par exemple, la cyanite, la perlite, le sable...) sont couvertes par les méthodes FWL et JRC price-based. Ces deux méthodes couvrent la majorité des métaux et minéraux d'intérêt économique. La méthode FWL couvre, en plus, certains gaz (par exemple, l'hélium) et combustibles fossiles (par exemple, le charbon, le propane, le gaz naturel...).

Ainsi, les méthodes ADP2015/EDP couvrent 76 ressources (principalement des éléments métalliques); ADR/LPST, 61 éléments métalliques ; FWL, 47 éléments métalliques et 90 autres ressources (minéraux, gaz, fossiles...); JRC price-based, 45 métaux et 21 minéraux ; EVDP, 15 ressources ; et ARP, 65 éléments métalliques. Toutes les méthodes sauf EVDP couvrent la grande majorité des métaux. Certains métaux utilisés sous forme de minéraux sont considérés indirectement dans la méthode ADR/LPST (c'est le cas par exemple, pour l'oxyde de titane). Les facteurs de caractérisation prennent alors en compte les usages métalliques et minéraux de façon agrégée. Finalement, on peut noter que la méthode FWL propose un seul facteur de caractérisation pour l'ensemble des terres rares. C'est aussi le cas pour la méthode JRC price-based, qui en plus considère un seul facteur de caractérisation pour l'ensemble des platinoïdes.

Les facteurs de caractérisation de l'ensemble des méthodes sont généralement plus élevés pour les métaux que les autres ressources abiotiques couvertes, (le cas échéant). Puisque l'essentiel des ressources critiques, centrales au présent rapport, sont des métaux, nous concentrons ici l'analyse sur ces derniers. On observe des variations importantes entre les FCs au niveau midpoint, soit pour les méthodes ADP2015/EDP et ADR/LPST100.

Il est important de noter que certains métaux inclus dans la Figure 13 n'ont pas de FCs. C'est le cas pour :

- la méthode EVDP : antimoine, bore, chrome, dysprosium, gallium, germanium, iridium, magnésium, néodyme, niobium, osmium, praséodyme, rhodium, scandium, silicone, tantale, titane, tungstène et vanadium
- la méthode FWL : iridium, niobium, osmium, rhodium et scandium
- la méthode JRC price-based : scandium

Evaluation des matières premières

En premier lieu, il est possible d'observer que la variabilité des FCs pour l'ensemble des méthodes est très élevée, hormis pour LPST100 midpoint. Cette dernière méthode implique un horizon temporel de 100 ans exerçant une influence marquée sur les FCs calculés (Charpentier Poncelet et al., 2021). Ainsi, l'or, soit le métal le moins dissipé sur le très long terme (1 000 ans), possède un FC normalisé de 0 pour la méthode ADR, et de 11 pour LPST100 midpoint. Cela s'explique par le fait qu'à l'horizon 100 ans, le fer performe mieux que l'or dans la méthode LPST100 midpoint. Les FCs midpoint des méthodes ADR et LPST sont normalisés en équivalents du fer, en divisant la valeur absolue des taux de dissipation (dans le cas d'ADR) et des potentiels de durée d'usage perdus (dans le cas de LPST). Pour l'ensemble des méthodes sauf LPST100 midpoint, une minorité de métaux ont des FCs relativement élevés (par exemple, dont les valeurs peuvent être observées sur la partie gauche des Figure 13 A et B (FCs normalisés >0,2).

Cette grande variabilité de FCs pour les autres méthodes s'explique notamment par la concentration des métaux dans la croûte terrestre (pris en compte dans ADP2015 et EDP), ou encore le prix des ressources (pris en compte dans les méthodes ADR et LPST100 endpoint, FWL, EVDP et JRC price-based). Ainsi, on peut établir une corrélation entre la concentration terrestre et le prix des ressources pour les métaux, en partant du principe qu'en général, un métal peu concentré requiert plus d'énergie pour sa production. Cela se traduit, dans les méthodes ADP2015 ou EDP, par un fort potentiel de déplétion ou de dissipation des réserves ultimes des ressources ayant une faible concentration dans la croûte terrestre, comme l'or (FC le plus élevé, égal à 100 lorsque normalisé), ou les platinoïdes (par exemple, le palladium et le platine, avec des FCs normalisés d'environ 70). Dans les méthodes FWL, ADR endpoint, LPST100 endpoint, EVDP et JRC price-based, cela se traduit par une incidence du prix sur les FCs. Ainsi, on observe des FCs relativement élevés pour ces mêmes métaux précieux pour toutes ces méthodes. Il est possible d'observer que les trois seuls métaux précieux couverts par la méthode EVDP, sont aussi les FCs les plus élevés pour cette méthode. Dans le cas d'ADR/LPST100, d'EVDP et de JRC price-based, cela signifie une perte du potentiel de faire usage de la valeur des métaux due à leur dissipation. Dans le cas de FWL, cela signifie une perte de valeur économique pour les générations futures due à leur consommation actuelle.

Pour la méthode ADR endpoint, les CFs sont aussi fortement impactés par la vitesse de dissipation moyenne des métaux : ainsi, le scandium, métal relativement coûteux et dissipé en moyenne très rapidement, possède un FC très élevé par rapport aux autres métaux. Cela s'applique aussi à d'autres métaux dissipés relativement rapidement, comme le gallium et le germanium. Ces métaux ont en commun d'être des potentiels co-produits majoritairement dissipés à la phase de production. Les métaux précieux, dissipés relativement lentement par rapport au scandium, ont des FCs beaucoup plus petits que le scandium, mais néanmoins parmi les plus élevés de cette méthode. En comparaison à la méthode ADR endpoint, le prix des métaux a une plus grande influence sur les FCs endpoint de la méthode LPST100. Pour cette raison, les FCs de la méthodes LPST100 endpoint sont, comme pour FWL, EVDP ou JRC price-based, fortement déterminés par le prix des ressources. Ainsi, les FCs les plus élevés pour LPST100 sont ceux des platinoïdes (rhodium, osmium, platine, iridium, palladium) et de l'or.

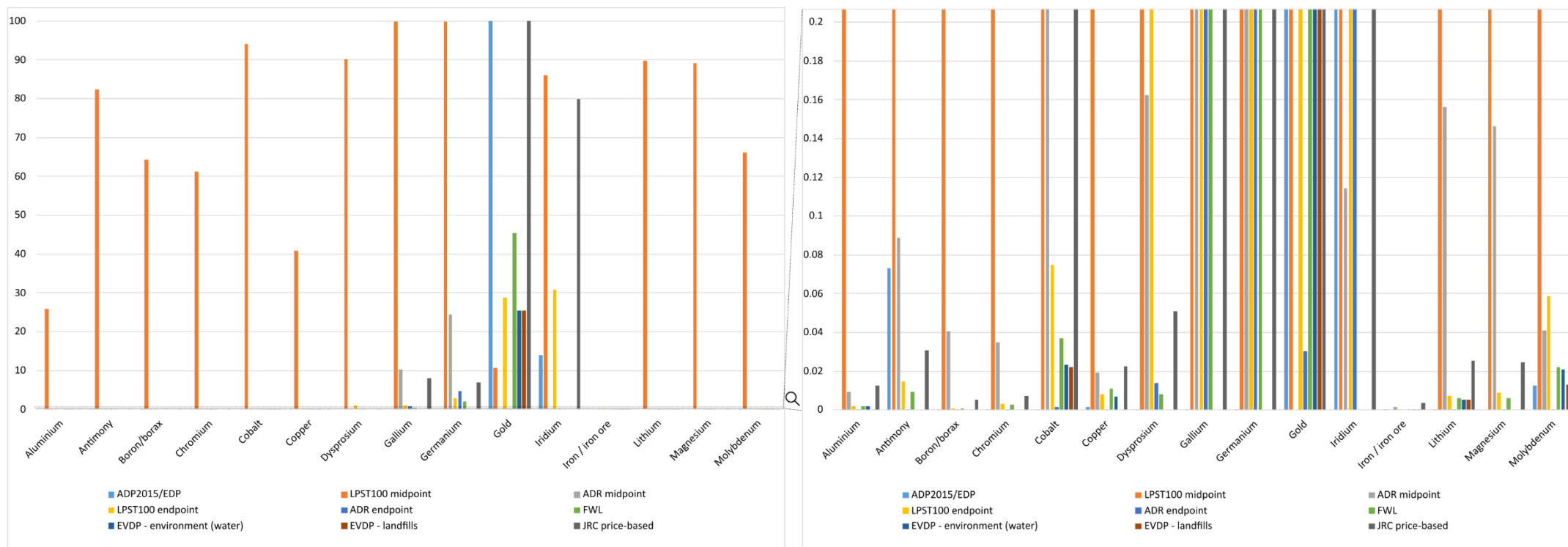


Figure 13 (partie A) Valeurs des facteurs de caractérisation normalisés pour une sélection de métaux. Les FCs d'ADP2015 et EDP sont les mêmes ; cependant, ces premiers sont appliqués aux flux d'extraction alors que ces seconds sont appliqués aux flux d'émissions. Les FCs de la méthode EVDP sont indiqués uniquement pour deux puits environnementaux : l'eau et les sites d'enfouissement (« landfills »). Les facteurs de caractérisation de la méthode ARP ne sont pas indiqués pour éviter la redondance avec EDP (voir description de la méthode dans le présent rapport, et une description détaillée dans le rapport SCORELCA n° 2020-05). La partie droite de la figure permet de visualiser les facteurs de caractérisation ayant une valeur normalisée inférieure à 0,2.

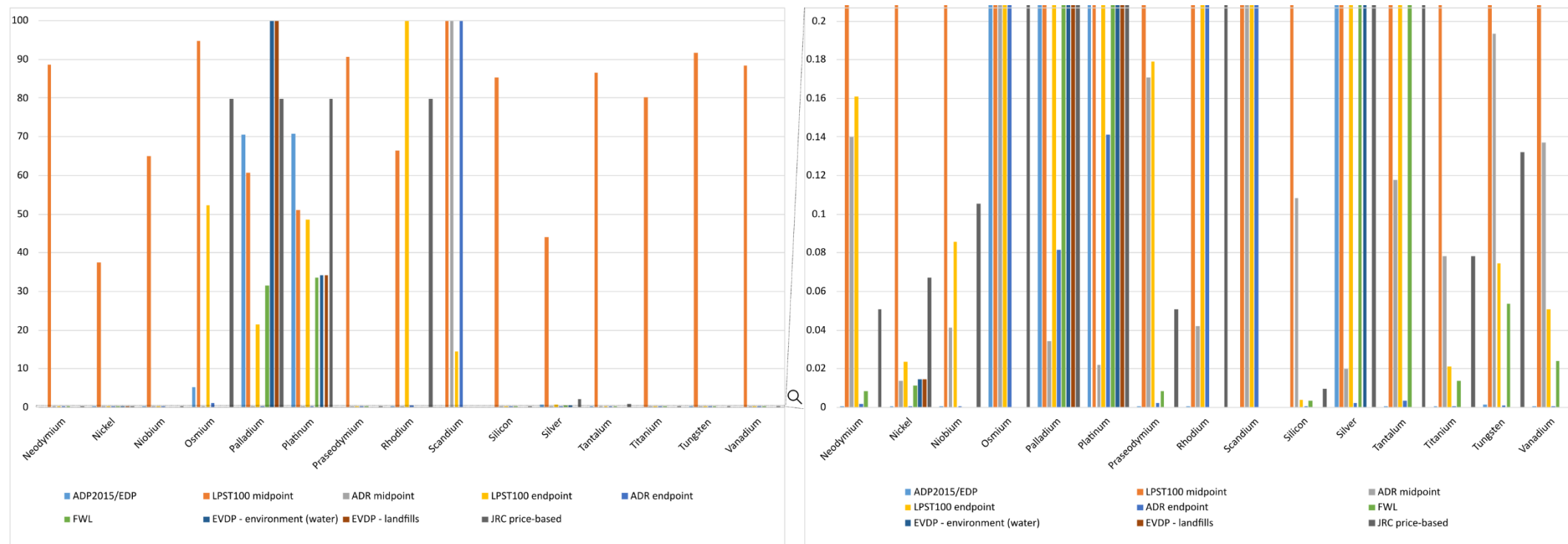


Figure 13 (suite, partie B) Valeurs des facteurs de caractérisation normalisés pour une sélection de métaux. Les FCs d'ADP2015 et EDP sont les mêmes ; cependant, ces premiers sont appliqués aux flux d'extraction alors que ces seconds sont appliqués aux flux d'émissions. Les FCs de la méthode EVDP sont indiqués uniquement pour deux puits environnementaux : l'eau et les sites d'enfouissement (« landfills »). Les facteurs de caractérisation de la méthode ARP ne sont pas indiqués pour éviter la redondance avec EDP (voir description de la méthode dans le présent rapport, et une description détaillée dans le rapport SCORELCA n° 2020-05). La partie droite de la figure permet de visualiser les facteurs de caractérisation ayant une valeur normalisée inférieure à 0,2.

2.4.2. Analyse pour les méthodes de la criticité

Les Figure 14 à Figure 17 présente le score normalisé (avec la matière première ayant le score le plus élevé fixé à 100 et le score le plus bas défini à 0) des matières premières sur une sélection d'indicateurs de criticité. De plus, la contribution absolue au changement climatique de chaque matière première (compte tenu de leurs taux de production mondiaux) est prise en compte. Les matières premières incluses dans les chiffres ne reflètent pas une liste exhaustive, mais fournissent une sélection représentative de matériaux qui ont une détermination diverse comme critique ou stratégique selon la Commission Européenne (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024).

Couverture des matières premières parmi les indicateurs

La couverture des données relatives aux matières premières sélectionnées et aux indicateurs de criticité est relativement élevée. Parmi les indicateurs et les matières premières sélectionnés dans les Figure 14 à Figure 17, les valeurs d'indicateur suivantes manquent. On peut observer que les taux de croissance annuels composés ont une faible couverture en matières premières :

- GeoPolRisk : Iridium, Silicium, Béryllium, hélium, roche phosphatée
- Émissions mondiales de CO₂ : graphite, silicium, feldspath, spath fluor, roche phosphatée,
- Pourcentage fourni en tant que sous-produit : silicium, baryum, feldspath, spath fluor, hélium
- Taux de croissance annuel composé (KU Leuven) : bore, graphite, magnésium, rhodium, titane, tungstène, antimoine, arsenic, baryum, béryllium, feldspath, spath fluor, hélium, lanthane, niobium, roche phosphatée, tantale, rhénium, fer
- Taux de croissance annuel composé (JRC) : bore, gallium, germanium, iridium, magnésium, manganèse, palladium, rhodium, titane, tungstène, arsenic, baryum, béryllium, feldspath, spath fluor, hélium, lanthane, niobium, roche phosphatée, tantale, vanadium, scandium, rhénium, fer, indium, chrome, molybdène, cadmium, or, plomb, zinc.
- ACV du berceau à la porte : graphite, silicium, baryum, feldspath, spath fluor, hélium, roche phosphatée.

(IRTC, 2023) fournit une indication sur la représentativité du marché des scores des indicateurs pour des matières premières spécifiques. Celle-ci est basée sur la disponibilité des données pour un indicateur spécifique à un pays (tels que les Worldwide Governance Indicators). Par exemple, si une matière première est principalement produite dans le pays X, mais qu'il n'y a pas de score pour un indicateur de criticité spécifique pour ce pays, la part de la production de ce pays n'est pas évaluée. C'est également le cas pour les pays fournisseurs qui sont regroupés en « autres pays » dans les services géologiques. La représentativité de l'indicateur « travail des enfants » sur le marché est faible, en raison du manque de données pour plusieurs pays, dont la Chine. Pour les autres indicateurs, la représentativité du marché est au moins supérieure à 70%.

Evaluation des matières premières

Parmi les matières premières considérées à la fois comme critiques et stratégiques d'un point de vue européen (Figure 14 et Figure 15), chaque matière première peut avoir une raison différente de la considérer comme « critique ».

De nombreuses matières premières, parmi lesquelles le cobalt, le gallium, l'iridium, le dysprosium, le néodyme, le platine et le rhodium, sont des matières premières avec une situation d'approvisionnement complexe, liée à une forte concentration de l'offre, approvisionnant les pays ayant de multiples problèmes (notamment des restrictions à l'exportation, une faible stabilité politique, la corruption et un faible indice de développement humain), et la matière première étant un sous-produit d'autres ressources.

Le graphite et le lithium se distinguent par leur taux de croissance élevé prévu sur le marché. En outre, ils ont également une concentration relativement élevée de l'approvisionnement et une forte association avec les impacts environnementaux via l'indice de performance environnementale. Cependant, la situation politique des pays fournisseurs est moins préoccupante pour le lithium.

L'aluminium a un score élevé en termes d'émissions mondiales de CO₂ et d'indice de performance environnementale. Ces indicateurs ne font pas partie de l'évaluation de l'UE. Toutefois, la grande importance économique de l'aluminium pour l'économie européenne n'est pas représentée dans ce graphique.

Parmi les matières premières critiques mais non stratégiques (Figure 16), on peut observer que pratiquement aucune des matières premières ne semble avoir un taux de croissance annuel composé élevé, car ces matières premières n'ont pas été incluses dans de telles études. Une exception est le scandium, qui a un score élevé dans l'étude de la KU Leuven.

Les matières premières qui sont essentielles mais non stratégiques pour l'UE ont en commun d'obtenir des résultats élevés pour au moins l'un des indicateurs suivants : une forte concentration de l'approvisionnement, des restrictions à l'exportation, un indice de performance environnementale ou une forte dépendance à l'égard des sous-produits. Parmi ces matières premières, l'antimoine, le lanthane, le tantale et le scandium semblent avoir la situation d'approvisionnement la plus complexe, en raison d'un score relativement élevé sur plusieurs indicateurs.

Enfin, la Figure 17 présente des matières premières qui ne sont pas considérées comme critiques du point de vue européen. Cependant, on peut observer que ces matières premières ne sont pas exemptes de tout souci. Tout d'abord, le nickel et le cuivre ne sont pas critiques, mais sont cependant considérés comme stratégiques par (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). La demande de nickel devrait fortement augmenter jusqu'en 2050, et c'est aussi le cas (bien que dans une moindre mesure) pour le cuivre. Le fait que le cuivre et le nickel soient déjà utilisés en grandes quantités peut s'expliquer par un taux de croissance annuel composé relativement faible, bien que des taux de croissance élevés en quantités absolues, ce qui n'est pas évalué dans la figure.

Parmi les matières premières non critiques, le rhénium, le cadmium et l'indium sont principalement fournis en tant que sous-produits, ce qui peut être une préoccupation pour certains utilisateurs de ces matières premières, en raison des fluctuations de prix potentiellement élevées. Le rhénium et l'or ont en outre une empreinte environnementale élevée. Le fer, le cuivre et le zinc ont une faible empreinte environnementale, mais leur utilisation à grande échelle à l'échelle mondiale contribue fortement aux impacts environnementaux globaux.

En comparant des indicateurs de criticité spécifiques avec la méthode GeoPolRisk (appliquant ici une perspective française), la méthode GeoPolRisk attribue un score élevé aux platinoïdes, suivis de l'or, puis du niobium, de l'arsenic, du gallium, du tungstène, du bore, du vanadium et du cobalt. Cette classification est conforme à la liste des matières premières critiques de l'UE. Seul le score élevé sur l'or est remarquable, car il ne semble pas y avoir de corrélation entre la méthode GeoPolRisk et d'autres indicateurs de risque d'approvisionnement présentés dans les graphiques. Le score élevé de l'or s'explique par son prix élevé, qui est intégré dans le facteur de caractérisation GeoPolRisk mais n'est pas un indicateur pris en compte dans d'autres évaluations axées sur le risque d'approvisionnement. Un prix élevé pourrait également expliquer le score élevé des platinoïdes, en plus d'autres facteurs de risque.

On peut noter que le score GeoPolRisk pour les éléments de terres rares (du point de vue français) est relativement faible. La France importe plus de 90 % de REE de Malaisie, suivie de 4 % du Japon et de 4 % de la Chine, les autres pays représentant les 2 % restants. Comparée à d'autres pays qui importent principalement de Chine, la France présente un léger avantage en termes de risque d'importation. Cela s'explique par la stabilité géopolitique plus élevée de la Malaisie, qui est classée à 49,06 selon les WGI de la Banque mondiale, contre 28,30 pour la Chine.

En comparant les terres rares à d'autres matières premières, telles que le lithium, la France importe plus de 55 % de son lithium d'Argentine, où la stabilité géopolitique est classée à 47,64. Le lithium présente également un FC plus élevé en raison de son prix, qui est près du double de celui des terres rares. En revanche, le cuivre a un CF légèrement supérieur, car la France importe plus de 85 % de son cuivre des États-Unis, qui avaient un classement WGI de 46,70 en 2021, inférieur à celui de la Malaisie.

Ressources critique et stratégique (perspective UE) (1/2)

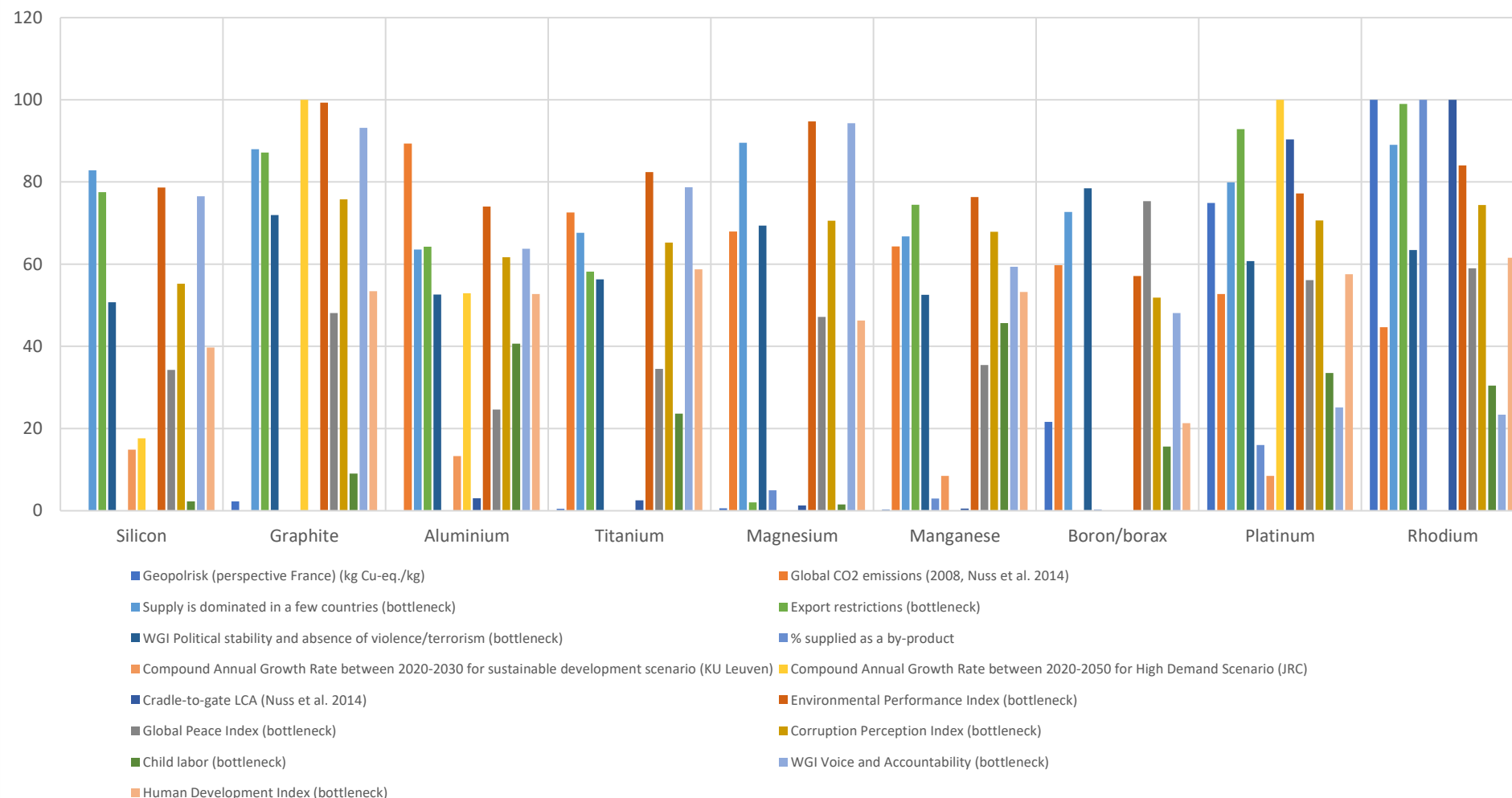


Figure 14 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières à la fois critiques et stratégiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024) (Figure 1/2). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO₂.

Ressources critique et stratégique (perspective UE) (2/2)

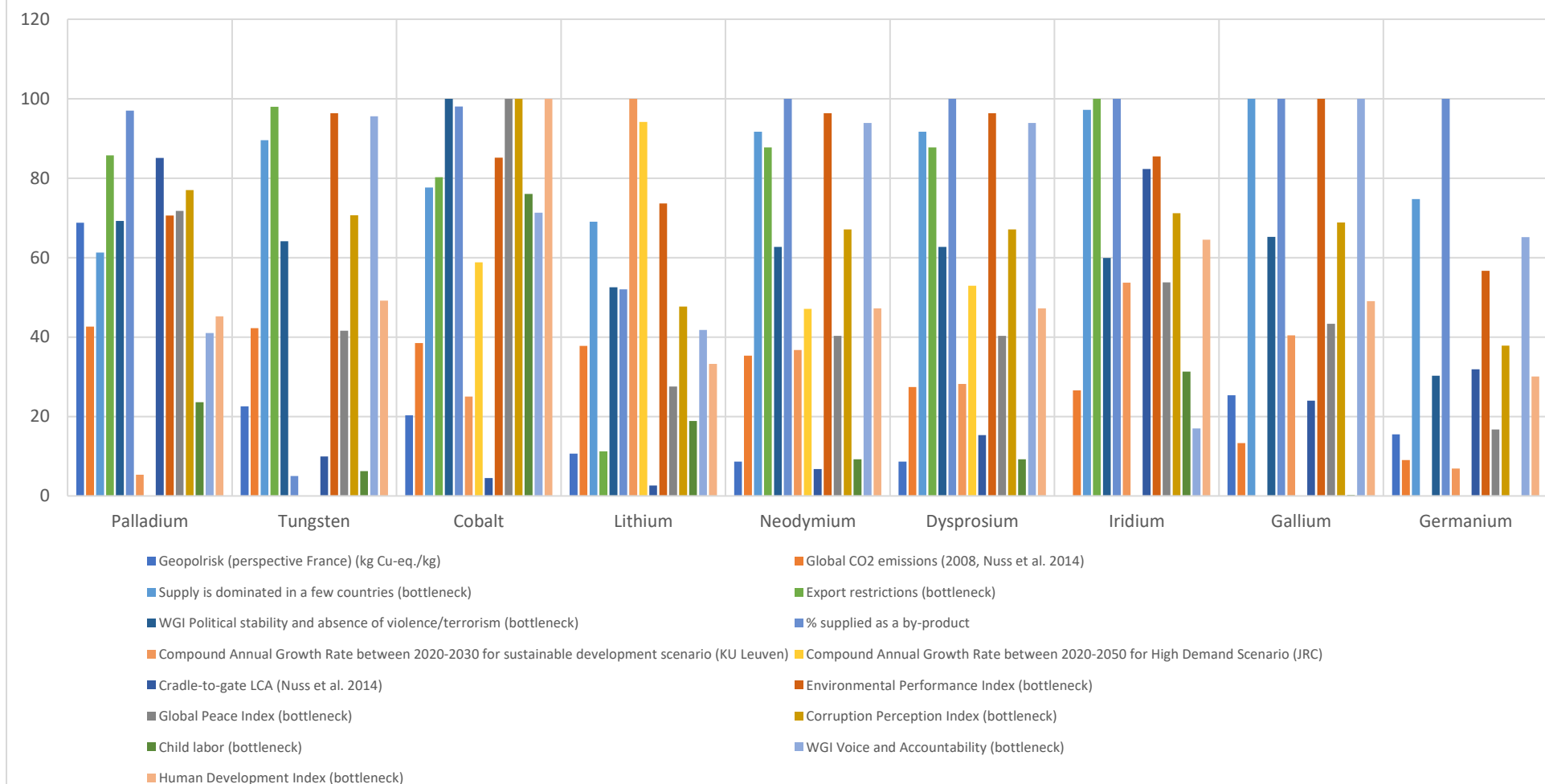


Figure 15 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières à la fois critiques et stratégiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024) (Figure 2/2). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO₂.

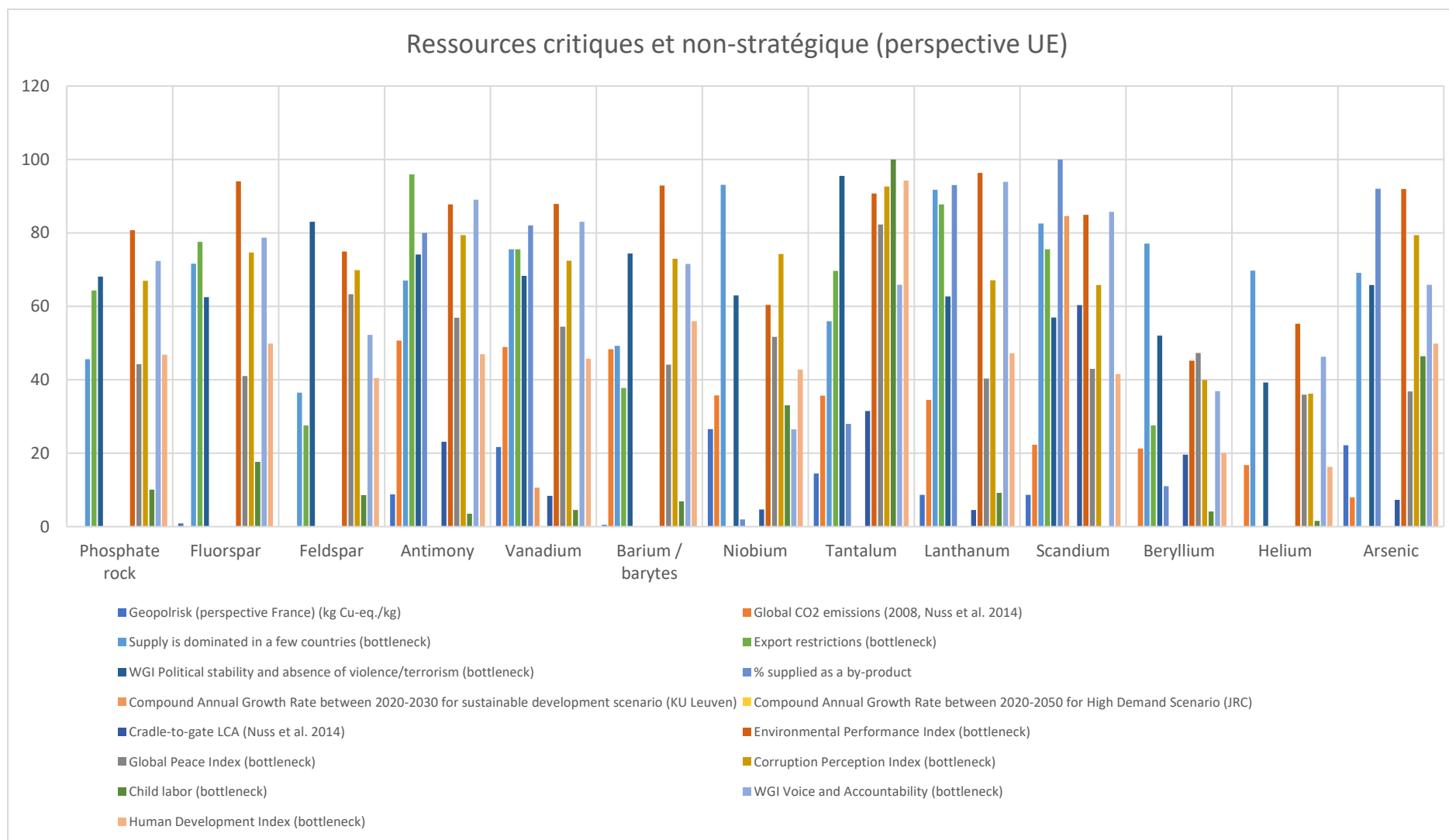


Figure 16 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières critiques mais non stratégiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO₂.

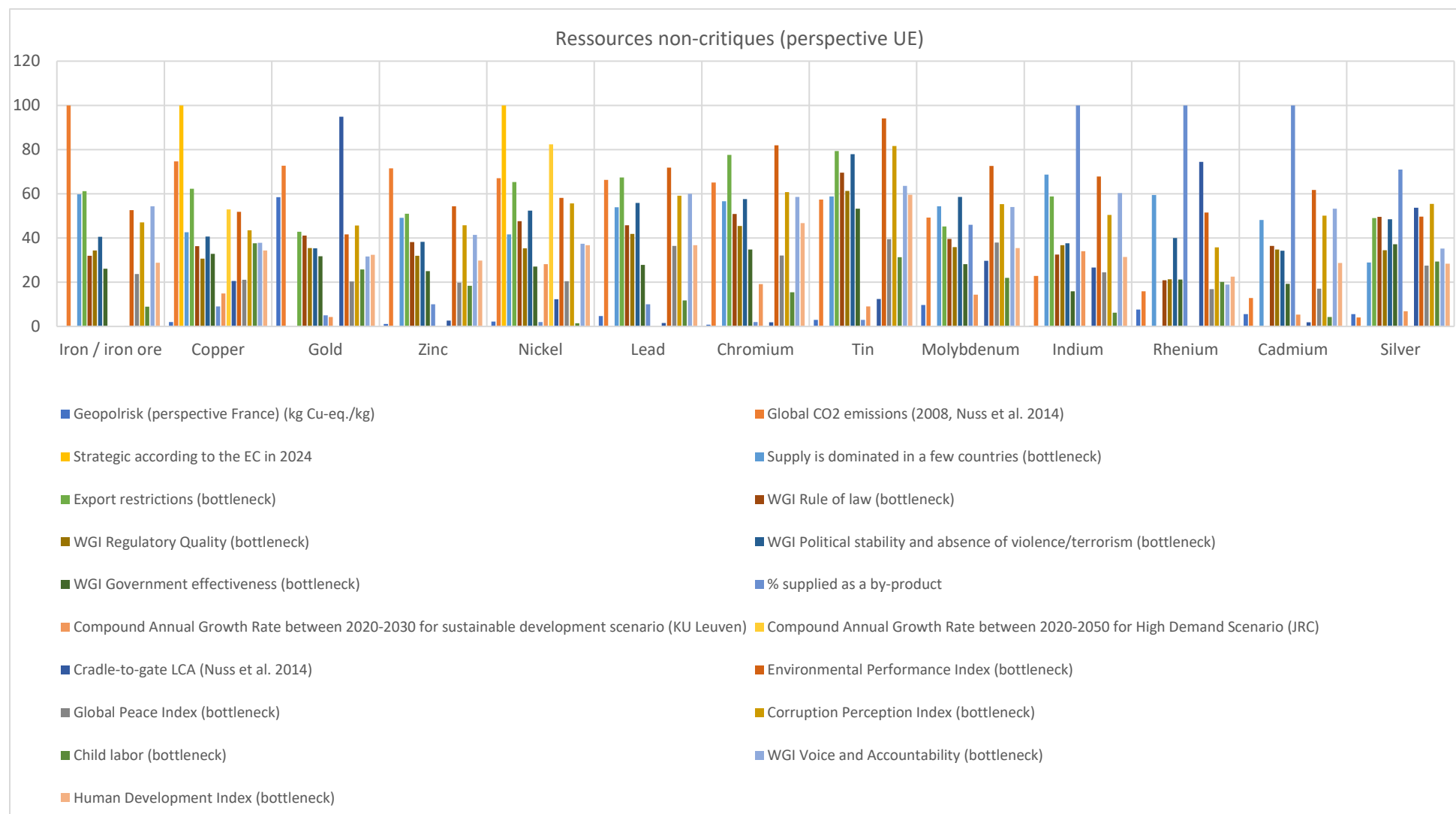


Figure 17 Notation normalisée sur (une sélection de) indicateurs de criticité pour (une sélection de) matières premières non critiques selon (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2024). Une échelle logarithmique est appliquée à GeoPolRisk et aux émissions mondiales de CO₂.

3. Synthèse des liens entre la criticité et l'ACV

L'objectif de l'étape 2 est d'analyser des croisements et liens entre l'évaluation des matières premières critiques et l'ACV.

3.1. Cartographie des liens

3.1.1. Sujets de sauvegarde des méthodes d'évaluation

La Figure 18 donne un aperçu schématique des différents sujets de sauvegarde des méthodes d'évaluation discutées dans ce chapitre, soient les méthodes introduites à la section 2.2. La figure fait la distinction entre « le système de produits à l'étude » et les « autres systèmes de produits ». Chaque système de produits a des impacts environnementaux (indiqués par des « émissions » dans la figure), et chaque système de produits génère une valeur économique pour la région géographique dans laquelle se déroule une étape ou un processus spécifique du cycle de vie, par exemple, sous la forme de la création d'emplois, de la génération d'un profit et des taxes associées. Enfin, chaque système de produit fournit une fonction spécifique, qui est associée de façon impersonnelle à l'unité fonctionnelle en ACV.

Comme le montre la Figure 18, le sujet d'intérêt d'une ACV attributionnelle sont les impacts environnementaux directement causés par les processus de la chaîne de valeur d'un produit. Les impacts environnementaux évalués dans une ACV conséquentielle sont causés par les processus de la chaîne de valeur du produit, à condition que l'approvisionnement du produit et des composants ou matières premières en amont ne soit pas limité. Si le produit à l'étude concerne un sous-produit, aucune émission liée à la production de ce sous-produit n'est modélisée dans l'étude, puisque la demande pour le sous-produit n'entraîne pas d'augmentation de la production. Au lieu de cela, la demande pour le sous-produit entraîne une diminution de l'utilisation de ce sous-produit dans d'autres systèmes de produits, ce qui entraîne des changements subséquents, et des impacts environnementaux correspondants causés par ces autres systèmes de produits. Les émissions évaluées dans une ACV conséquentielle représentent donc la variation nette totale des impacts environnementaux.

On observe une distinction similaire des périmètres étudiés pour les méthodes d'évaluation d'impact de l'utilisation des ressources. En effet, **le focus de l'aire de protection « ressources » sur l'utilisation potentielle de la valeur obtenue à partir des ressources, que ce soit à un niveau économique ou fonctionnel, souligne la distinction entre l'objectif environnemental de l'ACV environnementale et l'objectif économique et/ou social du domaine de protection « ressources »**. Cela ne contredit pas pour autant l'argument de Sonderegger et al. (2017), dictant que les ressources proviennent de l'environnement et doivent donc être intégrées à l'ACV.

Le sujet de sauvegarde d'une évaluation de criticité (y compris les méthodes de risque d'approvisionnement en ACV) est, souvent, la valeur économique générée pour le système étudié, c'est-à-dire la partie prenante qui utilise la matière première. Cependant, les études de criticité ne prennent généralement pas en compte la valeur économique générée sur l'ensemble de la chaîne de valeur d'une matière première, ce qui correspondrait au périmètre d'une ACV attributionnelle pour mesurer les impacts environnementaux. Plutôt, **seule la valeur économique générée pour une partie prenante définie est évaluée**. Cette partie prenante peut être une entreprise spécifique ou une région économique dans laquelle un ou plusieurs processus de production ont lieu, comme l'illustre la Figure 18. La substituabilité est souvent acceptée comme une mesure d'atténuation, et la différence de création de valeur entre les acteurs économiques en amont de la substitution (par exemple les mineurs des différents substituts) est hors du champ d'une étude de criticité (Schrijvers et al., 2024).

La méthode SPOTTER de Berr et al. (2022) fait exception à cette règle. En effet, cette méthode ne se focalise pas sur un seul acteur économique, mais évalue plutôt l'ensemble de la chaîne de valeur afin

d'identifier les éventuels goulots d'étranglement (« *bottlenecks* »). Ainsi, il est possible d'interpréter que l'approche de SPOTTER permet d'identifier l'acteur économique le plus sensible aux ruptures d'approvisionnement. Berr et al. prétendent appliquer une approche orientée sur un système de produit permettant la substitution de matières premières, mais pas la substitution de biens ou de services finaux. Par conséquent, il semble qu'ils définissent la nature du système de produit par les étapes finales de fabrication et d'utilisation, tandis que l'extraction et le raffinage sont considérés comme interchangeables. On peut donc soutenir que l'approche SPOTTER privilégie la pertinence des acteurs économiques qui sont actifs dans les dernières étapes de fabrication et d'utilisation par rapport aux acteurs économiques actifs en amont de la chaîne de valeur.

La méthode GeoPolRisk prend également en compte l'ensemble de la chaîne de valeur, mais applique l'hypothèse simplificatrice selon laquelle toutes les étapes de la chaîne de valeur sont menées par le même acteur économique, par exemple l'économie européenne. Cette hypothèse pourrait devenir représentative d'une étude qui évalue les risques si des étapes de la chaîne d'approvisionnement étaient déplacées, par exemple, vers l'Europe, ce qui est l'un des objectifs de la CRMA.

Certaines études de criticité ne prennent pas explicitement en compte la valeur économique générée par les processus de production, mais plutôt les rendements techniques du processus de production basés sur les caractéristiques du produit, comme les études qui évaluent les matières premières critiques pour les technologies de production d'énergie à faibles émissions de carbone (par exemple (Bauer et al., 2010 ; R.L. Moss et al., 2013)). On pourrait considérer que de telles études évaluent la fonctionnalité d'un système de produit comme sujet de sauvegarde. Cependant, puisque la substituabilité n'est généralement pas évaluée au niveau de la fonctionnalité, mais plutôt au niveau de la capacité à produire une technologie spécifique, il peut être considéré que ces études visent à informer les investissements pertinents, et donc appliquent indirectement une perspective économique.

Ainsi, les études d'évaluation de la criticité, réalisées de façon indépendantes ou encore développées dans le cadre de l'ACV, semblent se concentrer sur la valeur économique créée par les fabricants de produits finaux et les consommateurs finaux *du système de produit à l'étude*. En contraste, les méthodes d'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources en ACV, appliquant une perspective de l'intérieur vers l'extérieur (« *inside-out* »), prennent en compte la création de valeur (économique) liées à d'autres utilisateurs des ressources ou produits (par exemple, des utilisateurs futurs) (Figure 18). Parmi ces méthodes *inside-out* évaluant l'impact de l'utilisation des ressources en ACV, il pourrait y avoir une différence entre les impacts causés par l'occupation, la dégradation, la déplétion, et la dissipation, ce qui affecte implicitement l'identification de la ou des parties prenantes qui perdraient l'accessibilité à la valeur générée par les ressources.

Les méthodes *inside-out* d'évaluation des impacts de l'utilisation des ressources n'indiquent pas toujours explicitement quels systèmes de produits sont considérés comme affectés par une diminution de l'accessibilité aux ressources. Une différence clé réside dans les **différentes échelles de temps appliquées par les méthodes**. Par exemple, les réserves ultimes considérées dans la méthode ADP prennent en compte la disponibilité des réserves géologiques à très long terme, tandis que la méthode CTI-LCIA prend plutôt en compte l'inaccessibilité des ressources sur les 500 prochaines années, par exemple pour les ressources rendues temporairement inaccessibles dans un site d'enfouissement. De plus, la distinction explicite entre les usagers potentiels des ressources (par exemple, industries ou régions spécifiques) n'est pas effectuée jusqu'ici. Néanmoins, la méthode EVDP considère l'importance économique en Europe comme un facteur de perte de la valeur liée à la dissipation, ce qui peut être interprété comme un premier pas dans cette direction.

Bien que les autres systèmes de produit puissent générer de la valeur économique à plusieurs étapes du cycle de vie, dépendamment de la forme des ressources (préservées), les ressources peuvent être réutilisées pour la création de valeur tout en sautant certaines étapes du cycle de vie (par exemple, l'extraction et le raffinage). Par exemple, la méthode CTI-LCIA propose différents « temps avant l'accessibilité » aux ressources en fonction de l'étape du cycle de vie et de la forme des ressources (par exemple, dans un produit, dans un site d'enfouissement, dans l'environnement, etc.). Si une ressource est recyclée, elle sautera l'étape d'extraction et de raffinage suivante et pourra passer directement à un

traitement ultérieur. Ici, le potentiel futur de faire usage de la **valeur économique pour la fabrication et la consommation futures est prise en compte, mais la valeur économique peut être perdue pour les acteurs impliqués dans les processus de la chaîne de valeur en amont** dans le cas où les matériaux secondaires remplacent les matériaux primaires. Ce n'est qu'en cas d'épuisement que la création de valeur potentielle pour l'extraction et le raffinage peut également entrer dans le champ d'application de l'objet de sauvegarde.

Finalement, la distinction entre la création de valeur économique et la valeur fonctionnelle obtenue à partir des produits n'est pas toujours abordée dans les méthodes axées sur les ressources. La création de valeur économique peut être prise en compte tout au long de la chaîne de valeur, tandis que la création de valeur fonctionnelle peut bénéficier au consommateur final, qui utilise un produit pour répondre à un certain besoin. Les nouvelles méthodes d'évaluation d'impact pour les ressources considèrent de plus en plus la valeur économique des ressources comme au moins une partie du sujet de sauvegarde des ressources. Par exemple, la méthode EVDP est explicite sur la sauvegarde de l'importance économique des matières premières pour l'économie locale (dans le cadre de la fonction de valeur), la méthode JRC *price-based* considère le coût des ressources comme la valeur perdue des ressources dissipées pour les humains, et les méthodes ADR/LPST et CTI-LCIA utilisent la valeur marchande des ressources comme indicateur de leur utilité générale pour les humains. Dans ce dernier cas, **l'utilité peut inclure à la fois la valeur économique et la fonctionnalité fournies par les biens produits**. Il est possible d'évoquer que les méthodes d'évaluation de l'impact de l'ACV inside-out ne priorisent pas forcément le secteur manufacturier, mais plutôt les consommateurs finaux, car l'augmentation des coûts subie par le secteur manufacturier peut être transférée à ces consommateurs finaux. Dans ce cas, la valeur obtenue des ressources peut être axée sur la fonctionnalité fournie aux utilisateurs finaux des produits. Il est toutefois possible de nuancer que le prix des biens influencera aussi la clientèle potentielle en fonction de son pouvoir d'achat, et donc les usagers finaux pourraient changer à la suite d'une hausse de prix.

Alors qu'il n'existe pas de cadre défini qui clarifie *qui* peut être soumis à une perte potentielle de valeur obtenue par les ressources, lorsqu'une ressource est épuisée/dissipée/dégradée/occupée, on peut noter qu'**aucune des méthodes orientées ressources (inside-out ou outside-in) ne privilégie la création de valeur économique des processus en amont de la phase de fabrication (c'est-à-dire l'extraction et le raffinage)**. D'autre part, l'approche d'analyse du coût du cycle de vie (ACCV) pourrait couvrir la création de valeur économique au sein de l'ensemble du système de produits à l'étude, résultant en un chevauchement partiel du périmètre d'application avec l'évaluation de la criticité. Cependant, comme les évaluations de la criticité évaluent un *risque* plutôt qu'une valeur statique de la valeur économique, les évaluations de la criticité peuvent refléter dans quelle mesure les coûts et les revenus d'une partie prenante spécifique de la chaîne de valeur peuvent varier en fonction d'une perturbation potentielle, c'est-à-dire une différence entre une analyse d'ACCV entre les temps $t = 0$ et $t = 1$ (Schrijvers et al. *en préparation (projet CALIMERO)*).

Par rapport à une ACV conséquentielle, visant à évaluer les impacts environnementaux nets causés par un système de produit en tenant compte de tous les processus potentiellement affectés dans la technosphère, **il n'existe pas de méthode équivalente qui identifierait la valeur économique nette totale générée par un système de produit**. Des méthodes spécifiques, notamment les évaluations de criticité, l'ACCV et les méthodes d'évaluation des impacts de l'utilisation des ressources, se concentrent toutes sur un aspect spécifique de la création de valeur. Une combinaison de ces éléments peut fournir une vue complète de la durabilité économique d'un système de produits, bien que cela puisse être un exercice complexe dans la pratique, en raison des différentes portées, géographiques et temporelles liées aux parties prenantes auxquelles ils sont appliqués, ainsi que des différentes interprétations possibles de la « valeur créée » pour chaque partie prenante. Au travers une identification systématique des chemins d'impacts concernant les ressources visant à prendre en compte les différentes valeurs (économique ou d'usage) et utilisateurs potentiels des ressources, ainsi que les impacts sur les autres utilisateurs, Charpentier Poncelet et al. (2022a) appellent d'ailleurs la communauté ACV à employer un lot d'indicateurs pour caractériser les impacts de l'utilisation des ressources sur l'aire de protection ressources.

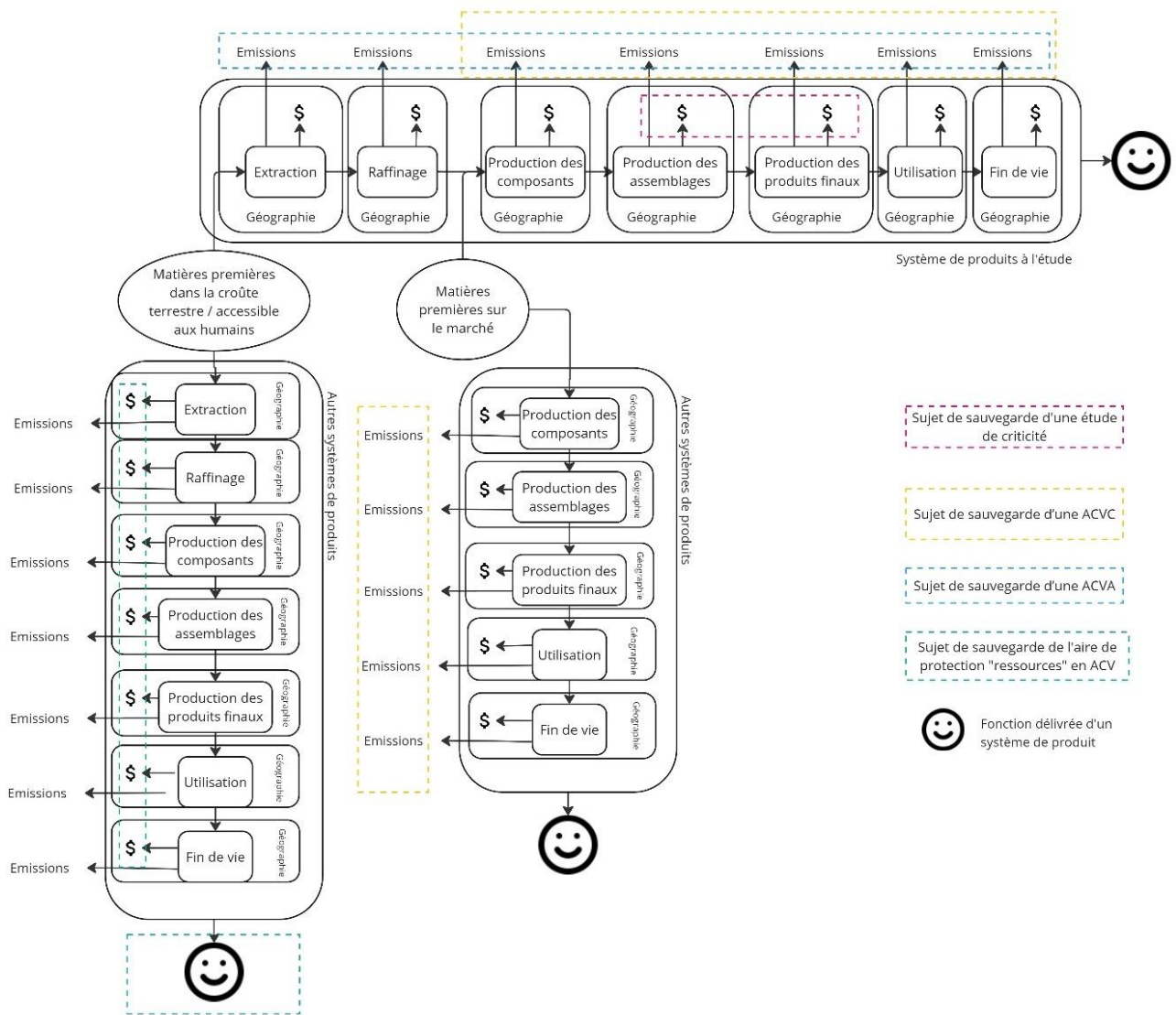


Figure 18 Vue d'ensemble schématique du champ d'application des méthodes orientées ressources. ACVC = Analyse du cycle de vie conséquentielle, ACVA = Analyse du cycle de vie attributionnelle.

3.1.2. L'utilisation conjoint des évaluations de criticité et l'ACV pour améliorer la prise de décision stratégique par les décideurs politiques et les entreprises

Utilisation de l'ACV environnementale dans les évaluations de criticité

D'après l'état de l'art, il a été observé que les impacts environnementaux jouent un rôle pertinent dans plusieurs études de criticité. (D. Schrijvers et al., 2021a) analysent comment la perspective environnementale dans les évaluations de la criticité des matières premières peut être évaluée via l'analyse du cycle de vie.

- *Perspective 1* : Les impacts environnementaux entraînent une probabilité élevée ou faible de rupture de l'approvisionnement d'un matériau en raison d'une réglementation potentielle
- *Perspective 2* : L'utilisation d'un matériau à fort impact environnemental ou social affecte la réputation d'une entreprise
- *Perspective 3* : L'utilisation d'un matériau a un impact faible ou élevé sur l'environnement
- *Perspective 4* : La perturbation de la disponibilité d'un matériau a un impact élevé ou faible sur l'environnement

Tout d'abord, sur la base d'un aperçu schématique des mécanismes de cause à effet implicites sous-jacents de chacune des perspectives (Figure 19), on peut observer que toutes les perspectives évaluent un « changement » dans la chaîne de valeur des matières premières, se manifestant soit par un changement de l'offre, soit par un changement de la demande. Les perspectives 1 et 2 considèrent que *les impacts environnementaux provoquent un changement dans la chaîne de valeur des matières premières*. Cela correspond à une perspective « *outside-in* », similaire à la perspective appliquée aux méthodes du risque d'approvisionnement dans le cadre de l'ACV (i.e. GeoPolRisk et autres). Les perspectives 3 et 4 considèrent qu'un *changement dans la chaîne de valeur des matières premières a un impact sur l'environnement*, ce qui est cohérent avec une perspective « *inside-out* », qui est l'approche générale de l'évaluation d'impact en ACV (D. Schrijvers et al., 2021a).

Pour les perspectives 1 et 2, il est important d'évaluer les impacts environnementaux qui peuvent être directement attribués à l'utilisation d'une matière première. Ces impacts sont généralement évalués au moyen d'une ACVA, comme il est indiqué à la section 2.2.1. D'autre part, les impacts environnementaux causés par l'évolution de l'offre ou de la demande d'une matière première sont mieux évalués via une ACVC.

Enfin, le sujet de sauvegarde des perspectives 1 et 2 peut être identifié comme une « activité économique », telle que la production d'une entreprise ou d'un secteur économique, tandis que les perspectives 3 et 4 se concentrent sur les dommages potentiels sur l'environnement.

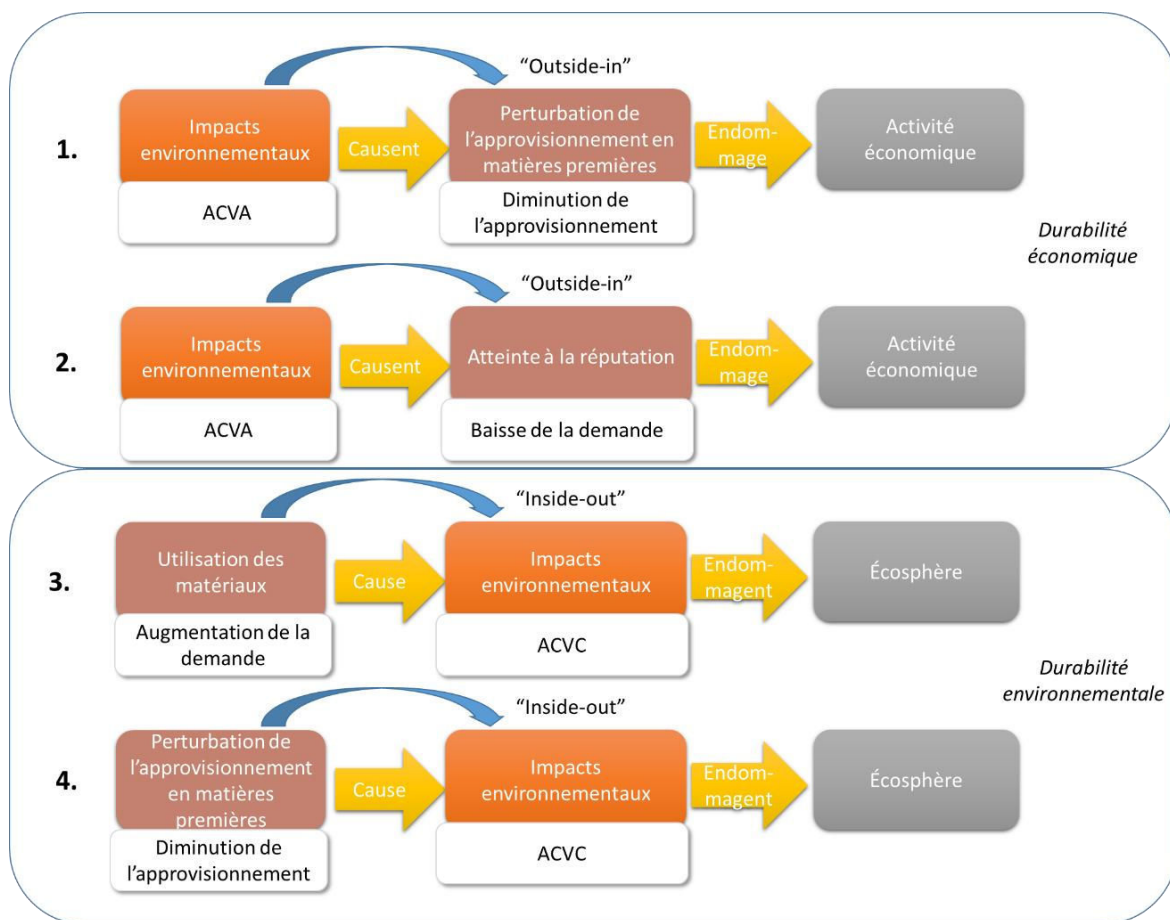


Figure 19 Mécanisme de cause à effet sous-jacent des 4 perspectives concernant les impacts environnementaux dans l'évaluation de la criticité des matières premières, leur classification en « outside-in » ou « inside-out », et l'approche ACV correspondante, adaptée de (D. Schrijvers et al., 2021b)

(D. Schrijvers et al., 2021a) montrent enfin que les résultats d'une analyse suivant les perspectives 1 et 2 peuvent en outre être utilisés comme une étape de calcul intermédiaire des perspectives 3 et 4. À titre d'exemple, ils considèrent les effets potentiels d'impacts élevés lors de l'extraction du lithium, tels qu'évalués via une ACV attributionnelle. Ces impacts peuvent motiver les législateurs à appliquer des réglementations qui augmentent les coûts de production du lithium, rendant l'achat de véhicules électriques moins intéressant financièrement. Une transition retardée vers la mobilité électrique peut à son tour avoir un impact négatif sur l'environnement, comme l'évalue l'ACV qui en découle. Cela montre que l'ACVA et l'ACVC peuvent jouer un rôle complémentaire dans l'évaluation de la durabilité environnementale, en considérant les dommages économiques comme une étape intermédiaire de l'évaluation.

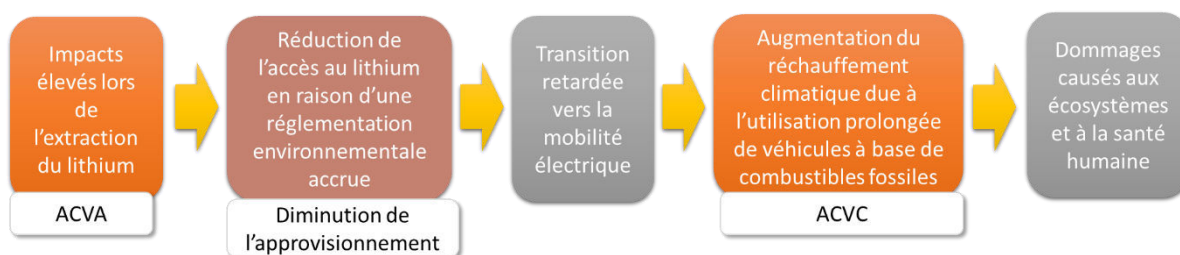


Figure 20 Illustration de la complémentarité de l'ACVA et de l'ACVC pour l'évaluation des impacts environnementaux (D. Schrijvers et al., 2021a)

Cependant, l'ACV est limitée pour refléter les risques environnementaux potentiels affectant l'approvisionnement en matières premières. Comme de nombreuses matières premières critiques sont des sous-produits, l'application de l'allocation économique dans l'ACV attributionnelle se traduit par un profil environnemental relativement faible attribué au sous-produit spécifique. Cependant, les réglementations environnementales ou les dommages potentiels à la réputation peuvent ne pas être basés sur les impacts environnementaux attribués du sous-produit, mais plutôt être informés par les impacts environnementaux totaux d'une mine spécifique (D. Schrijvers et al., 2021). Un exemple évoqué par (D. Schrijvers et al., 2021) est la publicité négative autour des impacts environnementaux des éléments de terres rares, qui sont des matières premières utilisées dans des technologies prétendument propres – sans tenir compte du fait que les éléments de terres rares sont principalement produits en tant que sous-produits d'autres métaux. Par conséquent, d'autres indicateurs environnementaux, tels que l'indice de performance environnementale (EPI), peuvent dans certains cas être de meilleurs prédicteurs de l'association potentielle d'une matière première avec des impacts environnementaux.

Utilisation des impacts sur les ressources dans les évaluations de criticité

L'épuisement des ressources

Bien que de nombreuses études de criticité des matières premières considèrent l'épuisement comme un facteur de risque, cet indicateur est controversé dans le domaine de la criticité, en raison de l'orientation générale à court terme des études de criticité par rapport à la pertinence à long terme de l'épuisement (Schrijvers et al., 2020b). Il peut être soutenu que les matières premières qui sont rares (telles qu'évaluées par les méthodes d'évaluation de l'impact des ressources) et qui ont des taux de croissance du marché élevés peuvent être à risque, car il est incertain qu'une demande accrue pour ces ressources puisse être satisfaite par une augmentation de l'offre. Cependant, les experts de l'industrie minière s'opposent généralement à l'utilisation de la rareté géologique comme un indicateur de rareté sur le marché. En effet, lorsqu'une pénurie de marché se profile, les prix des matières premières augmentent, ce qui entraîne des efforts accrus en exploration et rend plus de gisements financièrement intéressants à exploiter, menant à une augmentation des réserves. De ce fait, la rareté géologique est un facteur instable et incertain (puisque la quantité totale de matières premières dans la croûte terrestre est inconnue), et elle n'est pas considérée comme un facteur de risque dans les horizons temporels typiques des évaluations de criticité (généralement jusqu'à 30 ans).

Cependant, les évaluations de criticité dépendent fortement de la portée de l'analyse. Alors que la plupart des études se concentrent sur les besoins actuels en matières premières et la valeur (économique) actuelle créée, conceptuellement, on peut faire une étude de criticité sur les besoins en matières premières dans 100 ans. (Graedel et al., 2012) formulent une méthodologie de détermination de la criticité pour plusieurs perspectives d'acteurs économiques (une perspective d'entreprise, une perspective nationale et une perspective mondiale) et différentes périodes (à moyen terme (5-10 ans) et à long terme (quelques décennies)).

(Graedel et al., 2012) considèrent qu'une période à long terme est surtout pertinente pour la « perspective mondiale », qui considère le temps d'épuisement et la dépendance aux sous-produits comme les seuls indicateurs du risque d'approvisionnement. La vulnérabilité à une rupture d'approvisionnement au niveau mondial est évaluée par l'importance d'une matière première (mesurée par le pourcentage de la population utilisant une matière première) et la substituabilité (évaluée par la performance de substitution, la disponibilité et le rapport d'impact environnemental). Il convient de noter que (Graedel et al., 2012) évaluent la vulnérabilité en fonction des modes de consommation et de substitution actuels, même s'ils peuvent être différents à long terme. Les perspectives mondiales (et aussi nationales) de (Graedel et al., 2012) diffèrent en outre des autres domaines de criticité (nationaux) typiques, en considérant les utilisateurs finaux des matières premières et, dans une moindre mesure (uniquement au niveau national, pas au niveau mondial) l'importance économique de la transformation des matières premières.

Les prix

En comparant les scores des indicateurs d'impact des ressources pour l'ACV et ceux des méthodes de criticité, (voir Section 0), il est possible de conclure que certains facteurs causant un impact élevé (c'est-à-dire un prix élevé et une faible concentration dans la croûte terrestre) ne sont pas de bons prédicteurs

d'une haute probabilité d'interruption de l'approvisionnement. Néanmoins, comme les platinoïdes ont un prix élevé et que leur approvisionnement est fortement concentré dans des pays politiquement instables, ils seront souvent considérés comme des points chauds dans la plupart des méthodes d'évaluation. De plus, bien que les prix ne puissent pas nécessairement provoquer une interruption de l'approvisionnement, ils pourraient jouer un rôle dans l'évaluation des vulnérabilités liées à une telle interruption, ce qui représente une étape importante pour mesurer les impacts potentiels dans une évaluation de criticité.

La dissipation

Le scandium, le gallium et le germanium présentent un taux de dissipation élevé, ce qui leur confère un score élevé dans la méthode ADR. Comme ce taux de dissipation est lié au fait que ces ressources sont exclusivement des co-produits, et que l'approvisionnement en co-produits est souvent considéré comme un facteur de risque critique (en raison des fluctuations potentielles des prix), ces matières premières pourraient également avoir un impact élevé pour l'ensemble des perspectives d'évaluation des impacts. Cependant, un taux de dissipation élevé n'a pas été considéré comme un indicateur pertinent dans le domaine de la criticité.

Il peut être possible de tenir compte des impacts liés à l'utilisation des ressources également dans les évaluations de criticité à court terme, de la même manière que les impacts environnementaux sont considérés comme une source de risque. Dans ce cas, l'utilisation d'une matière première qui entraîne une diminution du potentiel d'autres utilisations pour utiliser sa valeur peut entraîner 1) une réglementation limitant l'accessibilité actuelle d'une matière première ou le prix de la matière première, ou 2) une atteinte potentielle à la réputation. Il n'est pas totalement inimaginable que des matières premières dont le taux de recyclage est actuellement faible ou dont les réserves sont relativement faibles soient soumises à des exigences de recyclage, ce qui est déjà le cas pour les matières premières critiques dans le CRMA. Cependant, un lien plus direct entre les risques réglementaires et l'utilisation des matières premières peut être l'identification d'une matière première comme « critique » dans un certain contexte politique, comme c'est le cas de la liste de l'UE des matières premières critiques qui informent les exigences de la CRMA (plutôt que les taux d'épuisement ou de dissipation). Dans cette optique, la méthode EVDP peut être un indicateur de risque pertinent pour les entreprises basées en Europe dans leurs évaluations de criticité, car l'utilisation dissipative d'une matière première considérée comme critique par la Commission Européenne peut faire l'objet de réglementations supplémentaires.

Utilisation d'évaluations de criticité dans les impacts sur les ressources

Les évaluations de criticité développées pour le cadre ADCV (par exemple GeoPolRisk) ont été évaluées et appliquées parallèlement à d'autres méthodes d'évaluation de l'impact sur les ressources spécifiques à l'ACV (Berger et al., 2020 ; Gemechu et coll., 2015b ; Sonderegger et al., 2020). Même si les méthodes d'évaluation de la criticité ont intrinsèquement une portée différente de celle des autres évaluations d'impact orientées ressources (c'est-à-dire l'accent mis sur les dommages potentiels au système de produits à l'étude plutôt qu'à d'autres systèmes de produits – la perspective « outside-in » par opposition à la perspective « inside-out »), il ne s'agit pas nécessairement d'une limitation de la boîte à outils de l'évaluation de l'utilisation des ressources en ACV. En fait, bien que d'autres méthodes orientées vers les ressources en ACV évaluent les dommages causés aux « autres systèmes de produits », il existe une grande variation dans ce que l'on entend par ces « autres » systèmes de produits, à la fois implicitement et explicitement. Ces « autres systèmes de produits » peuvent varier selon des échelles de temps différentes, mais aussi selon les parties prenantes (économiques). Par exemple, la méthode EVDP considère les « autres systèmes de produits » comme des entreprises européennes nécessitant la matière première, évaluant ainsi les dommages potentiels sur l'économie européenne à très court terme (<10 ans). En revanche, l'approche du JRC prend en compte des parties prenantes non spécifiques à court terme (<25 ans) et à moyen terme (<50 ans). La méthode ARP n'est pas non plus spécifique aux parties prenantes et prend en compte les systèmes de produits à très long terme.

Pour faire un parallèle avec une ACV environnementale conséquentielle, qui évalue les impacts environnementaux nets en tenant compte à la fois du système de produits à l'étude et d'autres systèmes de produits dans la technosphère, il n'existe pas une seule méthode axée sur les ressources qui évalue

la valeur potentielle totale de l'utilisation des ressources, en tenant compte de tous les systèmes de produits affectés. Les méthodes développées pour quantifier les dommages dans le domaine de la protection « utilisation des ressources » s'intéressent principalement à la réduction du potentiel de création de valeur dans les systèmes de produits alternatifs. La valeur créée par le système de produits à l'étude, qui utilise actuellement la ressource, n'est pas prise en compte dans ces méthodes d'analyse d'impact.

Sur le plan conceptuel, pour évaluer la valeur potentielle totale créée par l'utilisation des ressources, à la fois dans le système de produits à l'étude et dans d'autres systèmes de produits susceptibles d'être intéressés par l'utilisation de la même ressource, il peut être nécessaire de combiner différentes méthodes d'évaluation de l'impact axées sur les ressources, éventuellement dans une évaluation dynamique qui tient compte de la disponibilité et des besoins des ressources au fil du temps.

Dans l'intervalle, il serait utile de préciser quelles parties prenantes (économiques) sont visées par chaque méthode spécifique d'évaluation de l'impact sur les ressources, ce qui permet une sélection et/ou une combinaison plus efficace des méthodes d'évaluation de l'impact.

Utilisation des impacts sur les ressources dans l'ACV environnementale

Il semble y avoir un consensus sur le fait que les « ressources » ne sont pas une préoccupation environnementale, et ne contribuent pas à l'Aire de protection (AdP) « environnement naturel », prouvée par l'existence de l'aire de protection « ressources naturelles ». Cependant, l'importance ultérieure des « ressources » du point de vue de la durabilité n'est pas claire. Même si les ressources sont souvent considérées comme ayant une importance économique (par exemple par (Sonnemann et al., 2015)), l'AdP « ressources » ne sont pas fusionnées avec l'AdP économique « prospérité » dans le nouveau cadre de (Hackenhaar et al., 2024) qui a été développé dans le projet ORIENTING. En outre, on pourrait faire valoir que la valeur obtenue à partir des ressources entraîne la satisfaction des besoins humains, conduisant à une augmentation du bien-être humain, ce qui est un autre AdP distinct dans le cadre de (Hackenhaar et al., 2024). Par conséquent, il n'existe pas encore de cadre consensuel d'évaluation des ressources parallèlement à l'ACV environnementale, et une évaluation parallèle des impacts environnementaux et des impacts sur l'utilisation des ressources est donc la meilleure pratique actuelle.

Utilisation des évaluations de criticité dans l'ACV environnementale

Outre la réflexion susmentionnée sur la signification sous-jacente de la combinaison d'une évaluation axée sur les ressources et d'une ACV environnementale, une réflexion sur la combinaison de méthodes d'évaluation conceptuellement différentes est en place. Il existe deux façons d'intégrer la criticité (entendue comme le risque et la vulnérabilité des ruptures d'approvisionnement) à l'analyse du cycle de vie : l'une au niveau des résultats et l'autre au niveau méthodologique. Les forces et les faiblesses de chacune de ces méthodes, ainsi que la relation entre elles, font l'objet de débats dans le monde de l'analyse du cycle de vie depuis plus de deux décennies pour le thème de la toxicité des produits chimiques et des nanomatériaux manufacturés (Guinée et al., 2017; Sonnemann et al., 2018).

Pour l'intégration de la criticité dans l'ACV, cela signifie que :

- Les résultats des évaluations de la criticité (des risques) des matières premières peuvent compléter les résultats de l'A(D)CV d'un système de produit d'une entreprise afin d'avoir une compréhension plus large des répercussions sur la durabilité des ressources, ou
- Les aspects du risque d'approvisionnement peuvent être intégrés au niveau méthodologique dans l'A(D)CV au stade de l'évaluation de l'impact du cycle de vie par le biais de facteurs de caractérisation qui sont calculés à l'aide d'un outil d'évaluation comparative des risques similaire à USEtox (Rosenbaum et al., 2008).

La première approche est recommandée par le projet ORIENTING, un projet d'Horizon Europe, (Hackenhaar et al., 2024). Hackenhaar et al. affirment que les évaluations de criticité ne sont pas « conçues dans une logique complète de cause à effet vers une zone de niveau de protection ou un domaine de durabilité » (Hackenhaar et al., 2024, p.510). Par conséquent, Hackenhaar et al. proposent de considérer les évaluations de criticité (ainsi que les indicateurs de circularité) comme une analyse

supplémentaire, en plus des aspects environnementaux, sociaux et économiques d'un système de produits, plutôt que comme une intégration complète des trajectoires d'impact et des scores LCSA.

Le projet ORIENTING a passé en revue les méthodes d'évaluation de la criticité et a examiné leur potentiel pour évaluer la criticité des matériaux de façon intégrée à l'ACV (Hackenhaar et al., 2022). Des critères clés, tels que la transparence, la robustesse et l'exhaustivité de la méthodologie, ont été mis en évidence. Cependant, la complexité du calcul des valeurs a également été soulignée. L'évaluation réalisée dans ce projet a attribué les scores les plus élevés aux méthodes d'évaluation de la criticité de la Commission Européenne (EC-CA) (Blengini et al., 2017) et GeoPolRisk.

La méthode EC-CA intègre le risque d'approvisionnement et l'importance économique. L'importance économique se rapporte aux conséquences potentielles en cas de rupture de l'offre, évaluées à l'aide de la part de la demande et de la valeur ajoutée brute. Cependant, le projet ORIENTING lui a attribué un score faible en termes de compatibilité avec l'approche ACV et recommande qu'il puisse s'intégrer à l'ACV en cartographiant les flux élémentaires, à l'instar des travaux sur une méthode basée sur les prix pour quantifier la réduction de l'accessibilité à la valeur des ressources minérales (Ardente et al., 2023).

Suivant la deuxième perspective, l'évaluation de la criticité peut être intégrée à l'ACV au niveau méthodologique dans le but de fournir des informations complémentaires aux autres indicateurs (Tsang et al., 2017). C'est l'approche qui est recommandée par GLAM et est également adoptée par les méthodes GeoPolRisk, ESSENZ et SPOTTER.

3.1.3. Utilisation des données ACV dans les études de criticité

En ACV, les bases de données telles qu'ecoinvent incluent les mix d'approvisionnements en matériaux sous-jacents aux différents procédés. En théorie, la région ou pays des matériaux extraits de l'environnement requis pour un procédé connu est représentative, et témoigne d'une dépendance de l'approvisionnement sur ces pays. Cette information peut être employée pour évaluer le risque de criticité, comme le fait la méthode GeoPolRisk. Cependant, dans les bases de données, cette information est contenue dans les noms des procédés et au niveau des flux intermédiaires plutôt qu'à l'échelle des flux élémentaires, ce qui complique leur prise en compte avec une méthode de criticité qui voudrait caractériser ces flux directement dans un outil d'ACV. De la même façon, il n'est pas possible de prendre en compte la criticité lorsque le risque d'approvisionnement provient plutôt d'un matériau raffiné (par exemple, si l'étape de raffinage a lieu de façon concentrée dans un pays donné malgré une production répandue dans le monde) ou d'un composant spécifique. Le décalage entre l'accent mis sur la caractérisation des flux élémentaires dans l'ACV et la nécessité de caractériser les flux intermédiaires dans les évaluations de criticité est un défi technique que l'équipe ecoinvent étudie actuellement (communication personnelle). La méthode GeoPolRisk contourne actuellement cette limitation en combinant les données des bases de données sur des interactions commerciales avec les quantités de flux élémentaires d'ecoinvent. Seuls les flux élémentaires sont caractérisés, sur la base de l'hypothèse simplificatrice selon laquelle tous les processus de production se déroulent dans la région étudiée.

De plus, la représentativité géographique de l'approvisionnement tel que fourni par ecoinvent peut être limitée dans plusieurs cas, par exemple lorsque la base de données ne distingue pas de régions pour certains procédés, ou encore si la représentativité géographique n'est plus correcte lorsque les procédés se basent sur d'anciennes données.

3.2. Formulation des cas d'application

3.2.1. Evaluation des matériaux d'intérêt

Afin de mieux comprendre les implications de l'application des différentes méthodes ressources (incluant la criticité) et les conclusions pouvant en être tirées, quelques métaux identifiés comme étant d'intérêt sont étudiés ici : le cobalt, le cuivre, le lithium, l'or, le platine, ainsi que deux terres rares : le

dysprosium, le néodyme. Ces métaux couvrent une large gamme de propriétés, telles que critiques et non-critiques, stratégiques ou non, et sont importants pour la transition énergétique, et sont utilisés et recyclés de façon plus ou moins importantes. Concernant les méthodes codéveloppées ADR/LPST, la méthode ADR est considérée, puisqu'elle a été recommandée comme méthode proxy pour estimer les flux dissipatifs à partir flux élémentaires de ressources extraites dans le rapport ScoreLCA 2020-05 (de Caemel et al., 2022).

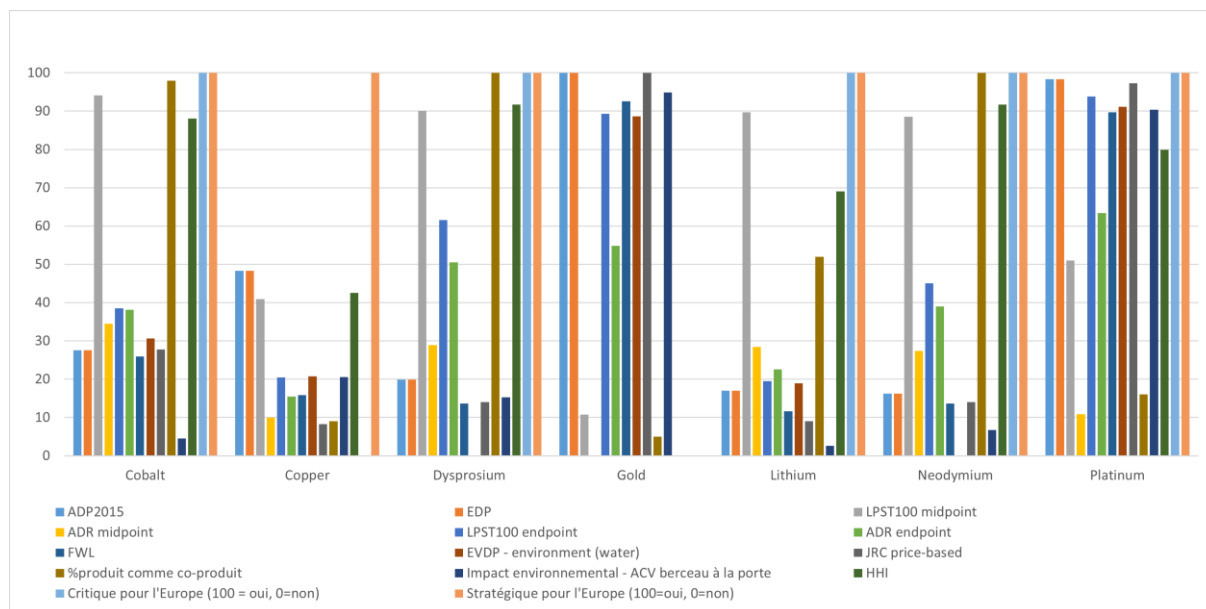


Figure 21 Comparaison des facteurs de caractérisation normalisés pour 9 méthodes d'évaluation des impacts de l'utilisation de ressources, et une sélection d'indicateurs liés à l'évaluation de la criticité. Afin d'améliorer la lisibilité des valeurs, une échelle logarithmique est appliquée à l'ensemble des méthodes d'évaluation des impacts pour l'ACV, hormis LPST100 midpoint. Méthodes: ADP=abiotic depletion potential, EDP= environmental dissipation potential, LPST100 = lost potential service time à l'horizon 100 ans, ADR=average dissipation rate, FWL=future welfare loss, EVDP= economic value dissipation potential, JRC price-based= Joint Research Centre price-based. Indicateurs utilisés dans les approches de criticité : HHI=Herfindahl-Hirschmann index et %produit comme co-produit.

Les FCs d'EDP et d'ADP2015, comme présentés dans la Figure 21, ont les mêmes valeurs, mais ceux de cette première méthode sont appliqués aux flux émis vers l'environnement, alors que ces seconds sont appliqués aux flux d'extraction. Ainsi, la méthode ADP2015 suggère qu'à masse égale, l'extraction de l'or et du platine sont les plus problématiques en termes de déplétion des réserves ultimes, alors que la méthode EDP suggère qu'à masse dissipée égale, la dissipation vers l'environnement de ces mêmes métaux est la plus problématique. On remarque un écart important des FCs pour les métaux qui ne sont pas précieux. Par exemple, pour ces deux dernières méthodes, le FC normalisé du cobalt ($1,8 \times 10^{-5}$) est environ 100 fois plus petit que celui du cuivre ($1,6 \times 10^{-3}$) et cinq millions de fois plus petits que celui de l'or (100), et les FCs du lithium, du dysprosium et du néodymium sont encore plus petits que celui du cobalt.

La méthode ADR midpoint indique que l'or est globalement dissipé le moins rapidement des sept métaux, et même des 61 métaux inclus dans la méthode (FC normalisé = 0), suivi du cuivre (0,019) et du platine (0,022). Les autres métaux ont des taux de dissipation bien plus élevés, résultat en des FCs normalisés d'environ 0,15 pour le néodyme, le lithium et le dysprosium, et de 0,28 pour le cobalt. Lorsque l'on prend en compte la valeur économique des métaux sur dix ans dans la méthode ADR endpoint, la perte potentielle de valeur liée à la dissipation des métaux est la plus importante pour le platine (0,14), l'or (0,030), le dysprosium (0,013), le néodyme (0,0017), le cobalt (0,0015), le lithium ($9,1 \times 10^{-5}$) et le cuivre ($2,4 \times 10^{-5}$).

Pour la méthode FWL, le FC le plus élevé est celui de l'or (45,5), suivi du platine (33,5). Les autres FCs sont plus de 1000 fois moindre que celui de l'or, avec le cobalt à 0,037, suivi du cuivre (0,011), des terres rares (0,0082) et du lithium (0,0061). Plus le FC est élevé, et plus la perte de valeur économique pour les générations futures liées à la consommation actuelle des métaux est importante.

En ce qui concerne la méthode JRC price-based, les FCs de l'or et du platine sont est encore une fois les plus élevés (100 et 79,9, respectivement), suivis du cobalt (0,21), des terres rares (0,051), du lithium (0,026) et du cuivre (0,022). Cela suggère que pour une même masse dissipée, la valeur perdue pour la société est plus importante pour l'or et le platine.

Finalement, deux indicateurs utilisés pour calculer la criticité sont affichés sur la figure : l'indice de Herfindahl-Hirschmann (IHH), et le %produit comme co-produit. Les valeurs normalisées du HHI sont relativement élevées pour les terres rares (91,7), le cobalt (88,0) et le platine (79,9), témoignant d'une forte concentration de la production de ces métaux dans un ou deux pays. Par exemple, les terres rares sont très majoritairement produites en Chine ; le cobalt, au Congo ; et le platine, en Afrique du Sud.

Finalement, les FCs de la méthode EVPD varient selon le compartiment environnemental dans lequel se retrouvent les flux dissipés. Nous avons ici considéré les FCs caractérisant les flux dissipatifs dans l'eau. La méthode EVDP ne propose pour l'instant pas de FCs pour les terres rares. Des cinq autres métaux, le FC normalisé le plus élevé est celui du platine (34,2), suivi de l'or (25,5), du cobalt (0,023), du cuivre (0,0067) et du lithium (0,0052). Cela indique qu'à masse égale, les flux dissipatifs vers l'eau entraînant la plus importante perte de valeur économique en Europe sont ceux du platine et de l'or.

Généralement, on observe que les métaux les plus dissipés sont généralement aussi des co-produits. Cela peut être lié aux faibles concentrations de ces métaux dans les gisements, entraînant des difficultés techniques accrues pour leur co-extraction du minerai, et une rentabilité limitée, incertaine (en cas de variations des prix), voire des pertes qui seraient entraînées par leur production. De ce fait, les co-produits sont parfois uniquement extraits des minerais extraits de très grosses mines, ou alors par les compagnies minières qui ont développé des procédés permettant leur extraction à coût compétitif.

En résumé, des sept métaux, l'or et le platine ressortent généralement comme ayant les FCs normalisés les plus élevés pour les méthodes prenant en compte la concentration dans la croûte terrestre dans le calcul des FCs (ADP2015 et EDP), ou encore le prix des métaux (ADR endpoint et LPST100 endpoint, EVDP, JRC price-based, FWL). Ces deux facteurs sont largement liés : une faible concentration dans la croûte terrestre entraîne généralement l'exploitation de gisements à relativement faible concentration, nécessitant du fait même une grande quantité d'énergie et d'intrants pour leur production, et des coûts élevés associés (Charpentier Poncelet et al., 2022c). En contrepartie, l'or est le mieux conservé des métaux dans l'économie, expliquant ses petits FCs pour les méthodes ADR midpoint et LPST100 midpoint. Généralement, en comparant les FCs des méthodes d'évaluation des impacts avec les indicateurs HHI et %production comme co-produit, on observe que les méthodes d'évaluation d'impact sont de mauvais prédicteur de la criticité des métaux, car il existe une faible corrélation entre un score élevé sur les impacts sur les ressources et son statut comme critique ou stratégique. L'or a un fort impact sur les méthodes de ressources, mais n'est ni critique ni stratégique selon la Commission Européenne. Seul le platine semble avoir un score élevé constant dans toutes les méthodes d'évaluation. La corrélation entre l'IHH et le statut critique d'un matériau est plus forte, mettant en avant l'intérêt pour l'accessibilité à court terme (par exemple facilitée par un approvisionnement diversifié à court terme) des méthodes de criticité.

3.2.2. Formulation des cas d'application

Les résultats de l'état de l'art et la synthèse des liens sont combinés dans la formulation des cas d'utilisation. Ces cas incarnent différents types de questions liées aux matières premières que les décideurs politiques et les acteurs industriels peuvent se poser, dans lesquelles la combinaison des différentes perspectives peut servir. **Parmi ces études de cas potentielles, deux seront sélectionnées dans le cadre du projet.**

1. Evaluation environnementale ACV de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers ».

Cette étude de cas évalue dans quelle mesure les impacts environnementaux associés à une chaîne d'approvisionnement en matières premières (ACV attributionnelle) augmenteront ou diminueront si l'exploitation minière est délocalisée en Europe, comme le prévoit la loi CRM. Une matière première sera sélectionnée pour laquelle des gisements européens sont identifiés (par exemple, le lithium ou les terres rares). Les gisements européens potentiels seront comparés qualitativement et si possible quantitativement aux gisements internationaux prédominants sur la base d'une revue de la littérature (y compris SCORE LCA 2018-01) et d'entretiens avec des experts. Dans ce domaine en particulier, l'expertise du BRGM sera consultée, ainsi que d'éventuels autres experts (e.g. Magnus Ericsson (RMG Consulting) et Alain Rollat (Carester)) . Sur la base de cette comparaison, les données de l'inventaire du cycle de vie de l'extraction et du traitement actuels (telles qu'elles sont disponibles auprès d'ecoinvent ou de la littérature) seront adaptées aux conditions européennes, et une ACV comparative sera réalisée.

Les résultats de cette étude de cas pourraient être utilisés pour formuler des recommandations sur l'utilisation des résultats de l'ACV dans le discours sur les matières premières critiques (par exemple, comment les matières premières pourraient devenir plus ou moins critiques en fonction de leur empreinte environnementale, de l'acceptabilité sociale de l'exploitation, des risques pour la réputation ou de l'approvisionnement responsable).

2. Evaluation environnementale ACV comparative des usages d'un même matériau critique prenant en compte les possibilités ou non de substitution.

Dans cette étude de cas, les impacts environnementaux causés par la perturbation potentielle de l'approvisionnement d'une matière première par l'UE seront évalués par le biais d'une ACV attributionnelle. Hormis les impacts environnementaux, d'autres trade-offs concernant la sécurité de l'approvisionnement peuvent également être évalués.

Cette étude de cas peut évaluer, du point de vue de différentes parties prenantes économiques (par exemple les industries minières, les fabricants et les utilisations finales des produits) au sein d'un système de produits défini, comment chaque partie prenante est affectée par la substitution d'une matière première. La substituabilité est envisagée au niveau des matières premières ou au niveau technologique. Cette étude de cas peut démontrer que la « substituabilité » est un concept relatif, évalué différemment par différents acteurs de la chaîne de valeur, alors que la plupart des études de criticité ne considèrent la « substituabilité » qu'au niveau d'une matière première dans des technologies prédéfinies.

Cette étude de cas peut évaluer, à partir de différents points de vue des parties prenantes économiques (par exemple, les mineurs, les fabricants et les utilisations finales des produits) au sein d'un système de produits défini, comment chaque partie prenante est affectée par la substitution d'une matière première. La substituabilité est considérée au niveau de la matière première, ou au niveau technologique. Cette étude de cas peut démontrer que la « substituabilité » est un concept relatif, évalué différemment par les différents acteurs de la chaîne de valeur, alors que la plupart des études de criticité ne considèrent la « substituabilité » qu'au niveau de la matière première dans des technologies prédéfinies.

3. Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et des impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique

Dans cette étude de cas, l'accent est mis sur l'intégration de l'évaluation de la criticité et de l'analyse du cycle de vie (ACV) pour évaluer à la fois le risque d'approvisionnement et les impacts environnementaux d'un système produit dans le contexte de la transition énergétique. Le système de produit proposé est la production d'un moteur électrique pour un véhicule électrique (ou des batteries), dans le but ultime de réaliser une ACV pour la fabrication du moteur de traction du véhicule électrique. Cette évaluation comprend l'utilisation de l'indicateur midpoint GeoPolRisk pour les ressources naturelles abiotiques. Le système étudié est adapté de l'inventaire évolutif du cycle de vie (ICV) de la machine électrique synchrone à aimants permanents (Nordelöf et al., 2018; Nordelöf and Tillman, 2018).

Les tâches prévues dans cette étude de cas sont les suivantes :

- Réalisation d'une évaluation intégrée de la criticité et d'une ACV du système produit.
- Comparaison des résultats à l'aide de différents indicateurs de criticité, dont la méthode GeoPolRisk, ESSENZ et l'outil IRTC.

Les résultats obtenus montreront comment l'intégration de l'évaluation de la criticité dans l'ACV complète la compréhension du risque d'approvisionnement et des impacts environnementaux. Cette étude de cas vise à fournir des conseils aux praticiens sur la façon d'interpréter efficacement les résultats. Cette étude de cas peut être focalisée sur des points chauds ou peut être un cas comparatif, selon le contexte décisionnel adopté.

4. Mise à jour des résultats de l'ACV du berceau à la porte des matières premières de (Nuss et Eckelman, 2014) vers ecoinvent 3.10

Les données ACV sont utilisées pour estimer le risque d'atteinte à la réputation et le risque réglementaire lié aux matières premières dans les études de criticité. Ces données sont principalement basées sur une étude de Nuss et al. (Nuss et Eckelman, 2014) basé sur une version obsolète d'ecoinvent. Entre-temps, ecoinvent a investi dans la mise à jour des données existantes et dans le complément des données sur les matières premières qui n'étaient pas représentées dans les versions précédentes de la base de données.

5. Identification des corrélations entre les résultats de l'ACV du berceau à la porte, le statut d'une matière première en tant que sous-produit et l'indicateur Indice de Performance Environnementale, afin de sélectionner la méthode la plus représentative pour prédire les dommages potentiels à la réputation et/ou les risques réglementaires

Alors que les données ACV ont été utilisées dans des études de criticité pour évaluer les risques réputationnels et réglementaires, il est connu que les sous-produits ont généralement une faible empreinte environnementale en raison de l'application d'une procédure d'allocation dans les ACV attributionnelles. Les matières premières qui sont aussi des sous-produits étant souvent considérées comme critiques (en raison de la difficulté à adapter leur approvisionnement à l'évolution de la demande), leurs impacts environnementaux basés sur l'ACV peuvent ne pas être représentatifs des risques environnementaux réels. Alternativement, l'indice de performance environnementale (Environmental Performance Index, EPI) peut être utilisé pour estimer si un pays qui fournit des matières premières est susceptible de respecter les normes environnementales. Un tel indicateur peut être plus prédictif des risques environnementaux qui conduisent à des titres tels que « *Clean energy's dirty secret* » (Margonelli, 2009), faisant référence aux dommages environnementaux liés à l'extraction des terres rares (qui sont des sous-produits et ont donc une faible empreinte environnementale basée sur l'ACV).

L'analyse des résultats de l'ACV, les taux de production en tant que sous-produit et de l'EPI permet d'identifier si les résultats de l'ACV sont un bon facteur prédictif des risques environnementaux ou si l'EPI est plus fiable.

6. Application combinée de méthodes d'impact des ressources afin d'identifier un large éventail de parties prenantes touchées par une diminution de l'accès aux ressources

Les méthodes axées sur les ressources en ACV évaluent les dommages potentiels causés par l'utilisation des ressources. Ces dommages sont souvent interprétés comme une diminution du potentiel d'extraction de valeur économique des ressources. Les parties prenantes spécifiques qui subissent ces dommages ne sont pas toujours explicitement abordées. Les méthodes de risque d'approvisionnement (c'est-à-dire les méthodes de criticité) se concentrent sur (une sélection de) parties prenantes impliquées dans le système étudié, et les méthodes « *inside-out* » se concentrent sur les « autres » parties prenantes, qui peuvent varier entre les acteurs dans les différentes étapes de la chaîne de valeur et peuvent être différenciées entre les utilisateurs potentiels à court terme ou à long terme.

Il peut être nécessaire de combiner plusieurs méthodes d'impact sur les ressources pour obtenir une image complète des dommages (économiques) potentiels causés par l'utilisation des ressources dans

un système de produits. Une analyse plus approfondie des perspectives appliquées par chaque méthode peut aider à combiner les méthodes et à cerner les lacunes pour une évaluation potentielle de la durabilité économique.

7. Évaluation des effets de l'augmentation du taux de recyclage à 25 % (conformément au CRMA) pour certaines matières premières critiques à l'aide de différents indicateurs de criticité et d'ACV

L'augmentation du recyclage d'une matière première critique à 25 % pourrait affecter les impacts environnementaux liés à la matière première, ainsi que plusieurs autres aspects, tels que la concentration de l'approvisionnement, la stabilité politique des pays fournisseurs et les augmentations attendues de la demande. Sur la base d'hypothèses simplificatrices et, si possible, de données de la littérature, le potentiel d'atténuation de l'augmentation du taux de recyclage peut être étudié à l'aide de divers indicateurs de ressources.

3.2.3. Disponibilité des données en interne

Les Tableau 18 et Tableau 19 donnent un aperçu des matières premières et des produits auxquels le consortium a accès et qui peuvent être utilisés dans une étude de cas. D'autres études de cas pourraient également être réalisables, mais la collecte de données pourrait être limitée par les données disponibles dans la littérature accessible au public.

Tableau 18 Disponibilité des données sur les matières premières au sein du consortium

Partenaire	Matière première	ICV de l'exploitation minière en Europe	ICV de l'exploitation minière hors Europe	Données sur la production mondiale	Autres aspects	GeoPolRisk	Criticality	Possibilité d'utilisation dans le projet SCORE LCA
BRGM	50+ matières premières	Modèles ICV élaborés à partir de données de la littérature	Modèles ICV élaborés à partir de données de la littérature	Données de marché basées sur diverses sources				Projet en cours. La possibilité d'utiliser les données doit être confirmée auprès des partenaires .
CyVi group	42 matières premières	Modèles ICV élaborés à partir de données de la littérature	Modèles ICV élaborés à partir de données de la littérature			Facteurs de caractérisation pour 40 pays différents		
WeLOOP	51+ matériaux			Données de production globale (masse) de 61 métaux, non spécifiée par pays	Efficacité des principaux procédés de 61 métaux (production, transformation, recyclage) et demandes par secteurs d'activité, représentative de		Scores relatifs des indicateurs de criticité présents dans l'outil IRTC	

					l'année 2020 environ			
--	--	--	--	--	-------------------------	--	--	--

Tableau 19 Disponibilité des données technologiques au sein du consortium

Partenaire	Produit / technologie	Disponibilité des données	Possibilité d'utilisation dans le projet SCORE LCA
CyVi group	La fabrication du moteur de traction du véhicule électrique	L'analyse ne couvre que l'étape de fabrication du moteur de VE, sur la base des données ICV publiées existantes.	publication scientifique – Open Access
WeLOOP	Batterie (pour une équivalence fonctionnelle entre NMC et LFP)	Du berceau à la porte	Accessible via ecoinvent
		Possibilité d'inclure l'EoL si nécessaire, sans la phase d'utilisation.	Utilisation confidentielle
BRGM	Systèmes de production d'énergie renouvelable (parcs éoliens, systèmes H2)	Nomenclature, modèles MFA, potentiellement ICV	À discuter avec les partenaires

4. Evaluation des études de cas

Au cours de la réunion intermédiaire, **deux études de cas** ont été sélectionnées parmi les 7 de la section 3.2.2 afin de réaliser une évaluation conjointe/combinée de la criticité et des impacts environnementaux :

- 1) Evaluation environnementale de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers » - Cas de l'hydroxyde de lithium
- 2) Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et les impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique – Cas des batteries lithium-ion de véhicules électriques NMC811 et LFP

Une analyse de sensibilité est également réalisée afin d'évaluer des effets de l'augmentation du taux de recyclage à 25 % (conformément au CRMA) pour certaines matières premières critiques et des taux d'utilisation de cobalt et lithium recyclés dans les batteries lithium-ion.

Les études de cas sont développées à l'aide des dernières versions de SimaPro et ecoinvent. Les études de cas seront analysées en fonction des perspectives adoptées et de leur lien avec la criticité et/ou la communauté de l'ACV, des utilisations potentielles de ces perspectives (par exemple, par les entreprises et/ou les décideurs), de l'applicabilité de ces analyses (par exemple, en ce qui concerne les besoins en données et la maturité des modèles) et des actions potentielles qui peuvent être éclairées par les résultats des études de cas. Des recommandations seront formulées sur la base de l'analyse de l'état de l'art, de la synthèse méthodologique et des études de cas.

4.1. Evaluation environnementale de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers » - Cas de l'hydroxyde de lithium

4.1.1. Analyse Environnementale : ACV cradle-to-gate

La dépendance européenne aux importations de matières premières (MP) constitue un des principaux facteurs contribuant à la criticité de ces MP. Ainsi, une possible option pour limiter cette criticité passe par une relocalisation de la production des MP en Europe plutôt que dans le reste du monde. C'est l'une des ambitions de la Commission Européenne comme formulé dans le Critical Raw Materials Act (voir Section 2.1.2). Bien qu'une production « locale » permettrait d'améliorer la souveraineté européenne et de réduire la dépendance aux importations, la question des impacts environnementaux d'une production européenne peut se poser. Dans quelle mesure une production européenne de MP peut se montrer avantageuse par rapport à d'autres filières mondiales du point de vue environnemental ?

Pour apporter des éléments de réponse à cette problématique, cette étude de cas se focalisera sur le cas du Lithium (Li), listé comme étant une MP critique dans la dernière liste établie par la Commission Européenne (CE) (cf. Tableau 4). La criticité du Li peut aujourd'hui s'expliquer par une importance cruciale dans certains usages tels que les batteries Li-ion, dont le développement est clé pour la mobilité électrique, ainsi qu'une dépendance de l'Europe aux importations, la production de Li étant essentiellement dominée par :

- Le Chili, qui exploite le Li au sein de « salars ». La principale production chilienne de Li provient aujourd'hui du Salar de Atacama.
- L'Australie, qui exploite le Li au sein de mines de spodumène. La principale mine de spodumène actuellement en exploitation est la mine de Greenbushes qui produit un concentré ensuite essentiellement raffiné en Chine.
- La Chine, qui raffine la très grande majorité du spodumène australien (venant de Greenbushes ainsi que d'autres mines).

Face à cette dépendance à l'Amérique du Sud, l'Australie et la Chine, de nombreux projets de production de Li sont en développement en Europe, notamment en France (Imerys, Lithium de France, Eramet, etc.), en Finlande (Keliber), en Espagne (San José), en Angleterre, Serbie, etc. Le projet finlandais de Keliber est aujourd'hui le premier projet européen qui devrait entrer en opération (possiblement en 2025-2026), prévoyant d'exploiter une mine de spodumène pour en produire de l'hydroxyde de lithium ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) de grade batterie.

Cette étude de cas se focalisera donc sur le cas de Keliber, avec pour objectif de comparer l'empreinte environnementale de cette future production finlandaise aux grandes routes de production aujourd'hui en opération. Ainsi, trois routes de production sont ici considérées :

- L'extraction de minerai de spodumène et raffinage en hydroxyde à Keliber en Finlande ;
- L'extraction de minerai de spodumène à Greenbushes en Australie et raffinage en hydroxyde à Shehong en Chine ;
- Production d'hydroxyde à partir de saumures de Li à Salar de Atacama au Chili.

L'unité fonctionnelle est ici définie comme étant « la production d'1 kg d'hydroxyde de lithium ($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) de grade batterie ». Les frontières du système, montrées dans la Figure 22, sont établies selon les recommandations de l'International Lithium Association et couvrent les phases d'extraction/concentration (spodumène et saumure), transport de la mine à la raffinerie (notamment dans le cas australien/chinois), et le raffinage en hydroxyde grade batterie.

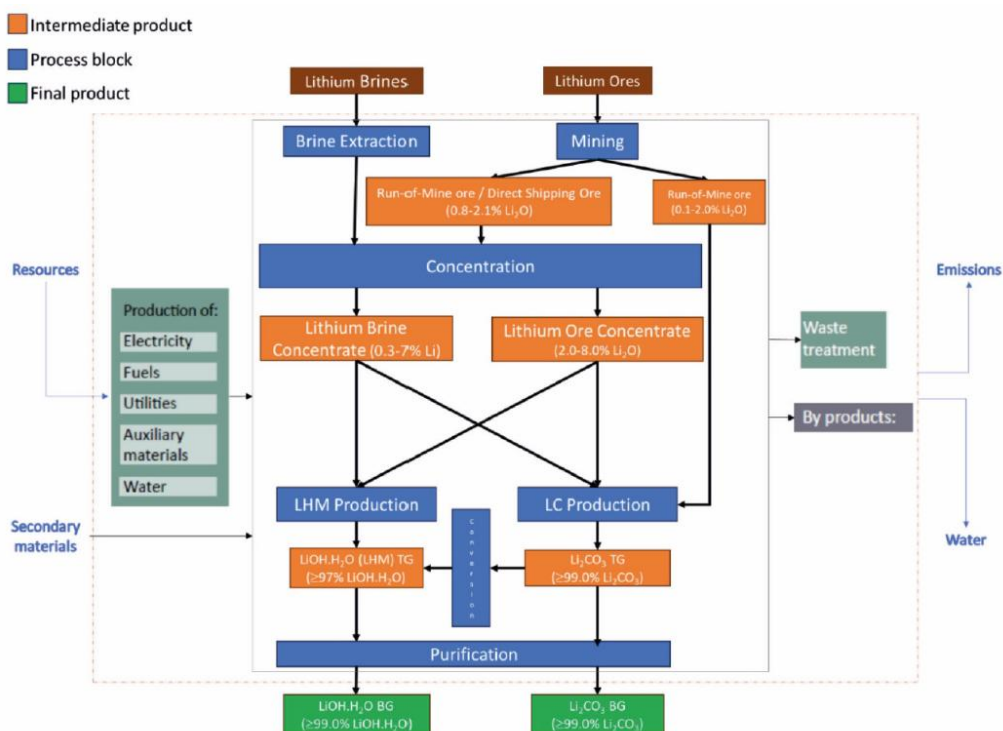


Figure 22 Frontières du système considérées pour le cas d'étude Li, avec focus sur la production de $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ grade batterie – Tiré de International Lithium Association (2024)

Les données ICV d'avant-plan pour les routes de production australienne/chinoise et chilienne sont tirées de la littérature scientifique, compilées et harmonisées sur la base de plusieurs sources (travaux menés par le BRGM ; (Lai et al., 2024b, 2024a)). Les données ICV pour la route de production finlandaise ont quant à elles été compilées sur la base de deux publications scientifiques fournissant des données ICV sur le cas de Keliber (Chordia et al., 2022; Lappalainen et al., 2024).

Les données d'arrière-plan s'appuient quant à elles sur ecoinvent v3.10, dans sa version APOS.

L'évaluation des impacts a été réalisée via le logiciel SimaPro, en utilisant la méthode EF v3.1 recommandée par la Commission Européenne dans le cadre du Product Environmental Footprint (PEF), incluant 16 catégories d'impacts.

Les impacts environnementaux calculés pour chacune des trois routes de production sont présentés dans le Tableau 20 et comparés dans la Figure 23.

Tableau 20 Impacts environnementaux de la production d'1 kg de LiOH.H₂O grade batterie pour les trois routes de production considérées, selon les 16 catégories d'impacts de la méthode EF3.1

Catégories d'impact	Unités	Greenbushes (Australie) + Shehong (Chine)	Atacama (Chili)	Keliber (Finlande)
Acidification	mol H+ eq	1.7E-01	4.9E-02	3.6E-02
Climate change	kg CO ₂ eq	2.7E+01	8.3E+00	1.0E+01
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	7.7E+01	6.9E+01	6.4E+01
Particulate matter	disease inc.	3.4E-06	6.3E-07	5.3E-07
Eutrophication, marine	kg N eq	2.9E-02	1.3E-02	1.6E-02
Eutrophication, freshwater	kg P eq	2.2E-02	2.5E-03	1.3E-03
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	2.9E-01	1.5E-01	1.2E-01
Human toxicity, cancer	CTUh	3.6E-08	1.4E-08	4.7E-08
Human toxicity, non-cancer	CTUh	2.3E-07	3.8E-08	7.2E-08
Ionising radiation	kBq U-235 eq	3.8E-01	7.0E-02	1.5E+00
Land use	Pt	5.5E+01	1.6E+01	8.4E+01
Ozone depletion	kg CFC11 eq	3.3E-07	9.4E-08	2.0E-07
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	8.3E-02	4.2E-02	4.1E-02
Resource use, fossils	MJ	2.8E+02	9.5E+01	1.3E+02
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1.2E-04	3.0E-05	2.2E-04
Water use	m ³ depriv.	4.3E+00	9.3E+00	2.5E+00

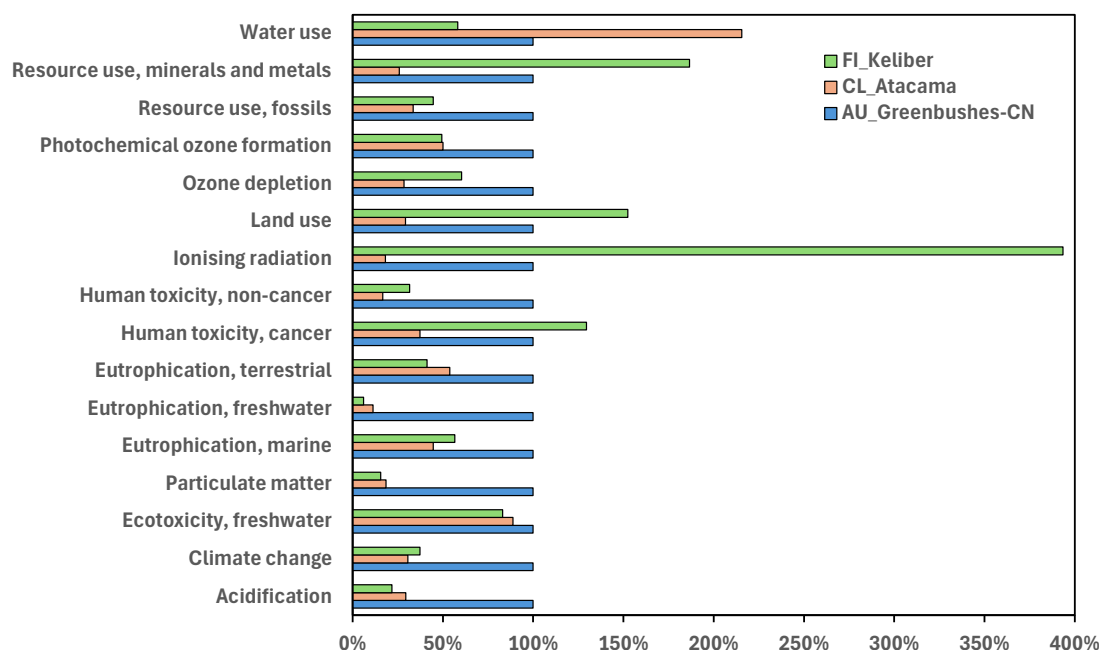


Figure 23 Comparaison des impacts environnementaux des trois routes de production étudiées, selon les 16 catégories d'impacts de la méthode EF3.1. Les impacts sont normalisés aux impacts de la route de Greenbushes.

Globalement, la production d'un kilogramme de $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ en Australie/Chine présente des impacts environnementaux plus importants que via les autres routes, dans la mesure où elle domine les impacts pour 11 des 16 catégories d'impacts ici considérées, avec presque deux fois plus d'impacts que les routes chilienne et finlandaise pour quasiment l'ensemble de ces 11 catégories d'impacts (à l'exception de la catégorie « Ecotoxicity, freshwater » où les écarts sont plus resserrés).

La route chilienne domine quant à elle les impacts relatifs à la catégorie « Water use », avec un impact deux fois plus important que le cas de Greenbushes et presque quatre fois plus important que le cas de Keliber.

Enfin, la route finlandaise présente les impacts les plus élevés pour 4 des 16 catégories d'impacts étudiées : « Human toxicity, cancer effects », « Ionising radiation », « Land use », « Resource use, minerals and metals ».

Après normalisation et pondération des impacts (selon méthodologie recommandée par le PEF), on obtient la Figure 24 comparant les impacts des 3 routes en score unique et le Tableau 21 présentant les 5 plus grandes catégories d'impacts pour les trois routes de production. On remarque que la Chine a bien plus d'impacts que les routes finlandaise et chilienne. Également, malgré le fait que la route finlandaise ait plus d'impacts que la route chilienne, cette route présente des avantages non négligeables pour une production européenne. Les catégories d'impacts les plus impactantes pour toutes les routes sont le changement climatique, les particules, l'eutrophication marine et l'utilisation des ressources fossiles.

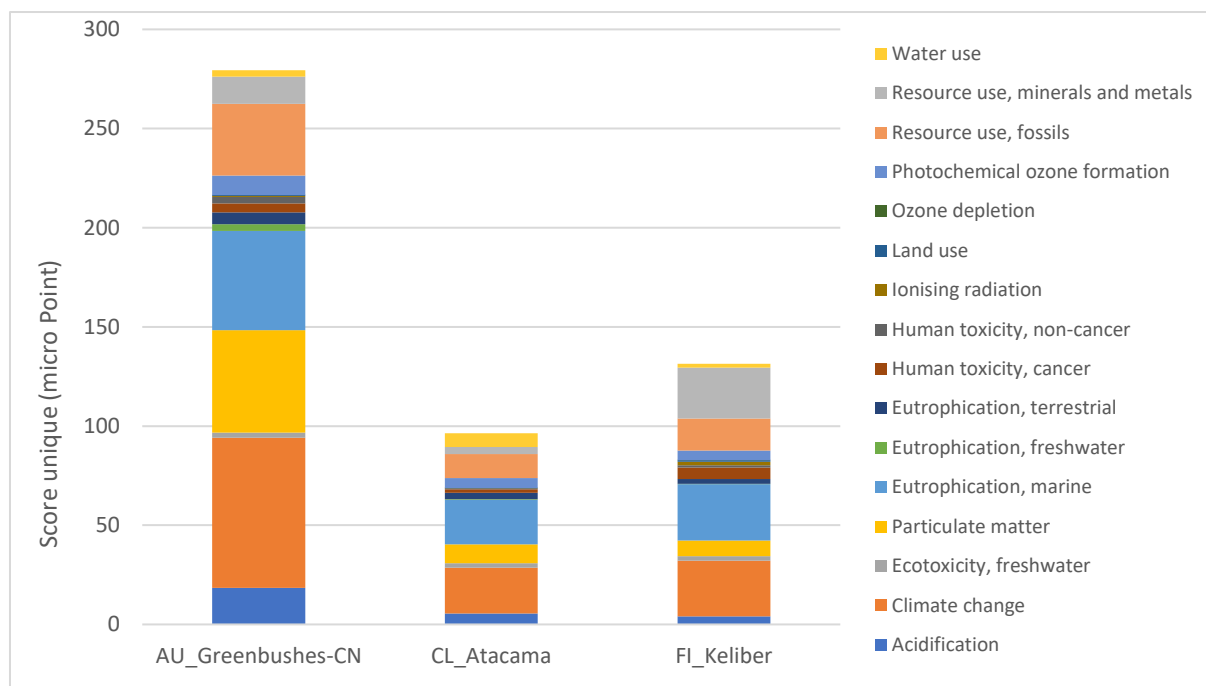


Figure 24 Comparaison des impacts des 3 routes de production en score unique

Tableau 21 Comparaison des 5 catégories d'impacts les plus impactantes (représentant 80% des impacts) pour les 3 routes, celles en vert sont communes à toutes les routes de production

AU_Greenbushes-CN		CL_Atacama		FI_Keliber	
Total	100,00%	Total	100,00%	Total	100,00%
Climate change	27,09%	Climate change	24,02%	Eutrophication, marine	21,56%
Particulate matter	18,47%	Eutrophication, marine	23,18%	Climate change	21,46%
Eutrophication, marine	17,90%	Resource use, fossils	12,59%	Resource use, minerals and metals	19,57%
Resource use, fossils	12,93%	Particulate matter	9,89%	Resource use, fossils	12,27%
Acidification	6,62%	Water use	7,18%	Particulate matter	6,08%

Le Tableau 22 présente une interprétation des principaux contributeurs aux impacts pour les principales catégories.

Tableau 22 Interprétation des points chauds environnementaux selon les routes de production et étapes les plus impactantes pour les principales catégories d'impacts PEF identifiées

Catégorie d'impacts	Route de production dominante	Etape(s) du procédé contribuant le plus aux impacts (% des impacts)	Principaux flux contribuant aux impacts
Climate change	Greenbushes (Australie) + Chine	Raffinage (55.4%)	- Chaleur - Electricité (mix chinois) - Hydroxyde de sodium
		Extraction (42.8%)	- Electricité (mix australien)
Resource use, fossils	Greenbushes (Australie) + Chine	Raffinage (53.5%)	- Chaleur - Electricité (mix chinois) - Hydroxyde de sodium

		Extraction (44.4%)	- Electricité (mix australien)
Water use	Atacama (Chili)	Extraction (83.5%)	- Consommation d'eau directe
		Raffinage (16.5%)	- Carbonate de sodium
Land use	Keliber (Finlande)	Extraction (57.7%)	- Chaleur - Gestion des déchets miniers (tailings) - Acides gras - Electricité (mix finlandais)
		Raffinage (42.3%)	- Gestion des déchets - Carbonate de sodium - Electricité (mix finlandais)
Human toxicity, non-cancer effects	Greenbushes (Australie) + Chine	Raffinage (62.9%)	- Acide sulfurique - Chaleur - Hydroxyde de sodium - Electricité (mix chinois)
		Extraction (36.4%)	- Electricité (mix australien)
Particulate matter	Greenbushes (Australie) + Chine	Extraction (64.9%)	- Emissions directes à l'air (PM10 et PM2.5)
		Raffinage (34.7%)	- Chaleur - Electricité (mix chinois)
Eutrophication, freshwater	Greenbushes (Australie) + Chine	Extraction (84.6%)	- Electricité (mix australien)
		Raffinage (15.3%)	- Chaleur - Electricité (mix chinois)
Ionising radiation	Keliber (Finlande)	Raffinage (52.8%)	- Electricité (mix finlandais)
		Extraction (47.2%)	- Electricité (mix finlandais)
Resource use, minerals and metals	Keliber (Finlande)	Extraction (86%)	- Explosifs - Electricité (mix finlandais)
		Raffinage (14%)	- Carbonate de sodium
Human toxicity, cancer	Keliber (Finlande)	Raffinage (74%)	- Carbonate de sodium
		Extraction (26%)	- Electricité (mix finlandais) - Explosifs - Diesel (machinerie)

Dans le cas de Greenbushes (Australie, avec raffinage en Chine), l'ampleur des impacts s'explique principalement par les consommations de chaleur lors du raffinage, électricité lors de l'extraction et raffinage, acide sulfurique et hydroxyde de sodium lors du raffinage. Pour la catégorie d'impacts « Particulate matter », l'ampleur des impacts de Greenbushes s'explique essentiellement par les émissions directes de PM10 et PM2.5 lors de la phase d'extraction.

Dans le cas d'Atacama (Chili), dont les impacts relatifs à la catégorie « Water use » dominent les autres routes de production, la consommation d'eau directe de l'exploitation de la saumure associée à un facteur de stress hydrique élevé au Chili constitue la principale cause de ces impacts. Dans une moindre mesure, la consommation de carbonate de sodium en tant que réactif lors de la phase de raffinage représente également une certaine contribution aux impacts relatifs à « Water use » (consommation d'eau indirecte dans le cycle de vie du carbonate de sodium).

Enfin, dans le cas de Keliber (Finlande), l'ampleur des impacts relatifs aux catégories « Land use », « Ionising radiation », « Resource use, minerals and metals » et « Human toxicity, cancer » par rapport aux routes australienne et chilienne s'explique avant tout par des impacts indirects relatifs à la consommation d'électricité (mix finlandais principalement basé sur de l'hydro-électrique, nucléaire, éolien), de carbonate de sodium lors du raffinage et d'explosifs lors de l'extraction. Il convient de noter que concernant la catégorie « Land use », l'occupation/transformation du sol associée à la gestion des déchets miniers (tailings) et métallurgiques représente également une part importante de ces impacts. Concernant la catégorie « Resource use, minerals and metals », l'extraction du Li en soi ne représente qu'une contribution mineure à ces impacts dans la mesure où le facteur de caractérisation du Li dans la méthode ADP est relativement faible en comparaison d'autres éléments métalliques et minérales comme présenté dans le Tableau 23 de la partie 4.2.2. Les principaux contributeurs à cette catégorie sont à trouver dans l'arrière-plan des sets de données relatifs aux explosifs et à l'électricité (mix finlandais), où des quantités relativement importantes de métaux peuvent être retrouvées.

Globalement, le cas finlandais permet de montrer **qu'une production européenne de Li présente un potentiel certain en termes de réduction d'impacts environnementaux en comparaison des principales filières aujourd'hui en opération au niveau mondial** (Australie/Chine), ceci pour une majorité de catégories d'impacts (en particulier l'empreinte carbone et l'empreinte eau).

4.1.2. Analyse de criticité

Pour la criticité, une analyse réalisée avec la méthode IRTC sur le lithium sur la relocalisation de la production d'hydroxyde de lithium en Finlande est donnée dans la partie 5.1.1 avec la synthèse des études de cas car elle utilise des éléments de l'étude IRTC des batteries lithium-ion de la partie 4.2.3.

Cette étude de cas met en évidence trois types d'extraction ayant des impacts environnementaux variés. Elle souligne ainsi que **l'utilisation d'indicateurs environnementaux par défaut dans les études de criticité**, sans analyse environnementale approfondie, peut conduire à des décisions inadaptées. La méthode **ESSENZ** recommande l'utilisation de cinq indicateurs pour l'évaluation environnementale « climate change », « acidification », « eutrophisation », « particulate matter » et « water scarcity ». Or, certains points chauds identifiés dans cette étude, comme le « resource use, fossils » ou « ressource use, minerals and metals » ne sont pas réellement pris en compte parmi ces cinq indicateurs. Cela démontre que les enjeux environnementaux dans les études de criticité ne sont pas toujours suffisamment approfondis.

4.2. Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et les impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique

Dans cette étude de cas, l'accent est mis sur l'intégration de l'évaluation de la criticité et de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour évaluer à la fois le risque d'approvisionnement et les impacts environnementaux d'un système produit dans le contexte de la transition énergétique. Le système de produit proposé est la production d'une batterie pour un véhicule électrique en comparant deux technologies, NMC811 et LFP. Cette évaluation comprend également une évaluation de la criticité en suivant le cadre IRTC, l'utilisation de l'indicateur midpoint GeoPolRisk pour les ressources naturelles abiotiques et une évaluation avec la méthode ESSENZ+.

4.2.1. Description des batteries étudiées

Les batteries jouent un rôle essentiel dans la transition vers une société sans énergie fossile, en tant que sources d'énergie pour les Véhicules Electriques (VE) et en tant que technologies de stockage pour les énergies renouvelables intermittentes. Actuellement, les batteries lithium-ion (LIB) dominent le marché des batteries rechargeables, car elles couvrent un large éventail d'applications et présentent des performances exceptionnelles, avec une densité d'énergie et de puissance élevée et une faible autodécharge (Kim et al., 2019). Comme toute autre cellule de batterie, les cellules Li-ion sont

composées de quatre éléments principaux : la cathode, l'anode, l'électrolyte et le séparateur. Parmi les matériaux utilisés pour fabriquer ces éléments, on trouve des matériaux considérés comme critiques et/ou stratégiques par la Commission Européenne en raison de la qualité requise, comme l'a montré le Tableau 4. Les prévisions de marché indiquent que d'ici 2030, les batteries les plus pertinentes seront celles avec des cathodes NMC (nickel-manganèse-cobalt) et LFP (phosphate de fer-lithium) et des anodes en graphite (International Energy Agency, 2022). Pour l'étude de cas, nous avons choisi de comparer les batteries NMC811 et LFP car elles sont toutes deux très utilisées dans les VE, elles utilisent des matériaux critiques et/ou stratégiques et les inventaires sont disponibles et complets sur ecoinvent 3.10.

Batteries Lithium Fer Phosphate (LFP)

Les batteries LFP se distinguent par leur grande stabilité thermique, leur longévité, leur sécurité accrue et leur tolérance élevée aux conditions de pleine charge. Comparées aux autres systèmes lithium-ion, elles sont moins sollicitées lorsqu'elles sont maintenues à haute tension pendant une longue période, ce qui garantit une meilleure stabilité structurelle et des performances de cyclage supérieures. Toutefois, leur densité énergétique reste inférieure à celle des batteries à base de cobalt, et leur autodécharge est plus élevée, ce qui peut poser des problèmes d'équilibrage lors du vieillissement. Bien que la technologie LFP soit couramment utilisée dans les véhicules électriques, elle est particulièrement adaptée aux applications lourdes, comme les bus et les camions, plutôt qu'à l'électronique portable ou aux voitures électriques, car l'énergie volumétrique spécifique y est un facteur plus important. En plus des applications automobiles, le LFP présente un fort potentiel dans les systèmes d'alimentation électrique, grâce à son faible coût et à sa longévité (Ding et al., 2019).

Batteries Nickel/Cobalt/Manganese 8/1/1 (NMC811)

Dans l'industrie des batteries automobiles, l'une des chimies Li-ion les plus performantes est la combinaison de l'oxyde de nickel, de manganèse et de cobalt (NMC) pour la cathode de formule chimique $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$. Les batteries NMC offrent une capacité spécifique égale ou supérieure à celle des autres technologies à base de cobalt, avec une tension de fonctionnement similaire, tout en étant moins coûteuses grâce à la réduction de la teneur en cobalt. Le nickel, qui est reconnu pour sa haute densité énergétique, présente cependant une stabilité limitée, tandis que le manganèse forme une structure spinelle qui permet de réduire la résistance interne, mais offre une faible énergie spécifique. La technologie des batteries NMC est particulièrement adaptée aux véhicules électriques, car elle présente un faible taux d'auto-échauffement. De plus, les trois composants actifs – nickel, manganèse et cobalt – peuvent être mélangés de manière flexible pour répondre à divers besoins dans les secteurs de l'automobile et des systèmes de stockage d'énergie (EES), notamment pour les applications nécessitant des cycles fréquents (Ding et al., 2019). Un avantage de la chimie NMC811 ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$) est qu'elle a une énergie spécifique plus élevée et un coût plus faible que les autres chimies NMC, car elle est riche en nickel et pauvre en cobalt (INL, 2023).

Les étapes de fabrication de ces deux types de batteries sont montrées dans les diagrammes de flux de matières suivants (Figure 25 et Figure 26). Ces figures sont basées sur les la base de données ecoinvent 3.10 « Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW}| battery production, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | Cut-off, U » et la batterie LFP « Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW}| battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic | Cut-off, U »

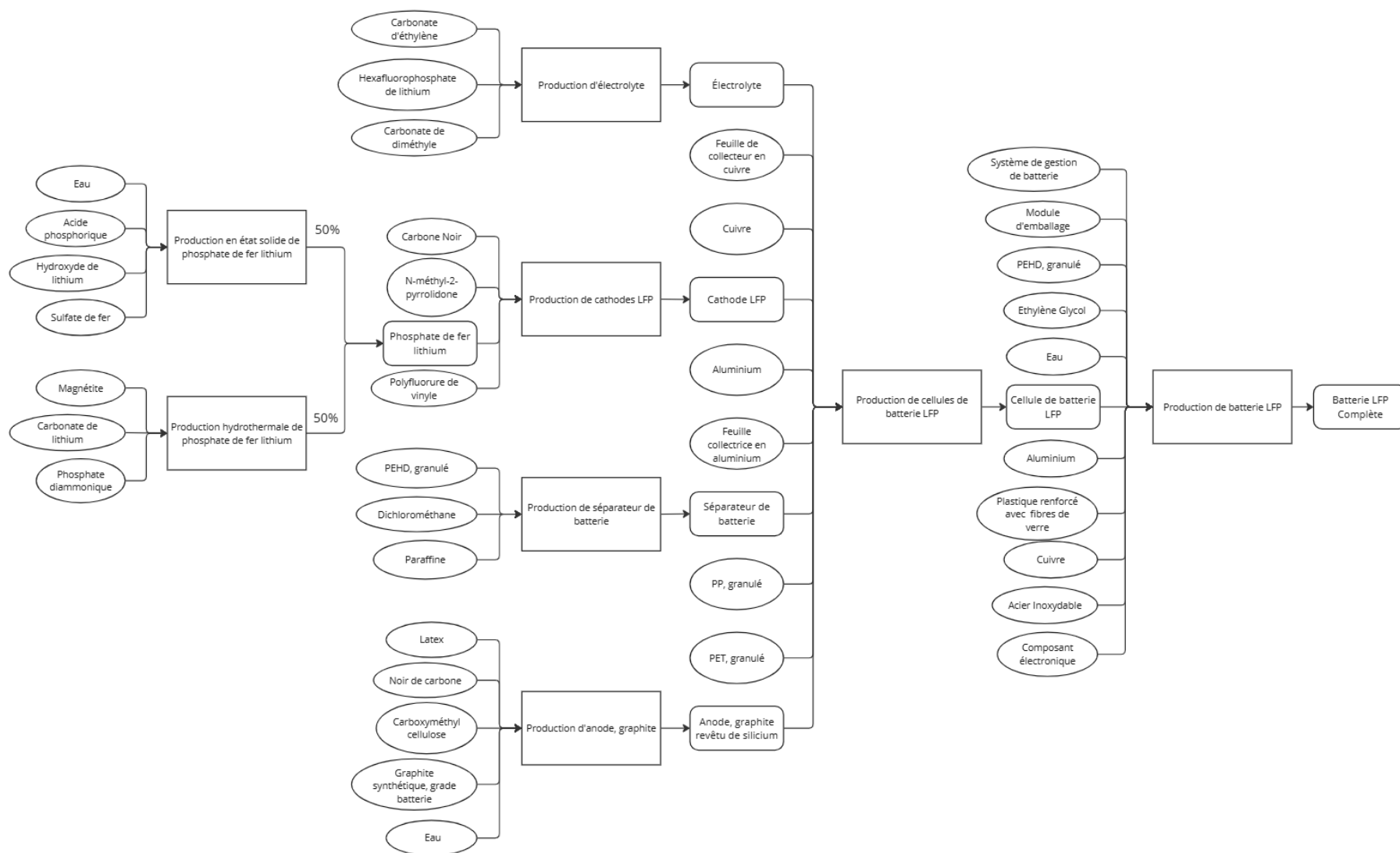


Figure 25 Diagramme de flux des composants et matières premières utilisés dans la production d'une batterie LFP

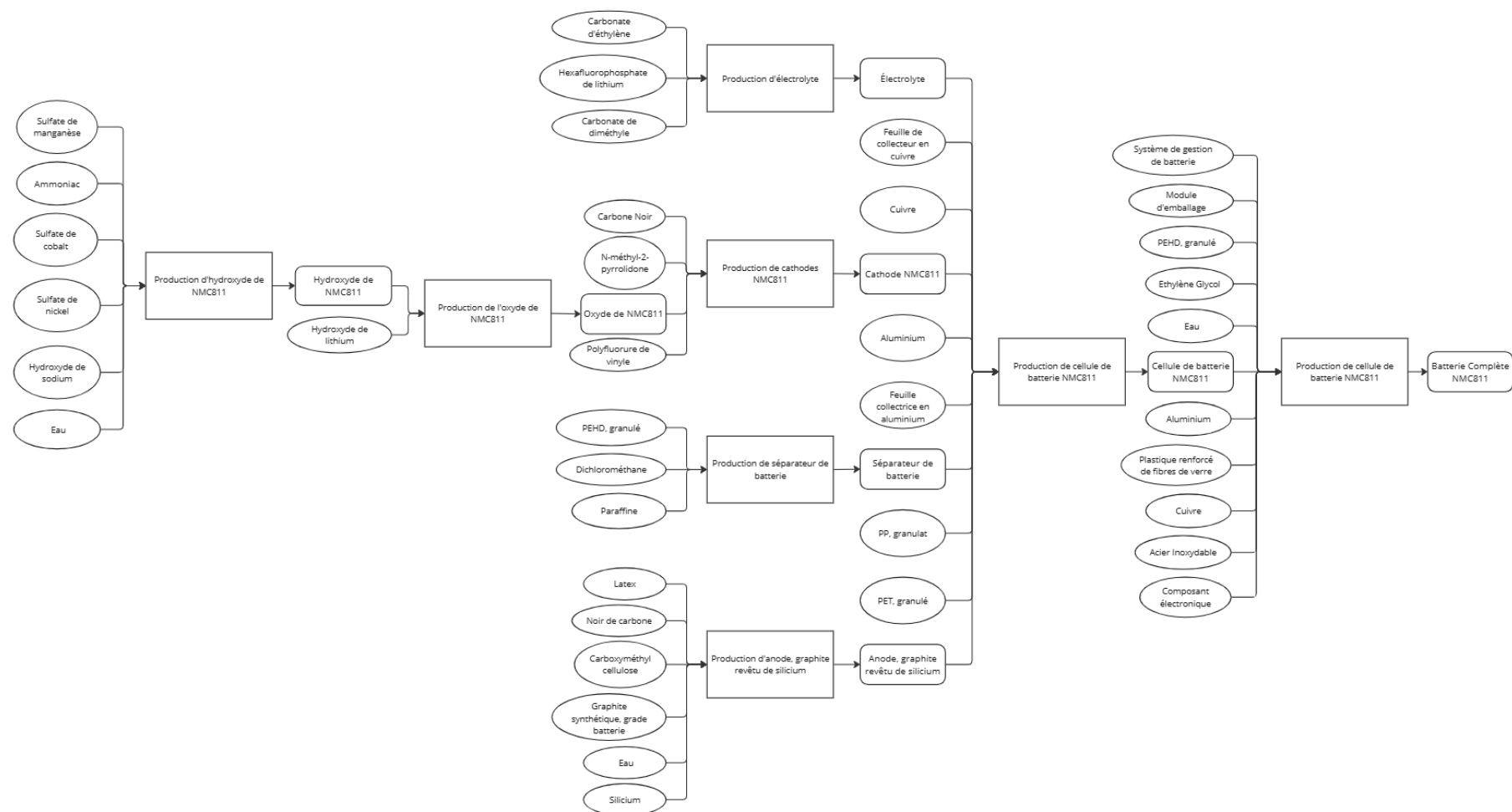


Figure 26 Diagramme de flux des composants et matières premières utilisés dans la production d'une batterie NMC811

4.2.2. Evaluation Environnementale

Application de la méthode PEF

La méthode Product Environmental Footprint (PEF) suit les principes de l'analyse de cycle de vie (ACV) décrits par les normes ISO 14040/14044, avec des adaptations spécifiques pour répondre aux priorités européennes. Son objectif est de fournir une méthode standardisée et scientifiquement robuste pour évaluer les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un produit. La modélisation a été réalisée en suivant la méthode EF 3.1, la méthode d'analyse d'impacts de cycle de vie recommandée par la méthode PEF, intégrant les dernières avancées scientifiques et données, notamment dans l'évaluation des impacts environnementaux et des flux élémentaires. Les données cut-off ont été utilisées et les analyses ont été menées en cradle-to-gate.

Parmi les 16 indicateurs de la méthodes EF3.1, nous allons nous focaliser sur l'indicateur « **resource use, minerals and metals** » (utilisation des ressources en minéraux et métaux) pour les analyses. Cet indicateur, calculé avec la méthode ADP_{ultimate reserves} (voir Tableau 11) représente la contribution d'une ressource spécifique (minéral ou métal) à l'épuisement des ressources abiotiques et permettra donc un lien avec les résultats des évaluations réalisées avec les indicateurs de criticité qui suivront. Il quantifie l'impact environnemental relatif de l'extraction d'une ressource donnée sur l'ensemble des ressources abiotiques disponibles par le facteur de caractérisation. Ce facteur est exprimé en kg d'équivalent antimoine (Sb-eq) et permet de comparer l'épuisement potentiel des ressources entre différentes substances.

Les facteurs de caractérisation de cet indicateur sont calculés avec le rapport entre le **taux d'extraction** annuel de la ressource, quantifiant l'utilisation actuelle de la ressource, et sa **réserve ultime**, donc la quantité totale estimée de la ressource disponible dans la croûte terrestre, y compris les réserves exploitables et non exploitables. La normalisation se fait par le rapport de la ressource par celui de l'antimoine. **Un facteur de caractérisation élevé peut donc être causé par la rareté de la ressource (réserve ultime faible) ou par un taux d'extraction élevé, entraînant une déplétion de la ressource (Oers et al., 2002).** Le Tableau 23 donne les facteurs de caractérisation des ressources avec la méthode EF 3.1.

Tableau 23 Facteurs de caractérisation des ressources de l'indicateur "resource use, minerals and metals" (ADP_{ultimate reserves}) de la méthode EF 3.1

Element	characterisation factor (kg Sb eq/kg)	Element	characterisation factor (kg Sb eq/kg)
gold	52	sulfur	1,93E-04
tellurium	40,7	nickel	6,53E-05
platinum	2,22	tantalum	4,06E-05
silver	1,18	chlorine	2,71E-05
antimony	1	thallium	2,43E-05
rhenium	0,603	niobium	1,93E-05
palladium	0,571	cobalt	1,57E-05
selenium	0,194	beryllium	1,26E-05
cadmium	0,157	lithium	1,15E-05
mercury	0,0922	barium	6,04E-06
bismuth	0,0411	phosphorus	5,52E-06
iodine	0,025	zirconium	5,44E-06
molybdenum	0,0178	manganese	2,54E-06
tin	0,0162	vanadium	7,70E-07
indium	6,89E-03	strontium	7,07E-07
lead	6,34E-03	germanium	6,52E-07

tungsten	4,52E-03		yttrium	5,69E-07
bromine	4,39E-03		gallium	1,46E-07
boron	4,27E-03		sodium	5,50E-08
arsenic	2,97E-03		iron	5,24E-08
copper	1,37E-03		titanium	2,79E-08
zinc	5,38E-04		potassium	1,60E-08
chromium	4,43E-04		magnesium	2,02E-09
sulfur	1,93E-04		aluminium	1,09E-09
nickel	6,53E-05		silicon	1,40E-11

Comparaison des deux batteries

Afin de comparer les impacts des deux batteries, il faut qu'elles soient équivalentes. Les voitures électriques ont une capacité énergétique moyenne de 65kWh par batterie (Sevdari et al., 2024) qui est prise comme unité fonctionnelle. Les cellules LFP et NMC811 ont une capacité énergétique de 0.159kWh/kg de cellule et 0.208kWh/kg de cellule respectivement d'après la documentation de SimaPro pour une masse de cellules de 0.727kg/kg de batterie LFP et de 0.713kg/kg de batterie NMC811. Il faut donc une masse de 562.3kg de batterie LFP et 435.8kg de batterie NMC811 pour avoir la capacité énergétique voulue pour les batteries étudiées.

Ces analyses ont été réalisées du berceau à la porte (cradle-to-gate) avec le logiciel SimaPro version 10.0.1.2 avec la méthode d'analyse EF 3.1. Les données viennent de la base de données ecoinvent 3.10.

La donnée de batterie NMC811 utilisée est « 435.8 kg Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW} | battery production, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | Cut-off, U » et celle de la batterie LFP est « 562.3kg kg Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW} | battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic | Cut-off, U »

La Figure 27 montre les résultats d'étude d'impacts en score unique, permettant une comparaison de l'importance des catégories d'impact pour les deux batteries.

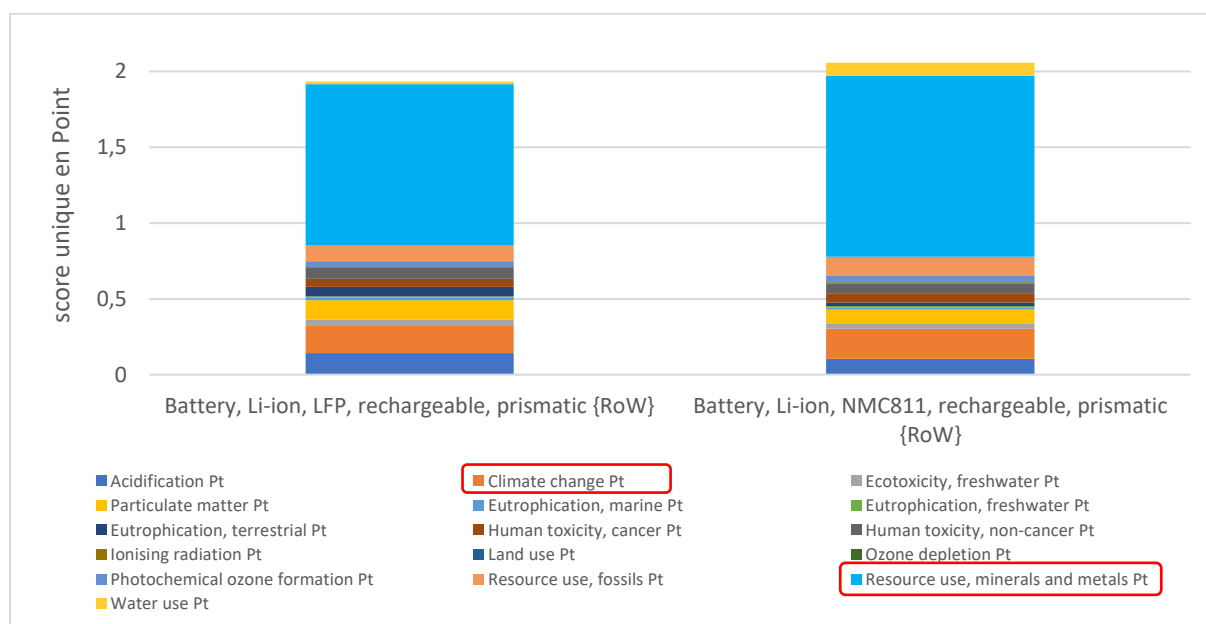


Figure 27 comparaison en score unique des deux batteries étudiées

On peut voir que la batterie NMC811 a plus d'impacts globalement que la batterie LFP. Par la Figure 28, on voit qu'elle a également plus d'impacts dans 10 sur 16 catégories d'impacts. On peut également tirer de la Figure 27 que les catégories d'impacts majoritaires pour les deux batteries sont les catégories « **resource use, minerals and fossils** » (aussi appelé ADP_{ultimate reserves}) et « **climate change** », les autres catégories représentant ensemble environ 30% des impacts.

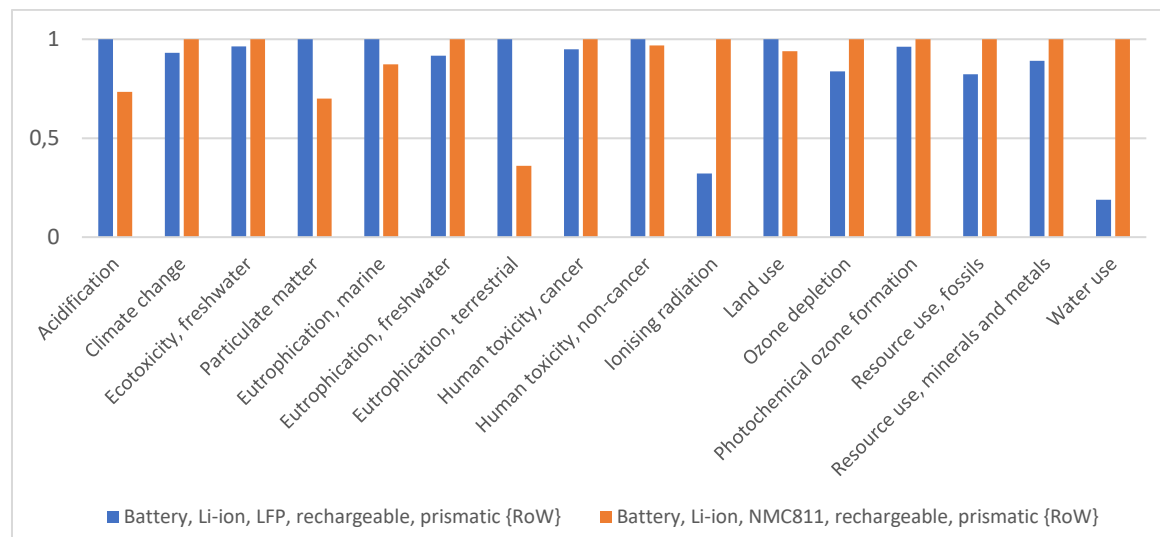


Figure 28 Comparaison des impacts pour batteries LFP et NMC811

Le Tableau 24 et le Tableau 25 montrent les processus les plus impactant pour les deux types de batteries en score unique (impacts globaux) et pour les deux indicateurs majoritaires. Ceux en bleu sont en commun entre le score unique et changement climatique et ceux en orange en commun entre score unique et utilisation des ressources en minéraux et métaux. On voit dans les deux figures qu'il y a plus de procédés en communs entre score unique et utilisation des ressources en minéraux et métaux qu'avec changement climatique, l'indicateur « resource use, minerals and metals » sera donc l'indicateur sur lequel seront focalisées les analyses suivantes comme énoncé précédemment. Le fait qu'un indicateur d'utilisation des ressources, en particulier en minéraux et métaux, soit la catégorie d'impact majoritaire rend l'exemple des batteries lithium-ion pertinent pour une comparaison avec la criticité selon l'état de l'art.

Tableau 24 Processus les plus impactant pour le score unique, l'indicateur « climate change » et l'indicateur « resource use, minerals and metals » pour la batterie LFP, les procédés en orange sont communs entre score unique et utilisation de minéraux et métaux et ceux en bleu entre score unique et changement climatique

LFP					
Single score		resource use, minerals and metals		Climate change	
Processes	%	Processes	%	Processes	%
Copper concentrate, sulfide	9,9625327	Copper concentrate	17,919387	Hard coal {CN} hard coal m	5,7477056
Copper concentrate, sulfide	8,4824882	Copper concentrate	15,192992	Heat, district or industrial	5,1996638
Gold, unrefined {RoW} gold	7,2683938	Gold, unrefined {RoW} gold	13,134312	Natural gas, vented	3,6755408
Lithium iron phosphate {RoW} lithium iron phosphate	4,9276841	Gold {RoW} silver-gold mix	6,355457	Heat, district or industrial	2,8259163
Gold {RoW} silver-gold mix	3,4994029	Copper concentrate	5,6606913	Electricity, high voltage	2,7388035
Copper concentrate, sulfide	3,1361746	Silver {RoW} silver	4,4297909	Quicklime, in pieces	2,2421612
Silver {RoW} silver-gold mix	2,4391044	Copper concentrate	3,6532633	Electricity, high voltage	2,082338
Copper, anode {CN} smelted	2,2479584	Copper concentrate	2,8350532	Electricity, high voltage	1,8848243
Lithium iron phosphate {CN} lithium iron phosphate	2,2095226	Copper concentrate	2,785707	Aluminium, primary	1,860928
Copper, anode {RoW} smelted	2,137736	Copper concentrate	2,7098906	Electricity, high voltage	1,785097
Copper concentrate, sulfide	2,0349765	Gold {AU} gold processing	2,369731	Heat, district or industrial	1,6124771
Hard coal {CN} hard coal m	1,98409	Gold {RoW} gold-silver	2,3339868	Electricity, high voltage	1,49839
Copper concentrate, sulfide	1,5710325	Copper concentrate	2,2464032	Heat, district or industrial	1,4491667
Copper concentrate, sulfide	1,5570023	Copper concentrate	2,155105	Electricity, high voltage	1,3702558
Copper concentrate, sulfide	1,5134313	Copper, cathode {GL} copper	2,0243795	Electricity, high voltage	1,2600482

Tableau 25 Processus les plus impactant pour le score unique, l'indicateur « climate change » et l'indicateur « resource use, minerals and metals » pour la batterie NMC811, les procédés en orange sont communs entre score unique et utilisation de minéraux et métaux et ceux en bleu entre score unique et changement climatique

NMC811					
Single score		resource use, minerals and metals		Climate change	
Processes	%	Processes	%	Processes	%
Nickel sulfate {GLO} cobalt	8,3733922	Copper concentrate	14,022215	Heat, district or indu	5,0608138
Copper concentrate, sulfide	8,2132388	Nickel sulfate {GLO}	13,110107	Natural gas, vented	4,3008996
Copper concentrate, sulfide	6,9930713	Copper concentrate	11,888766	Hard coal {CN} har	4,2940149
Gold, unrefined {RoW} gol	6,0738903	Gold, unrefined {Ro	10,418006	Heat, district or indu	2,6566772
Cobalt hydroxide {GLO} co	4,6508238	Cobalt hydroxide {C	7,2817322	Electricity, high vol	2,4700763
Electricity, high voltage {Ro	3,594973	Gold {RoW} silver	5,0410852	Heat, district or indu	2,2519651
Gold {RoW} silver-gold mi	2,9243035	Copper concentrate	4,4295839	Electricity, high volta	1,8930439
Copper concentrate, sulfide	2,5855023	Silver {RoW} silver	3,4410019	Quicklime, in pieces	1,7479417
Silver {RoW} silver-gold mir	1,9961047	Copper concentrate	2,8587385	Sweet gas, burned in	1,4518435
Copper, anode {CN} smeltir	1,8476401	Copper concentrate	2,2184757	Electricity, high volta	1,4392882
Copper, anode {RoW} smelt	1,7570462	Copper concentrate	2,1798615	Diesel, burned in bu	1,3842704
Copper concentrate, sulfide	1,6776606	Copper concentrate	2,1205339	Heat, district or indu	1,3623787
Coke {RoW} coke productio	1,5428948	Gold {AU} gold proc	1,8796471	Aluminium, primary	1,3303812
Hard coal {CN} hard coal m	1,4943459	Gold {RoW} gold-si	1,8512951	Electricity, high volta	1,2410895
Copper concentrate, sulfide	1,2951792	Copper concentrate	1,7578474	Electricity, high volta	1,1991149

Ces tableaux montrent également que les procédés les plus impactant pour la batterie LFP sont les procédés de cuivre, d'or et d'argent et pour la batterie NMC811 les procédés de sulfate de nickel, d'hydroxyde de cobalt, de cuivre, d'or et d'argent.

Le Tableau 26 donne la contribution des ressources extraites du sol aux impacts de l'indicateur « resource use, minerals and metals » dans l'unité d'impact et en pourcentage pour les deux batteries.

Tableau 26 Contribution des ressources extraites du sol des deux batteries à l'indicateur "resource use, minerals and fossils", en gras sont indiqués les contributions supérieures à 5% pour les deux batteries

	Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW}		Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW}	
	kg Sb eq	% d'impact	kg Sb eq	% d'impact
Total de Matière première	0,8965	100	1,0056	100
Tellurium	0,3786	42,2249	0,3324	33,0522
Gold	0,2830	31,5652	0,2517	25,0337
Copper	0,0831	9,2721	0,1742	17,3216
Silver	0,0674	7,5233	0,0599	5,9583
Selenium	0,0269	2,9952	0,0236	2,3445
Molybdenum	0,0266	2,9657	0,0234	2,3221
Lead	0,0130	1,4479	0,0124	1,2317
Tin	0,0078	0,8664	0,0070	0,6939
Zinc	0,0050	0,5613	0,0047	0,4673
Sulfur	0,0026	0,2940	0,1060	10,5377
Chromium	0,0013	0,1448	0,0058	0,5774
Nickel	0,0002	0,0270	0,0030	0,2976
Platinum	0,0002	0,0245	0,0005	0,0493
Phosphorus	0,0002	0,0214	4,41E-05	0,0044
Cadmium	0,0002	0,0189	0,0002	0,0155
Rhenium	9,44E-05	0,0105	8,29E-05	0,0082

Boron	8,74E-05	0,0097	0,0001	0,0102
Palladium	7,38E-05	0,0082	0,0002	0,0220
Lithium	6,42E-05	0,0072	5,05E-05	0,0050
Barium	4,29E-05	0,0048	5,42E-05	0,0054
Antimony	3,20E-05	0,0036	3,03E-05	0,0030
Tantalum	8,79E-06	0,0010	7,64E-06	0,0008
Iron	5,95E-06	0,0007	5,99E-05	0,0060
Arsenic	5,54E-06	0,0006	0,0002	0,0224
Manganese	3,46E-06	0,0004	4,08E-05	0,0041
Cobalt	1,38E-06	0,0002	5,58E-05	0,0055
Indium	1,06E-06	0,0001	9,68E-07	0,0001
Mercury	6,92E-07	7,72E-05	1,31E-06	0,0001
Zirconium	5,16E-07	5,76E-05	5,08E-07	5,05E-05
Aluminium	1,26E-07	1,40E-05	1,30E-07	1,29E-05
Niobium	7,06E-08	7,87E-06	7,09E-08	7,05E-06
Titanium	1,98E-08	2,21E-06	1,66E-08	1,65E-06
Gallium	5,20E-09	5,80E-07	4,00E-09	3,97E-07
Magnesium	4,37E-09	4,88E-07	1,01E-07	1,00E-05
Potassium	3,39E-09	3,78E-07	4,24E-09	4,22E-07
Strontium	1,82E-09	2,03E-07	2,03E-09	2,02E-07
Sodium	6,90E-11	7,70E-09	6,33E-11	6,30E-09
Silicon	6,61E-11	7,38E-09	2,68E-09	2,66E-07
Vanadium	3,23E-11	3,60E-09	2,97E-11	2,95E-09
Yttrium	1,37E-11	1,53E-09	2,39E-11	2,37E-09

La batterie NMC811 a plus d'impact que la batterie LFP pour cet indicateur (voir Figure 28). Les éléments ayant le plus d'impacts (plus de 5%) pour la batterie LFP sont le tellure, l'or, le cuivre et l'argent. Pour la batterie NMC811 il s'agit des mêmes composés auxquels s'ajoute le soufre. Cet ordre se conserve pour la contribution des métaux et minéraux au score unique et correspond aux procédés les plus impactant des figures précédentes à part pour le tellure.

Le cuivre est également un des éléments les plus impactant, malgré son facteur de caractérisation beaucoup plus faible que celui du tellure et de l'or, sa contribution significative s'explique quantité importante comme montré dans le Tableau 56 de l'Annexe 1. Les contributions de l'or et du tellure dans les deux types de batteries sont relativement proches, tandis que celles du cuivre diffèrent davantage, expliqué par une quantité plus importante de cuivre dans la batterie NMC811. Enfin, la batterie NMC811 présente également une contribution notable du soufre, absent dans la batterie LFP.

Cas du tellure

Le tellure est l'un des éléments les plus impactant mis en évidence par l'analyse environnementale ADP^{ultimate reserves}, en raison de son facteur de caractérisation élevé pour cet indicateur. L'or, bien que doté d'un facteur de caractérisation supérieur à celui du tellure, n'est, en effet, pas le principal contributeur à l'indicateur. Cependant, le tellure n'est actuellement pas présent dans les composants de la batterie alors que l'or si.

Pour expliquer la présence du tellure dans les résultats malgré son absence dans la batterie (cf. Figure 25 et Figure 26), il faut revenir sur les limites énoncées en partie 2.2.2 sur les inventaires de base de données comme ecoinvent. En effet, ces inventaires, comme ceux des batteries présentées dans l'Annexe 1, prennent en compte les intrants et sortants de l'ensemble de chaîne de valeurs d'un produit et pas uniquement les matériaux utilisés pour produire le produit (Bill of Materials – BoM). L'utilisation de composé minéral/métal miné inclus une allocation, économique ou massique, sur les différents éléments composants le minéral. Ainsi des éléments présents dans un minéral utilisé pour produire un métal se retrouve dans l'inventaire du produit, sa quantité allouée étant liée à la quantité de métal utilisé dans le produit.

C'est le cas du tellure, coproduit de la production du cuivre, métal actuellement présent en quantité non négligeable dans les batteries que ce soit dans la cellule ou les composés électroniques, récupéré à partir des gisements de sulfures de cuivre, des résidus, ou des sous-produits du raffinage du cuivre. Etant exclusivement extrait et valorisé lors du raffinage électrolytique des cathodes et anodes de cuivre, où il se dépose sous forme d'impuretés insolubles au fond du réservoir électrolytique, et non lors de l'extraction des minerais (Chung et al., 2024), la quantité de tellure est déterminée à l'aide d'un bilan de matière tout au long de la chaîne de valeur du cuivre malgré son absence dans les composants réels de la batterie.

L'allocation des masses sont réalisées sur une base économique, attribuant une part plus importante de la masse du cuivre au tellure (et l'inverse) en raison de sa valeur économique supérieure (voir la Figure 67 de la partie 5.2). En raison de son facteur de caractérisation (CF) élevé dans des méthodes comme CML (40,7 pour le tellure contre $1,37E-3$ kg Sb eq pour le cuivre), même des quantités infimes de tellure dominant l'impact en ressources du cuivre, positionnant ainsi le cuivre (tellure inclus dans le minéral) comme un point chaud significatif dans les évaluations des ressources.

La dominance du tellure sur l'or s'explique par sa quantité allouée, nettement plus élevée que celle de l'or en raison de la quantité de cuivre actuellement (avec une part de tellure allouée) utilisé dans la batterie, comme montré dans le Tableau 56 de l'Annexe 1. Cette limite de calculs basée sur les ICV se retrouve également dans la suite des analyses pour d'autres éléments et une partie y est consacré dans la synthèse des études de cas en partie 5.2.

Nous allons à présent réaliser des analyses de points chauds sur les deux batteries, en regardant l'indicateur « ressource use, minerals and metals », afin de comprendre où sont utilisés ces éléments et procédés dans chaque batterie.

Analyse de points chauds d'une batterie de chimie LFP

Dans les figures suivantes sont présentées les analyses des points chauds d'une batterie prismatique rechargeable de chimie LFP. La donnée de batterie utilisée est « 1 kg Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW}| battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic | Cut-off, U »

Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel SimaPro version 10.0.1.2 avec la méthode d'analyse EF 3.1. Les matériaux les plus impactants pour l'indicateur « ressource use, minerals and metals » sont encadrés. Les encadrés rouges représentent les points chauds pour la batterie LFP et en bleu les points chauds communs aux deux batteries étudiées.

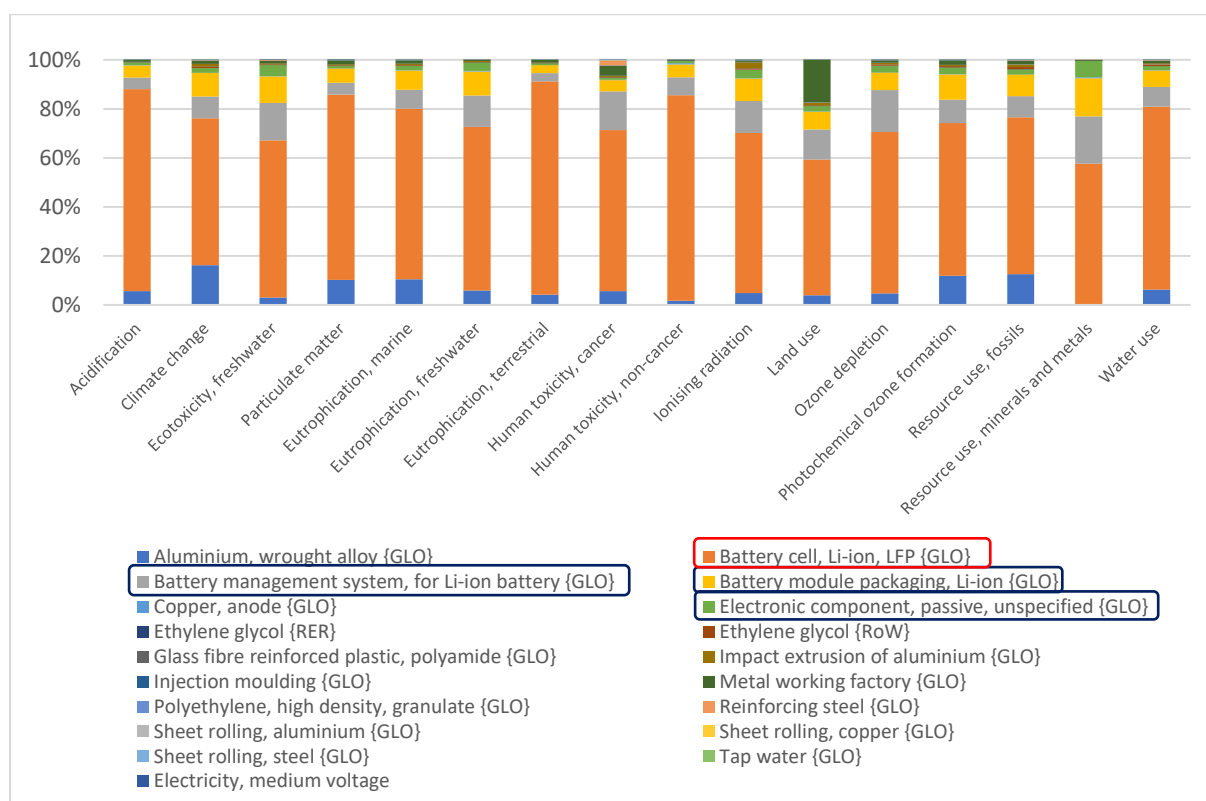


Figure 29 Analyse de points chauds d'une batterie LFP entière

La Figure 29 montre que les éléments les plus impactants d'une batterie LFP pour l'indicateur étudié sont la cellule de batterie LFP et, en plus petite mesure, le système de gestion de la batterie, l'emballage de la batterie et les autres appareils électroniques. Les composants électroniques, l'emballage et le système de gestion sont des éléments communs aux batteries et seront analysés dans une autre partie.

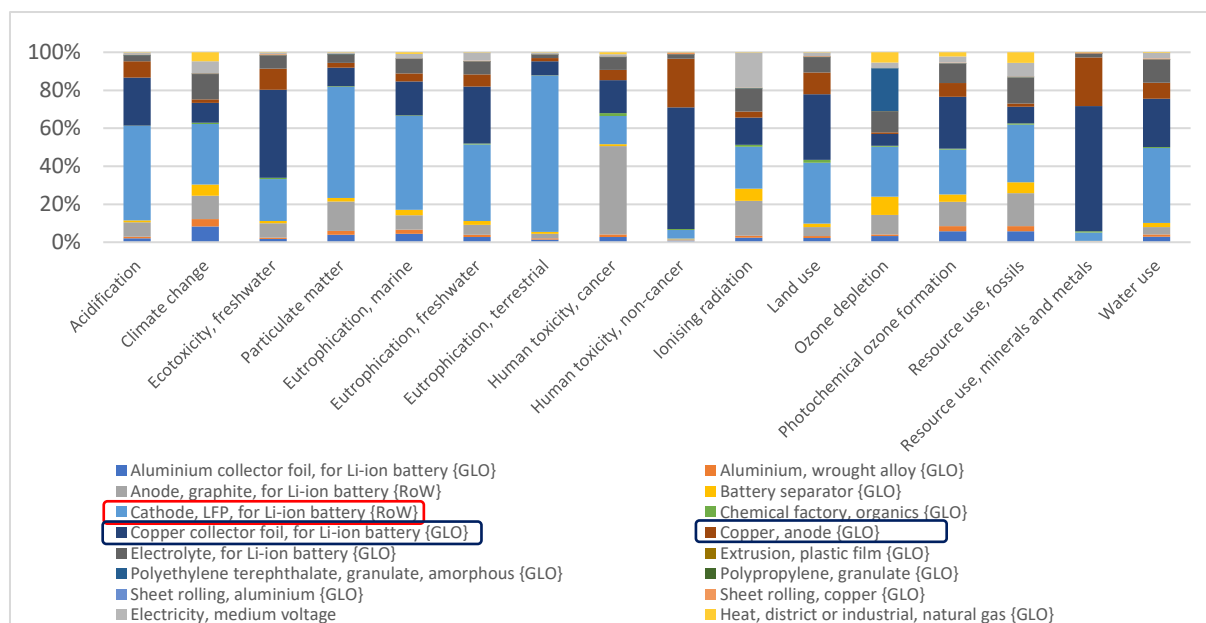


Figure 30 Analyses de points chauds d'une cellule de batterie LFP

Pour la cellule de batterie LFP, comme le montre la Figure 30, les composants les plus impactant pour l'indicateur étudiés sont la production du collecteur de courant en cuivre, le cuivre de qualité anode et en plus petite mesure, la cathode LFP. Le cuivre étant le 3^{ème} élément le plus impactant d'après le Tableau 23, la quantité de cuivre nécessaire à ce qu'il soit aussi impactant vient certainement au moins en partie du **collecteur de cuivre et du cuivre qualité anode**.

Il y a 0.72698kg de cellule de batterie LFP dans une batterie LFP alors pour faire une analyse de contribution des ressources pour la cellule comparable avec le Tableau 26, il faut $562.3 \times 0.72698 = 408.78\text{kg}$ de cellule LFP. Cela donne le Tableau 27.

Tableau 27 Contribution des ressources de la cellule LFP à l'indicateur "resource use, minerals and metals"

Element	kg Sb eq	Contribution (%)	Element	kg Sb eq	Contribution (%)
Total de Matière première	0,5137	100,0000	Antimony	1,12E-05	0,0022
Tellurium	0,3355	65,3187	Arsenic	4,76E-06	0,0009
Copper	0,0734	14,2867	Iron	3,18E-06	0,0006
Selenium	0,0238	4,6334	Manganese	1,50E-06	0,0003
Molybdenum	0,0236	4,5853	Cobalt	1,18E-06	0,0002
Gold	0,0230	4,4795	Indium	6,72E-07	0,0001
Silver	0,0189	3,6863	Mercury	5,44E-07	0,0001
Lead	0,0082	1,5947	Zirconium	2,26E-07	4,41E-05
Zinc	0,0032	0,6166	Niobium	5,56E-08	1,08E-05
Sulfur	0,0023	0,4380	Aluminium	3,14E-08	6,11E-06
Chromium	0,0010	0,1905	Tantalum	1,53E-08	2,99E-06
Phosphorus	0,0002	0,0372	Titanium	1,23E-08	2,39E-06
Nickel	0,0002	0,0331	Magnesium	3,32E-09	6,46E-07
Cadmium	0,0001	0,0207	Potassium	1,82E-09	3,53E-07
Tin	0,0001	0,0199	Gallium	1,27E-09	2,48E-07

Rhenium	8,37E-05	0,0163	Strontium	9,42E-10	1,83E-07
Lithium	6,42E-05	0,0125	Silicon	5,66E-11	1,10E-08
Platinum	5,75E-05	0,0112	Sodium	4,33E-11	8,42E-09
Palladium	3,14E-05	0,0061	Vanadium	2,03E-11	3,94E-09
Barium	3,07E-05	0,0060	Yttrium	1,02E-11	1,99E-09
Boron	1,46E-05	0,0028			

En comparant les valeurs des Tableau 26 et Tableau 27, on voit que la **majorité du tellure et du cuivre viennent de la production de la cellule** et que ces éléments sont les plus grands contributeurs aux impacts de l'utilisation des ressources et minéraux et métaux de la cellule. Il y a **peu d'or et d'argent** dans la fabrication de la cellule, il vient donc des composés en commun des batteries comprenant les appareils électroniques.

Pour la cathode de LFP, bien que représentant peu d'impact globaux, il est intéressant de noter que les Figure 31, Figure 32 et Figure 33 montrent que la majorité des impacts viennent de la production de matériau actif de LFP, dont la majorité des impacts viennent de la production de diammonium phosphate et de carbonate de lithium pour la voie de synthèse en solution et de la production d'hydroxyde de lithium et d'acide phosphorique pour la voie hydrothermale.

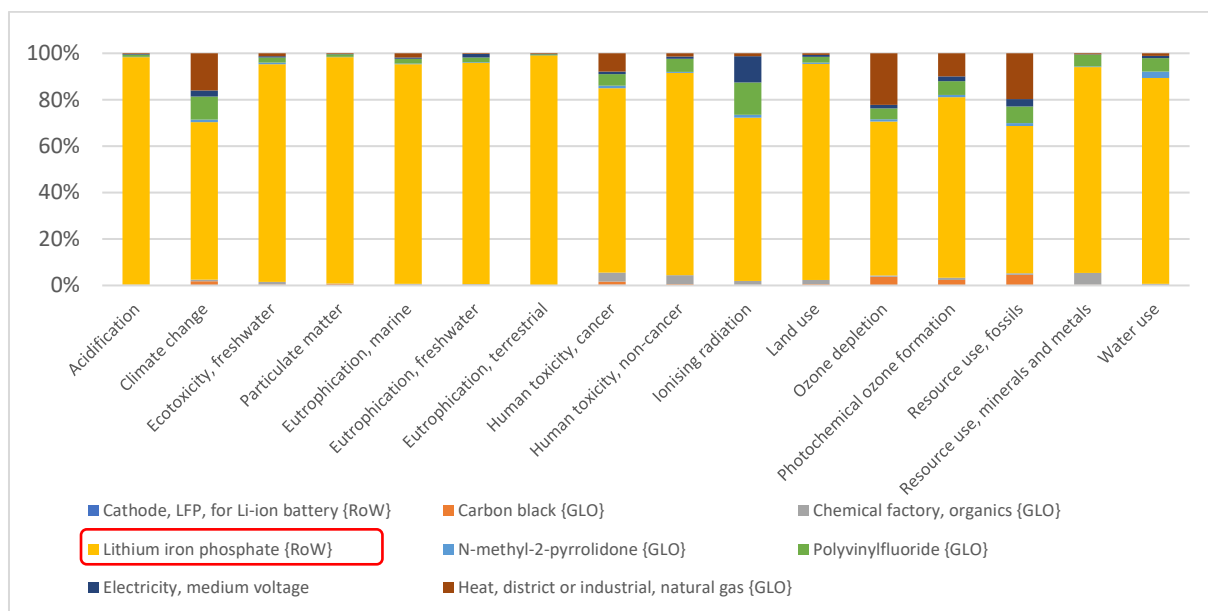


Figure 31 Analyse de points chauds pour la cathode LFP

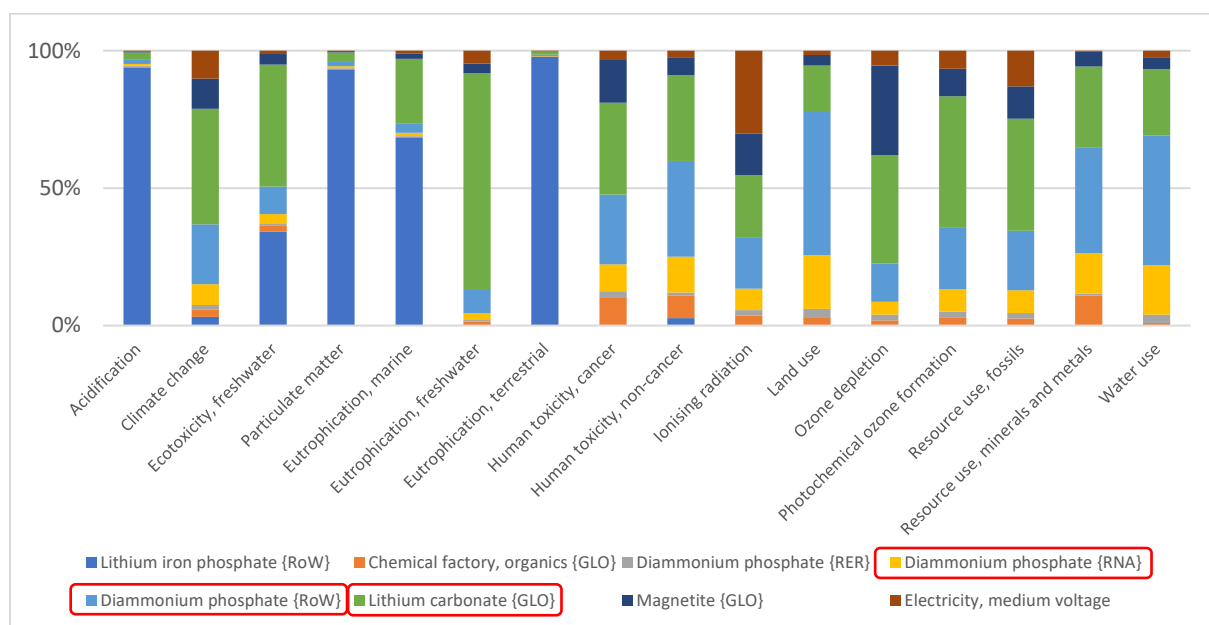


Figure 32 Analyse de points chauds pour la production de matériau active de cathode LFP en production en solution (50% de la production)

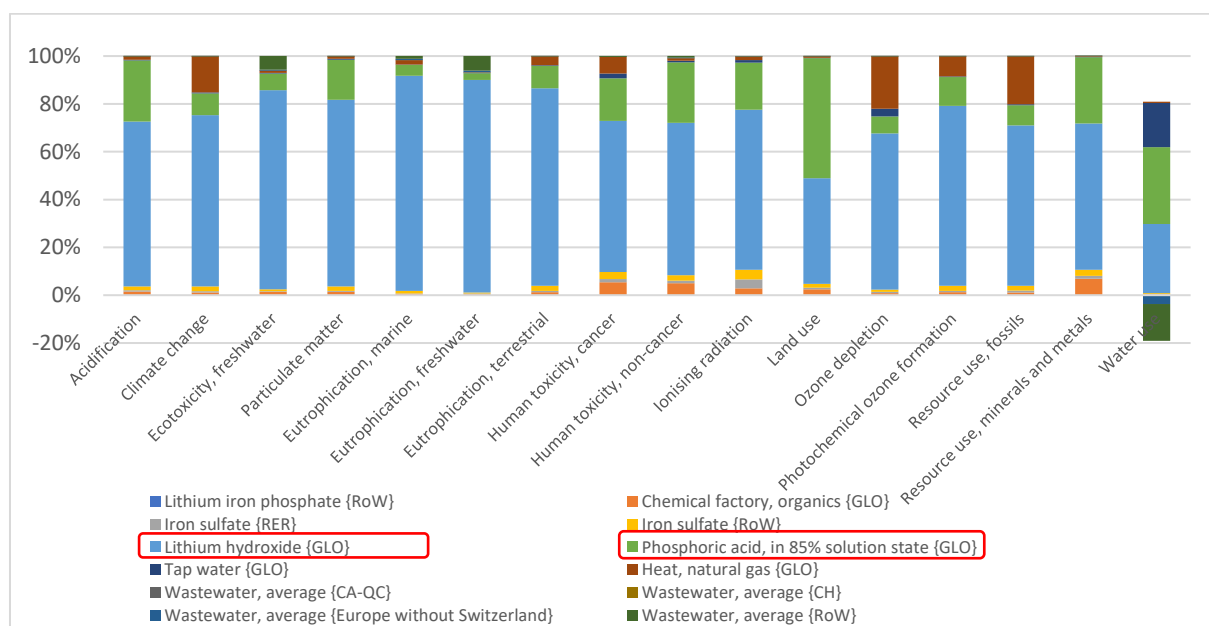


Figure 33 Analyse de points chauds pour la production de matériau active de cathode LFP en production hydrothermales (50% de la production)

Il y a 0.3676kg de cathode LFP dans 1kg de cellule LFP. Pour voir la quantité de ressource quand une cathode et la comparer aux Tableau 26 et Tableau 27, il faut $562.3 \times 0.72698 \times 0.3676 = 150.27\text{kg}$ de cathode LFP. Cela donne le Tableau 28.

Tableau 28 Contribution des ressources à l'indicateur "resource use, minerals and metals" pour la cathode LFP

Element	kg Sb eq	Element	kg Sb eq
Total de Matière première	0,02299	Palladium	1,55E-06
Tellurium	0,0109	Iron	7,24E-07

Gold	0,0027	Manganese	4,30E-07
Copper	0,0025	Arsenic	2,84E-07
Silver	0,0021	Mercury	2,52E-07
Lead	0,0019	Indium	1,48E-07
Selenium	7,75E-04	Cobalt	7,54E-08
Molybdenum	7,70E-04	Zirconium	3,77E-08
Zinc	7,25E-04	Niobium	1,40E-08
Chromium	1,51E-04	Tantalum	6,72E-09
Sulfur	1,37E-04	Titanium	4,85E-09
Phosphorus	1,18E-04	Aluminium	8,20E-10
Lithium	6,10E-05	Magnesium	5,74E-10
Tin	4,28E-05	Potassium	4,47E-10
Cadmium	2,45E-05	Strontium	3,86E-10
Nickel	2,43E-05	Gallium	3,21E-11
Barium	1,09E-05	Sodium	9,97E-12
Antimony	6,33E-06	Vanadium	4,67E-12
Boron	5,91E-06	Yttrium	4,03E-12
Platinum	3,23E-06	Silicon	3,40E-12
Rhenium	2,73E-06		

On constate en comparant avec la Figure 25 que les éléments les plus impactant de la cellule, le tellure et le cuivre, n'ont que peu d'impact dans la cathode, il y en a donc en très petite quantité dans la cathode, la quantité de ces éléments est donc en majorité allouée au cuivre qualité anode et au collecteur de cuivre.

Analyse de points chaud d'une batterie de chimie NMC811

Les figures suivantes présentent les analyses des points chauds d'une batterie prismatique rechargeable de chimie NMC811. La donnée de batterie utilisée est « 1 kg Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW}| battery production, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | Cut-off, U »

Comme pour la batterie LFP, ces analyses ont été réalisées avec le logiciel SimaPro version 10.0.1.2 avec la méthode d'analyse EF 3.1 et les matériaux les plus impactant pour l'indicateur « resource use, minerals and metals » sont encadrés. Les encadrés rouges représentent les points chauds pour la batterie NMC811 et en bleu les points chauds communs aux deux batteries étudiées.

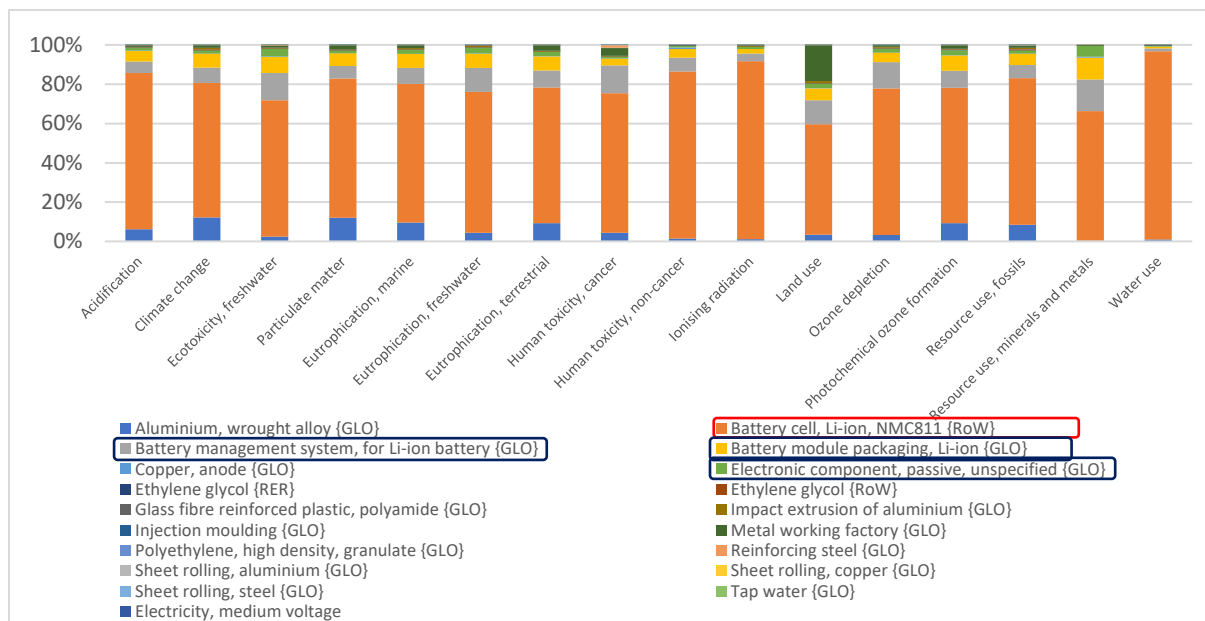


Figure 34 Analyse de points chauds d'une batterie NMC811

Comme pour la batterie LFP, la Figure 34 montre que les éléments les plus impactant pour l'indicateur étudié sont la cellule de batterie cette fois-ci NMC811 et, en plus petite mesure, le système de gestion de la batterie, l'emballage de la batterie et les autres appareils électroniques. La cellule de batterie représente plus des 60% des impacts de l'indicateur étudié, ce qui est plus que pour la batterie LFP. Les composants électroniques, l'emballage et le système de gestion sont des éléments communs aux batteries qui seront analysés dans une autre partie.

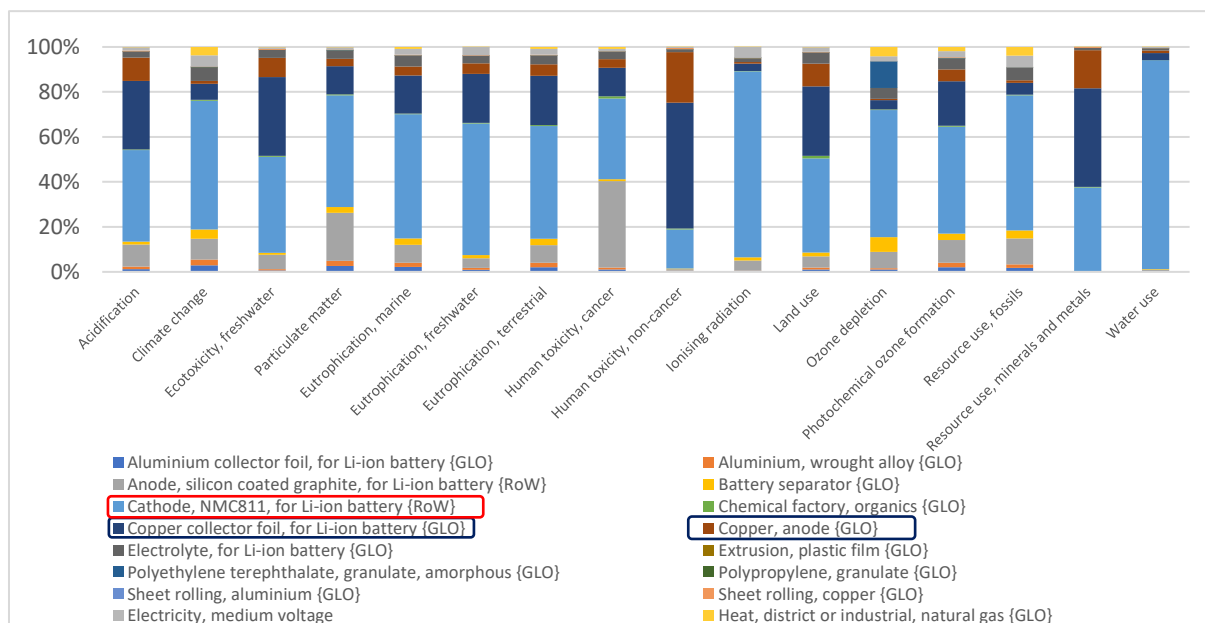


Figure 35 Analyse de points chauds d'une cellule NMC811

Pour la cellule de batterie NMC811, les composants les plus impactant pour l'indicateur étudiés sont la production du **collecteur de courant en cuivre, de la cathode NMC811 et du cuivre de qualité anode** comme montré dans la Figure 35. La cathode NMC811 a plus d'impact par rapport aux éléments en cuivre que pour la batterie LFP. Le cuivre étant également le 3^{ème} élément le plus impactant pour la

batterie NMC811 d'après le Tableau 26, une partie du cuivre doit être dû au collecteur de courant et cuivre qualité anode.

Il y a 0.71359kg de cellule de batterie LFP and une batterie LFP alors pour faire une analyse de contribution des ressources pour la cellule comparable avec le Tableau 26, il faut $435.8 \times 0.71359 = 310.98\text{kg}$ de cellule NMC811. Cela donne le Tableau 29

Tableau 29 Contribution des ressources à l'indicateur "resource use, minerals and fossils" pour une cellule NMC811

Element	kg Sb eq	Contribution (%)	Element	kg Sb eq	Contribution (%)
Total de Matière première	0,6644	100,0000	Phosphorus	4,31E-05	0,0065
Tellurium	0,2932	44,1245	Barium	4,30E-05	0,0065
Copper	0,1653	24,8830	Manganese	3,90E-05	0,0059
Sulfur	0,1056	15,8971	Boron	3,51E-05	0,0053
Gold	0,0210	3,1602	Antimony	1,15E-05	0,0017
Selenium	0,0208	3,1300	Mercury	1,19E-06	0,0002
Molybdenum	0,0206	3,0984	Indium	6,20E-07	9,33E-05
Silver	0,0171	2,5668	Zirconium	2,55E-07	3,84E-05
Lead	0,0080	1,2110	Magnesium	9,98E-08	1,50E-05
Chromium	0,0055	0,8296	Niobium	5,73E-08	8,62E-06
Zinc	0,0030	0,4528	Aluminium	5,33E-08	8,02E-06
Nickel	0,0029	0,4406	Tantalum	1,41E-08	2,12E-06
Platinum	0,0004	0,0533	Titanium	1,01E-08	1,52E-06
Arsenic	0,0002	0,0338	Potassium	2,81E-09	4,22E-07
Palladium	0,0002	0,0277	Silicon	2,67E-09	4,02E-07
Cadmium	9,82E-05	0,0148	Strontium	1,23E-09	1,86E-07
Tin	9,61E-05	0,0145	Gallium	8,11E-10	1,22E-07
Rhenium	7,31E-05	0,0110	Sodium	4,00E-11	6,02E-09
Iron	5,75E-05	0,0086	Yttrium	2,09E-11	3,14E-09
Cobalt	5,56E-05	0,0084	Vanadium	1,87E-11	2,82E-09
Lithium	5,05E-05	0,0076			

En comparant les valeurs avec le Tableau 26, on note que la majorité du **tellure, cuivre et soufre sont alloués à la cellule de batterie**. Il y a eu la majorité de tellure et de cuivre également dans la batterie LFP mais pas de soufre, on peut s'attendre à trouver le soufre dans la cathode NMC811 mais peu de cuivre ou de tellure, expliquant ainsi son impact plus élevé que pour la batterie LFP qui ne comprenant que de petite quantité des ressources impactantes.

Comme pour la batterie LFP, il y a **peu d'or et d'argent** dans la fabrication de la cellule, il vient donc certainement également des composés en commun des batteries comprenant les appareils électroniques.

Par les Figure 36 et Figure 37 on note que les impacts de la cathode NMC811 viennent en totalité de la production de l'oxyde de NMC811, qui viennent majoritairement de la production d'hydroxyde de NMC811. La production d'hydroxyde de lithium a peu d'impact en comparaison.

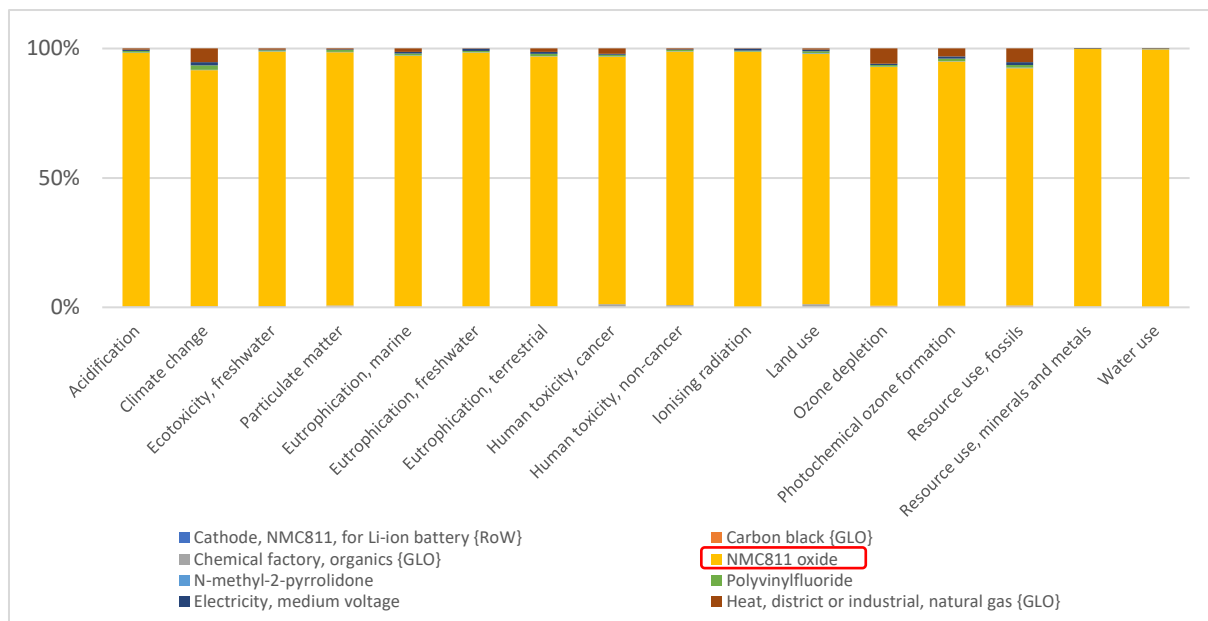


Figure 36 Analyse de points chauds pour la production de cathode NMC811

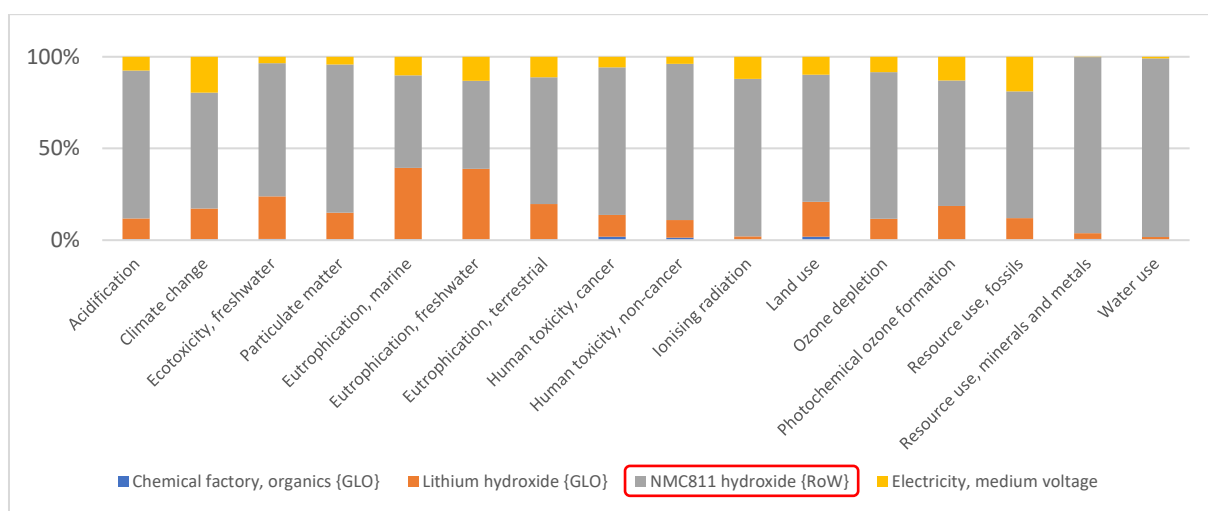


Figure 37 Analyse de points chauds pour la production d'hydroxyde de NMC811

La Figure 38 montre que la production d'hydroxyde de cobalt et de nickel sont les procédés les plus impactant pour l'indicateur utilisation des ressources en minéraux et métaux et tous les autres indicateurs pour la production d'hydroxyde de NMC811 et donc de la cathode NMC811. Le soufre, élément nécessaire à la formation de sulfate vient donc de la production de ces matériaux.

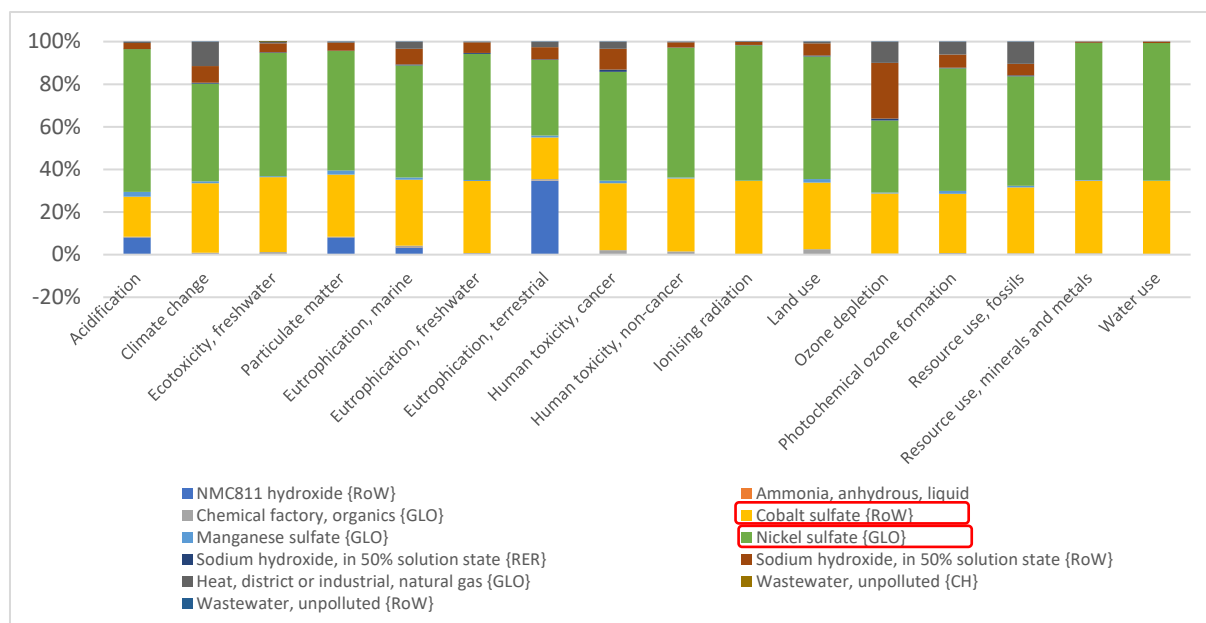


Figure 38 Analyse de points chauds pour la production d'hydroxyde de NMC811

L'analyse de contribution des ressources pour l'indicateur « resource use, minerals and fossils » de la cathode, figurant dans le Tableau 30, montrera donc les majorité les ressources utilisées pour la production de sulfate de cobalt et de cuivre, les autres composants de la cathode n'ayant que peu d'impact dans cet indicateur.

Il y a 0.3773kg de cathode NMC811 pour 1kg de cellule de batterie NMC811. Pour comparer les valeurs avec les Tableau 26 et Tableau 29, il faut $435.8 \times 0.71359 \times 0.3773 = 117.32\text{kg}$ de cathode NMC811.

Tableau 30 contribution des éléments à l'indicateur utilisation des ressources en minéraux et métaux pour la cathode NMC811

Element	kg Sb eq	Contribution (%)	Element	kg Sb eq	Contribution (%)
Total de Matière première	0,2463	100	Boron	2,82E-05	0,0115
Copper	0,1048	42,5519	Barium	2,65E-05	0,0108
Sulfur	0,1038	42,1533	Antimony	8,06E-06	0,0033
Tellurium	0,0159	6,4722	Rhenium	3,98E-06	0,0016
Chromium	0,0048	1,9609	Mercury	9,88E-07	0,0004
Gold	0,0041	1,6544	Phosphorus	4,69E-07	0,0002
Silver	0,0029	1,1672	Indium	1,88E-07	7,62E-05
Lead	0,0029	1,1577	Zirconium	9,96E-08	4,04E-05
Nickel	0,0028	1,1394	Magnesium	9,75E-08	3,96E-05
Selenium	0,0011	0,4591	Aluminium	3,51E-08	1,42E-05
Molybdenum	0,0011	0,4582	Niobium	2,82E-08	1,15E-05
Zinc	0,0010	0,4046	Tantalum	8,04E-09	3,26E-06
Platinum	0,0003	0,1250	Titanium	3,96E-09	1,61E-06
Arsenic	0,0002	0,0897	Silicon	2,62E-09	1,06E-06
Palladium	0,0002	0,0644	Potassium	1,75E-09	7,10E-07
Iron	5,54E-05	0,0225	Strontium	8,17E-10	3,32E-07
Cobalt	5,46E-05	0,0222	Gallium	7,99E-11	3,24E-08

Tin	5,31E-05	0,0216	Yttrium	1,65E-11	6,70E-09
Lithium	4,86E-05	0,0197	Sodium	1,26E-11	5,12E-09
Manganese	3,82E-05	0,0155	Vanadium	5,90E-12	2,40E-09
Cadmium	3,09E-05	0,0126			

En comparant les valeurs obtenues avec les valeurs du Tableau 29, on voit que tous les impacts du soufre viennent des impacts de la production des sulfates de nickel et cobalt. On note également que le cuivre est également très présent dans la cathode NMC811, contrairement à la cathode LFP. En regardant dans la contribution des processus, on voit que le procédé « Copper concentrate, sulfide ore {RoW} | copper mine operation and beneficiation, sulfide ore | Cut-off, U » est présent dans les procédés les plus contributeurs comme dans le Tableau 25. Cela signifie que la production de sulfate implique du cuivre qui se retrouve dans les impacts et qui explique le fait de trouver plus de cuivre dans la batterie NMC811 que dans la LFP.

Analyse de points chaud des composants communs aux deux batteries (packaging, composants électronique et système de gestion)

Afin de voir la contribution des matières premières à l'indicateur étudié, il faut avoir utilisé les masses du Tableau 31 pour les unités fonctionnelles (UFs) choisies (562.3kg de batterie LFP et 435.8kg de batteries NMC811).

Tableau 31 Masses de composants pour la contribution à l'indicateur choisi

	Packaging		Electronic component		Battery Management System	
	LFP	NMC811	LFP	NMC811	LFP	NMC811
masse pour 1kg de batterie (kg)	0,0558	0,05718	0,0035	0,00431	0,0201	0,02426
masse pour les UFs (kg)	31,37634	24,919044	1,96805	1,878298	11,30223	10,572508

Tableau 32 Contributions des matières premières à l'indicateur "resource use, minerals and metals" des composants communs pour la batterie LFP, tronqués à 0.01%

Substance	Unité	Electronic component, passive, unspecified {GLO}	Battery module packaging, Li-ion {RoW}	Battery management system, for Li-ion battery {GLO}	Total	Total
Total de Matière première	kg Sb eq	0,06163182	0,13921635	0,17382131	0,31303766	100,00%
Gold	kg Sb eq	0,04778684	0,094779	0,11699619	0,21177519	67,65%
Silver	kg Sb eq	0,00957528	0,01945716	0,01896271	0,03841987	12,27%
Tellurium	kg Sb eq	0,00159566	0,01544285	0,02139739	0,03684024	11,77%
Copper	kg Sb eq	0,0004753	0,00305432	0,00525566	0,00830997	2,65%
Tin	kg Sb eq	0,00111145	0,00218982	0,00435659	0,00654642	2,09%
Lead	kg Sb eq	0,0005442	0,00129122	0,00227529	0,00356651	1,14%
Selenium	kg Sb eq	0,00011319	0,00109543	0,00151782	0,00261325	0,83%
Molybdenum	kg Sb eq	0,0001123	0,0010847	0,00151112	0,00259582	0,83%
Zinc	kg Sb eq	0,00021035	0,00050137	0,00088636	0,00138773	0,44%
Sulfur	kg Sb eq	3,16E-05	0,00013539	0,00018508	0,00032047	0,10%
Chromium	kg Sb eq	8,53E-06	3,92E-05	0,00025052	0,00028969	0,09%
Platinum	kg Sb eq	3,80E-05	7,53E-05	4,80E-05	0,00012327	0,04%

Cadmium	kg Sb eq	7,12E-06	1,70E-05	3,00E-05	4,6979E-05	0,02%
Palladium	kg Sb eq	9,65E-06	1,92E-05	1,31E-05	3,2288E-05	0,01%
Restant Matière première	kg Sb eq	1,23E-05	3,45E-05	0,00013545	0,00016996	0,05%

Tableau 33 Contributions des matières premières à l'indicateur "resource use, minerals and metals" des composants communs pour la batterie NMC811, tronqués à 0.01%

Substance	Unité	Electronic component, passive, unspecified {GLO}	Battery management system, for Li-ion battery {GLO}	Battery module packaging, Li-ion {RoW}	Total	Total
Total de Matière première	kg Sb eq	0,05881615	0,16259215	0,11055677	0,33196507	100,00%
Gold	kg Sb eq	0,04560368	0,10943803	0,07526745	0,23030917	69,38%
Silver	kg Sb eq	0,00913783	0,01773768	0,01545164	0,04232715	12,75%
Tellurium	kg Sb eq	0,00152276	0,02001508	0,01226373	0,03380158	10,18%
Copper	kg Sb eq	0,00045359	0,00491613	0,00242555	0,00779527	2,35%
Tin	kg Sb eq	0,00106067	0,00407515	0,00173902	0,00687484	2,07%
Lead	kg Sb eq	0,00051934	0,0021283	0,00102541	0,00367304	1,11%
Selenium	kg Sb eq	0,00010802	0,00141976	0,00086992	0,00239771	0,72%
Molybdenum	kg Sb eq	0,00010717	0,0014135	0,0008614	0,00238207	0,72%
Zinc	kg Sb eq	0,00020074	0,0008291	0,00039816	0,00142799	0,43%
Sulfur	kg Sb eq	3,02E-05	0,00017312	0,00010752	0,00031085	0,09%
Chromium	kg Sb eq	8,14E-06	0,00023433	3,11E-05	0,00027358	0,08%
Platinum	kg Sb eq	3,63E-05	4,49E-05	5,98E-05	0,00014098	0,04%
Boron	kg Sb eq	6,55E-07	6,15E-05	1,91E-06	6,4105E-05	0,02%
Nickel	kg Sb eq	4,36E-06	4,21E-05	1,07E-05	5,7089E-05	0,02%
Cadmium	kg Sb eq	6,79E-06	2,81E-05	1,35E-05	4,834E-05	0,01%
Palladium	kg Sb eq	9,21E-06	1,23E-05	1,52E-05	3,67E-05	0,01%
Restant Matière première	kg Sb eq	6,71E-06	2,31E-05	1,48E-05	4,463E-05	0,01%

Globalement, pour les composants en commun des deux batteries, comprenant principalement les éléments électriques et électroniques, les éléments qui ont le plus d'impacts sont l'or, l'argent, le tellure, le cuivre et l'étain. En comparant les valeurs des Tableau 32 et Tableau 33 avec le Tableau 26 on retrouve la majorité de l'or et de l'argent dans ces composants en commun ainsi qu'un peu du cuivre et du tellure. En regardant dans la contribution des processus en score unique et en utilisation des ressources en minéraux et métaux, on retrouve les procédés les plus impactant liés à ces éléments. « Gold, unrefined {RoW}| gold mine operation and gold production, unrefined | Cut-off, U », « Gold {RoW}| silver-gold mine operation with refinery | Cut-off, U » et « Silver {RoW}| silver-gold mine operation with refinery | Cut-off, U »

Les composés en communs, encadrés en bleu des figures précédentes correspondant à l'emballage, les composants électroniques et le système de gestion, ont été analysés et les points chauds ont été identifiés en Annexe 2.

- Emballage de la batterie : les impacts viennent principalement des composés électroniques et peu des capots en cuivre et aluminium

- Composants électroniques : les impacts viennent principalement du connecteur électronique
- Système de gestion : les impacts viennent principalement du système d'interface et du système de courant faible.
- Système de faible courant : les impacts viennent des composants électroniques

Comparaison avec la méthode de dissipation des ressources

La méthode de dissipation des ressources minérales développée par (Charpentier Poncelet et al., 2021) vise à améliorer la prise en compte de l'épuisement des ressources minérales dans l'évaluation du cycle de vie (ACV). L'objectif principal est de mieux évaluer les impacts environnementaux liés à la dissipation irréversible des métaux, un aspect souvent sous-estimé dans les méthodologies classiques. Cette méthode s'appuie sur un concept élargi de la dissipation des métaux, intégrant leur dispersion dans l'environnement ou leur inclusion dans des formes non recyclables, ce qui empêche leur réintroduction dans le cycle économique. Elle est appliquée à 61 métaux, couvrant ainsi un large éventail de ressources critiques et stratégiques.

La déplétion d'un métal et sa dissipation sont deux concepts différents. La déplétion concerne la diminution de la masse de métaux disponible dans la croûte terrestre comme vu avec l'indicateur ADP, alors que la dissipation représente la diminution de la masse de métaux disponibles après leur extraction (donc dans la technosphère) et a donc un lien concret avec la criticité. La figure ci-dessous donne la dissipation et la déplétion pour certains métaux.

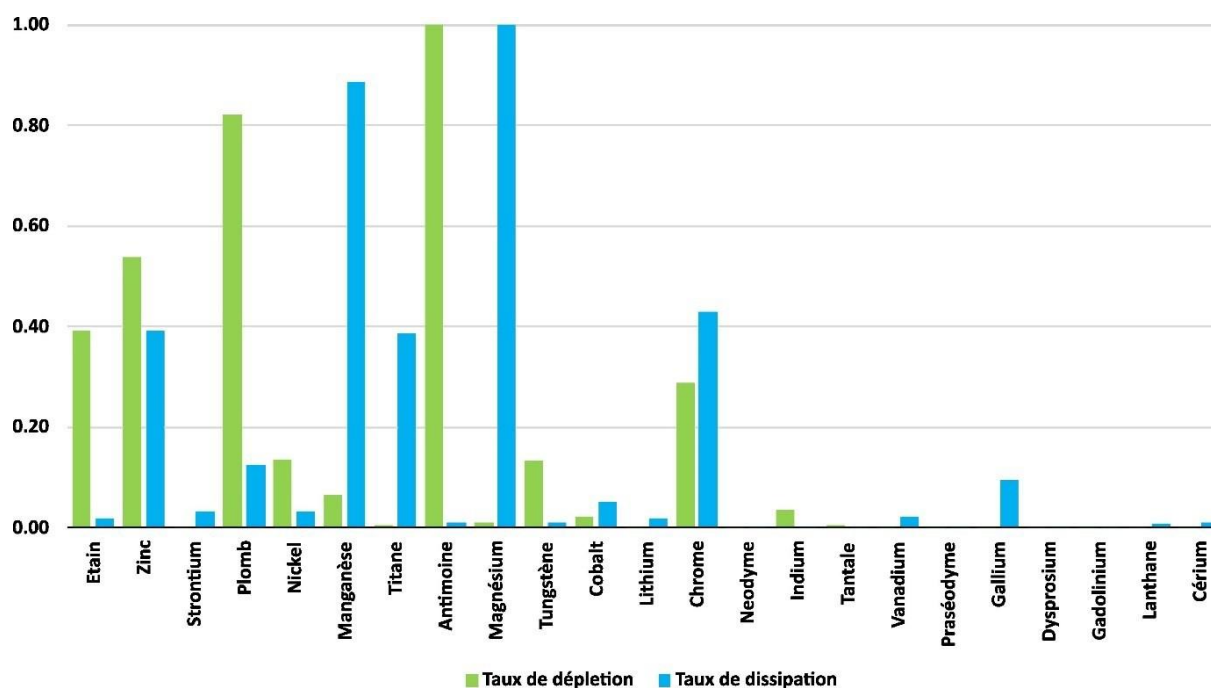


Figure 39: Taux globaux de déplétion et de dissipation pour 23 métaux collectés par ecosystem. Les valeurs affichées sont normalisées avec les taux maximaux observés pour chacun d'eux (taux de déplétion maximal (antimoine) : 7,40E-08 ; taux de dissipation maximal (Charpentier et al., 2022)

Pour la mise en œuvre de la méthode de dissipation, cette dernière utilise des modèles spécifiques pour quantifier les flux de dissipation à chaque étape du cycle de vie, depuis l'extraction jusqu'à la fin de vie afin de mesurer les impacts liés à la dissipation, incluant la pollution, l'énergie nécessaire à l'extraction de métaux alternatifs et les changements climatiques associés. Ces flux sont combinés avec des données sur la disponibilité des ressources, leur importance stratégique et les technologies de

recyclage existantes. L'approche propose des facteurs de caractérisation spécifiques pour évaluer l'impact de la dissipation sur l'environnement et les ressources. Elle met également en avant l'importance de distinguer les métaux selon leur criticité, car les impacts environnementaux varient fortement en fonction de leur taux de recyclage et de leur abondance dans la croûte terrestre.

Deux indicateurs de la méthode sont intéressants pour comparer avec les résultats précédents. L'**ADR (Annual Dissipative Rate)**, un indicateur mesurant le taux annuel de dissipation d'un métal, c'est-à-dire la quantité de métal perdue de manière irréversible dans l'environnement ou sous une forme non recyclable, rapportée à la disponibilité globale estimée de la ressource. Il reflète l'intensité de la dissipation d'une ressource et sa criticité en termes de durabilité. Le **PVLR (Potential Value Loss Rate)** un indicateur évaluant la perte potentielle de valeur économique liée à la dissipation d'un métal. Il prend en compte la rareté, l'importance stratégique et le coût de remplacement du métal perdu, offrant ainsi une perspective économique et stratégique pour prioriser les efforts de réduction des pertes. Etant disponible dans SimaPro, il est intéressant d'analyser les deux batteries avec cette méthode et de comparer les résultats avec les méthodes d'analyse environnementales EF3.1 et de Recipe2016 Midpoint(H)

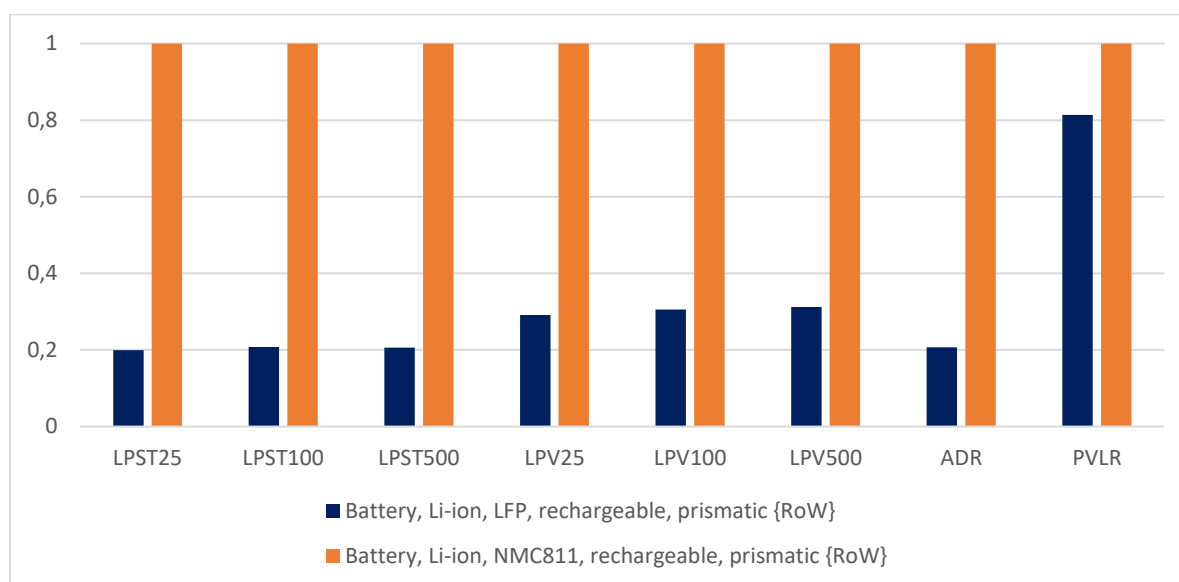


Figure 40 Résultats de l'analyses des deux batteries avec la méthode dissipation des ressources, avec les valeurs maximales apportées à 0

On voit dans la Figure 40 que la batterie NMC811 a plus d'impacts que la batterie LFP pour tous les indicateurs de la méthode. Il y a donc plus de dissipation de ressources dans cette batterie. En regardant les indicateurs ADR et PVLR en particulier dans les Tableau 34 et Tableau 35, on voit que pour l'indicateur ADR, la majorité des impacts de la batterie NMC811 viennent du silicium, du fer et du magnésium, ils doivent donc être utilisés de façon irréversible dans cette batterie.

Il y a plus d'impact du fer pour la batterie NMC811 que pour la batterie LFP, ce qui est contre-intuitif mais expliqué par les limites de l'inventaire vu plus tôt avec le tellure (voir partie 5.2). En effet, le fer se trouve majoritairement alloué au sulfate de cobalt et au sulfate de nickel, utilisés en matière active dans la cathode NMC811 alors que les composants de la batterie LFP n'ont pas autant de fer alloué. Le cobalt est issu un minerai qui contient plus de 34 kg de fer pour 1 kg de cobalt, selon les données industrielles. Cette teneur en fer, qui est significative, est répartie (allouée) entre différents co-produits en fonction de leur teneur en cobalt dans le minerai dont le sulfate de nickel et le sulfate de cobalt.

Tableau 34 Contribution des éléments à l'indicateur ADR, en pourcentage et tronqué à 0.1%

ADR					
	Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW}			Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW}	
	Contribution (%)	Kg Fe-eq		Contribution (%)	Kg Fe eq
Total de Matière première	100	1458,0812	Total de Matière première	100	7046,4373
Barium	29,021782	423,16115	Silicon	41,65909	2935,4817
Aluminium	16,094	234,66358	Iron	16,228598	1143,538
Copper	14,098662	205,56993	Magnesium	14,509898	1022,4309
Lithium	8,3462886	121,69566	Barium	7,5784521	534,01088
Iron	7,7835463	113,49042	Copper	6,113276	430,76816
Silicon	4,9754232	72,54571	Aluminium	3,4384068	242,28518
Zinc	3,9818475	58,058569	Cobalt	1,9149559	134,93617
Gallium	3,3774184	49,245503	Manganese	1,8987403	133,79354
Magnesium	3,0438294	44,381504	Nickel	1,710961	120,5618
Selenium	2,7422382	39,984059	Lithium	1,3579457	95,68679
Chromium	1,100614	16,047845	Chromium	1,018425	71,762679
Lead	0,79282922	11,560094	Zinc	0,76936919	54,213118
Titanium	0,78236042	11,40745	Gallium	0,53718822	37,852631
Manganese	0,77730421	11,333726	Selenium	0,49822378	35,107026
Nickel	0,66846996	9,7468347	Lead	0,15653656	11,03025
Molybdenum	0,65029812	9,4818745	Titanium	0,13602206	9,5847095
Tin	0,25522403	6,1772585	Molybdenum	0,11818262	8,3276642
Hafnium	0,24738471	3,7213735	Tin	0,07875007	5,5490742
Tantalum	0,22964369	3,6070699	Hafnium	0,0518603	3,6543037
Cobalt	0,15501955	3,3483915	Tantalum	0,04446802	3,1334112
Tellurium	0,11756516	2,2603109	Tellurium	0,02816474	1,9846106
Cerium	0,1038999	1,7141955	Cerium	0,0153581	1,0821986
Scandium	0,42365669	1,5149449	Restant Matière première	0,12422819	0,90894648

Pour l'indicateur PVLR, on voit qu'il y a plus d'éléments ayant une perte de valeur élevée (8 éléments sont au-dessus de 10\$1998/year pour NMC811 et 4 pour LFP). Cet indicateur étant basé sur la rareté et l'importance stratégique, on retrouve les terres rares comme le gallium dans les deux batteries. Pour la batterie NMC811 on retrouve également le silicium et le cobalt comme dans l'indicateur ADR.

Tableau 35 Contribution des éléments à l'indicateur PVLR, en pourcentage et tronqué à 0.1%

PVLR					
	Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW}			Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW}	
	Contribution (%)	\$US1998/year		Contribution (%)	\$US1998/year

Total de Matière première	100,000	220,53569	Total de Matière première	100	271,06449
Gallium	53,635	118,28534	Gallium	33,541911	90,920211
Scandium	23,513	51,854336	Silicon	11,636238	31,541709
Selenium	6,798	14,991721	Scandium	11,477675	31,111902
Hafnium	3,543	7,8142878	Cobalt	9,1756742	24,871995
Copper	3,192	7,0384038	Magnesium	8,85278	23,996743
Tantalum	1,542	3,399869	Copper	5,4410856	14,748851
Aluminium	1,204	2,6561331	Selenium	4,8560822	13,163114
Lithium	1,068	2,355544	Nickel	4,3784057	11,868303
Molybdenu m	0,778	1,7162372	Hafnium	2,8308584	7,673452
Tellurium	0,768	1,6929195	Iron	1,6874774	4,5741519
Magnesium	0,472	1,0416465	Tantalum	1,0895631	2,9534187
Nickel	0,435	0,95949456	Aluminium	1,0117154	2,7424012
Silicon	0,353	0,77950261	Lithium	0,68327491	1,8521156
Gold	0,345	0,76059603	Molybdenu m	0,55607541	1,507323
Tin	0,305	0,67176428	Tellurium	0,54836637	1,4864265
Zinc	0,301	0,66411446	Manganese	0,33778824	0,67662408
Cobalt	0,280	0,61718942	Chromium	0,29980135	0,6201275
Silver	0,275	0,60588609	Gold	0,24961738	0,60345051
Titanium	0,215	0,47489634	Zinc	0,22877489	0,5382479
Iron	0,206	0,4539617	Tin	0,22262249	0,43035026
Barium	0,155	0,34101835	Silver	0,19856821	0,39901498
Chromium	0,082	1,3608297	Barium	0,15876305	2,784559
Manganese	0,035	220,53569	Titanium	0,14720297	271,06449
Restant Matière première	0,499	118,28534	Restant Matière première	0,38967848	90,920211

A présent on peut comparer ces indicateurs de dissipation avec les indicateurs principaux pour les deux batteries avec la méthode EF 3.1 soit « climate change » et « resource use, minerals and metals » et l'équivalente de « resource use, minerals and metals » dans la méthode Recipe 2016 Midpoint (H) « Mineral resource scarcity ». La Figure 41 montre que la batterie NMC811 a plus d'impacts pour tous les indicateurs utilisés. La méthode ADR montre que bien que les impacts environnementaux mesurés pour les deux batteries avec la méthodologie d'analyse d'impacts de cycle de vie EF3.1 soient proches, la dissipation des ressources est plus élevée pour la batterie NMC811. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de cobalt et de nickel dans NMC811, qui sont des ressources plus critiques selon la méthode ADR alors que le fer (dans LFP), étant plus abondant, contribue moins à la déplétion. L'utilisation de l'indicateur ADR dans des études liant l'ACV et la criticité serait donc pertinent.

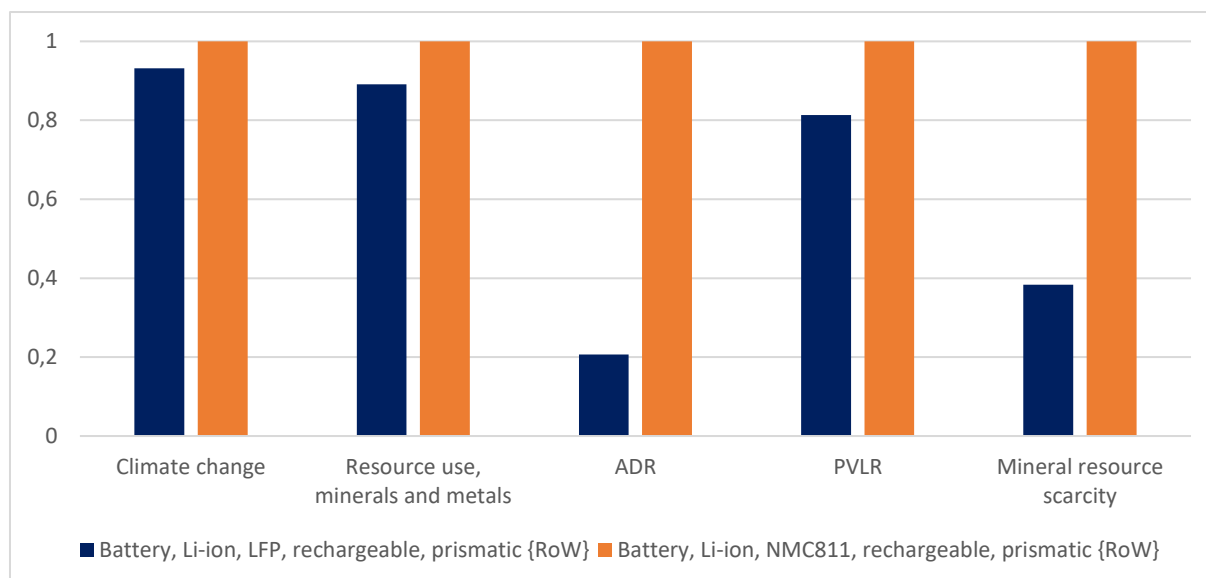


Figure 41 comparaison des résultats des méthodes EF3.1, dissipation et Recipe 2016 Midpoint (H) avec la plus grande valeur reportée à 100%

Nous allons à présent comparer la contribution des 10 éléments les plus impactant pour les différents indicateurs pour les deux batteries

Tableau 36 Contribution en pourcentage des 10 éléments les plus impactant pour chaque indicateur pour la batterie LFP, les éléments en vert sont dans tous les indicateurs, ceux en jaune dans 3 indicateurs sur 4 et ceux en orange dans 2 indicateurs sur 4

LFP									
resource use, minerals and metals		ADR		PVLR		Mineral scarcity			
Tellurium	42,225	Barium	29,022	Gallium	53,635	Copper	25,936		
Gold	31,565	Aluminium	16,094	Scandium	23,513	Molybdenum	18,643		
Copper	9,272	Copper	14,099	Selenium	6,798	Lithium	11,596		
Silver	7,523	Lithium	8,346	Hafnium	3,543	Gold	8,677		
Selenium	2,995	Iron	7,784	Copper	3,192	Aluminium	8,342		
Molybdenum	2,966	Silicon	4,975	Tantalum	1,542	Tantalum	4,896		
Lead	1,448	Zinc	3,982	Aluminium	1,204	Nickel	4,576		
Tin	0,866	Gallium	3,377	Lithium	1,068	Silver	3,738		
Zinc	0,561	Magnesium	3,044	Molybdenum	0,778	Iron	3,003		
Sulfur	0,294	Selenium	2,742	Tellurium	0,768	Phosphorus	2,484		

- Plus contributifs dans tous les indicateurs pour LFP : Cuivre
- Plus contributifs dans 3 indicateurs sur 4 pour LFP : Sélénium, Molybdène, Aluminium, Lithium
- Plus contributifs dans 2 indicateurs sur 4 pour LFP : Tellure, Or, Argent, Zinc, Fer, Gallium, Tantale

Tableau 37 Contribution en pourcentage des 10 éléments les plus contributifs pour chaque indicateur pour la batterie NMC811, les éléments en vert sont dans tous les indicateurs, ceux en jaune dans 3 indicateurs sur 4 et ceux en orange dans 2 indicateurs sur 4

NMC811									
resource use, minerals and metals		ADR		PVL		Mineral scarcity			
Tellurium	33,052	Silicon	41,659	Gallium	33,542	Nickel	21,714		
Gold	25,034	Iron	16,229	Silicon	11,636	Copper	20,847		
Copper	17,322	Magnesium	14,510	Scandium	11,478	Silicon	13,415		
Sulfur	10,538	Barium	7,578	Cobalt	9,176	Iron	11,606		
Silver	5,958	Copper	6,113	Magnesium	8,853	Magnesium	6,462		
Selenium	2,345	Aluminium	3,438	Copper	5,441	Molybdenum	6,281		
Molybdenum	2,322	Cobalt	1,915	Selenium	4,856	Cobalt	3,827		
Lead	1,232	Manganese	1,899	Nickel	4,378	Lithium	3,497		
Tin	0,694	Nickel	1,711	Hafnium	2,831	Aluminium	3,304		
Chromium	0,577	Lithium	1,358	Iron	1,687	Gold	2,961		

- Plus contributifs dans tous les indicateurs pour NMC811 : Cuivre
- Plus contributifs dans 3 indicateurs sur 4 pour NMC811 : Silicium, Fer, Magnesium, Cobalt, Nickel
- Plus contributifs dans 2 indicateurs sur 4 pour NMC811 : Or, Sélénium, Molybdène, Lithium, Aluminium

On voit dans les tableaux ci-dessus que le cuivre est le seul élément le plus contributif commun à toutes les méthodes d'analyse environnementale et de dissipation. Il est présent en quantité non négligeable dans les deux batteries et participe donc à l'impact environnementale par son extraction. Sa présence dans les méthodes de dissipation montre également qu'une partie est utilisée de façon irréversible et non recyclable. On voit également que la plupart des éléments les plus contributifs de l'indicateur « mineral scarcity » de la méthode Recipe 2016 Midpoint (H) se retrouve également dans la majorité des indicateurs contrairement à ceux de l'indicateur « resource use, minerals and metals ». Avec cette méthode, pour les deux batteries, les éléments les plus contributifs sont vraiment des éléments présents dans les deux batteries soit le cuivre, le lithium, l'or, l'aluminium et le fer pour la batterie LFP et le fer, le nickel, le cuivre, le magnésium, le cobalt et le lithium pour NMC811.

Conclusions à tirer de l'évaluation environnementale

Lors de l'analyse environnementale avec la méthode d'analyse d'impacts de cycle de vie EF3.1, il a été constaté que les deux batteries ont des impacts proches mêmes si la batterie NMC811 a plus d'impacts globalement et pour 11 indicateurs sur 16. Il a également été constaté la majorité des impacts des deux batteries viennent de l'utilisation des ressources en minéraux et métaux, indicateur basé sur le taux d'extraction et la réserve ultime des ressources, faisant des batteries un bon cas d'étude pour une comparaison avec des études de criticité. Les procédés contribuant au changement climatique, deuxième catégorie la plus impactante, ne sont pas les plus impactants dans les impacts globaux et donc n'ont pas été plus analysés.

Les éléments contribuant le plus aux impacts globaux et à la catégorie d'impact « resource use, minerals and metals » sont, pour les deux batteries :

- Le cuivre (NMC811 et LFP), élément identifié dans les points chauds de la production des deux batteries car présent dans les composés électroniques et le collecteur de courant
- L'or (NMC811 et LFP), élément identifié dans les points chauds de la production des deux batteries par sa présence dans les composants électroniques et électriques
- L'argent (NMC811 et LFP), présent dans les composés électroniques et dans la production de l'or

- Le soufre (NMC811), nécessaire à la fabrication de sulfate de cobalt et nickel, matériaux actifs de la batterie NMC811.
- Le tellure (NMC811 et LFP), non pas utilisé en matière première mais étant un sous-produit de l'extraction du cuivre comme expliqué dans la comparaison globale des deux batteries. Il est associé par exemple au processus « Copper concentrate, sulfide ore {RoW}| copper mine operation and beneficiation, sulfide ore | Cut-off, U » qui est l'un des procédés les plus impactant dans les deux batteries.

Pour la batterie LFP, nous avons vu que la majorité des impacts liés à l'utilisation des ressources en minéraux et métaux viennent la production de la cellule et des composants électroniques. La majorité des impacts de la **cellule** viennent du **collecteur de courant en cuivre** et de l'utilisation de **cuivre** de qualité anode et peu d'impacts viennent de la cathode. L'or et l'argent n'ont quant à eux que peu d'impacts dans la cellule, se retrouvant majoritairement dans les composants électroniques.

Pour la batterie NMC811, nous avons vu que les impacts liés à l'utilisation des ressources en minéraux et métaux viennent également de la production de la cellule et des composants électroniques. Les impacts de la cellule diffèrent avec celle de la batterie LFP car en plus des impacts du **collecteur de courant en cuivre et du cuivre de qualité anode**, la cathode a des impacts non négligeables par la présence de **sulfate de nickel et de cobalt**. Comme pour la batterie LFP, l'or et l'argent n'ont quant à eux que peu d'impacts dans la cellule.

Pour les éléments communs aux deux batteries, les impacts de l'emballage viennent des composés électroniques qui le composent, les impacts des composés électroniques viennent des **connecteurs électriques** et les impacts du système de gestion viennent des **circuits imprimés**, des composés électroniques. On y retrouve bien la majorité de **l'or et de l'argent** et du cuivre en moindre quantité.

Quant à la comparaison entre la méthode EF3.1 et la méthode de dissipation de (Charpentier Poncelet et al., 2021), comme montré dans la Figure 42, tous donnent en résultats que la batterie NMC811 a plus d'impacts que la batterie LFP. On note cependant que l'indicateur ADR donne des résultats différents de la méthode EF3.1 qui se rapproche plus de ceux de l'indicateur PVLRL. Quand on regarde plus précisément les éléments les plus impactant, peu des éléments identifiés avec la méthode ADP ressortent dans les indicateurs de dissipation en raison de la différence entre les méthodes. Le seul élément qui ressort dans toutes les méthodes et les deux batteries est le cuivre, utilisé dans de nombreux composants des batteries. L'indicateur ADR plus d'éléments impactant en commun avec l'indicateur mineral scarcity de la méthode Recipe 2016 Midpoint (H), ce qui est intéressant si on cherche à comparer des méthodes de dissipation et d'épuisement donnant des résultats plus ou moins proches.

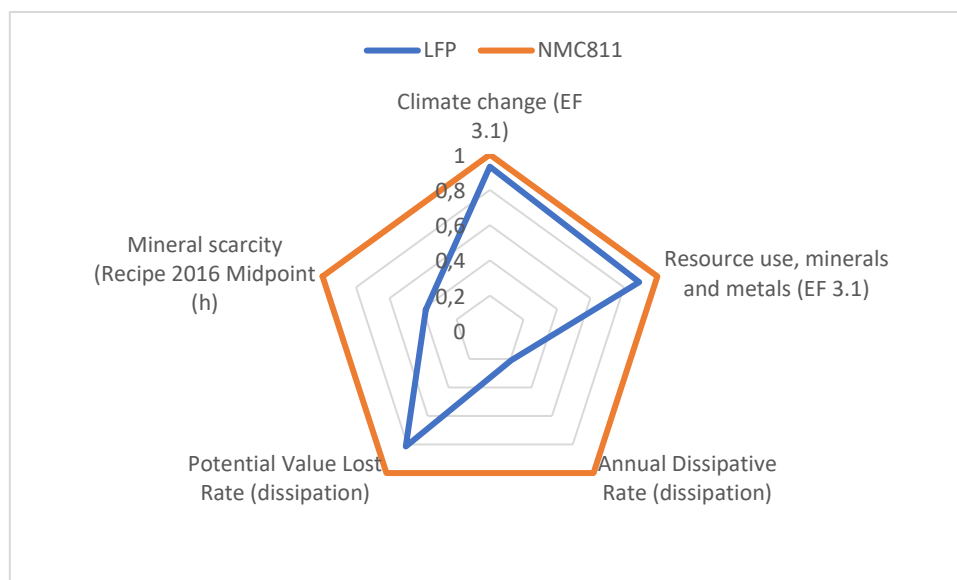


Figure 42 Comparaison des impacts des deux batteries avec tous les indicateurs avec la plus grande valeur reportée à 100%

4.2.3. Application du cadre IRTC

Introduction à la méthode

Comme introduit dans la section 2.1, le modèle IRTC fournit un moyen d'effectuer une évaluation de la criticité des matières premières. Ce modèle n'a pas été développé dans le contexte de l'ACV ou de l'ACV sociale et sociétale (ACV S), et ne suit donc pas nécessairement les normes ISO 14040/44. Cependant, basé sur les expériences acquises durant le projet IRTC, un guide pas à pas est présenté par Helbig et al. (2021) pour mener à bien une évaluation de la criticité, qui peut être appliqué au modèle IRTC.

Inspiré par le cadre de l'ACV, cette évaluation suit les étapes suivantes :

1. Définition des objectifs et du champ d'application,
2. Sélection et évaluation des indicateurs,
3. Définition d'une méthode d'agrégation,
4. Interprétation et communication des résultats.

Les étapes présentées dans la Figure 43 sont appliquées au cadre IRTC par Schrijvers et al. (2024) pour les matériaux biosourcés dans le cadre du projet Horizon Europe CALIMERO.

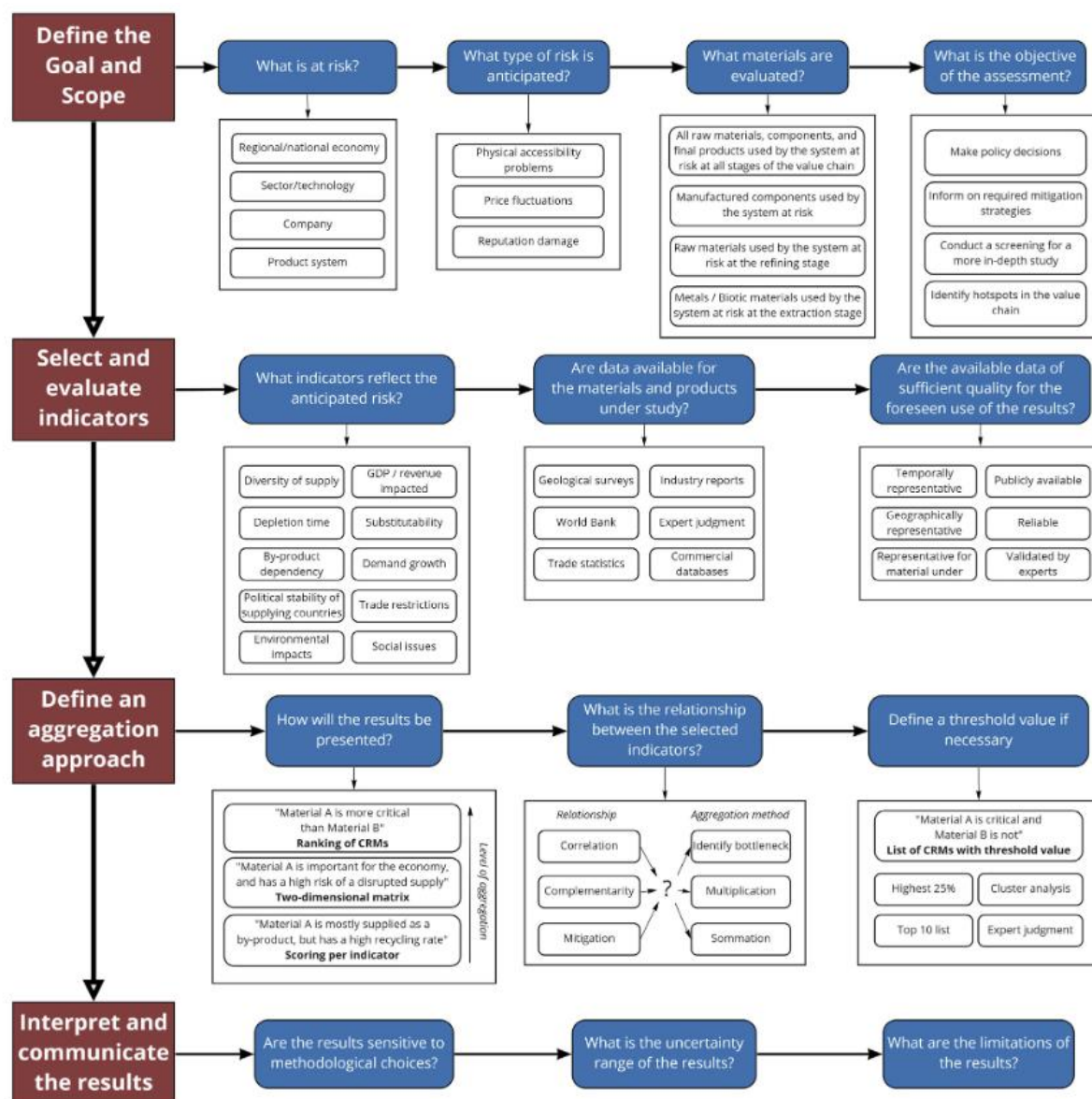


Figure 43 Orientation étape par étape pour la conception et la communication d'une évaluation de criticité, avec des exemples de choix méthodologiques potentiels (Helbig et al., 2021)

Définition des objectifs et du champ d'application

Système à risque

Un aspect clé de l'objectif et du champ d'application d'une évaluation de criticité est la définition du "système à risque". Ce dernier représente la perspective sous laquelle l'évaluation est conduite. Par exemple, pour la liste des matières premières critiques de l'UE, le "système à risque" est l'économie européenne. Dans cette étude de cas, le "système à risque" est défini comme le **fabricant d'un véhicule électrique**, qui doit choisir une batterie spécifique pour son design.

Types de risques anticipés

Comme introduit dans la Section 2.1.4, le cadre IRTC considère que le système à risque peut subir trois types de risques liés à l'utilisation de matières premières :

- Les problèmes potentiels d'accessibilité physique

- Les fortes fluctuations de prix
- L'atteinte à la réputation

Objectifs de l'étude

Cette étude vise à fournir des informations pour :

- Identifier les points critiques pour deux types de batteries.
- Sélectionner des mesures d'atténuation pour réduire les risques pour l'entreprise.

Matériaux évalués

Les perturbations d'approvisionnement peuvent se produire à tout point de la chaîne de valeur, au niveau de l'extraction ou du raffinage, mais aussi durant la production de composants ou de produits finis. Idéalement, chaque flux intermédiaire utilisé par le fabricant est évalué pour détecter d'éventuels goulots d'étranglement.

Cependant, les données disponibles dans l'outil IRTC (IRTC, 2023) sont **limitées aux étapes d'extraction et de raffinage des métaux**. Cette étude se concentre donc sur ces flux, en supposant que des perturbations à ces étapes affecteraient également la production des composants. Pour une analyse complète, chaque étape de la chaîne de valeur doit être examinée avec les mêmes indicateurs

Pour réaliser une évaluation de la criticité, il est nécessaire de savoir à partir de quels composants, et donc de quelles matières premières, un produit est fabriqué. En général, dans les évaluations de criticité, les informations sur le contenu en matières premières sont collectées à partir d'une revue de littérature. Par exemple, (Carrara et al., 2023b) ont identifié les matières premières suivantes comme pertinentes pour les technologies de batteries :

- **Cuivre** : utilisé comme feuille collectrice de courant du côté de l'anode, dans les fils et autres parties conductrices.
- **Graphite** : naturel ou synthétique de haute pureté, utilisé dans l'électrode d'anode de toutes les batteries Li-ion.
- **Silicium** : utilisé dans les anodes futures pour améliorer la densité énergétique.
- **Titane** : utilisé dans les matériaux et revêtements d'anodes futures, dans les batteries LTO, et pour l'emballage des batteries.
- **Phosphore** : utilisé dans les matériaux cathodiques des batteries LFP.
- **Aluminium** : utilisé pour l'emballage des batteries ou comme feuille collectrice de courant (cathode), dans les matériaux cathodiques des batteries NCA, et comme alumine de haute pureté (HPA) dans les revêtements.
- **Niobium** : utilisé dans les matériaux d'anode et de cathode futurs (revêtements) pour améliorer la stabilité et la densité énergétique.
- **Cobalt** : utilisé dans les matériaux cathodiques des batteries LCO, NCA et NMC.
- **Lithium** : utilisé dans les matériaux cathodiques (LMO, NMC, NCA, LMO, LFP, etc.) et comme sel (électrolyte). Le lithium métallique est envisagé pour les anodes futures.
- **Manganèse** : utilisé dans les matériaux cathodiques des batteries NMC et LMO.
- **Nickel** : utilisé sous forme d'hydroxyde ou de composés intermétalliques dans les batteries NMC et NCA.

Explorer les **listes des matériaux des batteries** dans ecoinvent permet une vue d'ensemble plus précise des matières premières extraites de l'écosphère, ainsi qu'une ventilation des matériaux à différents stades de production pour des batteries spécifiques.

Lors de l'utilisation d'ecoinvent, les informations sur les flux de matériaux pertinents peuvent être obtenues de deux manières

- De haut en bas (Top-down): en partant du produit final, les flux intermédiaires peuvent être identifiés à chaque étape de production (c'est-à-dire à chaque niveau de processus unitaire). Cette

approche est fiable pour obtenir un aperçu complet de toutes les étapes de production et des dépendances des matériaux. Seules les matières premières utilisées dans le produit (ou sa production) sont incluses, reflétées par des quantités correctes. Cependant, cela repose sur une exploration manuelle de la chaîne de production, ce qui peut devenir très chronophage, surtout si les composants utilisant les matières premières ne sont pas directement visibles.

- De bas en haut (Bottom-up) : une analyse d'inventaire peut être réalisée pour chaque produit afin d'obtenir une liste des flux élémentaires attribués au produit. Il s'agit d'une méthode automatisée permettant d'obtenir rapidement un aperçu complet de tous les métaux liés à un produit donné. Cependant, la liste des flux élémentaires inclut des matières premières extraites lors de l'exploitation minière mais n'entrant pas dans le produit final, en raison du processus d'allocation des flux élémentaires aux produits métalliques. De plus, les quantités signalées dans l'analyse d'inventaire peuvent ne pas correspondre aux quantités totales utilisées dans le produit, également en raison de ce processus d'allocation

Dans cette étude de cas, l'approche de bas en haut est appliquée pour obtenir une liste des matières premières utilisées dans les deux batteries évaluées, via les étapes suivantes :

1. Pour chaque batterie, une analyse d'inventaire est effectuée à l'aide des ensembles de données ecoinvent suivants dans SimaPro v.10.0.1.2. L'inventaire est extrait de l'option « inventaire », en se concentrant sur « matière première », avec les options « par sous-compartiment » et « unités par défaut ». Les résultats sont exportés vers Excel.
 - a. 1 kg Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW}| battery production, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | Cut-off, U
 - b. 1 kg Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW}| battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic | Cut-off, U
2. Dans Excel, un tableau est créé montrant les substances (c'est-à-dire les flux élémentaires) pour chaque entrée intermédiaire des batteries. Les substances des sous-compartiments biotiques, dans l'air, dans l'eau et sur terre sont retirées de l'aperçu en utilisant la fonction de filtrage intégrée d'Excel. Ces substances sont exclues car elles ne sont pas caractérisées dans le modèle IRTC et ne sont pas dans le champ d'application de l'évaluation de criticité présentée dans ce rapport.
3. Les quantités de chaque substance attribuée à la production des batteries sont multipliées par la quantité d'une batterie nécessaire pour un pack complet (435,8 kg pour une batterie NMC811 et 562,3 kg pour une batterie LFP).

Un aperçu des flux élémentaires et des quantités correspondantes est présenté dans le Tableau 56 dans l'Annexe 1.

Sélection et évaluation des indicateurs

Sélection des indicateurs

Les matières premières sont intégrées dans l'outil IRTC (IRTC, 2023) sur une large gamme d'indicateurs, listés dans le Tableau 38. Ces indicateurs sont liés à un modèle cause-effet des risques d'entreprise mentionnés (problèmes potentiels d'accessibilité physique, fortes fluctuations de prix, atteinte à la réputation), comme présentés dans la Figure 12, et observables dans l'outil IRTC (IRTC, 2023). Une vue plus détaillée de ces indicateurs, incluant la méthode de transformation des scores, les sources de données et les années de référence appliquées, est donnée en Annexe 3.

Tableau 38 Aperçu des indicateurs et des sources de données inclus dans le modèle IRTC

Paramètre	Source des données
Concentration des pays miniers (IHH)	USGS
Concentration des pays de raffinage (IHH)	USGS
WGI – Political stability & absence of Violence/terrorism	World Bank
WGI - Government effectiveness	World Bank

WGI - Regulatory Quality	World Bank
WGI – Rule of law	World Bank
WGI – Political stability & absence of Violence/terrorism	World Bank
WGI – Voice and accountability	World Bank
WGI – Control of corruption	World Bank
Fragile States Index	Fund for Peace
Restrictions à l'exportation entre 2017 et 2020	OCDE
Enabling trade index	World Economic Forum
Analyse du cycle de vie du berceau à la porte	(Graedel et al., 2015)
Environmental Performance Index	(Wendling et al., 2020)
Human Development Index (HDI)	UNDP
Global Peace Index	(Institute for Economics & Peace, 2022)
Corruption Perception Index	(Transparency International, 2021)
Travail des enfants (% âgés de 5 à 17 ans)	(UNSDG, 2022)
Liste des substances extrêmement préoccupantes candidates à l'autorisation	(ECHA, 2023)
Dépendance aux sous-produits	(Nassar et al., 2015a)
Augmentation prévue de la demande de technologies énergétiques entre 2020 et 2050	(Gregoir and Acker, 2022)
Augmentation prévue de la demande de technologies émergentes entre 2020 et 2040	(F. Marscheider-Weidemann et al., 2021)
Augmentation attendue de la demande dans les secteurs stratégiques entre 2020-2030	(Carrara et al., 2023b)
Policy Perception Index des pays détenant des réserves	USGS
Demande d'énergie cumulée	(Nuss and Eckelman, 2014)
Concentration d'entreprises fournisseurs (IHH)	Différentes sources variées

Attribution des scores aux indicateurs

Dans l'outil IRTC, les scores d'indicateurs peuvent être obtenus pour chaque matière première incluse (voir Figure 44). L'outil étant encore en développement, cela pose certaines limites :

- Il n'y a actuellement aucune fonctionnalité pour extraire les scores d'indicateurs pour toutes les matières premières en une fois ou pour un indicateur spécifique. Les scores ne peuvent être consultés que par matière première.
- La fonctionnalité d'identification des hotspots pour une matière première sélectionnée (mode « évaluation spécifique ») est encore en phase bêta et présente encore des dysfonctionnements, rendant l'évaluation peu fiable.

Pour contourner ces limites, les données brutes de l'outil IRTC sont utilisées dans cette évaluation, sous format Excel. Ces données sont actuellement accessibles uniquement au développeur de l'outil IRTC (c'est-à-dire WeLOOP).

Cobalt

Supply is dominated in a few countries	Score	Market share represented by score	
Concentration of mining countries	88.03	93%	(i)
Concentration of refining countries	86.45	87%	(i)
Concentration of supplying countries	88.03	93%	(i)
Supplying country is subject to an unstable investment climate	Score	Market share represented by score	
Fragile states index (2022)	76.15	93%	(i) (+)
WGI - Regulatory quality (2020)	77.71	93%	(i) (+)
WGI - Political stability & absence of violence (2020)	78.29	93%	(i) (+)
WGI - Governance effectiveness (2020)	77.19	93%	(i) (+)

Figure 44 Attribution des scores des indicateurs par matière première dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)

Disponibilité des données

En théorie, l'outil IRTC prévoyait l'évaluation de 82 matières premières sur 24 indicateurs. Cependant, certaines matières premières ont été exclues en raison de difficultés globales dans la collecte des données (agrégats, calcaire, phosphore). Les matières restantes ne sont pas toutes évaluées sur tous les indicateurs en raison de manque de données. Un aperçu du nombre total de matières premières évaluées dans d'autres méthodes d'évaluation des ressources, tel qu'évalué dans ce rapport, ainsi que leur représentativité au sein de l'outil IRTC, est présenté dans le

Tableau 57 en Annexe 1. Notez que, dans ce tableau, les indicateurs listés dans l'Annexe 3, mais non quantifiés dans l'outil IRTC (par exemple, la concentration des entreprises fournisseuses, les catastrophes naturelles et la spéculation) sont déjà exclus.

En raison des lacunes de données mentionnées précédemment, certains indicateurs sont mieux quantifiés que d'autres. Un aperçu de la part des matières premières du Tableau 57 couvertes par chaque indicateur est donné dans le Tableau 58 en Annexe 1. On peut y constater qu'environ 56 % des matières premières listées dans le

Tableau 57 sont intégrées dans l'outil. Les indicateurs se rapportant à la performance des pays fournisseurs de matières premières (comme les Indicateurs de Gouvernance Mondiale (WGI)) sont largement couverts, car les scores d'indicateurs sont basés sur la répartition de la production de matières premières, ce qui est couvert pour presque toutes les matières premières dans l'outil IRTC. Les indicateurs spécifiques aux matériaux, tels que la croissance attendue de la demande, sont limités à seulement quelques matières premières. Dans l'outil IRTC, l'inclusion ou l'exclusion d'une matière première pour un indicateur spécifique est représentée visuellement, comme montré dans la Figure 45.

Il est à noter que, même si un matériau peut recevoir un score pour un certain indicateur (par exemple, le travail des enfants), la représentativité de marché de cet indicateur peut être limitée, car aucun score de pays peut ne pas être disponible pour tous les pays qui fournissent cette matière première spécifique. La représentativité de marché de ces indicateurs est publiée dans l'outil IRTC (IRTC, 2023).

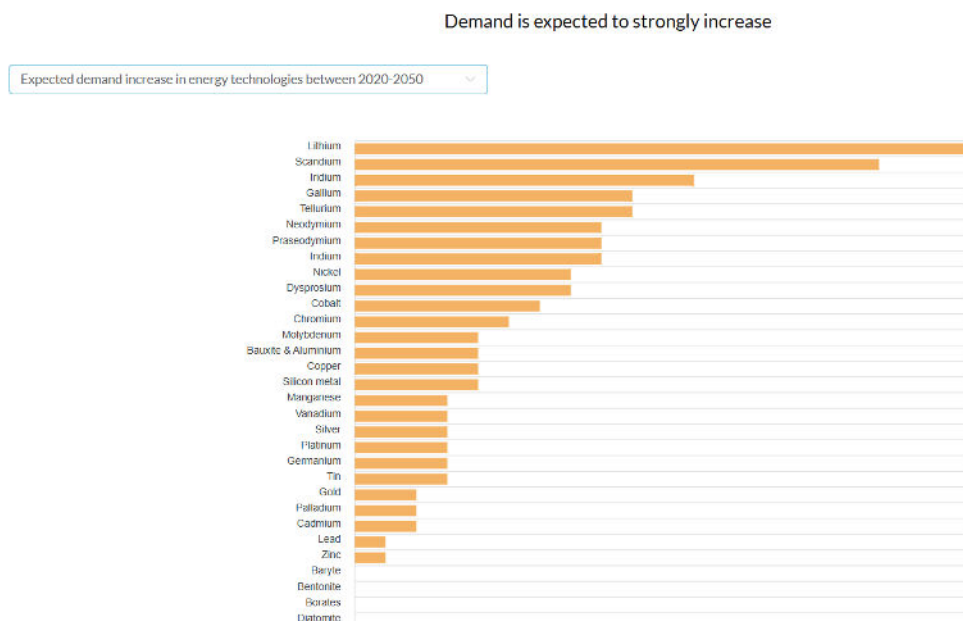


Figure 45 Aperçu des matières premières notées pour un indicateur spécifique (ici, l'augmentation prévue de la demande dans les technologies énergétiques entre 2020-2050) dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)

Qualité des données

Outre l'évaluation de la représentativité de marché des indicateurs par pays dans l'outil IRTC, l'outil ne fournit pas d'informations sur la qualité des données. Dans le domaine de la criticité, il n'existe pas de méthode couramment appliquée pour évaluer la qualité des données. Cependant, une approche basée sur un modèle de pedigree, comme appliqué dans ecoinvent, pourrait également être applicable ici, comme le suggère également (D. Schrijvers et al., 2024)

Approche d'agrégation et valeur de seuil

Dans le modèle IRTC, les indicateurs ne sont pas intégrés dans un score final de criticité. À la place, les scores des matières premières sont comparés entre eux, et un score élevé pour une matière première sur un certain indicateur est traduit en un « point chaud de criticité ».

Cependant, les scores d'indicateurs obtenus à partir de l'outil IRTC sont reclassés sur une échelle de 0 à 100, où le score le plus bas parmi toutes les matières premières disponibles dans l'outil est mis à 0, et la valeur la plus haute à 100, permettant une représentation visuelle de plusieurs indicateurs dans un seul graphique.

Ensuite, une valeur de seuil est appliquée dans Excel. La valeur de seuil détermine quelles matières sont considérées comme « critiques » ou « non-critiques » pour un indicateur spécifique. Étant donné que les scores des matières premières sont classés entre 0 (le plus bas) et 100 (le plus élevé), une valeur de seuil de 25 % fixerait le score seuil à 75, attribuant à toutes les matières premières ayant un score entre 75 et 100 le statut de « critique ». Le pourcentage des matières premières évaluées par chaque indicateur identifié comme « critique » est montré dans le Tableau 39 pour différentes valeurs seuils. Il est observé que, pour certains indicateurs (par exemple, “supply is dominated in a few countries” et “environmental performance index”) une grande proportion des matières premières obtient un score supérieur à la valeur de seuil. Cela dépend de la distribution des scores des indicateurs sur l'échelle de 0 à 100. Si un nombre plus restrictif de matières premières devait être considéré comme critique, une transformation différente de cette échelle pourrait être envisagée.

Dans la démonstration ultérieure de la méthode appliquée à l'étude de cas des batteries, **une valeur de seuil de 33 % est utilisée.**

Tableau 39 Pourcentage de matières premières évaluées identifiées comme « critiques » sur la base de différentes valeurs seuils

Indicator	Percentage of materials critical with threshold value of 25%	Percentage of materials critical with threshold value of 33%	Percentage of materials critical with threshold value of 50%
Supply is dominated in a few countries (bottleneck)	40%	55%	73%
Export restrictions (bottleneck)	41%	45%	57%
Enabling Trade Index (bottleneck)	4%	16%	69%
WGI Rule of law (bottleneck)	3%	6%	37%
Fragile States Index (bottleneck)	3%	16%	62%
WGI Regulatory Quality (bottleneck)	3%	4%	46%
WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)	7%	19%	69%
WGI Government effectiveness (bottleneck)	3%	4%	7%
% supplied as a by-product	54%	57%	59%
Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 for sustainable development scenario (KU Leuven)	7%	7%	11%
Compound Annual Growth Rate between 2018-2040 for sustainable development scenario (DERA)	10%	14%	19%
Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)	29%	29%	57%
Share of current production capacity used in mining (production to reserves ratio)	10%	14%	24%
Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)	21%	58%	79%
Cradle-to-gate LCA	9%	13%	17%
Environmental Performance Index (bottleneck)	51%	65%	88%
Global Peace Index (bottleneck)	4%	6%	19%
Corruption Perception Index (bottleneck)	10%	51%	74%
WGI Control of Corruption (bottleneck)	3%	6%	26%
Child labor (bottleneck)	3%	3%	3%
WGI Voice and Accountability (bottleneck)	34%	40%	63%
Human Development Index (bottleneck)	3%	3%	18%
Cumulative energy demand [MJ-eq/kg]	2%	2%	2%

Substance of very high concern for Authorisation (REACH framework)	3%	3%	3%
--	----	----	----

Interprétation des résultats

Identification des points chauds

Identification des matières premières avec le plus grand nombre de points chauds

Les matières premières évaluées dans l'outil IRTC sont comparées à l'inventaire des matières premières des batteries NMC811 et LFP extrait d'ecoinvent (via SimaPro). Le Tableau 40 montre pour combien d'indicateurs une matière première est considérée comme « critique », si elle est principalement associée aux batteries NMC811, LFP, ou aux deux, ainsi que dans quelle mesure la matière est représentée par les données incluses dans l'outil IRTC.

Les observations suivantes peuvent être faites à partir du Tableau 40:

- Les matières premières suivantes sont les plus préoccupantes, car elles obtiennent un score de « critique » sur au moins 10 indicateurs :
 - o **Cobalt** : principalement pertinent pour les batteries NMC811.
 - o **Tantale** : pertinent pour les batteries NMC811 et LFP.
 - o **Antimoine** : pertinent pour les batteries NMC811 et LFP.
 - o **Graphite** : pertinent pour les batteries NMC811 et LFP.
 - o **Rhodium** : pertinent pour les batteries NMC811 et LFP
- Certaines matières premières ne sont pas considérées comme « critiques » en raison d'un faible score d'indicateur (comme pour le cuivre et le fer). Dans d'autres cas, les matières ne sont pas évaluées sur les indicateurs et ne peuvent donc pas être identifiées comme « critiques ». Cela concerne, par exemple, le mercure, l'yttrium et l'erbium

Tableau 40 Nombre d'indicateurs pour lesquels chaque matière première utilisée dans les batteries NMC811 ou LFP est considérée comme « critique » via l'outil IRTC et représentativité du score pour l'évaluation des matériaux.

Substance	Relative quantity of substance in NMC811 battery inventory	Relative quantity of substance in LFP battery inventory	Number of indicators with score "critical"	Representativeness of indicator scoring (number of indicators assessed)
Cobalt	100%	2%	17	100%
Tantalum	87%	100%	14	92%
Antimony	95%	100%	13	88%
Graphite	100%	64%	10	88%
Rhodium	100%	38%	10	83%
Palladium	100%	33%	9	88%
Tin	90%	100%	9	96%
Vanadium	92%	100%	9	92%
Lanthanum	65%	100%	8	88%
Cerium	63%	100%	7	83%
Dysprosium	100%	56%	7	100%
Europium	64%	100%	7	83%
Gadolinium	63%	100%	7	83%
Holmium	100%	78%	7	83%
Lutetium	100%	78%	7	83%
Neodymium	63%	100%	7	100%
Platinum	100%	44%	7	100%

Praseodymium	63%	100%	7	100%
Samarium	65%	100%	7	83%
Terbium	100%	54%	7	96%
Thulium	100%	78%	7	83%
Yttrium	100%	57%	7	88%
Fluorspar	56%	100%	6	71%
Gallium	77%	100%	6	88%
Magnesium	100%	4%	6	79%
Scandium	60%	100%	6	88%
Barium	100%	79%	5	75%
Manganese	100%	8%	5	92%
Niobium	100%	100%	5	88%
Arsenic	100%	2%	4	79%
Chromium	100%	22%	4	92%
Indium	92%	100%	4	96%
Lead	95%	100%	4	92%
Lithium	79%	100%	4	100%
Silicon	100%	2%	4	75%
Tellurium	88%	100%	4	92%
Boron	100%	85%	3	88%
Feldspar	93%	100%	3	71%
Perlite	100%	79%	3	71%
Titanium	84%	100%	3	88%
Cadmium	92%	100%	2	83%
Gold	89%	100%	2	92%
Molybdenum	88%	100%	2	92%
Nickel	100%	8%	2	96%
Rhenium	88%	100%	2	88%
Aluminium	100%	97%	1	96%
Hafnium	98%	100%	1	75%
Selenium	88%	100%	1	88%
Silver	89%	100%	1	92%
Strontium	100%	90%	1	79%
Sulfur	100%	2%	1	71%
Zinc	93%	100%	1	92%
Zirconium	98%	100%	1	88%
Anhydrite	94%	100%	0	0%
Basalt	97%	100%	0	0%
Borax	94%	100%	0	0%
Calcite	100%	89%	0	0%
Calcium	100%	22%	0	0%
Carbon, organic, in soil or biomass stock	88%	100%	0	0%
Chrysotile	100%	93%	0	0%

Clay, bentonite	97%	100%	0	0%
Clay, unspecified	100%	100%	0	0%
Coal, brown	100%	76%	0	0%
Coal, hard	93%	100%	0	0%
Copper	100%	48%	0	100%
Diatomite	100%	57%	0	0%
Dolomite	100%	98%	0	0%
Erbium	100%	78%	0	0%
Fluorine	24%	100%	0	0%
Gangue	96%	100%	0	0%
Granite	100%	91%	0	0%
Gravel	100%	72%	0	67%
Gypsum	100%	78%	0	67%
Iron	100%	10%	0	88%
Kaolinite	97%	100%	0	0%
Kieserite	95%	100%	0	0%
Laterite	100%	81%	0	0%
Magnesite	100%	17%	0	0%
Mercury	100%	53%	0	0%
Oil, crude, 43.4 MJ per kg	100%	86%	0	0%
Olivine	95%	100%	0	0%
Phosphorus	23%	100%	0	4%
Potassium	100%	80%	0	0%
Potassium chloride	100%	78%	0	0%
Sand	100%	88%	0	67%
Shale	100%	89%	0	0%
Sodium	92%	100%	0	0%
Sodium chloride	100%	68%	0	0%
Sodium nitrate	100%	74%	0	0%
Sodium sulfate	100%	53%	0	0%
Spodumene	79%	100%	0	0%
Steatite	99%	100%	0	0%
Talc	95%	100%	0	71%
Ulexite	99%	100%	0	0%
Uranium	100%	47%	0	0%

Vue d'ensemble des hotspots de criticité par matière première

Ensuite, il est important d'identifier pour quel indicateur spécifique chaque matière première est considérée comme « critique ». Un aperçu est fourni pour un nombre sélectionné de matières premières dans le Tableau 41

. Dans ce tableau, en plus des indicateurs évalués dans l'outil IRTC, trois indicateurs supplémentaires sont inclus :

1. Les émissions mondiales de CO₂ liées à l'extraction d'une matière (Nuss and Eckelman, 2014)
2. Si la matière figure sur la liste des CRM 2023.
3. Si la matière est considérée comme « stratégique » par le Parlement européen.

Un aperçu des hotspots de criticité pour toutes les matières premières évaluées avec au moins un hotspot est présenté dans le Tableau 60 de l'Annexe 4.

Tableau 41 Indicateurs pour lesquels les substances (avec une note de criticité pour le plus grand nombre d'indicateurs) sont considérées comme « critiques » en se basant sur une valeur de seuil de 33 %.

Indicator	Cobalt	Tantalum	Antimony	Graphite	Rhodium
Supply is dominated in a few countries (bottleneck)	Yes		Yes	Yes	Yes
Export restrictions (bottleneck)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Enabling Trade Index (bottleneck)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
WGI Rule of law (bottleneck)	Yes	Yes	Yes		
Fragile States Index (bottleneck)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
WGI Regulatory Quality (bottleneck)	Yes	Yes	Yes		
WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)	Yes	Yes	Yes	Yes	
WGI Government effectiveness (bottleneck)	Yes	Yes			
% supplied as a by-product	Yes		Yes		Yes
Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 for sustainable development scenario (KU Leuven)					
Compound Annual Growth Rate between 2018-2040 for sustainable development scenario (DERA)					
Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)				Yes	
Share of current production capacity used in mining (production to reserves ratio)					
Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Cradle-to-gate LCA					Yes
Environmental Performance Index (bottleneck)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Global Peace Index (bottleneck)	Yes	Yes			
Corruption Perception Index (bottleneck)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
WGI Control of Corruption (bottleneck)	Yes	Yes	Yes		
Child labor (bottleneck)	Yes	Yes			
WGI Voice and Accountability (bottleneck)	Yes		Yes	Yes	
Human Development Index (bottleneck)	Yes	Yes			
Cumulative energy demand [MJ-eq/kg]					Yes
Substance of very high concern for Authorisation (REACH framework)					
Global CO ₂ emissions					
On the 2023 EU list of CRM	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Strategic according to the EC in 2024	Yes			Yes	Yes

Le Tableau 41 montre que le cobalt, par exemple, obtient un score relativement élevé sur les indicateurs suivants :

- Supply is dominated in a few countries (bottleneck)
- Export restrictions (bottleneck)
- Enabling Trade Index (bottleneck)
- WGI Rule of law (bottleneck)
- Fragile States Index (bottleneck)
- WGI Regulatory Quality (bottleneck)
- WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)
- WGI Government effectiveness (bottleneck)
- % supplied as a by-product
- Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)
- Environmental Performance Index (bottleneck)
- Global Peace Index (bottleneck)
- Corruption Perception Index (bottleneck)
- WGI Control of Corruption (bottleneck)
- Child labor (bottleneck)
- WGI Voice and Accountability (bottleneck)
- Human Development Index (bottleneck)
- On the 2023 EU list of CRM
- Strategic according to the EC in 2024

La mention « bottleneck » indique que l'indicateur est, lorsque possible, évalué à la fois au stade de l'extraction minière et au stade du raffinage. Le stade avec le score le plus élevé est retenu comme valeur du « bottleneck ».

La principale raison pour laquelle le cobalt obtient des scores élevés sur ces indicateurs est due à la structure de son approvisionnement. L'approvisionnement est évalué sur la base de « l'offre mondiale ». Au stade de l'extraction minière, 70,6 % du cobalt provient de la République Démocratique du Congo (RDC). Les autres pays (Russie, Australie, Philippines, Canada, Cuba et quelques autres) ne contribuent pas à plus de 4,5 % chacun. En outre, la RDC a une notation défavorable sur tous les Indicateurs de Gouvernance Mondiale (WGI), ainsi que sur d'autres indicateurs évaluant les performances du pays. De plus, le cobalt est principalement fourni en tant que sous-produit.

L'approvisionnement en tantale au stade de l'extraction minière est beaucoup moins concentré que celui du cobalt, bien que la RDC soit également le plus grand fournisseur avec 33 %. Cependant, au stade du raffinage, seuls trois pays sont signalés (Chine, Allemagne et États-Unis). Une hypothèse d'égalité des parts d'approvisionnement a été faite, ce qui rend les résultats incertains, bien que cela aboutisse à une concentration de l'offre plus élevée au stade du raffinage qu'au stade minier. Le rôle de la RDC dans l'exploitation minière entraîne à nouveau un score élevé sur les indicateurs spécifiques au pays.

55 % de l'antimoine est fourni par la Chine, 23 % par la Russie et 12 % par le Tadjikistan, ce qui entraîne une forte concentration de l'offre en provenance de pays ayant des scores relativement élevés en matière d'instabilité. De plus, l'antimoine est principalement fourni en tant que sous-produit.

Graphite 79 % du graphite est fourni par la Chine au stade minier, ce qui entraîne une forte concentration de l'offre. En outre, la Chine obtient également des scores relativement élevés sur les indicateurs spécifiques aux pays. Par ailleurs, la demande de graphite devrait fortement augmenter selon (Carrara et al., 2023a).

Le rhodium est principalement fourni par l'Afrique du Sud (83 %), la Russie (9 %), le Zimbabwe (5 %) et le Canada (3 %). De plus, le rhodium est principalement fourni en tant que sous-produit et est associé à des impacts environnementaux élevés lors de l'extraction et/ou du raffinage. Cela peut sembler contre-intuitif, car les sous-produits se voient généralement attribuer une petite part des impacts environnementaux. Cela peut s'expliquer par le prix relativement élevé du rhodium.

Il convient de noter qu'actuellement, l'outil IRTC ne fournit pas un aperçu de la structure d'approvisionnement de chaque matière première. Cette information ne peut être obtenue qu'en consultant les références bibliographiques rapportées dans l'outil. L'ajout de ces données contextuelles aux fiches des matières premières dans l'outil IRTC est une fonctionnalité en attente.

Points chauds pour les matériaux utilisés en plus grande quantité

Le Tableau 61 en Annexe 5 montre que les matières premières considérées comme « critiques » pour le plus grand nombre d'indicateurs ne sont pas celles utilisées en plus grande quantité dans les batteries. Parmi les matériaux évalués via l'outil IRTC et attribués en plus grande quantité à la batterie NMC811, les points chauds suivants sont identifiés :

- Gravier : aucun point chaud
- Fer:
 - o Global CO₂ emissions
- Soufre:
 - o % supplied as a by-product
- Silicium
 - o Supply is dominated in a few countries (bottleneck)
 - o Export restrictions (bottleneck)
 - o Environmental Performance Index (bottleneck)
 - o WGI Voice and Accountability (bottleneck)
 - o On the 2023 EU list of CRM
 - o Strategic according to the EC in 2024
- Sable: aucun point chaud
- Cuivre:
 - o Global CO₂ emissions
 - o Strategic according to the EC in 2024
- Aluminium
 - o Environmental Performance Index (bottleneck)
 - o Global CO₂ emissions
 - o On the 2023 EU list of CRM
 - o Strategic according to the EC in 2024
- Fluorspar
 - o Supply is dominated in a few countries (bottleneck)

- Export restrictions (bottleneck)
- Enabling Trade Index (bottleneck)
- Environmental Performance Index (bottleneck)
- Corruption Perception Index (bottleneck)
- WGI Voice and Accountability (bottleneck)
- On the 2023 EU list of CRM
- Magnésium
 - Supply is dominated in a few countries (bottleneck)
 - Fragile States Index (bottleneck)
 - WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)
 - Environmental Performance Index (bottleneck)
 - Corruption Perception Index (bottleneck)
 - WGI Voice and Accountability (bottleneck)
 - Global CO₂ emissions
 - On the 2023 EU list of CRM
 - Strategic according to the EC in 2024
- Manganèse
 - Export restrictions (bottleneck)
 - Enabling Trade Index
 - Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)
 - Environmental Performance Index (bottleneck)
 - Corruption Perception Index
 - On the 2023 EU list of CRM
 - Strategic according to the EC in 2024
- Nickel
 - Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)
 - Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)
 - Global CO₂ emissions
 - Strategic according to the EC in 2024

Pour les batteries LFP, les matières premières suivantes, représentées dans l'outil IRTC, sont attribuées en plus grande quantité:

- Gravier: voir ci-dessus
- Aluminium: voir ci-dessus
- Sable: voir ci-dessus
- Fer: voir ci-dessus
- Fluorspar: voir ci-dessus

- Cuivre: voir ci-dessus
- Phosphore:
 - o On the 2023 EU list of CRM

La quantité de lithium attribuée aux deux types de batteries est très faible par rapport à celle des autres matières premières (seulement 0,0099 kg par kg de batterie pour le type LFP). Cependant, en raison de l'importance du lithium dans les deux batteries, les risques associés sont également mis en avant :

- Lithium:
 - o Supply is dominated in a few countries (bottleneck)
 - o Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 for sustainable development scenario (KU Leuven)
 - o Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)
 - o Environmental Performance Index (bottleneck)
 - o On the 2023 EU list of CRM
 - o Strategic according to the EC in 2024

Il est remarquable qu'il existe relativement peu de corrélation entre les matières premières considérées comme critiques pour l'Union européenne et les résultats de l'outil IRTC. Cela peut s'expliquer par les raisons suivantes :

- L'outil IRTC évalue le mélange d'approvisionnement mondial, tandis que la liste de l'UE prend en compte à la fois l'approvisionnement mondial et les importations européennes.
- L'UE considère l'importance d'une matière première pour l'économie européenne, ce qui n'est pas un facteur inclus dans l'évaluation IRTC.
- Un grand nombre d'indicateurs inclus dans l'outil IRTC ne sont pas évalués dans la méthodologie de l'UE.

Interprétation des points chauds au niveau des risques pour l'entreprise

À partir de l'identification des points chauds, les résultats peuvent être interprétés en termes de conséquences pour une entreprise ou un autre acteur dépendant de l'accessibilité à une matière première (Tableau 42). Le Tableau 42 est construit d'une combinaison du Tableau 4 et de la Figure 7, où cette dernière figure peut être consultée pour un aperçu plus détaillé de la chaîne cause-effet appliquée.

En combinant les hotspots de criticité pour chaque matière première avec le Tableau 42, on peut conclure, par exemple, que le cobalt et le lithium sont concernés par des risques d'accessibilité, de prix et de réputation.

Tableau 42 Lien entre les indicateurs de criticité et les risques pour l'entreprise

Indicator	Risk source	A company may not have access to a product	A product may change suddenly substantially in price	A company's reputation may be affected by the use of a product
Supply is dominated in a few countries (bottleneck)	Supply is dominated in a few countries	X	X	
Export restrictions (bottleneck)	Supplying country is subject to trade restrictions/ resource nationalism	X	X	
Enabling Trade Index (bottleneck)	Supplying country is subject to trade restrictions/ resource nationalism	X	X	
WGI Rule of law (bottleneck)	Supplying country is subject to societal unrest	X	X	
Fragile States Index (bottleneck)	Supplying country is subject to an unstable investment climate	X	X	
WGI Regulatory Quality (bottleneck)	Supplying country is subject to an unstable investment climate	X	X	
WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)	- Supplying country is subject to an unstable investment climate - Supplying country is subject to societal unrest	X	X	
WGI Government effectiveness (bottleneck)	Supplying country is subject to an unstable investment climate	X	X	
% supplied as a by-product	The material is mainly produced as a by-product of another product. If the demand of the main product decreases, the supply of the by-product decreases as well	X	X	
Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 for sustainable development scenario (KU Leuven)	Demand is expected to strongly increase	X	X	

Compound Annual Growth Rate between 2018-2040 for sustainable development scenario (DERA)	Demand is expected to strongly increase	X	X	
Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)	Demand is expected to strongly increase	X	X	
Share of current production capacity used in mining (production to reserves ratio)	High share of (current) production capacity used in mining and refining	X	X	
Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)	Low potential to increase supply from mines	X	X	
Cradle-to-gate LCA	A product can be associated with environmental impacts that are deemed unacceptable by social norms	X	X	X
Environmental Performance Index (bottleneck)	A product can be associated with environmental impacts that are deemed unacceptable by social norms	X	X	X
Global Peace Index (bottleneck)	The supply of a product can be associated with conflict	X	X	X
Corruption Perception Index (bottleneck)	The supply of a product can be associated with corruption	X	X	X
WGI Control of Corruption (bottleneck)	The supply of a product can be associated with corruption	X	X	X
Child labor (bottleneck)	The supply of a product can be associated with child labour	X	X	X
WGI Voice and Accountability (bottleneck)	The supply of a product can be associated with the violation of human rights	X	X	X
Human Development Index (bottleneck)	The supply of a product can be associated with the violation of human rights	X	X	X
Cumulative energy demand [MJ-eq/kg]	Production is dependent on the availability of energy at a reasonable price		X	
Substance of very high concern for Authorisation (REACH framework)	The product is potentially toxic	X		

Ce type de conclusion peut également être tiré directement de l'outil IRTC, dans le mode « évaluation spécifique », comme illustré dans la Figure 46. Il est possible que certains indicateurs soient identifiés différemment comme points chauds dans ce rapport par rapport à l'outil, car les résultats sont normalisés entre 0 et 100 dans le rapport, ce qui n'est pas fait pour tous les indicateurs dans l'outil IRTC.

Les boutons de l'outil IRTC fournissent en outre des informations sur les aspects suivants :

- Pourquoi est-ce un problème ? (Explication de la chaîne cause-effet).
- Quelles autres matières sont concernées ? (Aperçu du classement relatif de toutes les matières premières sur un indicateur spécifique).
- Comment cela peut-il être évité ? (Suggestions de mesures d'atténuation pour éviter que le problème ne se produise).
- Comment les dommages potentiels peuvent-ils être réduits ? (Suggestions de mesures d'atténuation pour éviter que ce problème n'entraîne des dommages pour l'utilisateur de la matière première)

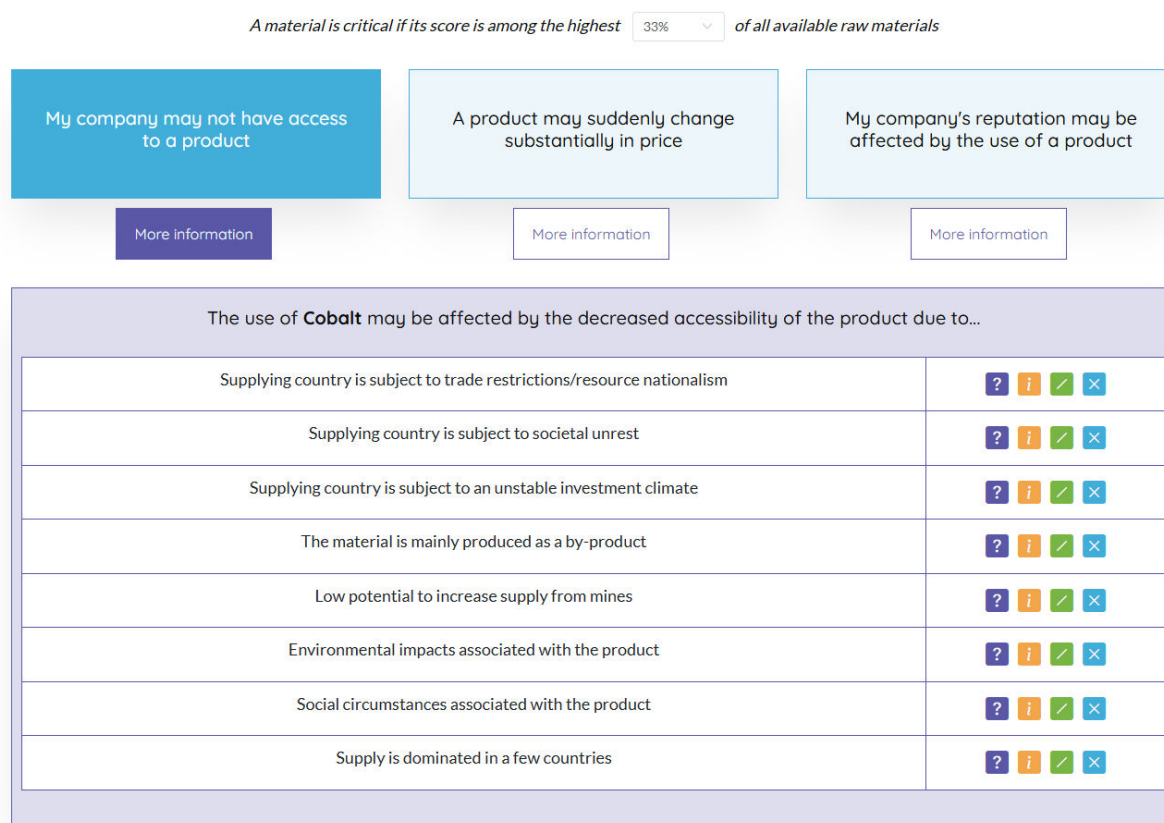


Figure 46 Capture d'écran de l'« évaluation spécifique » du cobalt, indiquant les points chauds dans la chaîne de valeur du cobalt, dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)

Sélection des mesures d'atténuation

Une fois les points chauds de criticité identifiés, des mesures potentielles peuvent être envisagées pour atténuer les risques d'approvisionnement identifiés. Schrijvers et al. (en préparation) ont collecté un large éventail de mesures d'atténuation (présentées en Annexe 6) pertinentes pour réduire les risques liés à l'approvisionnement en métaux et minéraux. Ces mesures peuvent soit diminuer la probabilité qu'une perturbation de l'approvisionnement se produise, soit atténuer les dommages potentiels causés par une perturbation pour une entreprise (Figure 47). Ces mesures d'atténuation sont intégrées dans l'outil IRTC (IRTC, 2023) et une description détaillée de chaque mesure est fournie, y compris les obstacles potentiels à leur mise en œuvre et les besoins de collaboration avec d'autres parties prenantes.

Les mesures d'atténuation suggérées par l'outil IRTC dépendent du type spécifique de risque, ainsi que du type spécifique de dommage subi par l'entreprise (problèmes d'accessibilité, fluctuations de prix ou atteinte à la réputation). Cela signifie que certaines mesures ne sont efficaces que pour éviter des problèmes d'accessibilité et/ou des risques de prix (par exemple, le stockage), tandis que d'autres ne protègent une entreprise que contre les risques de réputation (par exemple, la compensation des impacts environnementaux).

SCORE LCA

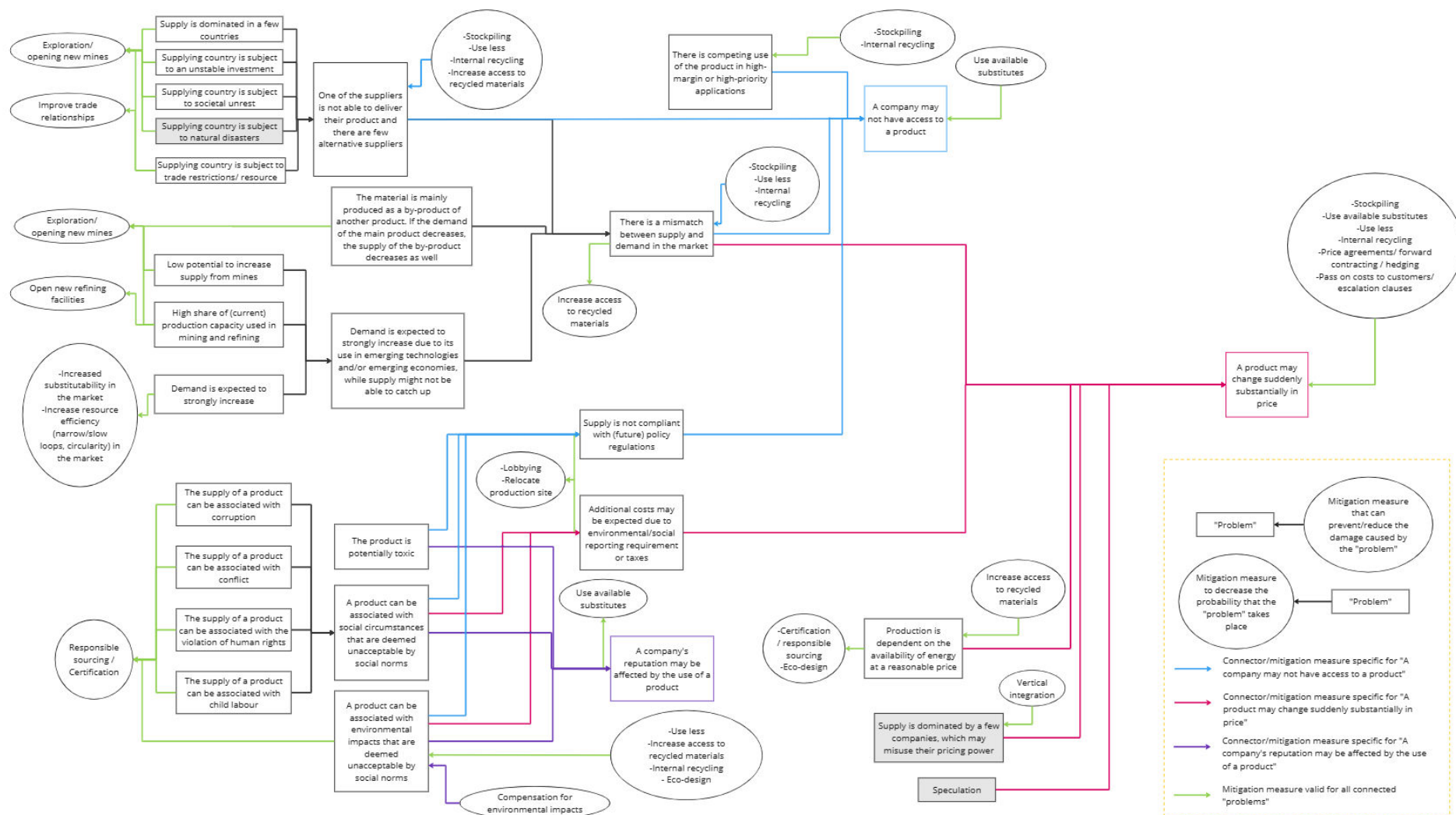


Figure 47 Mesures d'atténuation pertinentes pour différents types de risques, pouvant soit prévenir une perturbation de l'approvisionnement, soit empêcher une entreprise de subir des dommages dus à une telle perturbation (Schrijvers et al., article en préparation)

Identifier l'utilisation des matières premières au niveau des composants

Lien entre la collecte des données bottom-up et top-down

Dans cette étude de cas, les matières premières utilisées dans les batteries ont été identifiées en utilisant une approche ascendante (bottom-up), en effectuant une analyse d'inventaire du système de production des batteries. Pour relier cette stratégie de collecte de données à une approche descendante (top-down) — identifiant les besoins en matériaux à partir du pack de batterie final, puis détaillant au niveau des composants — et pour surmonter certaines limites de l'approche ascendante (comme le fait que les flux élémentaires dans l'inventaire ne reflètent pas nécessairement la nomenclature d'une batterie), il est maintenant analysé quels composants seront affectés par des perturbations potentielles de l'approvisionnement.

La Figure 48 montre que, pour la batterie NMC811, la plupart des matières premières « critiques » (c'est-à-dire celles avec le plus grand nombre de points chauds de criticité) sont utilisées dans la production de la cellule de batterie. Cependant, ce n'est pas le cas pour toutes les matières premières. Par exemple :

- **Tantale et étain** sont principalement utilisés dans le système de gestion de la batterie, l'emballage du module de batterie et les composants électroniques passifs.
- **Graphite** est utilisé non seulement dans la production de la cellule de batterie, mais également dans la production d'alliages d'aluminium travaillés.
- **Antimoine** est utilisé dans la cellule de batterie, mais aussi dans le système de gestion de la batterie, l'emballage du module, les composants électroniques, et dans le fonctionnement de l'usine de travail des métaux.

Avec l'aide du diagramme « réseau » de SimaPro, des détails supplémentaires sur les besoins en matières premières en amont peuvent être obtenus.

En se concentrant sur le cobalt, il a pu être observé dans la partie ACV que le cobalt vient des matériaux actifs de la cathode afin de fabriquer l'oxyde de NMC811, lui-même fabriqué à partir d'hydroxyde de NMC811.

Du cobalt se retrouve également dans la batterie LFP, ce qui est contre intuitif mais cela vient des problèmes d'inventaires identifiés dans la partie 4.2.2 et explicité dans la synthèse des études de cas dans la partie 5.2. En effet, en examinant le flux de cobalt dans la batterie LFP (cf. Figure 50 et Figure 51), il apparaît que **le flux d'inventaire de cobalt n'est pas dû à son utilisation dans la batterie LFP**, mais est plutôt lié à l'utilisation du cuivre.

Dans le jeu de données ecoinvent pour la batterie LFP, le cuivre utilisé est fourni en tant que sous-produit de la production de cobalt (dans un jeu de données considérant le cobalt comme produit de référence et le cuivre comme sous-produit). En conséquence, **l'extraction de cobalt de l'écosphère est en partie attribuée au cuivre**. Cela met en évidence une limitation de l'utilisation des flux d'inventaire d'ecoinvent pour représenter les perturbations potentielles de l'approvisionnement en métaux échangés. Cela pourrait être considéré comme un facteur de risque que le cuivre soit ici utilisé en tant que sous-produit, bien que cela n'affecte pas nécessairement l'approvisionnement en cuivre en raison de sa production substantielle en tant que produit principal.

La méthode IRTC prenant en compte tous les éléments de l'inventaire, le fait que des éléments se retrouvent dans l'inventaire alors qu'ils ne sont actuellement pas présents dans le produit final représente une autre limite de l'utilisation d'ICV car le cobalt ne devrait pas se trouver dans l'inventaire de la batterie LFP.

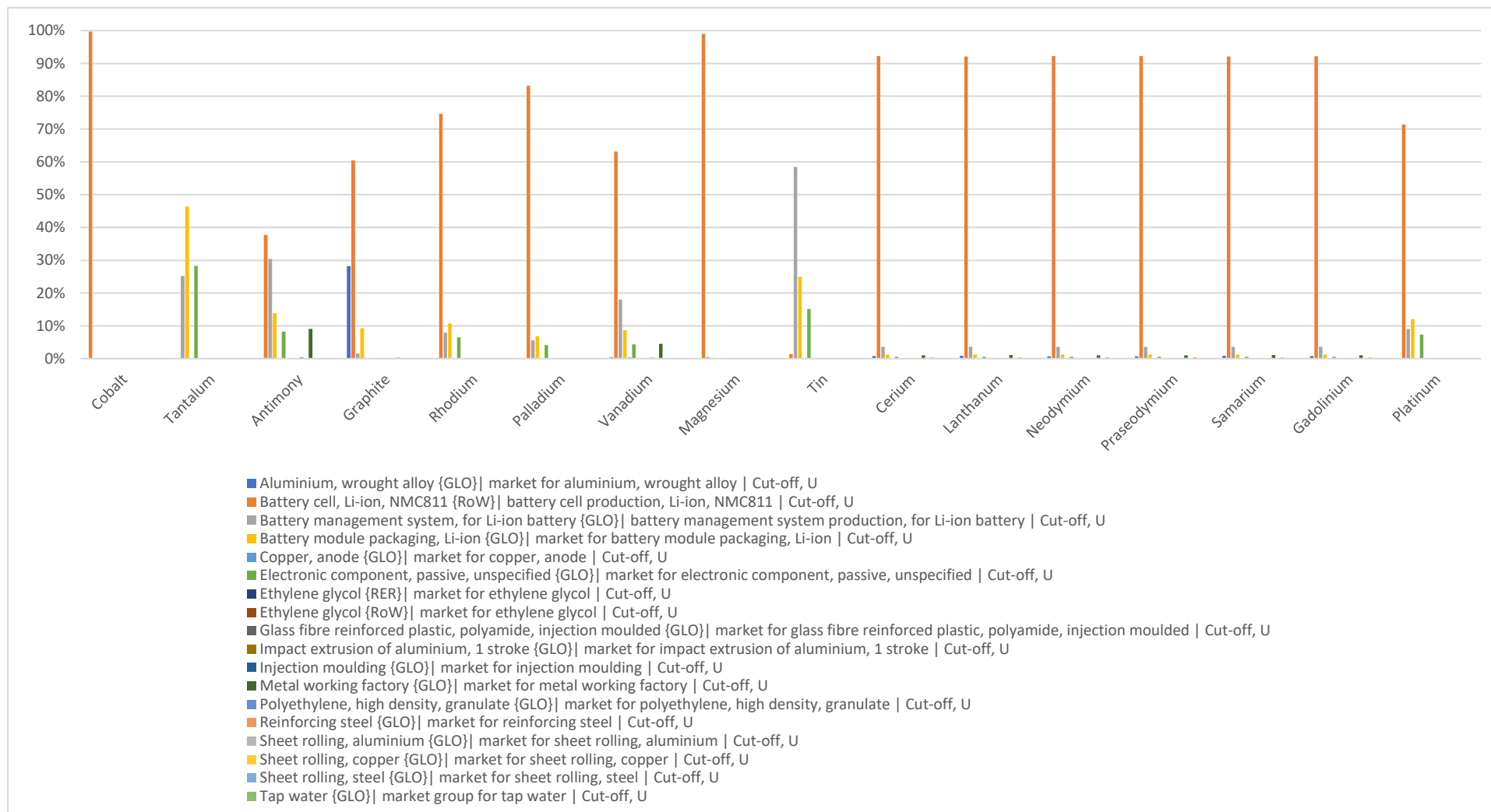


Figure 48 Dépendance des flux intermédiaires pour la production de la batterie NMC811 sur une sélection de matières premières. Les flux intermédiaires d'électricité sont exclus de l'analyse

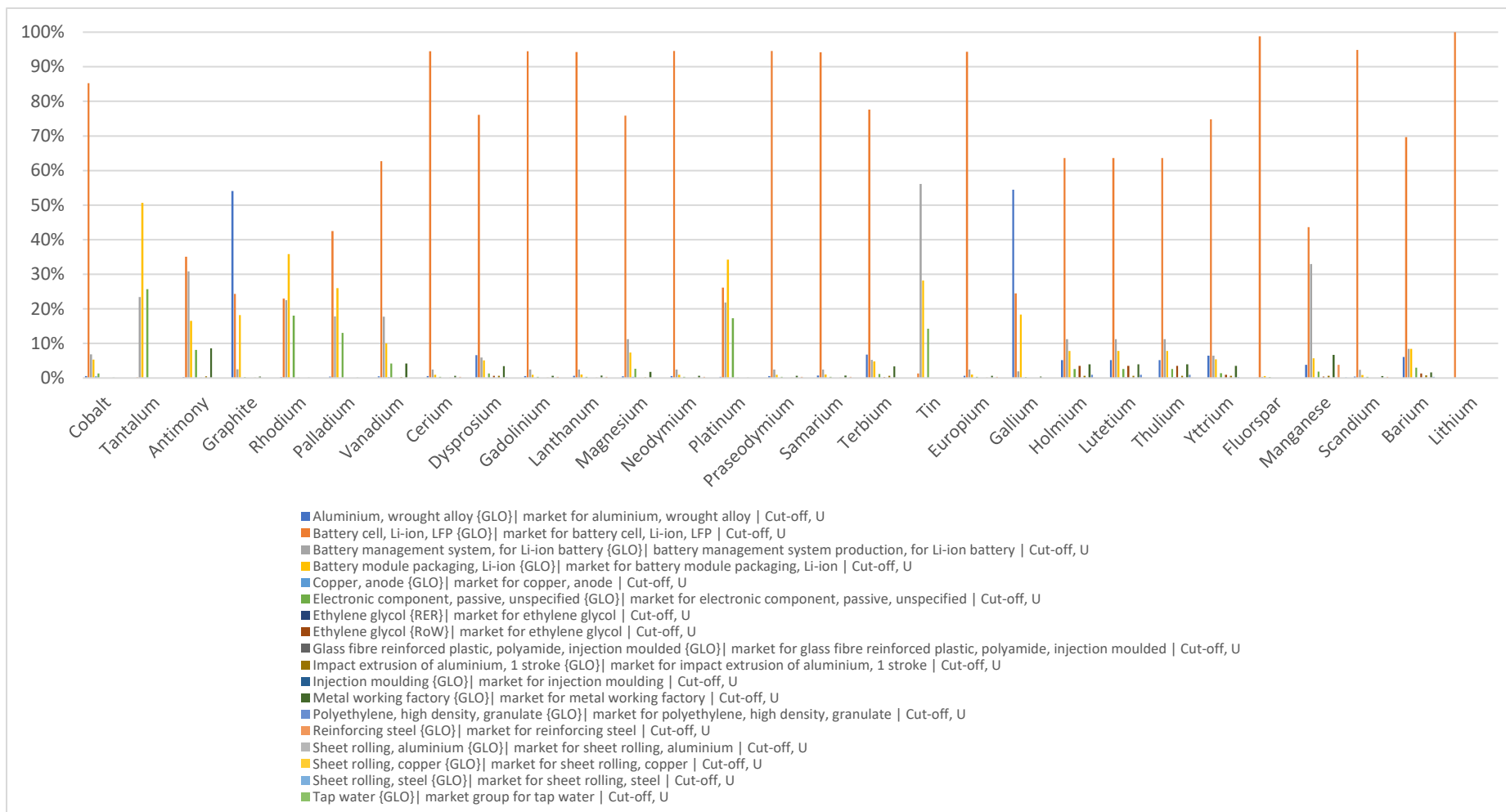


Figure 49 Dépendance des flux intermédiaires pour la production de la batterie LFP sur une sélection de matières premières. Les flux intermédiaires d'électricité sont exclus de l'analyse.

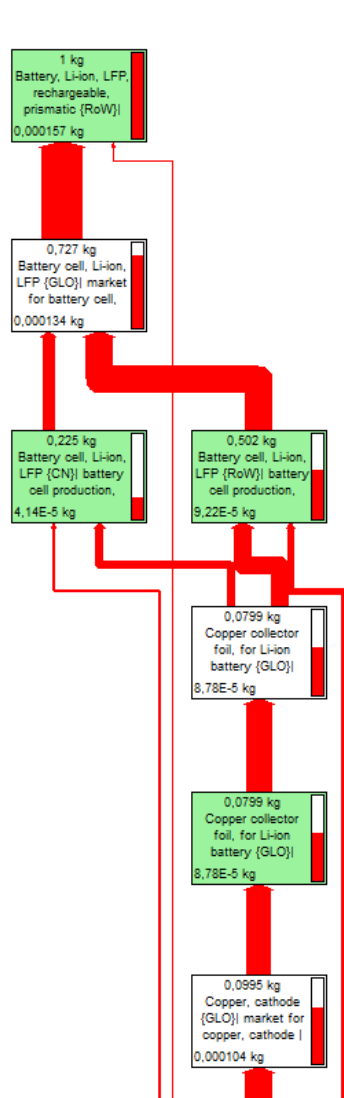


Figure 50 Diagramme des flux de l'utilisation du cobalt dans les batteries LFP (1/2)

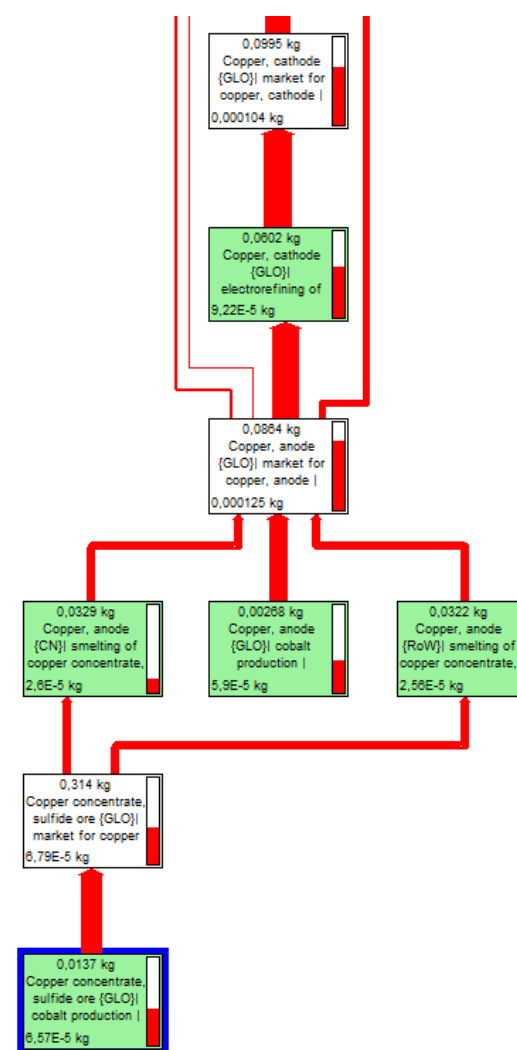


Figure 51 Diagramme des flux de l'utilisation du cobalt dans les batteries LFP (2/2)

Évaluation de la pertinence des risques liés à l'entreprise

Un aperçu des usages des matières premières dans différents composants aide à interpréter la pertinence des risques liés aux entreprises. Par exemple, si une matière première est liée à de potentielles augmentations de prix, une étape suivante serait d'évaluer la vulnérabilité aux fluctuations de prix dans la chaîne de valeur. Par exemple, en examinant l'utilisation du tantale dans la batterie NMC811 (Figure 52), on observe que le tantale est utilisé dans différents composants du système de batterie, bien que dans tous les cas, il soit lié à l'utilisation d'un condensateur en tantale.

- Quelle est la contribution des coûts du tantale à la fabrication totale des condensateurs ?
- De combien les prix des condensateurs augmenteraient-ils si le prix du tantale augmentait ?
- Comment cela se propage-t-il à travers la chaîne de valeur, jusqu'à la production de la batterie entière ?
- Quelle serait l'augmentation finale du prix de la batterie si le tantale devenait plus cher ?

Ce type d'information peut être soutenu par une analyse des coûts du cycle de vie (**Life Cycle Costing Analysis**).

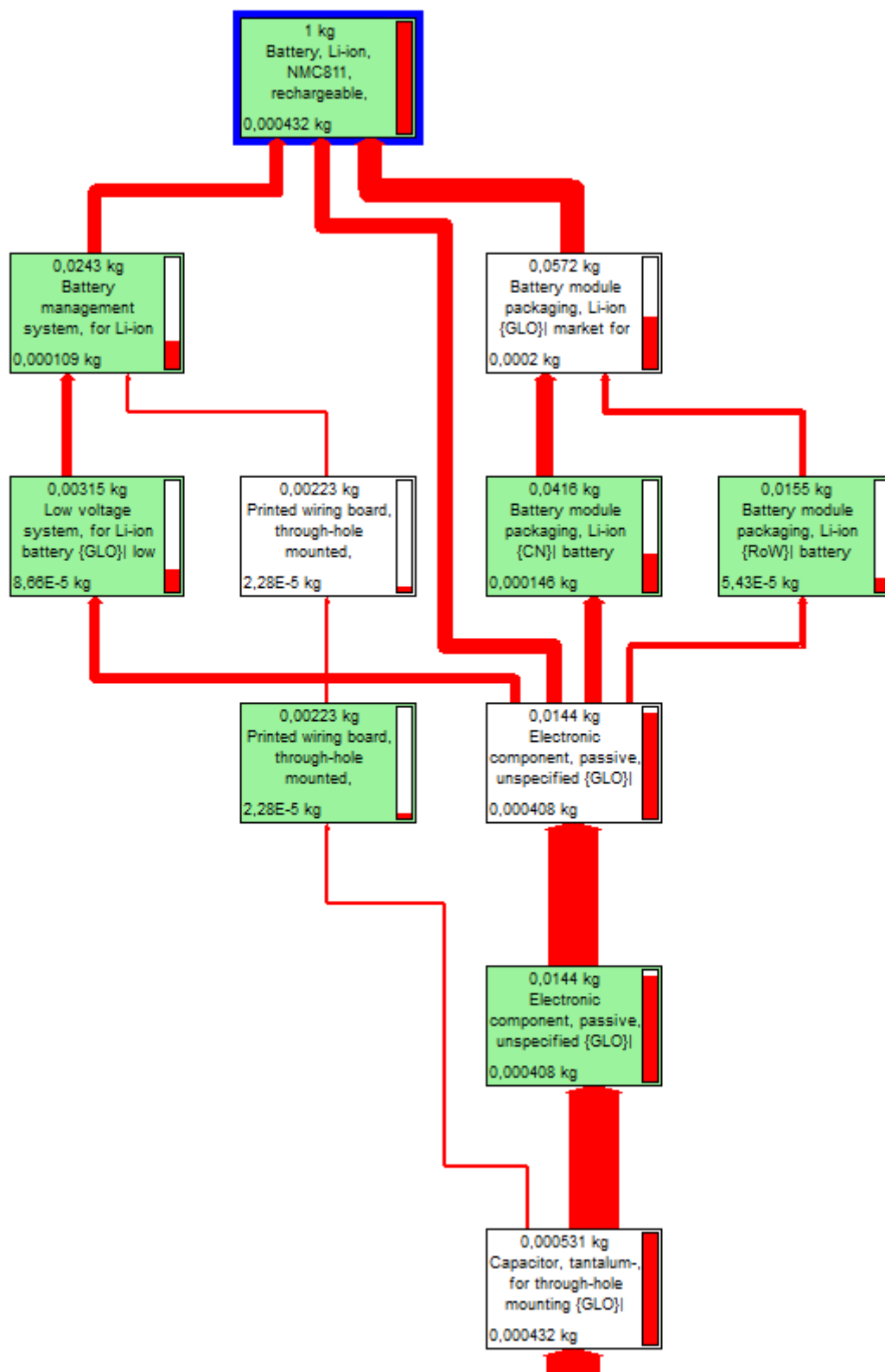


Figure 52 Diagramme des flux de l'utilisation du tantale dans les batteries NMC811

Évaluation de la faisabilité des mesures d'atténuation

Un aperçu des flux de matières premières dans la chaîne de valeur des batteries aide également à évaluer l'utilité et la faisabilité des mesures d'atténuation. Par exemple, l'une des mesures d'atténuation suggérées par l'outil IRTC est la **substitution**. La substitution est parmi les mesures d'atténuation les plus polyvalentes, car elle peut protéger une entreprise contre tous les types de risques évalués (accessibilité, prix et réputation).

La plupart des études d'évaluation de criticité examinent la substitution au niveau des matières premières, où les utilisations courantes de la matière première sont évaluées, ainsi que la substituabilité de la matière dans chacune de ces utilisations. La substituabilité n'est pas évaluée dans l'outil IRTC. Il est considéré que la substituabilité dépend fortement de l'application de la matière première et doit être évaluée au cas par cas.

Pour évaluer la faisabilité de la substitution en tant que mesure d'atténuation, il est intéressant de regarder les usages des matières premières à différents niveaux de la chaîne de valeur en amont. Ici encore, il est recommandé d'utiliser le diagramme réseau de SimaPro (ou un logiciel ayant une fonctionnalité similaire).

Dans l'évaluation de la faisabilité des mesures d'atténuation, la structure de la chaîne de valeur est essentielle à garder à l'esprit. Par exemple, la substitution du cobalt peut être appliquée au niveau de la cathode ou au niveau de la cellule de batterie. Le stockage peut également être effectué à différentes étapes de la chaîne de valeur : stockage de sulfate de cobalt, d'hydroxyde de NMC811, d'oxyde de NMC811, de cathodes, de cellules de batterie ou de batteries complètes. Différents acteurs de la chaîne de valeur peuvent être impliqués, et des réflexions doivent être menées sur la capacité à gérer et/ou accéder aux stocks ainsi que sur la stabilité technologique (par exemple, éviter que les stocks deviennent obsolètes).

Limites des résultats

Utilisation de mélanges d'approvisionnement mondiaux

Actuellement, les risques liés à l'approvisionnement sont évalués sur la base de la structure mondiale d'approvisionnement en exploitation minière et en raffinage. Cependant, lors de l'évaluation d'une chaîne de valeur spécifique, il devient pertinent d'identifier également les structures d'approvisionnement des composants en aval.

En examinant à nouveau l'utilisation du tantale dans la batterie NMC811 (Figure 52) :

- De quels pays le fabricant de la batterie importe-t-il les composants du système de gestion de la batterie, de l'emballage du module et des composants électroniques directement utilisés dans le système ?
- Ces composants sont-ils produits en interne ou importés, par exemple, d'un pays asiatique ?
- Combien de fournisseurs différents existe-t-il pour ces composants ?
- L'approvisionnement est-il fortement concentré ?

En outre, pour les pays qui produisent des condensateurs à base de tantale (utilisés dans notre système), de quels pays importent-ils à leur tour la poudre de tantale de qualité condensateur ? Ces mélanges d'approvisionnement peuvent sembler plus (ou moins) stables que le mélange d'approvisionnement mondial en matières premières. Cependant, le mélange d'approvisionnement mondial en matières premières constitue un point de départ fiable lorsque le mélange d'approvisionnement des composants (par exemple, les condensateurs et les composants électroniques plus sophistiqués) est inconnu.

Modélisation des sous-produits dans ecoinvent

Il a déjà été mentionné que l'utilisation des résultats de l'inventaire d'ecoinvent comme proxy pour avoir une liste des matières premières utilisées peut entraîner des erreurs, notamment lorsque la matière première extraite ne finit pas dans le produit étudié comme il a été montré avec le cobalt ou le rhodium dans cette partie ou le tellure dans la partie sur l'ACV. De plus, dans ecoinvent, les quantités d'inventaire

sont déformées par les allocations appliquées dans les jeux de données de coproduction comme explicité dans la partie 5.2. Cette allocation affecte les résultats comme il a été constaté avec le cobalt dans LFP ou le magnésium dans NMC811 identifiant ces éléments comme critiques alors qu'ils ne sont pas présents dans les batteries. Dans cette évaluation, la seule information pertinente est « si une matière première est nécessaire ».

De plus, pour une évaluation ultérieure de la vulnérabilité, en particulier en ce qui concerne les augmentations potentielles des coûts, la quantité des éléments réellement nécessaire devient pertinente. **Il est donc important d'étudier les flux intermédiaires au niveau des processus unitaires, plutôt que les flux élémentaires au niveau du système.**

4.2.4. Application de la méthode GeoPolRisk

Introduction à la méthode

La méthode GeoPolRisk, développée à l'origine par Gemechu en tant que facteur de caractérisation (FC) intermédiaire dans l'analyse du cycle de vie (ACV) (Gemechu et al., 2015b), évalue le risque d'approvisionnement en tenant compte de la concentration de la production mondiale de matières premières et des parts d'importation des partenaires commerciaux, pondérées par les scores de stabilité politique des pays exportateurs, comme le montre le Tableau 13. Cette méthode évalue le risque d'approvisionnement non seulement du point de vue d'un seul pays, mais aussi d'unités économiques plus larges, telles que des régions, des groupes de pays ou des entreprises, collectivement appelées unités économiques dans ce contexte. La formule permettant de calculer le Facteur de Caractérisation (FC) GeoPolRisk Midpoint d'une matière première « A » du point de vue d'une unité économique « c » au cours d'une année donnée est donnée en Equation 1 :

Equation 1: Formule pour calculer le FC GeoPolRisk Midpoint pour une matière première A (Santillán-Saldivar et al., 2022)

$$GeoPolRisk\ Midpoint\ CF_{Ac} = HHI_A * \sum_i \left(\frac{g_i * f_{Aic}}{p_{Ac} + F_{Ac}} \right) * \bar{p}$$

Dans cette équation :

- HHI_A représente l'Indice Herfindahl-Hirschman pour une matière première "A," calculée comme la somme des carrés des parts de production de tous les pays produisant le matériau.
- La quantité importée (f_{Aic}) de la matière première « A » vers l'unité économique « c » en provenance du pays « i » est pondérée par l'indicateur de stabilité politique (g_i) du pays exportateur.
- F_{Ac} est le total des importations de l'unité économique évaluée, tandis que p_{Ac} représente sa production intérieure de la matière première « A »
- $\bar{p}$ représente le prix moyen annuel du marché de la matière première en USD par kilogramme.

La donnée commerciale (f_{Aic}) est ajustée en utilisant le taux d'apport du recyclage en fin de vie (EoL_{RiR}), un indicateur de la contribution du recyclage à la satisfaction de la demande (Commission Européenne, 2018). Cet ajustement donne un aperçu des scénarios potentiels d'atténuation du risque d'approvisionnement en redistribuant les données commerciales entre les scénarios les plus favorables (Best-Case Scénario BCS) et les scénarios les plus défavorables (Worst-Case Scénario WCS). Un BCS suppose une réduction des importations en provenance de pays politiquement instables, tandis qu'un WCS considère une réduction des importations en provenance de pays politiquement stables (Santillán-Saldivar et al., 2021). Sans inclure le prix, la valeur calculée représente la probabilité d'une rupture d'approvisionnement de la matière première « A » pour l'unité économique « c ». Cette valeur non dimensionnelle, appelée score GeoPolRisk, est principalement utilisée pour l'évaluation comparative des risques.

Pour quantifier le Risque Géopolitique d'Approvisionnement des matières premières au sein d'un produit ou d'un système, le FC est appelé le Potentiel de Risque Géopolitique d'Approvisionnement (GSP). Le

GSP est calculé en divisant le GeoPolRisk Midpoint_{Ac} par le GeoPolRisk Midpoint moyen du cuivre dans les pays sur une période de cinq ans (2017-2020), comme décrit dans l'Equation 42. Ici, « A » fait référence à la matière première, « c » à l'unité économique et « t » à la période. Au niveau du point médian, l'indicateur répond à la question suivante : « Quel est le risque de problèmes d'accessibilité relative pour un système de produits en raison de facteurs géopolitiques et socio-économiques à court terme ? » (Berger et al., 2020). En caractérisant le risque d'approvisionnement comme équivalent à l'importation d'un kilogramme de cuivre, ce modèle facilite les comparaisons de GSR entre différents processus ou systèmes de produits à l'aide d'une référence normalisée.

Equation 42: Modèle de caractérisation GeoPolRisk pour calculer le potentiel de risque géopolitique

$$\text{Geopolitical Supply Risk Potential (GSP)} = \frac{\text{GeoPolRisk midpoint}_{Act}}{\text{GeoPolRisk midpoint}_{\text{copper}}}$$

Guide d'application

Comme cela a été souligné dans les discussions sur le lien entre la criticité et l'analyse du cycle de vie (ACV), aucun consensus n'existe sur la manière dont ces concepts devraient être intégrés, ni même sur leur nécessité. Cette ambiguïté découle non seulement de considérations théoriques, mais aussi de défis pratiques. Des éléments tels que la voie d'impact de l'ACV, l'analyse de l'inventaire et les indicateurs de ressources comme l'épuisement des ressources abiotiques sont intrinsèquement présents dans les évaluations de criticité. Au cours de la dernière décennie, des développements considérables ont été réalisés dans la méthode GeoPolRisk, aboutissant à un cadre permettant son application en tant qu'indicateur dans l'ACV. Une vue d'ensemble de ce cadre est présentée à la Figure 53 Figure 53 Aperçu du cadre méthodologique GeoPolRisk (Koyamparambath et al., 2024).

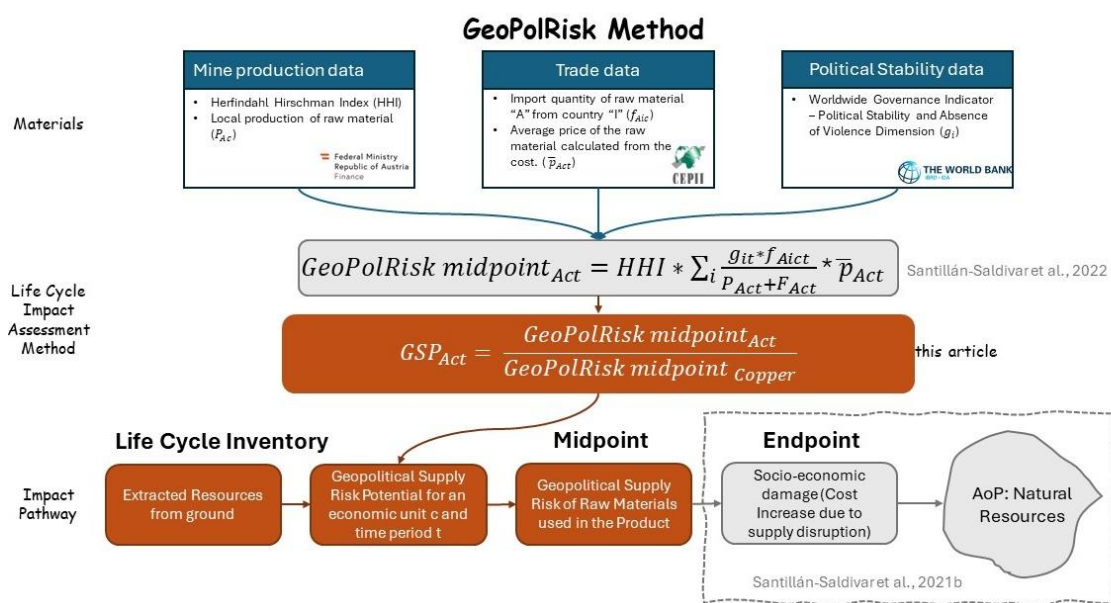


Figure 53 Aperçu du cadre méthodologique GeoPolRisk (Koyamparambath et al., 2024)

Bien que le cadre offre une voie structurée, sa mise en œuvre n'est pas aussi simple que pour d'autres méthodes d'ACV. Dans l'ACV, la plupart des bases de données sont préallouées et représentent généralement des consommations moyennes mondiales. Ce n'est que dans des cas limités que ces bases de données incluent des activités spécifiques à une région ou un site. Par exemple, Ecoinvent intègre principalement des activités moyennes mondiales. De plus, l'ACV caractérise les impacts sur la base des flux élémentaires, qui ne comportent pas d'attributs de localisation géographique. Pour

appliquer efficacement la méthode GeoPolRisk dans l'ACV, des hypothèses spécifiques doivent donc être formulées :

1. Association des FC aux flux élémentaires : Les logiciels d'ACV s'appuient sur des flux élémentaires (entrées/sorties de matières premières) pour quantifier les impacts environnementaux. Par conséquent, le GSP doit être directement appliqué à ces flux. Cela suppose que le flux élémentaire dans Ecoinvent est approximativement équivalent au flux économique intermédiaire correspondant auquel le GSP est théoriquement appliqué. Cette approche est valable lorsque le flux d'entrée des minéraux extraits est étroitement aligné avec le flux de sortie intermédiaire. Pour les processus impliquant des coproduits (par exemple, la production de 1 kg d'argent dans le processus unitaire d'Ecoinvent pour le RoW, où le flux élémentaire d'entrée pour l'argent est de 0,38 kg), cette hypothèse est valide lorsque la quantité de matière première utilisée dans le système de produit est relativement faible par rapport au total des matières premières consommées.
2. Différenciation géographique : Les FC sont spécifiques à une région, comme les États-Unis, la France ou la Chine. Les FC doivent correspondre au périmètre géographique de l'analyse. Par exemple, lors de l'évaluation du risque d'approvisionnement pour la France, les FC spécifiques à la France doivent être appliqués, en supposant que tous les composants nécessaires à la fabrication du produit sont produits en France. Ces FC sont dérivés des pays fournissant les matières premières à la France.
3. Différenciation temporelle : Les ensembles de données les plus récents, généralement issus de 2022, doivent être utilisés pour garantir la précision, sauf si l'analyse porte spécifiquement sur des tendances historiques.

Pour appliquer la méthode à l'étude de cas, il est pertinent d'évaluer le risque d'approvisionnement des cellules de batteries LFP et NMC811 du point de vue de la France et de l'Union européenne. L'analyse suppose que la production de tous les sous-composants de la cellule de batterie, y compris les activités minières, a lieu en France et dans l'Union européenne. Les facteurs de caractérisation (CF) pour la méthode GeoPolRisk sont calculés à partir des données de 2022, en fonction de leur disponibilité, et aucune différenciation temporelle n'est prise en compte.

Calculer des facteurs de caractérisation

Pour calculer les facteurs de caractérisation (CF) en utilisant la formule décrite dans l'Equation 1, trois sources de données spécifiques sont nécessaires, comme indiqué dans la Figure 53. Il s'agit des données de production minière des matières premières issues de *World Mining Data*, des indicateurs de gouvernance provenant des *Worldwide Governance Indicators* publiés par la Banque mondiale, et des données commerciales de *BACI*. Bien que ces sources de données soient accessibles au public, elles sont généralement mises à jour avec un décalage d'au moins deux ans. Par conséquent, les valeurs obtenues à partir des Equation 1 et Equation 42 ne reflètent pas entièrement l'année en cours.

Les FC sont appliqués aux flux élémentaires des modèles Ecoinvent 3.9.1 pour les batteries NMC811, "battery production, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic", et LFP, "battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic". Ces modèles proviennent des modèles de processus unitaires de la base de données cut-off.

Les facteurs de caractérisation (CF) proviennent du matériel complémentaire d'un article récemment publié, qui inclut des données pour 40 pays de l'OCDE sur une période de cinq ans (2017–2021). Un outil basé sur Python a été développé pour simplifier le calcul des CF en utilisant des données de fond mises à jour ou des données commerciales spécifiques fournies par les entreprises. L'outil, *geopolrisk-py*, une bibliothèque Python, a été utilisé pour calculer les CF pour la France et l'Union européenne pour l'année 2022. La Figure 54 illustre les CF pour la France et l'UE sur une échelle logarithmique afin de faciliter la comparaison.

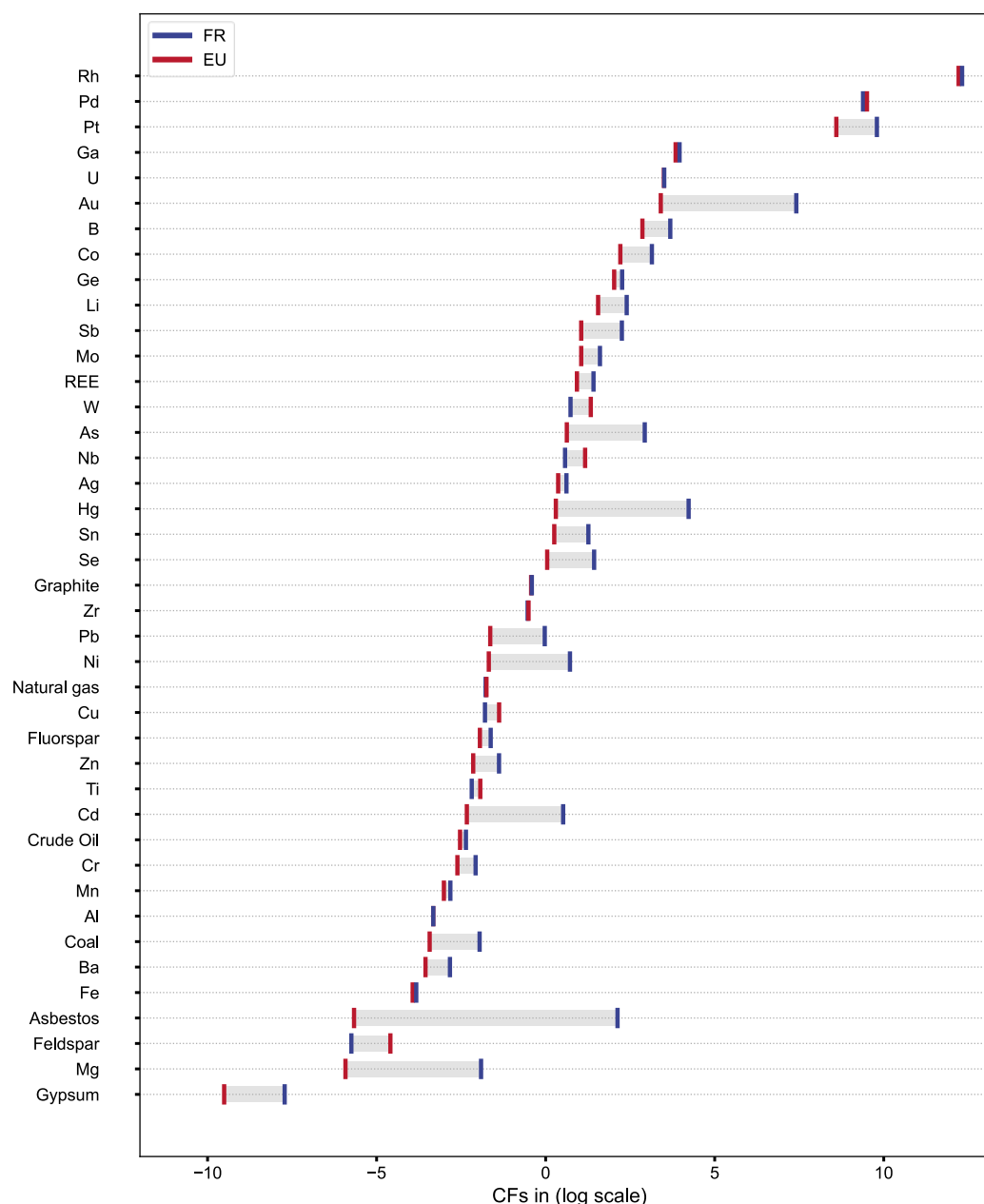


Figure 54 Potentiel de Risque D'approvisionnement Géopolitique (les facteurs de caractérisation pour l'indicateur de Risque D'approvisionnement Géopolitique) pour la France et l'Union européenne, basé sur les données de 2022.

Les matières premières sont classées par ordre décroissant de facteurs de caractérisation, les métaux du groupe du platine — platine, rhodium et palladium — affichant les valeurs les plus élevées. Dans la figure, les FC pour la France et l'UE sont distingués par deux couleurs, où les bords représentent la France et l'UE, et les différences de CF sont mises en évidence en gris. Après les métaux du groupe du platine, le tellure, l'or, le gallium et l'uranium figurent parmi les matériaux ayant les FC les plus élevés.

Pour la plupart des matières premières, les différences de FC entre la France et l'UE sont relativement mineures. Cependant, pour des matériaux comme l'or, le mercure et quelques autres, des différences notables sont observées. Ces divergences sont attribuées à des variations des risques d'importation et des prix moyens du commerce. Dans tous les cas, la France présente les CF les plus élevés.

Application dans un logiciel

La méthode GeoPolRisk peut être appliquée directement dans un outil d'ACV tel qu'OpenLCA, où les facteurs de caractérisation sont téléchargés en tant que méthode d'évaluation des impacts et exécutés lors de la phase d'évaluation des impacts. Cependant, l'implémentation dans SimaPro est moins directe. Pour cette application, les modèles d'inventaire pour la production des batteries NMC811 et LFP sont extraits de SimaPro dans un fichier Excel. Les CF sont ensuite mappés à la nomenclature des flux élémentaires dans SimaPro, en utilisant la base de données *cut-off* d'Ecoinvent. Ces CF mappés sont directement multipliés par l'inventaire de masse extrait.

Pour ce projet, dans le cadre de l'application de GeoPolRisk, l'inventaire choisi correspond au niveau du processus unitaire, mais se limite au premier plan. Cela signifie que toutes les activités impliquées dans la production de batteries au-delà du premier plan ne sont plus prises en compte. Il est tout à fait possible d'appliquer le même niveau d'inventaire aux méthodes IRTC et ESSENZ. Cependant, dans le cas de ce projet, des procédés complètement désagrégés ont été utilisés pour IRTC et ESSENZ. Par conséquent, la comparaison entre les deux résultats n'est pas possible.

Il est important de noter que, par l'application d'inventaires désagrégés au premier plan, les problèmes d'inventaire identifiés lors de l'ACV et de l'application de la méthode IRTC devraient être moins présents. Toutefois, une limite de cette méthode est que certains matériaux issus de processus intermédiaires pourraient être exclus, y compris les déchets des processus d'extraction et de raffinage.

Le Tableau 43 présente toutes les activités incluses dans le processus de production de batteries. La seule variation entre les ensembles de données concerne le type de cellule de batterie (NMC811 et LFP), tandis que les autres composants restent inchangés.

Tableau 43 Activités incluses dans le processus de production de batteries (NMC811 and LFP)

Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic	Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic
Aluminium, wrought alloy {GLO}	Aluminium, wrought alloy {GLO}
Battery cell, Li-ion, NMC811 {CN}	Battery cell, Li-ion, LFP {GLO}
Battery management system, for Li-ion battery {GLO}	Battery management system, for Li-ion battery {GLO}
Battery module packaging, Li-ion {GLO}	Battery module packaging, Li-ion {GLO}
Copper, anode {GLO}	Copper, anode {GLO}
Electronic component, passive, unspecified {GLO}	Electronic component, passive, unspecified {GLO}
Ethylene glycol {RoW}	Ethylene glycol {RoW}
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}
Impact extrusion of aluminium, 1 stroke {GLO}	Impact extrusion of aluminium, 1 stroke {GLO}
Injection moulding {GLO}	Injection moulding {GLO}
Metal working factory {GLO}	Metal working factory {GLO}
Polyethylene, high density, granulate {GLO}	Polyethylene, high density, granulate {GLO}
Reinforcing steel {GLO}	Reinforcing steel {GLO}
Sheet rolling, aluminium {GLO}	Sheet rolling, aluminium {GLO}
Sheet rolling, copper {GLO}	Sheet rolling, copper {GLO}
Sheet rolling, steel {GLO}	Sheet rolling, steel {GLO}
Tap water {RoW}	Tap water {RoW}
Electricity, medium voltage {CN}	Electricity, medium voltage {CN}

Aucune modification importante des données n'est nécessaire, à l'exception du facteur de caractérisation (CF) du gaz naturel. Dans l'ACV, l'utilisation du gaz naturel est quantifiée en volume

plutôt qu'en poids. La transformation de kg Cu eq/kg en kg Cu eq/m³ est réalisée en multipliant le CF d'origine par un facteur de 0,829, tel qu'indiqué dans les sources bibliographiques.

La modélisation des sous-produits

Comme mentionné ci-dessus, les sous-produits et coproduits dans Ecoinvent sont préalloués, ce qui rend préférable l'application des facteurs de caractérisation (CF) aux flux intermédiaires plutôt qu'aux flux élémentaires. Cependant, les contraintes techniques actuelles limitent cette application. De plus, le problème de l'allocation représente une limitation importante lorsqu'il s'agit d'évaluer les flux massiques des flux élémentaires de ressources comme mentionné dans les précédentes parties.

Interprétation des résultats

Les CFs sont multipliés par les flux de masse dans le cadre de la production de batteries NMC et LFP. Le Tableau 44 résume les activités dont les flux sont agrégés, avec des CFs appliqués de manière similaire à une méthode traditionnelle d'ACV. Selon le type de base de données, les résultats peuvent être disponibles sous un format désagrégé. Dans cette étude de cas, bien que l'ensemble de données sélectionné soit un processus unitaire, l'évaluation se concentre sur les activités de premier niveau (activités de premier plan) traitées comme des processus système pour simplifier l'analyse. La valeur globale représente le risque d'approvisionnement lié à la fabrication de batteries NMC ou LFP du point de vue de la France et de l'UE, comme indiqué dans le Tableau 44. La Figure 55 visualise les contributions des activités, montrant que la cellule de batterie présente le risque d'approvisionnement le plus élevé, contribuant à au moins 80 % pour les cellules NMC et à plus de 65 % pour les cellules LFP, tant en France qu'au sein de l'UE. D'autres contributeurs significatifs incluent l'aluminium, le système de gestion de la batterie et l'emballage des modules de batterie.

Tableau 44 Valeurs du Risque Géopolitique d'Approvisionnement pour la production de NMC811 et LFP du point de vue de la France et de l'UE.

Activity	NMC811 - France	NMC811 - EU	LFP - France	LFP - EU
	Kg Cu eq.	Kg Cu eq.	Kg Cu eq.	Kg Cu eq.
Total GeoPolRisk (kg Cu eq)	1.84383302	0.914574156	0.983193045	0.528987761
Aluminium, wrought alloy {GLO}	0.127610691	0.048963698	0.121981953	0.046803979
Battery cell, Li-ion	1.469185132	0.752868573	0.641680923	0.382071338
Battery management system, for Li-ion battery {GLO}	0.102794279	0.046052585	0.085167554	0.038155684
Battery module packaging, Li-ion {GLO}	0.089847291	0.038216556	0.087678886	0.037294225
Copper, anode {GLO}	0.000888011	0.000566057	0.000479526	0.000305671
Electronic component, passive, unspecified {GLO}	0.026404797	0.01157595	0.021442408	0.009400423
Ethylene glycol {RoW}	0.005163034	0.003472865	0.005719259	0.003847004
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}	0.00015727	0.000133332	8.57836E-05	7.27268E-05
Impact extrusion of aluminium, 1 stroke {GLO}	0.007306518	0.004223859	0.006990578	0.004041216
Injection moulding {GLO}	0.000397782	0.000224723	0.000379121	0.000214181
Metal working factory {GLO}	0.011486632	0.006732608	0.008940332	0.005240157
Polyethylene, high density, granulate {GLO}	0.001137604	0.000919663	0.001084235	0.000876519
Reinforcing steel {GLO}	0.001148504	0.000470195	0.001270152	0.000519997
Sheet rolling, aluminium {GLO}	5.57074E-05	5.57074E-05	4.69855E-05	4.69855E-05
Sheet rolling, copper {GLO}	5.13258E-05	5.13258E-05	2.77159E-05	2.77159E-05
Sheet rolling, steel {GLO}	0.000178971	0.000178971	0.000197928	0.000197928
Tap water {RoW}	2.18434E-06	2.18434E-06	2.41967E-06	2.41967E-06
Electricity, medium voltage {CN}	1.72876E-05	1.72876E-05	1.72876E-05	1.72876E-05

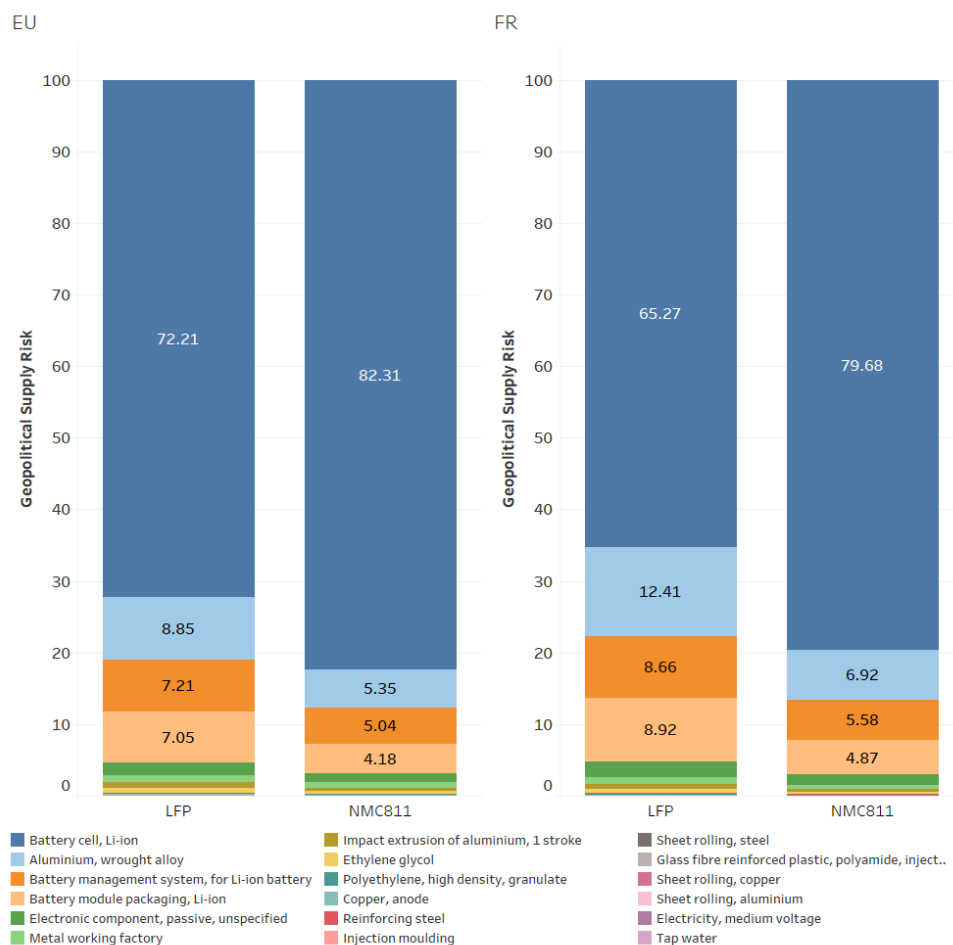


Figure 55 Contribution des différentes activités à l'indicateur de Risque Géopolitique d'Approvisionnement

Les activités critiques sont identifiées, et la Figure 56 examine la contribution de chaque flux de matières premières dans la fabrication des batteries. Il est évident que les combustibles fossiles comme le charbon et le gaz naturel contribuent le plus, suivis par les métaux et les minéraux. Bien que les CFs pour le charbon et le gaz naturel soient relativement faibles par rapport à la plupart des métaux, leur contribution de masse élevée — environ 15 % de la masse totale des matières premières pour le charbon, le gaz naturel et le pétrole brut combinés — est significative. Le fer, représentant environ 4 % de la masse totale des matières premières, possède l'un des CFs les plus bas et, malgré sa masse relativement élevée, ne constitue pas un contributeur majeur.

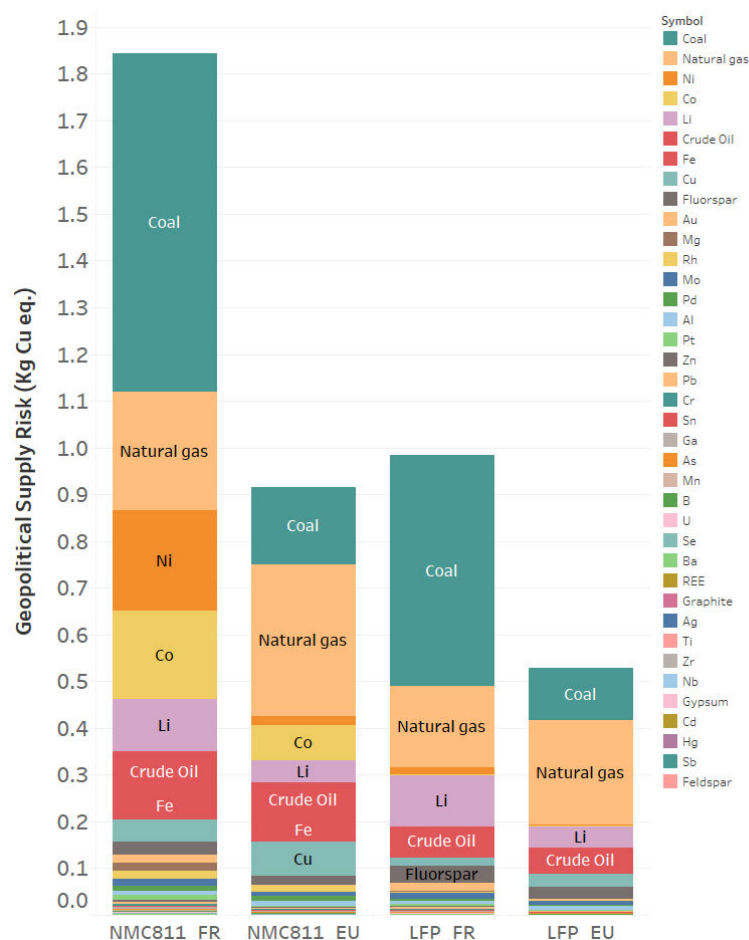


Figure 56 Contribution des différentes matières premières au Risque Géopolitique d'Approvisionnement des batteries NMC et LFP pour l'UE et la France

La production de combustibles fossiles n'est pas concentrée dans quelques pays comme c'est le cas pour certains métaux, tels que le gallium, qui est principalement un sous-produit du raffinage de la bauxite, effectué en grande partie en Chine (plus de 80 % de la production mondiale). Grâce aux initiatives politiques mises en place depuis la crise pétrolière des années 1970, l'approvisionnement en matières premières énergétiques a généralement été stable. Cependant, des événements géopolitiques récents, tels que le conflit entre la Russie et l'Ukraine, ont perturbé l'approvisionnement en gaz naturel en Europe. Cela se reflète dans le composant de risque d'importation de la méthode GeoPolRisk. En analysant uniquement ce composant, le gaz naturel figure parmi les matières premières les plus à risque en termes d'importation.

Cependant, le CF global du gaz naturel est atténué par les trois composantes de la méthode GeoPolRisk. La première composante, le HHI, représente la concentration de production, qui est faible pour le gaz naturel, indiquant une disponibilité élevée. Cela réduit son CF global. À l'inverse, le HHI pour le charbon est relativement plus élevé et, bien que son risque d'importation soit similaire à celui du gaz naturel, le composant prix réduit davantage le CF du charbon. Le composant prix de la méthode GeoPolRisk tient compte de la valeur échangée, y compris les coûts d'expédition, les assurances et les taxes comme les droits d'importation. Contrairement à la valeur marchande des matières premières, ce composant représente le coût réel supporté par l'importateur, offrant une réflexion plus précise du risque que les prix du marché, qui intègrent intrinsèquement des éléments de risque.

La Figure 57 met en évidence les contributions des matières premières, hors combustibles fossiles, au risque d'approvisionnement. Les matières premières clés des batteries, comme le nickel, le cobalt, le

lithium, le fer et le cuivre pour les batteries NMC, ainsi que le lithium et le cuivre pour les batteries LFP, montrent des contributions significatives au risque d'approvisionnement.

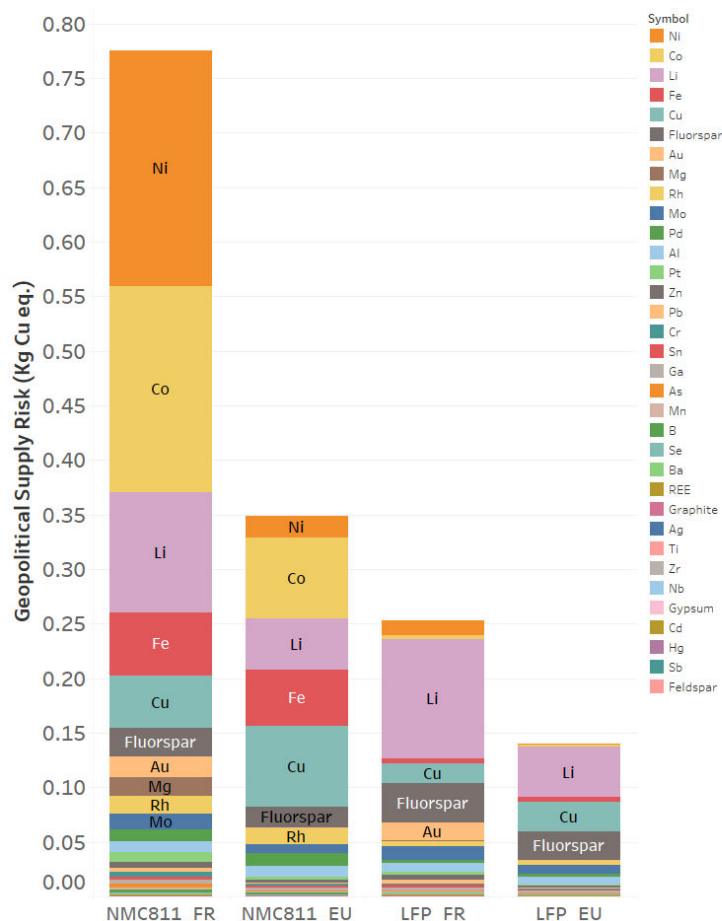


Figure 57 Contribution des différentes matières premières au Risque Géopolitique d'Approvisionnement des batteries NMC et LFP pour l'UE et la France, hors matières premières énergétiques

Comme mentionné précédemment, les trois composantes de la méthode GeoPolRisk révèlent que la production de lithium, de nickel et de cobalt est concentrée dans quelques pays : principalement le Chili et l'Australie pour le lithium, la République Démocratique du Congo pour le cobalt et l'Indonésie pour le nickel. À l'exception de l'Australie, ces pays obtiennent de faibles scores de gouvernance selon la Banque Mondiale, ce qui entraîne des scores de risque d'impact élevés. De plus, les prix de ces matières premières sont élevés, ce qui accroît leur contribution au risque d'approvisionnement.

Une observation intéressante émerge en comparant les contributions pour un même type de batterie entre la France et l'UE. Par exemple, bien que le risque d'importation pour le nickel soit presque identique pour la France et l'UE, le composant prix pour la France est dix fois supérieur à la moyenne de l'UE. Cela suggère que la France supporte des coûts dix fois plus élevés que la moyenne de l'UE pour le nickel. Des tendances similaires sont observées pour le cobalt, le lithium et le cuivre.

Bien que le mix d'importation pour la France et l'UE soit similaire, le composant prix influence de manière significative les CFs différenciés. La Figure 58 illustre les différences de CFs et les deux composantes, risque d'importation et prix, pour les matières premières analysées.

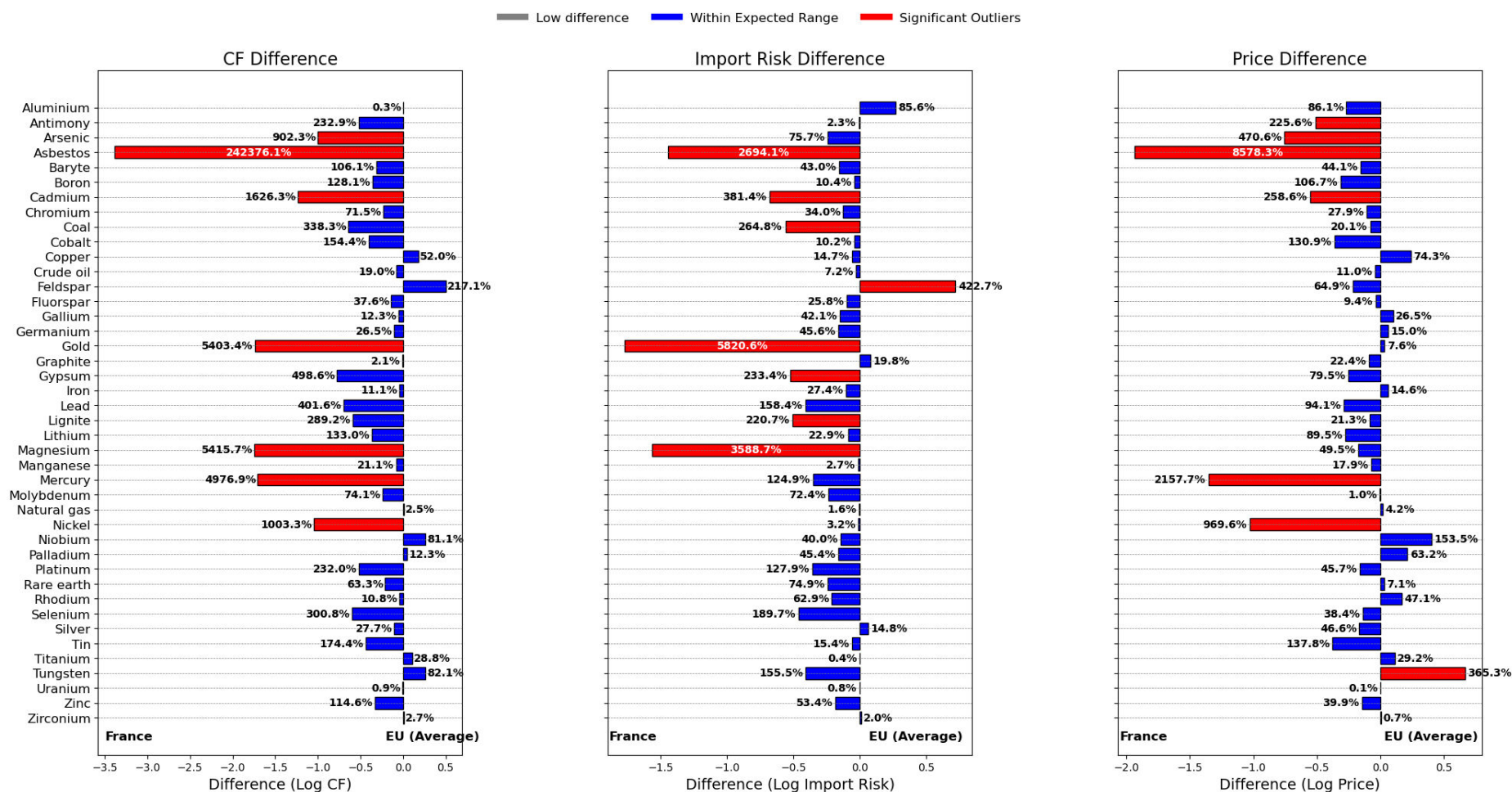


Figure 58 Différences dans le facteur de caractérisation de l'indicateur de Risque Géopolitique d'Approvisionnement et des composantes de la méthode GeoPolRisk (risque d'importation et prix). Les valeurs représentent la différence entre la France et l'UE ; les barres orientées vers la gauche indiquent des valeurs supérieures pour l'UE, tandis que celles orientées vers la droite indiquent des valeurs supérieures pour la France. Les pourcentages indiquent l'ampleur de ces différences

4.2.5. Application of ESSENZ

La méthode ESSENZ, développée par l'université technique de Berlin (Technische Universität Berlin - TUB), permet d'évaluer l'efficacité des ressources utilisées dans les produits, processus et services dans le cadre du développement durable.

Cette approche complète et intégrée mesure les impacts environnementaux, économiques et sociaux à travers 21 catégories distinctes, couvrant non seulement les impacts environnementaux, mais aussi la disponibilité physique et socio-économique des ressources, ainsi que leur acceptabilité sociétale avec des facteurs de caractérisation couvrant **36 métaux** et **4 ressources fossiles (48 ressources abiotiques dans ESSENZ+)**

ESSENZ offre ainsi une évaluation détaillée et adaptable qui peut être utilisée dans le cadre des analyses de cycle de vie (ACV), permettant de comparer l'efficacité des ressources tout au long du cycle de vie des produits, processus ou services. L'accent est mis sur la durabilité et la gestion responsable des ressources afin d'optimiser la conception des produits et la gestion des ressources.

Les trois dimensions clés du développement durable - environnementale, économique et sociale - sont au cœur de la méthode, permettant ainsi une évaluation complète de la durabilité comme le montre la Figure 59.

Construction de la méthode

Comme illustré dans la Figure 59, les facteurs de caractérisation de la méthode ESSENZ pour les indicateurs socio-économiques, disponibilité physique, et acceptation sociétale sont calculés en s'appuyant sur des données spécifiques à chaque catégorie d'indicateur. Voici une synthèse des approches pour chaque groupe :

Les facteurs de caractérisation pour les indicateurs socio-économiques de la méthode ESSENZ sont calculés à partir de données spécifiques et fiables, reflétant les caractéristiques structurelles et économiques des matériaux étudiés. Par exemple, l'indicateur de Concentration mesure la dépendance à un petit nombre de pays producteurs en utilisant l'indice de concentration Herfindahl-Hirschman (HHI), tandis que Mining Capacity évalue la capacité actuelle des infrastructures minières à répondre à la demande mondiale en fonction des volumes de production annuels. D'autres indicateurs, comme Feasibility of Exploration Projects, estiment la viabilité économique des projets d'exploration en tenant compte des investissements nécessaires et des conditions du marché. L'indicateur Companion Metal quantifie la dépendance à l'extraction en tant que sous-produit d'un autre métal principal, ce qui peut augmenter les risques d'approvisionnement.

D'autres dimensions socio-économiques sont également intégrées pour offrir une vision globale des risques et opportunités liés aux matériaux. Par exemple, l'indicateur Trade Barriers analyse les restrictions commerciales ou les tarifs douaniers qui peuvent limiter le commerce des ressources, tandis que Political Stability évalue les risques d'instabilité sociopolitique dans les pays producteurs grâce à des indices comme l'indice de corruption ou de gouvernance mondiale. Les facteurs comme Demand Growth et Primary Material Use capturent la dynamique de la demande et la dépendance aux ressources primaires, tandis que Price Fluctuations mesure la volatilité des prix sur les marchés internationaux. Ces facteurs, calculés à partir de bases de données sectorielles et internationales, permettent une évaluation normalisée et pondérée pour chaque matériau étudié.

Les indicateurs de disponibilité physique (3 indicateurs) et d'acceptation sociétale (2 indicateurs) complètent cette analyse. La disponibilité physique évalue la rareté des ressources à partir de données sur les réserves géologiques, les taux d'extraction et la recyclabilité des matériaux. Par exemple, l'indicateur de durée avant épuisement estime combien d'années une ressource pourrait encore être exploitée aux taux actuels. De leur côté, les indicateurs d'acceptation sociétale mesurent les risques politiques et sociaux à travers des indices comme la stabilité politique ou l'indice de perception de la corruption, tirés de sources internationales fiables. Ces données permettent d'évaluer les risques

éthiques ou de conflits dans les zones d'extraction, apportant une dimension qualitative essentielle à l'analyse du cycle de vie.

La dimension environnementale est calculée avec cinq catégories d'impact calculé avec la méthode CML soit changement climatique, acidification, eutrophisation, émissions de particules et rareté de l'eau.

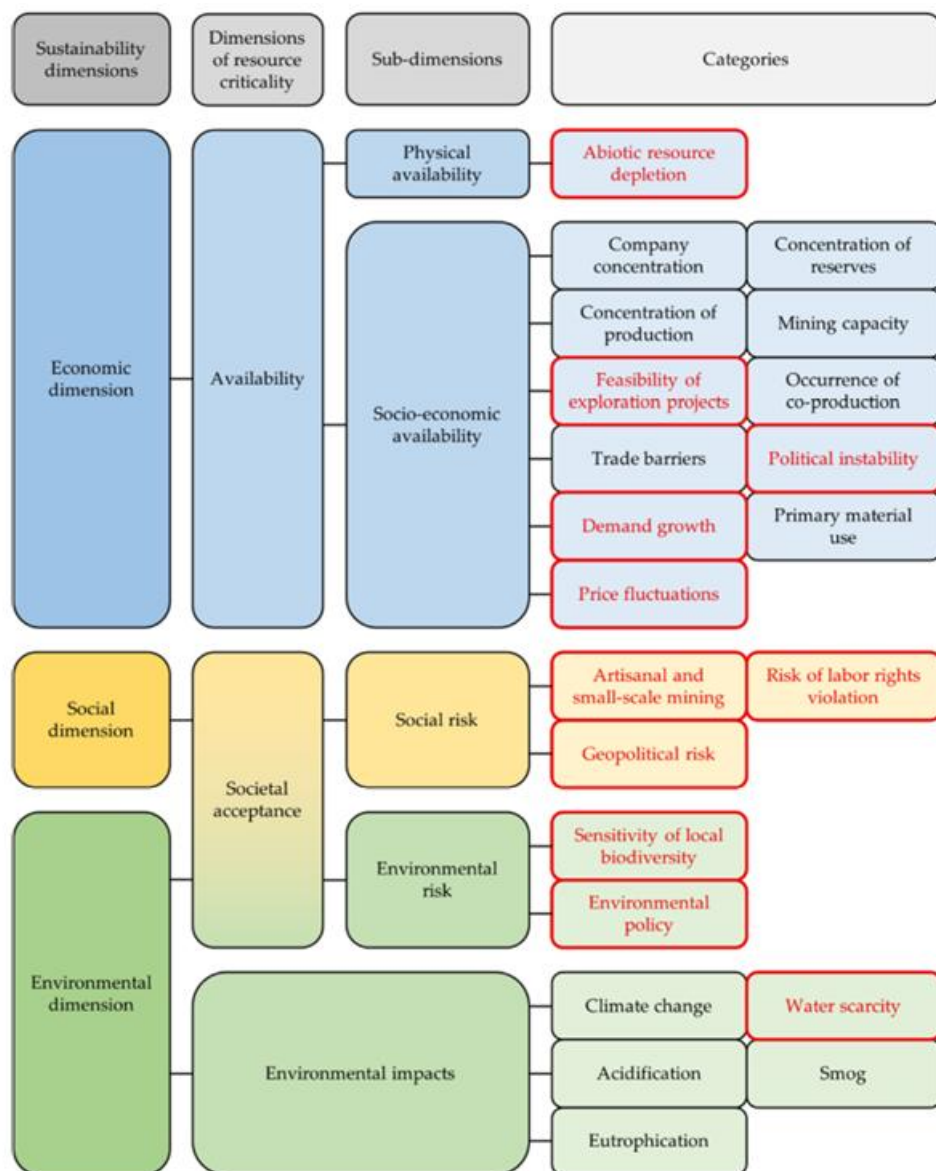


Figure 59 Aperçu des dimensions et catégories prises en compte dans ESSENZ+ avec les catégories mises à jour entre ESSENZ et ESSENZ+ encadrés en rouge (Bach et al., 2016)

Application de la méthode

Dans cette étude, nous avons utilisé les facteurs de caractérisation de la méthode **ESSENZ+**, mise à jour pour l'année 2024 par (Bach et al., 2024; TU Berlin, n.d.), afin d'évaluer deux dimensions : la **criticité socio-économique** (disponibilité et sécurité d'approvisionnement) et l'**acceptabilité sociétale** des éléments entrant dans la production de deux types de batteries : **LFP** et **NMC811**. Les facteurs de caractérisations se trouvent en Tableau 64 et Tableau 65 en Annexe 7.

Sur Excel, les quantités de chaque ressource ont été multipliées par les facteurs de caractérisation correspondants pour calculer les valeurs de criticité relatives à ces deux dimensions. La partie

environnementale ne fait pas partie de cette partie car cette étude détaillée a été réalisée dans la section 4.2.2.

Les quantités de chaque ressource sont issues des données d'inventaire (Flux élémentaires) des matières premières extraites de la base de données ecoinvent 3.10. L'analyse a été menée selon une approche berceau-à-la-porte (cradle-to-gate), couvrant l'ensemble du cycle de vie des matières premières jusqu'à leur transformation en produits finis.

Les modèles suivants ont été utilisés pour les batteries analysées :

- Batterie NMC811: Poids total de 435,8 kg. Donnée utilisée : « Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic {RoW} | battery production, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | Cut-off, U ».
- Batterie LFP: Poids total de 562,3 kg. Donnée utilisée : « Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {RoW} | battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic | Cut-off, U ».

Le choix d'utiliser les flux élémentaires plutôt que la BoM des composants pour cette analyse repose sur trois raisons principales :

- **Harmonisation des études de cas au sein de cette analyse** (Permet d'assurer une cohérence méthodologique entre les différentes études de cas.)
- **Utilisation des inventaires ACV existants au lieu des BoM** (Facilite l'exploitation des données disponibles dans les bases de données ACV sans nécessiter la création d'une BoM spécifique.)

Résultats

Après avoir calculé les valeurs de criticité en termes de **disponibilité socio-économique** et d'**acceptabilité sociétale**, une analyse a été réalisée pour identifier les éléments des batteries présentant les plus hauts niveaux de criticité.

Les résultats de cette analyse sont illustrés par les deux graphiques suivants, qui montrent respectivement les ressources les plus critiques pour la batterie **LFP** et la batterie **NMC811**. Les résultats détaillés sont présentés dans les Tableau 66 et Tableau 67 en Annexe 8.

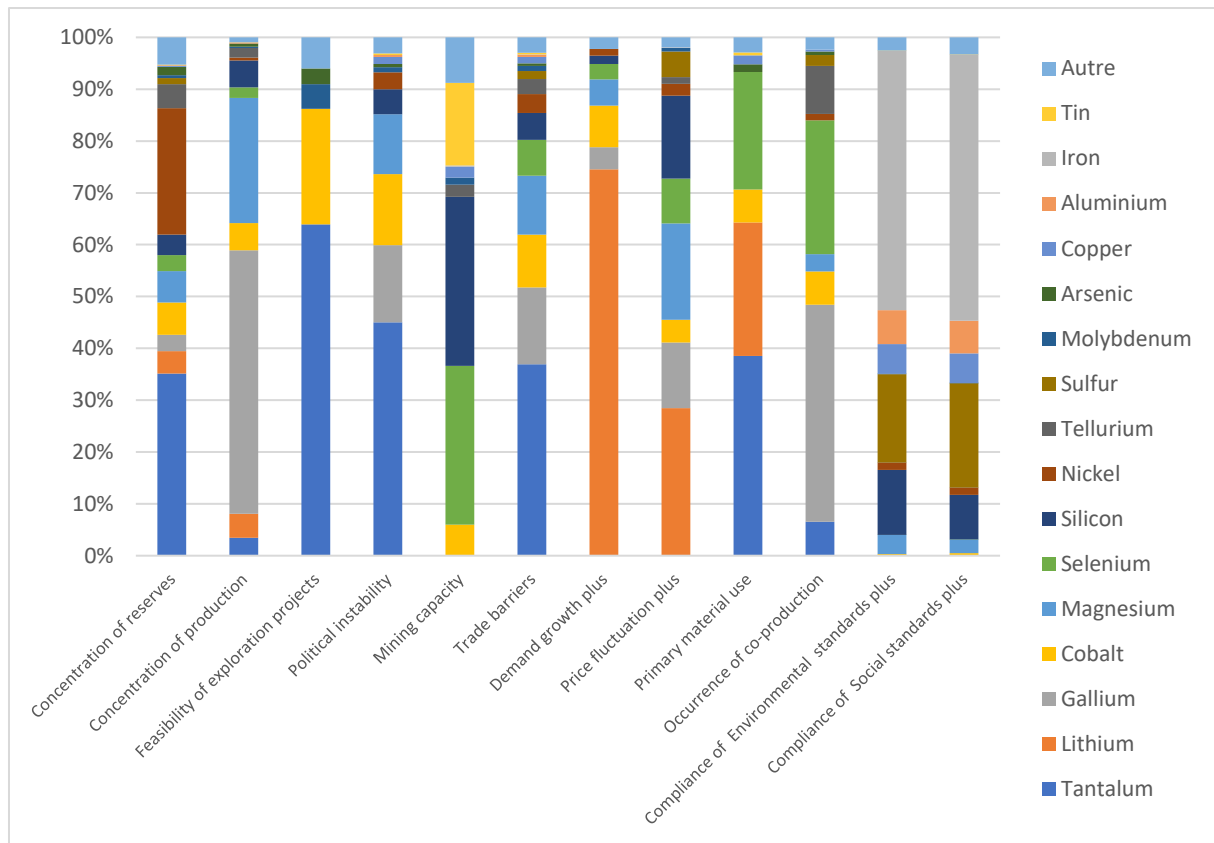


Figure 60 Résultats de l'analyse de la disponibilité socio-économique et de l'acceptabilité sociétale des ressources utilisées dans la batterie NMC811

La Figure 60 présente une analyse de la criticité des matériaux (batterie NMC811) en fonction de différentes dimensions ou facteurs, tels que la concentration des réserves, la capacité d'extraction minière, la conformité aux normes sociales, etc. Chaque barre empilée montre la contribution relative des différents matériaux (comme le lithium, le cobalt, le nickel, etc.) à chaque facteur.

Matériaux dominants :

- **Concentration des réserves et de la production** : Le bleu (Tantale) est un contributeur majeur, indiquant une forte dépendance géographique à ce matériau, tandis que le gris (Gallium) et marron (Magnésium) reflète un monopole de production.
- **Instabilité politique et barrières commerciales** : Mélange de plusieurs matériaux, avec une contribution notable du bleu (Tantale), du jaune (Cobalt) et du gris (Gallium).
- **Fluctuation des prix et croissance de la demande** : L'orange (Lithium), Silicon et le jaune (Cobalt) dominant.
- **Les normes sociales et environnementales (compliance of social/environmental)** : Elles affichent une diversité de matériaux, avec un poids notable pour le fer (iron), reflétant une quantité significative (voir 5.2).

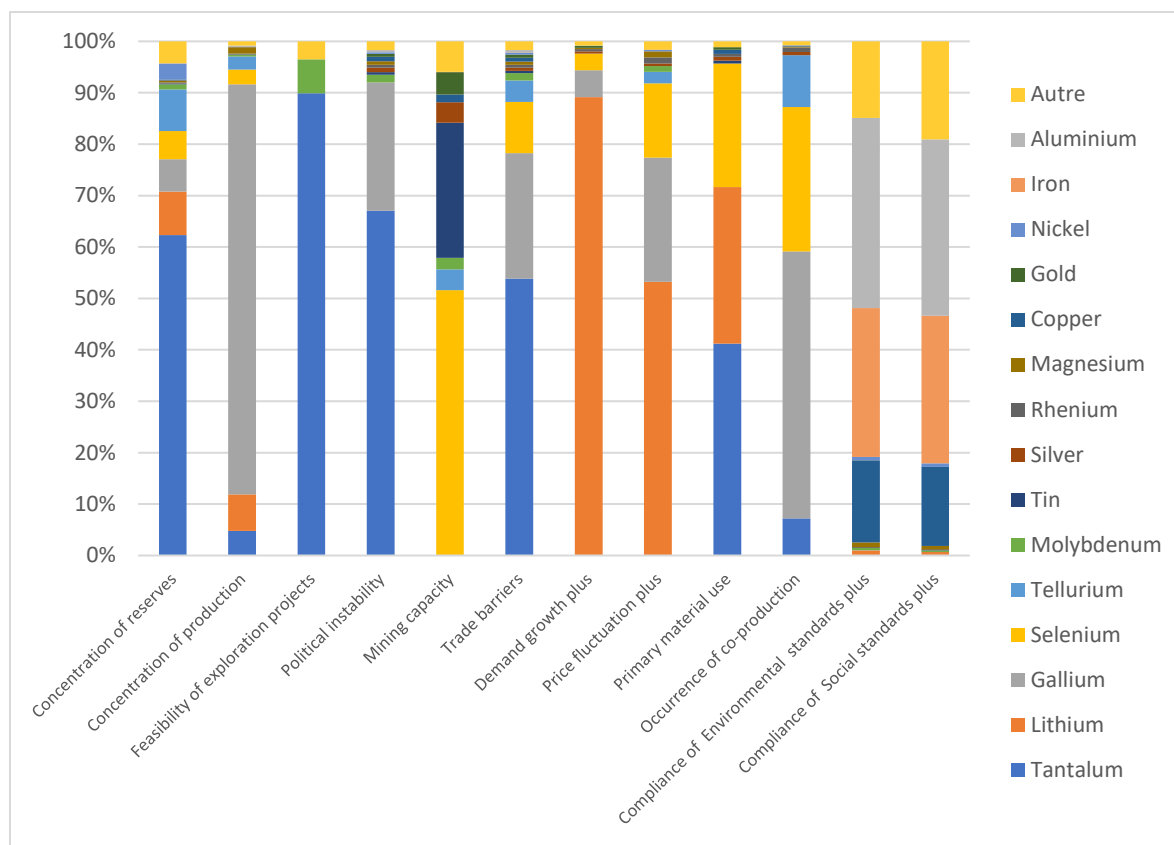


Figure 61 Résultats de l'analyse de la disponibilité socio-économique et de l'acceptabilité sociétale des ressources utilisées dans la batterie LFP

La Figure 61 met en évidence l'interconnexion entre les matériaux et les défis liés à leur extraction (batterie LFP), leur utilisation et leur gouvernance. Il montre que certains matériaux (par exemple, Lithium, Tantalum) jouent un rôle prépondérant dans certains domaines de risque.

Matériaux dominants :

- **Concentration des réserves et de la production** : Le bleu (Tantalum) est un contributeur majeur, indiquant une forte dépendance géographique à ce matériau, tandis que le gris (Gallium) reflète un monopole de production.
- **Instabilité politique et barrières commerciales** : Mélange de plusieurs matériaux, avec une contribution notable du bleu (Tantalum) et du gris (Gallium).
- **Fluctuation des prix et croissance de la demande** : L'orange (Lithium) et du gris (Gallium) dominant.
- **Les normes sociales et environnementales (compliance of social/environmental)** : Elles affichent une diversité de matériaux, avec un poids notable pour fer (iron) et l'Aluminium.

En additionnant les résultats pour toutes les ressources de chaque type de batterie, pour chaque élément de criticité, de disponibilité socio-économique et d'acceptabilité sociétale, nous avons obtenu des résultats agrégés sous forme de pourcentages. Ces éléments de criticité ont été analysés, ce qui

nous a permis de générer le diagramme présenté dans la Figure 62, illustrant la comparaison entre les batteries NMC811 et LFP.

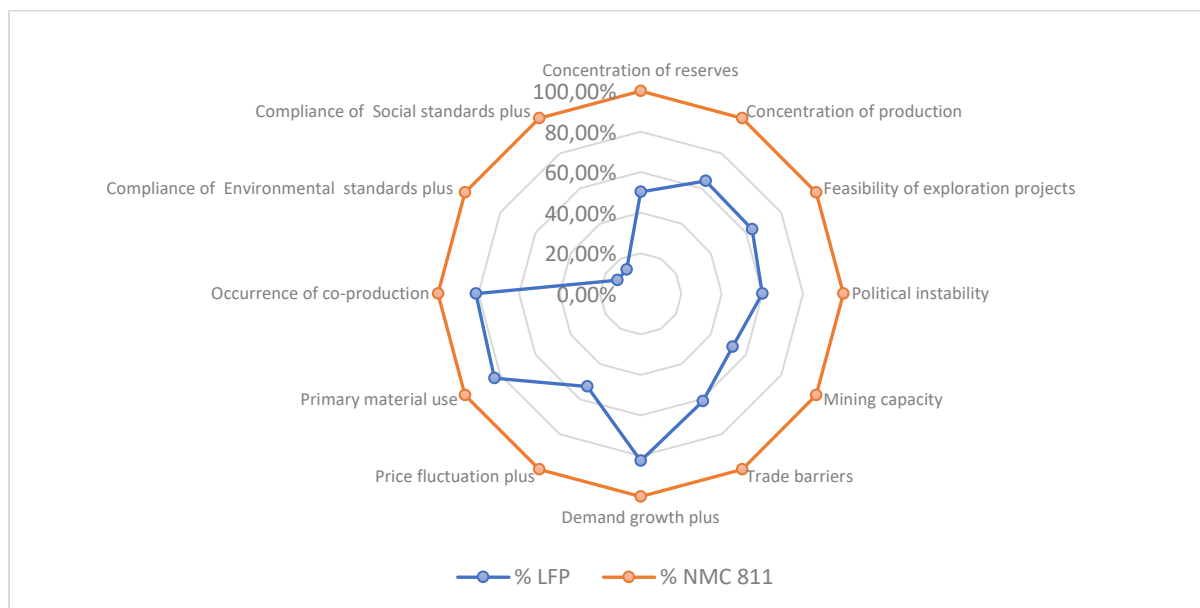


Figure 62 Comparaison des batteries NMC811 et LFP basée sur les résultats de criticité socio-économique et d'acceptabilité sociétale.

La batterie de type NMC811 est jugée plus critique en raison des enjeux liés à la disponibilité socio-économique et à l'acceptabilité sociétale. Cela s'explique par la présence de matériaux plus difficiles d'accès, associés à des problèmes d'extraction et à des préoccupations sociales et éthiques importantes. En revanche, les batteries LFP, qui utilisent des matériaux plus abondants et généralement extraits dans des conditions moins controversées, présentent une empreinte socio-économique et environnementale globalement plus favorable.

4.3. Analyse de Sensibilité

Le Critical Raw Materials Act (CRMA) est un cadre législatif de l'Union Européenne visant à sécuriser l'approvisionnement en matériaux stratégiques, essentiels pour des secteurs clés comme la mobilité électrique, les énergies renouvelables et les technologies numériques. Face à la dépendance de l'Europe aux importations de matériaux critiques tels que le **lithium** et le **cobalt** le CRMA vise à renforcer la résilience de l'UE en développant une économie circulaire et durable, réduisant ainsi l'impact environnemental de l'extraction minière. Il a été proposé en septembre 2023 et a été adopté en mai 2024 (European Commission, 2024c).

L'un des objectifs centraux du CRMA est d'atteindre un taux de **25% de recyclage des matériaux critiques** afin de les réutiliser en tant que contenu recyclé d'ici 2030. Cela implique de récupérer un quart des matériaux essentiels utilisés dans les batteries et autres technologies à partir des déchets, notamment des **batteries usagées** et des **déchets électroniques**. Cette initiative vise à réduire la dépendance de l'Europe aux importations et à stimuler le développement de technologies de recyclage plus efficaces, contribuant ainsi à une transition énergétique plus durable.

Nous allons évaluer les quantités de cobalt et de lithium que l'Europe peut recycler des batteries lithium-ion de véhicules électriques sur la période 2020-2050. Nous allons également évaluer la demande dans ces matériaux sur cette période en se basant sur les valeurs de marché afin d'estimer si les réserves en matériaux recyclés de l'Europe serait suffisante sur cette période. Le cas du cobalt est intéressant car il y a un objectif de 26% d'utilisation de matériaux recyclés à partir de 2036, il faut donc respecter les demandes du CRMA pour atteindre ces objectifs.

Les analyses sont basées sur les calculs réalisés dans le cadre du projet BATTERS du bureau d'étude WeLOOP (WeLOOP, 2023) qui a estimé les études des marché européens pour plusieurs chimies de batteries Li-ion ainsi que la capacité de production et de recyclage des batteries et déchets de batteries (scraps) à l'échelle de la région Hauts-de-France en France. Les données ont été adaptées aux capacités de recyclage des usines européennes actives et en projet afin d'estimer la capacité de recyclage de l'Europe pour atteindre les objectifs du CRMA.

4.3.1. Evaluation de la capacité de l'Europe à satisfaire la demande en lithium et cobalt recyclés

Evaluation des quantités de batteries et déchets de batteries à recycler

Dans le cadre du projet Batters, en estimant une durée de première vie de batterie de 15 ans et une durée de deuxième vie de 10 ans, le Tableau 45 a été développé pour estimer le marché du recyclage sur l'intervalle 2025-2050 en Europe.

Tableau 45 Calculs et Hypothèses des quantités de batteries Lithium - ion disponibles au recyclage sur la période 2005-2050 avec les hypothèses prises en compte, Projet Batters

	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ventes totales	14 000 000,00	14 000 000,00	14 000 000,00	12 000 000,00	12 000 000,00	12 000 000,00	12 000 000,00	12 000 000,00	12 000 000,00	12 000 000,00
Part EV	0	0,001	0,012	0,112	0,28	0,58	0,90	0,90	0,90	0,90
Capacité (kWh)	0	24	40	55	60	65	65	65	65	65
Densité (kg/kWh)	0	6	6	7	7	7	7	7	7	7
Masse produite (t)	0,00	2 016,00	40 320,00	517 440,00	1 411 200,00	3 166 800,00	4 914 000,00	4 914 000,00	4 914 000,00	4 914 000,00
Taux réemploi	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Taux collecte	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Quantité en réemploi (t)	0,00	0,00	0,00	0,00	1 632,96	32 659,20	419 126,40	1 143 072,00	2 565 108,00	3 980 340,00
Quantité en recyclage (t)	0,00	0,00	0,00	0,00	181,44	3 628,80	48 202,56	159 667,20	704 138,40	1 585 332,00

Tableau 46 Quantités estimées des déchets (scraps) de production européenne de batteries lithium-ion sur la période 2005-2050, projet Batters

	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Masse produite (t)	0	2016	40320	517440	1411200	3166800	4914000	4914000	4914000	4914000
Part Scrap de production	0%	20%	20%	20%	20%	15%	5%	5%	5%	5%
Quantité scrap (t)	0	403,20	8 064,00	111 955,20	282 240,00	475 020,00	245 700,00	245 700,00	245 700,00	245 700,00

Avec ces quantités et en se basant sur les données de marché des Tableau 47 et Tableau 48 et aux proportions de composants dans les batteries du Tableau 49 et les quantités de déchets du Tableau 46 on obtient les quantités de matériaux disponibles au recyclage des batteries et déchets de batteries lithium-ion dans le Tableau 50

Tableau 47 Marché européens des technologies de batteries de véhicules électriques utilisant des batterie Lithium-ion sur l'intervalle 2010-2035, projet Batters

Mix de batteries en	Mix batteries disponibles au recyclage en	NMC811	NMC532	NMC622	NMC111	NCA+	LFP
2005	2020	0	0	0	0	0	0
2010	2025	0%	0%	0%	38%	0%	49%
2015	2030	0%	0%	0%	75%	18%	0%
2020	2035	0%	24%	57%	0%	18%	0%
2025	2040	15%	15%	45%	0%	0%	25%
2030	2045	40%	5%	25%	0%	5%	25%
2035	2050	50%	0%	20%	0%	5%	25%

Tableau 48 Mix des scraps de batteries européennes sur la période 2025-2050, projet Batters

	NMC811	NMC532	NMC622	NMC111	NCA+	LFP
2020	0%	24%	57%	0%	18%	0%
2025	15%	15%	45%	0%	0%	25%
2030	40%	5%	25%	0%	5%	25%
2035	50%	0%	20%	0%	5%	25%
2040	55%	0%	15%	0%	5%	25%
2045	60%	0%	10%	0%	5%	25%
2050	60%	0%	10%	0%	5%	25%

Tableau 49 Proportion de lithium et cobalt présents dans les batteries et déchets de batteries Lithium-ion selon la chimie

	NMC811	NMC532	NMC622	NMC111	NCA+	LFP
Lithium	2,1%	2,6%	2,3%	2,6%	2,6%	2,0%
Cobalt	2,1%	4,1%	4,3%	7,0%	0,9%	0,0%

Tableau 50 Quantités estimées de lithium (en tonnes) et cobalts disponibles au recyclage sur la période 2025-2050

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lithium	2 714,26	6 353,66	10 420,42	6 418,35	8 809,82	20 533,56	39 058,06
Cobalt	3 996,19	8 030,45	10 383,08	6 475,07	9 023,61	19 583,67	34 889,80

La capacité de l'Europe à recycler les batteries Lithium-ion ne vient pas de la capacité de recyclage de batteries, car de nouvelles sont construites pour satisfaire la demande, mais des batteries disponibles au recyclage

Avec des objectifs d'efficacités de recyclages fixés à 80% pour le lithium et à 90% pour le cobalt dans la Réglementation batterie, excédant donc les 25% du CRMA, l'Europe pourrait produire les matériaux recyclés du Tableau 51.

Tableau 51 Matériaux pouvant être recyclés en Europe sur la période 2020-2050 en tonnes

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lithium	2 171,41	5 082,92	8 336,33	5 134,68	7 047,86	16 426,85	31 246,45
Cobalt	3 596,57	7 227,40	9 344,78	5 827,56	8 121,25	15 666,94	27 911,84

Demande en matériaux recyclés

La réglementation (EU) 2023/1542 impose des taux de matériaux recyclés dans les batteries pour le lithium et le cobalt de 6% et 16% respectivement en 2031 et 12% et 26% respectivement en 2036 (European Commission, 2023). Afin d'évaluer la capacité de l'Europe à fournir ces matériaux recyclés avec les capacités de recyclage actuelles et annoncées il faut estimer la demande en matériaux sur la période 2025-2050

Pour cela il faut estimer les parts de marché sur cette période pour estimer les matériaux nécessaires à les produire, ce qui a été fait dans le cadre du projet Batters et se retrouve dans le Tableau 52.

Tableau 52 Marché européens des technologies de batteries de véhicules électriques utilisant des batterie Lithium-ion sur l'intervalle 2025-2050, projet Batters

Mix de batteries en	Mix batteries disponibles au recyclage en	NMC811	NMC532	NMC622	NMC111	NCA+	LFP
2025	2040	15%	15%	45%	0%	0%	25%
2030	2045	40%	5%	25%	0%	5%	25%
2035	2050	50%	0%	20%	0%	5%	25%
2040	2055	55%	0%	15%	0%	5%	25%
2045	2060	60%	0%	10%	0%	5%	25%
2050	2065	60%	0%	10%	0%	5%	25%

Les masses de batteries produites sont estimées dans le Tableau 45. Avec les parts de marché du Tableau 52 et la composition en métaux des batteries dans le Tableau 49 on obtient les quantités de matériaux nécessaire à la production des batteries basées sur le marché estimé ainsi que la demande en matériaux recyclés.

Tableau 53 Masses estimées de cobalt et lithium nécessaire à la production des batteries sur la période 2025-2050, projet Batters

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lithium (tonnes)	31 750,38	68 882,68	104 994,36	104 349,83	103 705,29	103 705,29
Cobalt (tonnes)	40 128,12	67 912,14	95 090,01	89 667,97	84 245,93	84 245,93

Tableau 54 Estimation de la demande en cobalt et lithium recyclés sur la période 2025-2050 pour la production de batteries

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Taux lithium recyclé	6%	6%	6%	12%	12%	12%
Taux cobalt recyclé	16%	16%	16%	26%	26%	26%
Lithium (tonnes)	2 665,01	5 109,21	7 557,78	14 230,72	14 230,72	14 230,72
Cobalt (tonnes)	8 981,88	13 432,59	18 210,49	27 508,70	27 508,70	27 508,70

En comparant les Tableau 51 et Tableau 54, on obtient la part de la demande en matériaux recyclés que l'Europe pourrait satisfaire avec les usines actuelles et annoncées et le marché estimé dans le Tableau 55.

Tableau 55 Part de la demande en matériaux recyclés que l'Europe pourrait satisfaire sur la période 2025-2050

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lithium	100,00%	100,00%	81,51%	56,28%	100,00%	100,00%
Cobalt	100,00%	86,00%	38,30%	34,83%	71,53%	100,00%

4.3.2. Résumé de la capacité européenne à respecter les objectifs de recyclage du CRMA

Les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrent les Tableau 51, Tableau 54 et Tableau 55 et montrent que l'Europe pourrait satisfaire les demandes en cobalt et lithium recyclés dans les batteries lithium ion de véhicules électriques sur la période 2025-2030. Il y aurait ensuite un besoin de matériaux recyclés venant d'autres pays entre 2030 et 2040 avant que la demande puisse à nouveau être satisfaite en 2045-2050 si les ventes de véhicules et les taux de matériaux recyclés restent les mêmes.

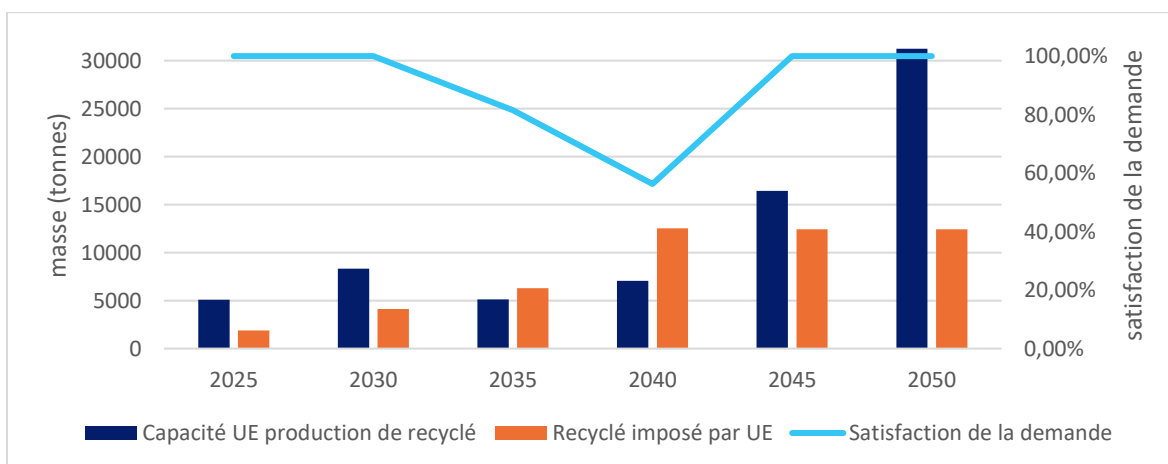


Figure 63 Satisfaction de demande de production de lithium recyclé en Europe

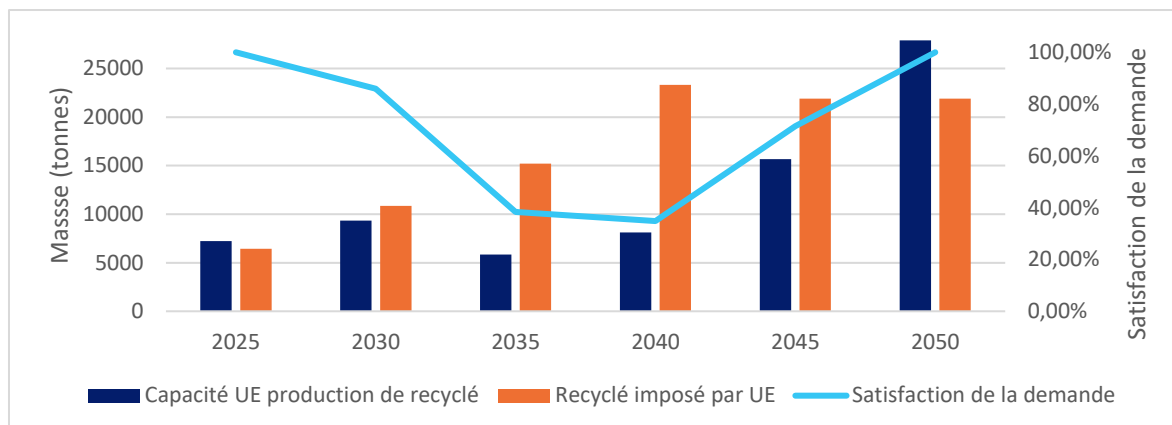


Figure 64 Satisfaction de la demande de production de cobalt recyclé en Europe

Avec les objectifs d'efficacité de recyclage fixés par la réglementation batterie (EU) 2023/1542, les objectifs du CRMA seront respectés sur la période 2030-2050. Cependant, une augmentation des taux de matériaux recyclés diminuerait la capacité de l'Europe à fournir du cobalt et du lithium recyclés pour respecter la réglementation batterie (EU) 2023/1542. Par exemple, une augmentation du taux de cobalt recyclés à 50% diminuerait les capacités de l'Europe à produire du cobalt recyclé à 60% en 2050 au lieu des 100% estimés avec les taux de recyclés de la réglementation batterie. Les calculs ne prennent pas en compte la quantité de batteries exportées ou autre fuite de matériaux.

La criticité du lithium et cobalt dépendent de la provenance des matériaux. Nous avons vu dans la première étude de cas dans la partie 4.1 que l'Europe aura dans les prochaines années la capacité de produire du lithium européen diminuant ainsi sa criticité dans les années 2035-2040 quand l'Europe ne sera pas capable de fournir suffisamment de lithium. Il n'y a en revanche pas de possibilité de production de cobalt en Europe.

4.3.3. Conclusion

Les résultats montrent que l'Europe est capable de satisfaire la demande en matériaux recyclés sur certaines périodes (2025-2030 et 2045-2050), mais des lacunes significatives subsistent entre 2030 et 2040, nécessitant un recours aux importations.

La dépendance persistante au cobalt, faute de production locale, contraste avec les progrès potentiels pour le lithium grâce à l'exploitation des ressources européennes. Cependant, l'efficacité des capacités de recyclage est étroitement liée aux taux imposés par la réglementation. Une augmentation de ces taux, bien qu'en faveur de la durabilité, risque de limiter la capacité de l'Europe à répondre aux besoins futurs en matériaux recyclés. Cette situation met en lumière la nécessité d'élargir les capacités industrielles et de développer des stratégies complémentaires pour garantir l'autonomie à long terme. En conclusion, si les objectifs du CRMA et de la réglementation (EU) 2023/1542 sont ambitieux et prometteurs, une coordination renforcée entre les acteurs industriels et politiques ainsi qu'un suivi rigoureux des marchés seront essentiels pour surmonter les défis à venir et assurer une transition énergétique durable et résiliente.

Sensibilité des résultats de IRTC à une augmentation de contenu recyclé

Dans l'approche IRTC, il n'existe pas de méthode formelle pour modéliser les matériaux recyclés. Deux approches de modélisation peuvent être envisagées :

- **Le flux de matières premières est indéfini quant à son origine primaire ou recyclée.**

Dans cette approche, une augmentation du recyclage entraîne une diversification accrue de l'approvisionnement en matières premières. Le pays qui fournit les matières premières recyclées est ajouté au mix global d'approvisionnement, et ce pays est évalué en fonction d'indicateurs spécifiques,

tels que sa stabilité politique. Si les matières premières recyclées sont fournies depuis l'Europe, un effet positif est attendu sur la stabilité politique des pays fournisseurs. Cependant, si l'Europe dépend principalement de l'approvisionnement en matériaux recyclés provenant de pays comme la Chine, les scores des indicateurs pourraient ne pas s'améliorer de manière significative. De plus, les matières premières recyclées sont par définition des sous-produits, car leur approvisionnement dépend de la disponibilité des déchets en fin de vie. Ainsi, un déclin du marché d'un certain produit (par exemple, les batteries contenant du cobalt) entraînera également une diminution de l'approvisionnement en cobalt recyclé. Par conséquent, une part plus importante des matières premières sera considérée comme un sous-produit, ce qui constitue l'un des indicateurs de criticité inclus dans la méthode IRTC.

- **Les matières premières recyclées sont considérées comme un flux distinct des matières premières primaires.**

Cette approche est adaptée si la teneur en matières recyclées d'un produit est fixe (par exemple, en vertu de réglementations locales ou du CRMA), et que les matières premières recyclées ne sont pas considérées comme substituables par des matières premières primaires. Dans ce cas, les perturbations de l'approvisionnement en matériaux recyclés peuvent être évaluées de manière complètement indépendante des perturbations de l'approvisionnement en matières premières primaires. Par exemple, si l'Europe dépend d'un seul pays tiers pour l'approvisionnement en cobalt recyclé, la concentration de l'approvisionnement sera évaluée comme très élevée – encore plus que pour l'approvisionnement primaire. De plus, la stabilité politique (et d'autres indicateurs spécifiques aux pays) sera évaluée pour ce pays fournisseur. Dans ce cas également, les matériaux recyclés sont considérés comme des sous-produits, ce qui fait que le pourcentage fourni en tant que sous-produit est de 100 %, indiquant ainsi un point critique de criticité.

Sensibilité des résultats de GeoPolRisk à une augmentation de contenu recyclé

La méthode GeoPolRisk évalue le risque d'approvisionnement des matières premières critiques et prend en compte le potentiel du recyclage domestique pour atténuer ces risques. Elle suppose que le recyclage peut réduire le risque d'approvisionnement si les matériaux recyclés sont réintégrés dans l'économie locale et si le mix d'approvisionnement en importations est géré stratégiquement. Le recyclage réduit le risque via deux mécanismes :

- **Effet de réduction** : Réduit les importations totales en compensant la demande de matières premières avec des matériaux recyclés.
- **Effet de redistribution** : Modifie les sources d'importation, en remplaçant potentiellement des partenaires commerciaux à risque élevé par d'autres moins risqués.

Ces effets sont évalués selon divers scénarios, allant du meilleur cas (remplacement des importations provenant de fournisseurs à haut risque) au pire cas (remplacement des importations provenant de fournisseurs à faible risque).

Le recyclage domestique est distinct de l'utilisation de contenu recyclé provenant de sources mondiales. Dans le cadre de GeoPolRisk, les matériaux recyclés localement sont considérés comme « sans risque » sur le plan géopolitique, car ils soutiennent la production locale et réduisent la dépendance aux importations. À l'inverse, les matériaux recyclés provenant de l'étranger sont traités comme des importations et restent soumis à des risques géopolitiques. Cette approche s'aligne sur l'évaluation des risques d'approvisionnement au niveau national.

La méthode GeoPolRisk est adaptable pour évaluer les risques pour des groupes de pays ou des régions définies par le praticien. Dans ces cas, le recyclage domestique fait référence au recyclage au sein de la région définie ou par des entreprises spécifiques.

La méthode intègre l'indicateur EoL-RiR (End-of-Life Recycling Input Rate) pour appliquer les mécanismes de réduction et de redistribution. Cependant, cet indicateur est actuellement limité à l'Europe. Des modifications pour créer des indicateurs de recyclage spécifiques à chaque pays sont possibles, mais elles sont contraintes par la disponibilité des données. L'absence de données publiques

sur le recyclage dans d'autres pays est la principale raison pour laquelle le contenu recyclé n'a pas été pris en compte dans l'application de la méthode GeoPolRisk dans cette étude de cas.

Point de vue de ESSENZ+ sur l'analyse de sensibilité

Un aperçu de l'ajustement des facteurs de caractérisation (CF) pour les matériaux recyclés est présenté dans la Figure 65. Les catégories marquées en rouge sont ajustées, tandis que les catégories grisées sont considérées comme non pertinentes pour les matériaux recyclés, ce qui conduit à attribuer un risque nul pour celles-ci.

L'ADP (Abiotic Depletion Potential) est supposé non pertinent pour les matériaux recyclés, car les matériaux recyclés ne sont pas pris en compte. Les autres catégories grisées concernent les matériaux primaires extraits. Les catégories **Croissance de la demande** et **Fluctuations des prix** ne sont pas ajustées, car la demande de matières premières peut être satisfaite à la fois par des matériaux primaires et secondaires, et parce que les matières premières, « quelle que soit leur origine primaire ou secondaire, ont généralement la même valeur »

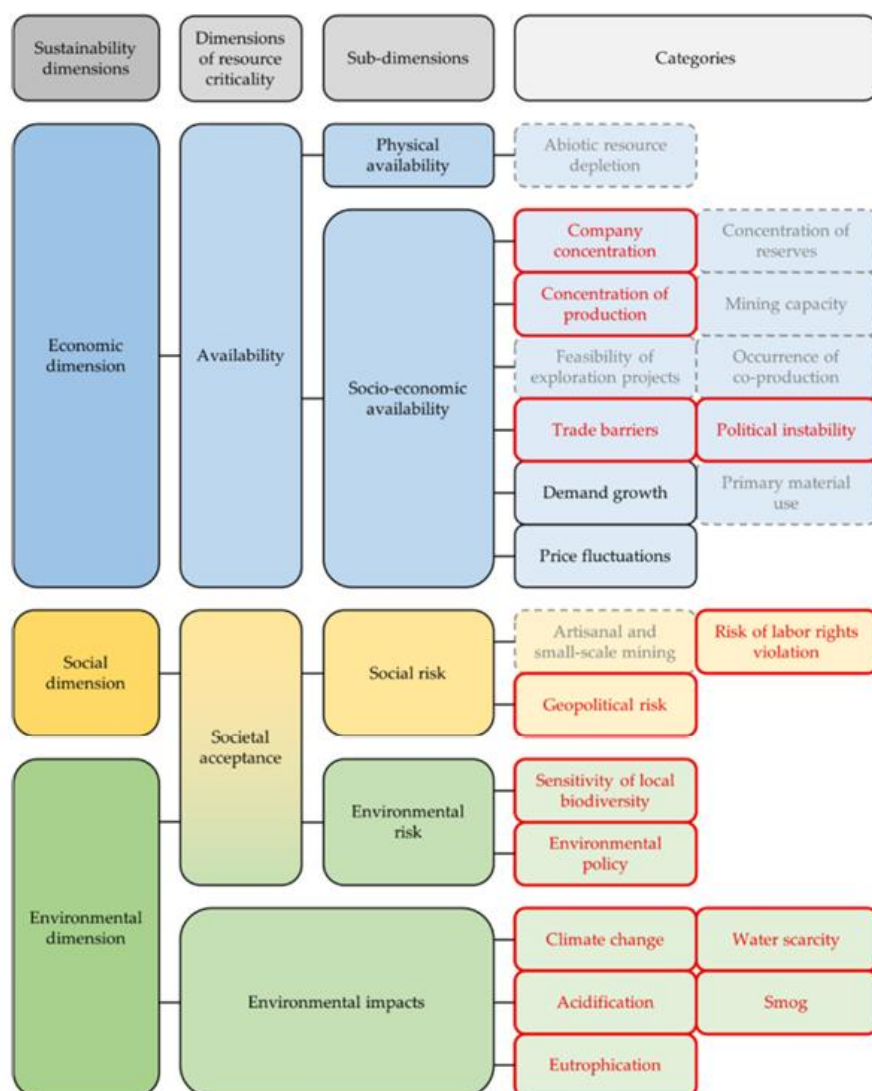


Figure 65 Catégories affectées concernant les produits recyclés, les catégories ajustées dans la méthode ESSENZ+ sont marquées en rouge et celle en grises sont assumées sans importance pour les produits recyclés. (Pelzeter et al., 2022)

Pour les matériaux recyclés, il est toutefois nécessaire de mener des recherches afin de compiler une liste des parts de marché des différents pays en ce qui concerne les activités de recyclage spécifiques à chaque produit au niveau mondial. Ces recherches devraient couvrir toutes les activités de recyclage dont les produits peuvent être utilisés dans le cadre de l'évaluation du produit étudié. Les parts de marché des pays issues de ces recherches remplacent les parts de production mondiale relatives aux matières premières primaires. Ainsi, pour les catégories basées sur les pays, la différence entre les matières premières secondaires et primaires découle des localisations distinctes de production (c'est-à-dire les activités de recyclage au niveau mondial par opposition à la production minière mondiale d'une matière première).

Étant donné que notre temps était limité et que les facteurs de caractérisation (CF) pour les matériaux recyclés n'étaient pas disponibles, nous recommandons d'étendre cette étude à l'avenir afin d'inclure les risques d'approvisionnement en matériaux recyclés provenant d'autres pays, en particulier les parts qui ne peuvent pas être fournies au sein de l'Europe.

5. Synthèse des études de cas et Conclusion

5.1. Synthèse des études de cas

5.1.1. Evaluation environnementale de la relocalisation en Europe de l'extraction et la préparation d'un matériau critique plutôt que son importation d'un pays « tiers »

Lors de la première étude de cas (partie 4.1), les résultats ont montré qu'une production européenne de lithium présente un potentiel certain en termes de réduction d'impacts environnementaux dans la plupart des catégories d'impacts en comparaison des principales filières aujourd'hui en opération au niveau mondial, tel que AU/CN, concordant ainsi avec les prédictions de criticité. Il reste néanmoins plus élevé que le cas chilien pour les catégories d'impacts « resource use, minerals and metals », « eutrophication, marine » et « resource use, fossils ».

D'un **point de vue de criticité** on peut anticiper la différence qu'entraînerait une production d'hydroxyde de lithium en Finlande dans les résultats de la méthode IRTC. En effet, la méthodologie de criticité de l'IRTC a permis d'identifier les signaux d'alerte suivants pour le lithium dans la partie 4.2.3:

- L'offre est dominée par quelques pays
- L'offre est associée à des pays dont l'indice de performance environnementale est faible.
- La demande est en forte augmentation.

La diversification de l'offre par l'ajout de mines finlandaises diminuera la concentration de l'offre et améliorera les résultats de l'indice de performance environnementale (la Finlande étant mieux notée que le Chili et la Chine). En outre, en supposant que l'offre finlandaise s'ajoute à l'offre mondiale actuelle, le risque de pénurie sur le marché est moindre en raison de la forte augmentation de la demande, ce qui réduit l'effet potentiel des problèmes d'accessibilité et des augmentations de prix.

De plus, comme le lithium n'a pas présenté de point chaud en ce qui concerne les résultats de l'ACV du berceau à la porte dans le cadre de l'IRTC pour les batteries Lithium-ion (partie 4.2.3), l'état de la criticité sur cet aspect n'est pas perceptible lorsque l'on se concentre sur les points chauds de la criticité pour cet usage.

Toutefois, étant donné que l'empreinte environnementale est mentionnée comme une exigence pour les MRC dans la CRMA, les utilisateurs de lithium pourront faire état d'une empreinte environnementale plus favorable lorsqu'ils s'approvisionnent en Finlande, compte tenu de la plupart des catégories d'impact, que lorsqu'ils s'approvisionnent dans des pays tiers.

5.1.2. Intégration de l'évaluation de la criticité et de l'ACV pour l'évaluation des risques d'approvisionnement et les impacts environnementaux dans un scénario de transition énergétique

La figure suivante montre la comparaison des résultats des méthodes d'analyses des ressources utilisées en ACV avec les méthodes de criticité utilisés pour la deuxième étude de cas dans le cas de batteries LFP et NMC811 (partie 4.2). Concernant la méthode IRTC, une approche expérimentale a été utilisée en multipliant les quantités relatives de substances issues de l'inventaire de chaque batterie par le nombre d'indicateurs « critiques » pour chaque substance du Tableau 40 et en faisant la somme de toutes les substances. On voit que tous donnent des résultats plus élevés pour la batterie NMC811, il y a en revanche des différences dans les points chauds des résultats.

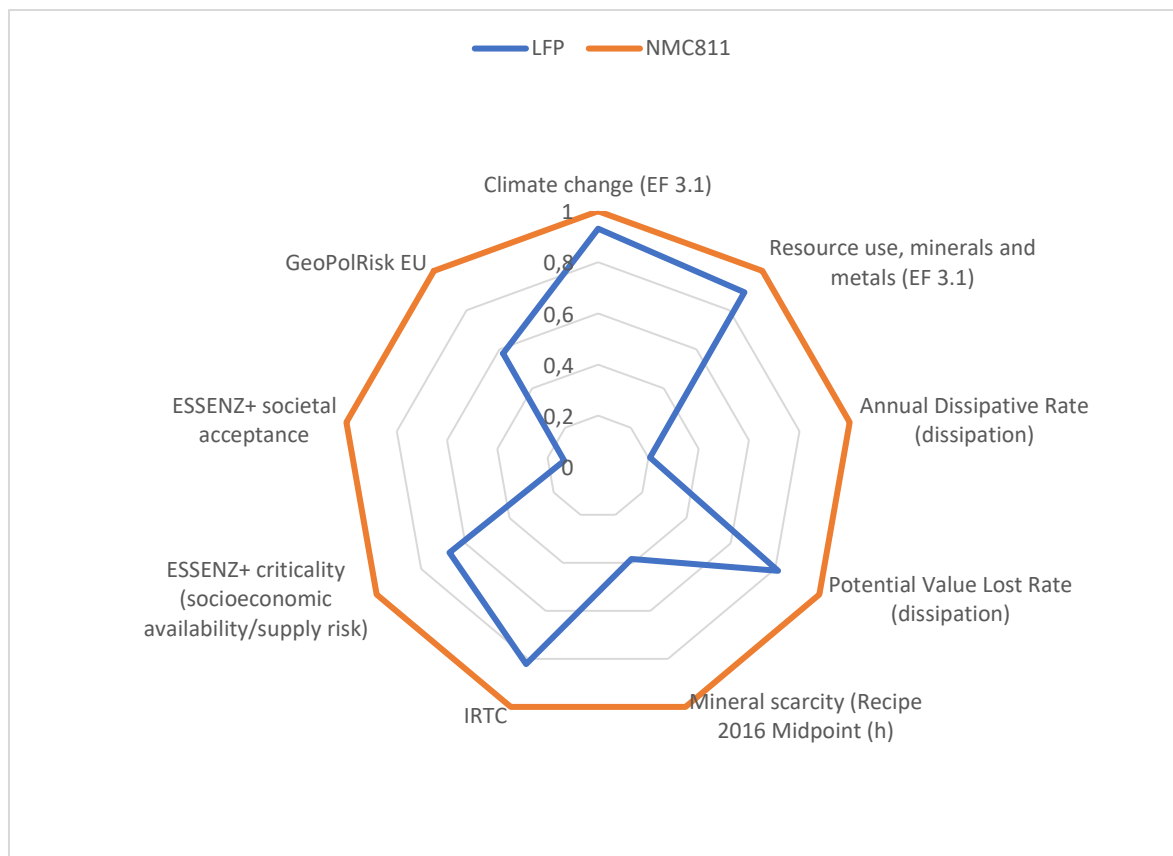


Figure 66 Comparaison des résultats d'évaluation d'utilisation des ressources avec les méthodes de criticité pour les deux batteries

Différents « points chauds » ont été identifiés dans la catégorie d'impact environnemental « utilisation des ressources minérales et métalliques » et les évaluations de la criticité par la méthode IRTC, GeoPolRisk et ESSENZ+ et peuvent être expliqués par les différences entre les méthodes :

- L'ACV environnementale a montré que le tellure, l'or, le cuivre et l'argent sont des points chauds en ce qui concerne l'utilisation des ressources minérales et métalliques sur la base de la méthode ADP. Toutefois, ces flux ne sont pas apparus comme des points chauds dans l'évaluation de la criticité réalisée dans le cadre de l'IRTC. La méthode ADP considère qu'en raison de la rareté de ces métaux, leur extraction empêche d'autres utilisateurs potentiels de les utiliser, ce qui entraîne une perte de valeur pour les autres utilisateurs potentiels. Le tellure vient également en priorité de l'allocation des impacts (voir partie 5.2)
- La méthode GeoPolRisk attribue des facteurs de caractérisation élevés aux platinoïdes et à l'or, potentiellement en raison de leur prix élevé. Comme il peut y avoir une corrélation entre le prix du métal et sa rareté (comme le prévoit la méthode ADP), la corrélation entre les facteurs de caractérisation de la méthode GeoPolRisk et la méthode ADP peut être plus élevée qu'entre la méthode ADP et la méthode IRTC. Le prix élevé des platinoïdes et de l'or dans la méthode GeoPolRisk implique que, si l'approvisionnement de ces métaux est perturbé, cela peut entraîner un coût élevé pour l'acteur économique qui dépend de l'utilisation de ce métal, l'acteur économique étant défini comme l'utilisateur actuel.
- Dans la méthode IRTC, la rareté et le prix ne sont pas considérés comme des facteurs de risque, car on estime que les utilisateurs d'un métal s'attendent à des coûts élevés (stables) et que seules les augmentations soudaines et inattendues des prix constituent un facteur de risque, qui est évalué à l'aide d'autres indicateurs. Même si l'acteur économique à risque (c'est-à-dire l'utilisateur du métal qui effectue l'évaluation) est le même que dans la méthode GeoPolRisk, la différence dans la prise

en compte des prix élevés (mais stables) des métaux entraîne une hiérarchisation différente des métaux dans l'évaluation.

- Avec la méthode ESSENZ+, ayant une dimension criticité et sociétale, le tantale est un élément impactant pour les indicateurs de criticité pour les deux batteries en raison de son facteur de caractérisation élevé dans la plupart des indicateurs. Pour la batterie NMC811, en plus du tantale, le cobalt et le lithium sont les éléments les matériaux dominants pour les indicateurs critiques et pour LFP le lithium ressort en plus du tantale, ces éléments sont présents dans la batterie mais le fer est alloué. Pour la partie sociétale, le fer et le soufre ressortent pour NMC811 et le fer et l'aluminium ressortent pour LFP. Pour LFP les éléments sont présents dans la batterie mais pour NMC811 la majorité du fer vient de l'allocation.

5.1.3. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a posé la question du recyclage et des matériaux recyclés dans les méthodes d'analyse. Le contenu recyclé peut être modélisé dans les méthodes d'ACV et abaissent l'impact environnemental d'un produit. Les objectifs de recyclage du CRMA et d'efficacité de recyclage de la réglementation (EU) 2023/1542 permettent donc d'envisager un impact réduit des batteries lithium ion à partir de 2030.

Nous avons vu dans la partie 4.3.3 qu'il n'existe pas de méthode formelle pour modéliser les matériaux recyclés dans l'approche IRTC mais que des approches de modélisation peuvent être envisagées.

Concernant GeoPolRisk celle-ci évalue le risque d'approvisionnement des matières premières critiques et prend en compte le potentiel du recyclage domestique pour atténuer ces risques. Elle suppose que le recyclage peut réduire le risque d'approvisionnement si les matériaux recyclés sont réintégrés dans l'économie locale et si le mix d'approvisionnement en importations est géré stratégiquement.

Enfin, la méthode ESSENZ+ considère un recyclage avec un ajustement des facteurs de caractérisation (CF) pour les matériaux recyclés, il est toutefois nécessaire de mener des recherches afin de compiler une liste des parts de marché des différents pays en ce qui concerne les activités de recyclage spécifiques à chaque produit au niveau mondial. Cependant les facteurs de caractérisation pour les matériaux recyclés ne sont pas disponibles.

En conclusion, nous recommandons de réaliser une étude spécifique de criticité pour les matériaux recyclés dans le futur afin de combler les lacunes des méthodes de criticité pour évaluer les matériaux recyclés.

5.2. Limites liées à l'utilisation des inventaires ACV pour l'évaluation des ressources et de la criticité

Pour l'évaluation de l'impact des ressources dans l'ACV, des méthodes courantes comme CML (recommandé et utilisée dans la méthode EF3.1 de la commission Européen), Dissipation, ReCiPe, etc., s'appuient sur les inventaires disponibles dans des bases de données largement utilisées telles qu'ecoinvent, Sphera, et autres. Ces bases de données sont également souvent utilisées pour les évaluations de criticité. Cependant, au cours de notre étude, nous avons identifié plusieurs défis qui compliquent l'évaluation de la criticité des ressources avec l'utilisation de ces inventaires.

Les ICV (Inventaires du Cycle de Vie) sont construits à partir de jeux de données et d'éléments interconnectés. Par exemple, le jeu de données pour l'hydroxyde de cobalt inclut des flux élémentaires tels que le cobalt, le fer, l'aluminium, les consommables utilisés dans les processus de pyrometallurgie (les acides ou l'ammonium par exemple), les intrants énergétiques, ainsi que les émissions et les déchets comme sorties. Lorsqu'un minerai est extrait, le concentré contient souvent plusieurs éléments provenant de la croûte terrestre. Dans ce cas l'efficacité d'extraction est prise en compte. L'efficacité d'extraction d'un métal à partir d'un minerai représente le pourcentage du métal récupéré lors du processus d'extraction et de raffinage par rapport à la quantité totale présente dans le minerai brut

L'allocation au niveau de l'inventaire dans l'ACV consiste à répartir les flux d'entrées (matières premières, énergie) et de sorties (émissions, déchets, co-produits) entre les différents produits issus d'un même processus en prenant en compte l'efficacité d'extraction. Cette allocation peut être basée sur des critères physiques (ex. masse, énergie, volume) ou économiques (valeur marchande des co-produits). L'allocation joue un rôle clé dans les ICV et l'ACV, souvent basée sur des critères économiques, massique ou énergétique. Cependant, ces pratiques peuvent introduire des flux élémentaires dans l'inventaire qui ne font ni partie de BoM (Bill of Materials) ni des étapes intermédiaires du processus.

Par exemple :

- Tellure² dans le minerai de cuivre : Lors de l'extraction du cuivre, du tellure est également récupérée et attribuée au cuivre en utilisant des règles d'allocation économique ou massique. Par exemple, le concentré de cuivre issu des minerais sulfurés contient environ 6.3E-5 kg de tellure (ecoinvent, voir Figure 67). Alors que le cuivre est extrait à 90% à 100%, seulement 30 % à 70 % du tellure est extrait, avec des portions classées comme déchet ou coproduit. Pour l'exemple d'illustration dans figure 67 nous avons utilisé 100% pour cuivre et 70% pour le tellure. Les masses des différents éléments sont réparties dans le cuivre et le tellure avec une allocation économique. On retrouve donc du tellure dans les inventaires de cuivre et du cuivre dans ceux du tellure. En raison de son facteur de caractérisation (CF) élevé dans des méthodes comme CML (40,7 pour le tellure contre 1,37E-3 kg Sb eq pour le cuivre), la simple présence, même en quantités infimes, de tellure (co-produit du cuivre) dominant l'impact en ressources du cuivre, positionnant ainsi le cuivre (tellure inclus dans le minerai) comme un point chaud significatif dans les évaluations des ressources pour les produits contenant du cuivre comme les batteries étudiées.

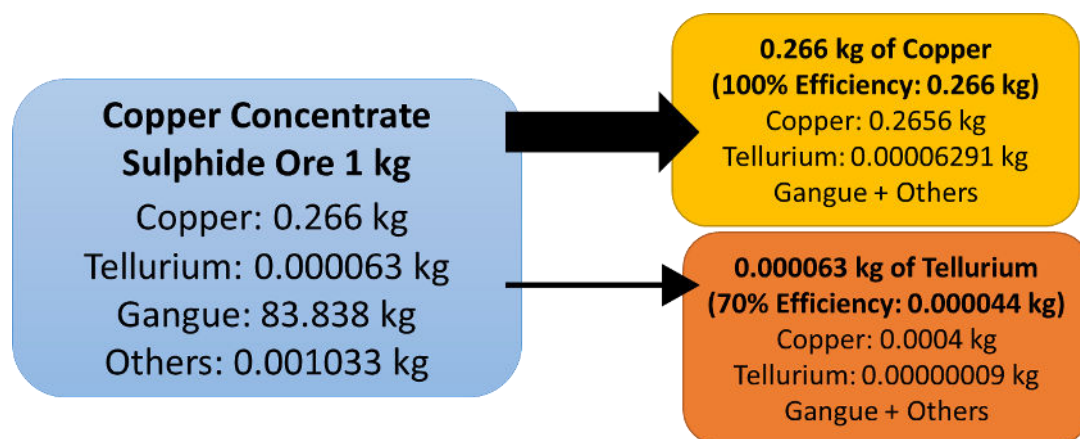


Figure 67 Exemple d'allocation économique du cuivre et du tellure (basée sur la valeur économique (prix hypothétiques du Tellure : Environ 77,71 \$ par kilogramme et Cuivre : Environ 8,85 \$ par kilogramme) provenant du minerai sulfuré d'entrée vers les produits finaux

² Selon Ecoinvent, la quantité de tellure dans la chaîne de production du cuivre est calculée à l'aide d'une approche de bilan massique. Ce calcul est basé sur la quantité estimée de boue anodique produite dans la région spécifiée et sur la teneur moyenne en tellure de cette boue anodique. Ces données proviennent de l'étude réalisée par Turner, D. A. et Hischer, R. (2020), intitulée Life Cycle Inventories of Pyrometallurgical Copper Production and Anode Slime Processing, menée à l'EMPA, à Saint-Gall, en Suisse.

La quantité de tellure a ensuite été ajustée en fonction de l'hypothèse selon laquelle les régions en question représentent environ 70 % du tellure extrait mondialement des minerais de cuivre. Cet ajustement garantit que l'inventaire reflète la contribution régionale à la production mondiale de tellure, fournissant une représentation plus précise des flux de matériaux dans le processus de production du cuivre.

- Fer dans minerai de cobalt : Le cobalt est issu un minerai qui contient plus de 34 kg de fer pour 1 kg de cobalt, selon les données industrielles (voir Figure 68). Cette teneur en fer, qui est significative, est répartie (allouée) entre différents co-produits en fonction de leur teneur en cobalt dans le minerai. Dans la plupart des processus industriels de raffinage du cobalt, le fer est efficacement éliminé en tant que déchet ou réutilisé sous forme de sous-produits tels que l'hydroxyde ferrique. L'objectif est de réduire au maximum la quantité de fer résiduel dans le produit final à base de cobalt, afin d'obtenir une pureté élevée, adaptée à des applications telles que la fabrication de batteries ou la production d'alliages.

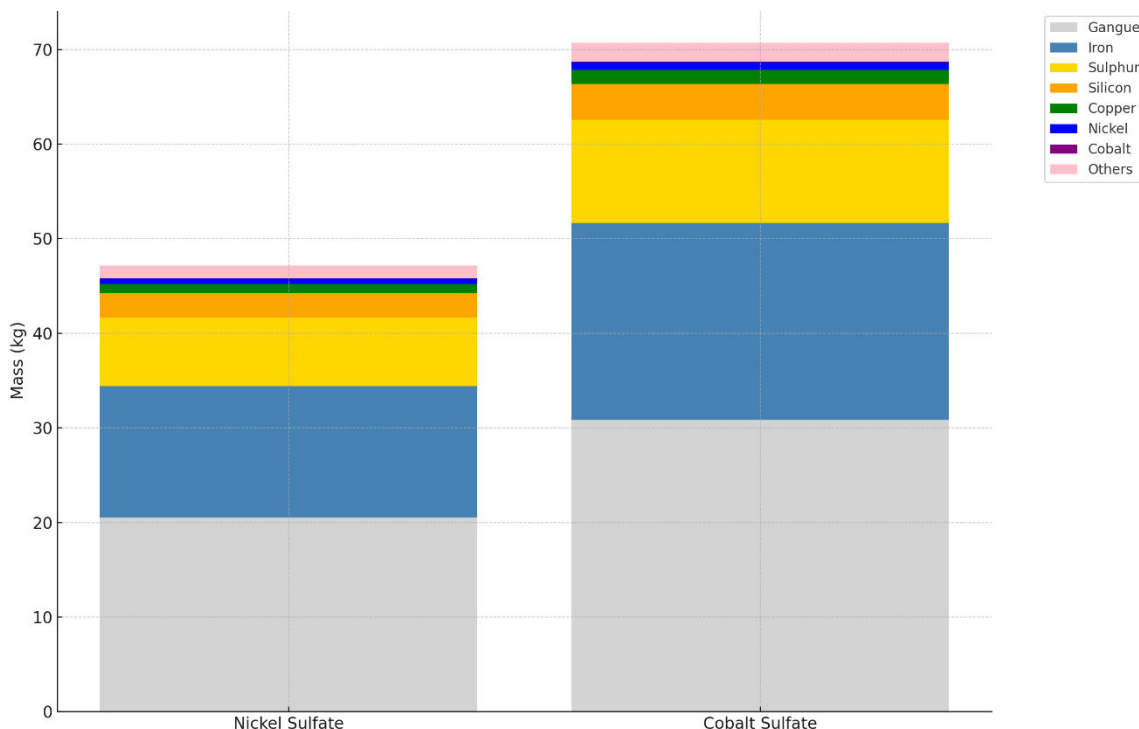


Figure 68 Exemple d'allocation des composants du minerai de cobalt entre les deux co-produits, sulfate de nickel et sulfate de cobalt, basée sur les valeurs économiques respectives de Cobalt et Nickel (60 % pour le sulfate de cobalt et 40 % pour le sulfate de nickel).

Les défis liés aux inventaires sont amplifiés par la structure même des ICV, rendant l'utilisation des inventaires au niveau des flux élémentaires complexe pour les évaluations des ressources et de la criticité. Les problèmes spécifiques incluent :

1. Masse élevée de certains éléments : Par exemple, des quantités importantes de fer dans le minerai de cobalt (voir Figure 68) finissent souvent comme déchets. (il s'agit un problème pour les méthodes de dissipation, GeoPolRisk, ESSENZ+, etc.)
2. Facteurs de caractérisation disproportionnés pour les éléments en traces : Les éléments comme le tellure, bien que présents en petites quantités, peuvent influencer de manière disproportionnée les résultats en raison de leurs CF élevés. (il s'agit un problème pour la méthode CML, etc.)

Améliorations potentielles pour relever ces défis

1. Mises à jour régulières des inventaires : Les inventaires doivent être régulièrement mis à jour pour intégrer les efforts de valorisation des déchets, tels que la récupération du fer lors du raffinage du cobalt ou du tellure lors de l'extraction du cuivre.

2. Approches basées sur des données désagrégées : Construire des inventaires à partir des quantités déclarées dans des ICV intermédiaires plutôt que de flux élémentaires permet d'obtenir des données plus précises et plus pertinentes. Cependant, cette approche nécessite du temps et une expertise approfondie des processus concernés, et ne peut pas se faire directement via un logiciel ACV.

En relevant ces défis grâce à des mises à jour régulières et des méthodologies de données avancées, les évaluations des ressources et de la criticité basées sur les ICV des bases de données pourront devenir plus précises.

5.3. Distinction entre les méthodes de criticité et les méthodes d'impact des ressources en ACV

Les méthodes d'évaluation de criticité et d'impact sur les ressources ont en commun d'évaluer les dommages potentiels d'un accès perturbé aux ressources pour une partie prenante spécifique. Les méthodes d'évaluation divergent quant à la partie prenante spécifique considérée comme le « sujet de sauvegarde », c'est-à-dire **quelle partie prenante doit être protégée**. En outre, les méthodes divergent dans le **type de dommage** contre lequel la partie prenante doit être protégée et, enfin, les méthodes divergent dans la sélection des **facteurs considérés comme à l'origine de ces dommages**.

Pour les méthodes de criticité, les parties prenantes spécifiques « à risque » sont un ou plusieurs acteurs économiques jouant un rôle actif **dans le système de produits étudié**, par exemple en tant que fabricant de produits finaux. Pour les méthodes d'impact sur les (comme la méthode ADP préconisée par ma méthode EF 3.1) l'acteur spécifique « à risque » ne joue pas un rôle actif dans la chaîne d'approvisionnement du système de produits à l'étude, mais est plutôt un acteur économique **affecté par le système de produits à l'étude**, c'est-à-dire « un autre système de produits ». La façon dont cet autre système de produit est identifié n'est pas toujours explicitement expliquée par les développeurs de la méthode. Il peut s'agir d'utilisateurs potentiels à moyen-long terme ou à très long terme. De plus, ces parties prenantes peuvent être des entreprises manufacturières ou des utilisateurs finaux de produits.

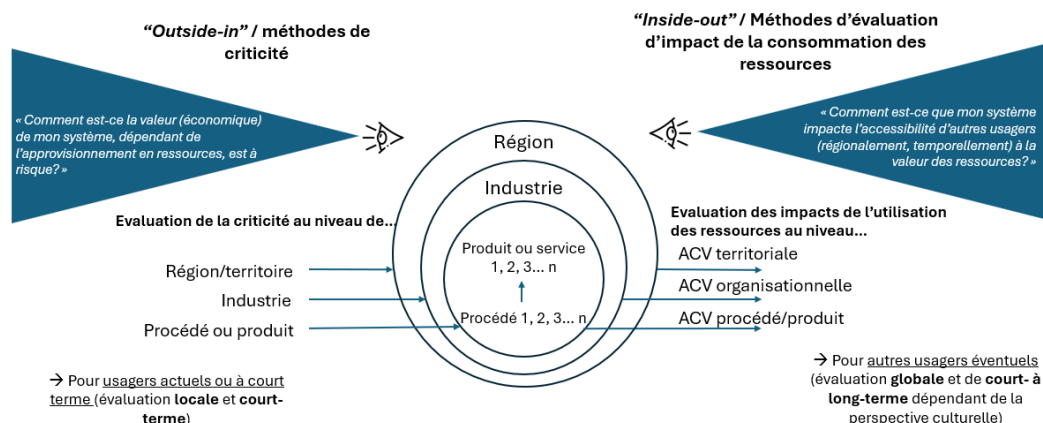


Figure 69 Opposition entre les approches « outside-in » de la criticité, et « inside-out » des méthodes d'évaluation des impacts de la consommation de ressources en ACV.

La Figure 69 schématise l'opposition des périmètres entre les approches criticité « outside-in » et les méthodes d'évaluation d'impact « inside-out ». En effet, l'approche criticité évalue comment le contexte d'approvisionnement (extérieur au(x) système(s) de production devant être protégé) peut impacter le produit/service, l'industrie ou la région que l'on souhaite préserver, alors que les méthodes d'évaluation d'impact des ressources en ACV évaluent comment le produit, l'industrie ou la région (ACV territoriale) impactent la capacité des autres usagers potentiels à faire usage de la ressource. Malgré cette opposition, les chemins d'impact ne sont pas forcément non-miscibles. En effet, un système peut à la fois générer une valeur pour l'utilisateur de la ressource, et un impact pour les autres utilisateurs

potentiels. Un tel raisonnement est sous-jacent à la méthode CTI-LCIA, prenant autant en considération une valeur positive générée pour l'utilisateur de ressources (cependant, une valeur liée à l'utilisation de ressources dans les produits, et non une valeur économique pour leur transformation dans une chaîne de valeur), et l'impact comme l'inaccessibilité de la ressource liée au système de produit. En bref, un système générant de la valeur pour un usager (lié à l'unité fonctionnelle en ACV) peut à la fois être dépendant de matériaux critiques, et générer une inaccessibilité pour d'autres utilisateurs.

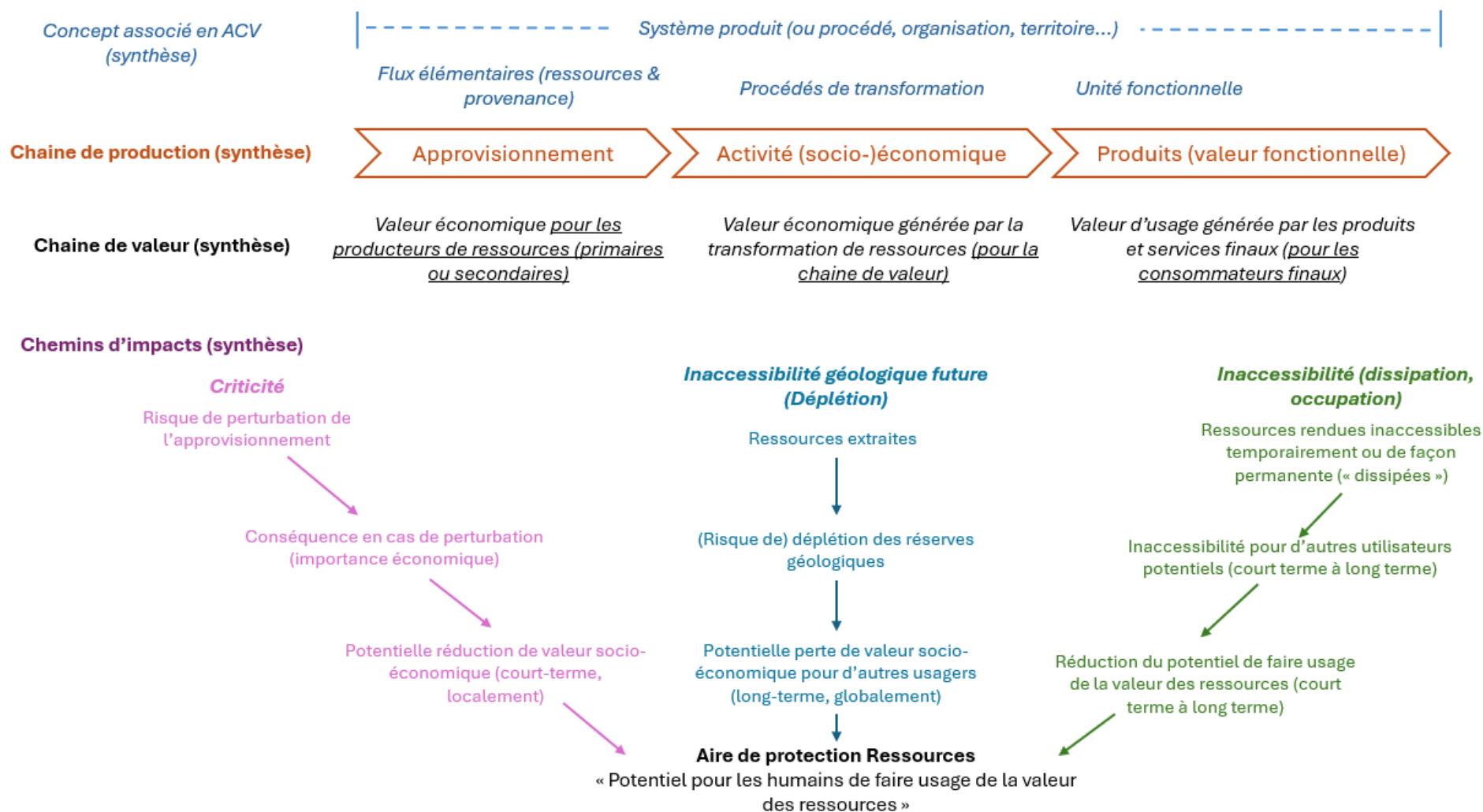


Figure 70 Synthèse des chemins d'impact menant à un impact sur l'aire de protection Ressources en ACV

Sur la Figure 70, on observe que la criticité (soit la nécessité de l'approvisionnement pour un utilisateur donné) et l'inaccessibilité des ressources (pour les autres utilisateurs) portent un regard opposé sur la question des ressources. En effet, plus un utilisateur utilise une ressource, plus celle-ci peut devenir critique pour les autres utilisateurs. Par exemple, si seule la Chine produisait des terres rares, et que ce pays décidait d'arrêter tout export de ces métaux pour les utiliser sur place, les terres rares deviendraient soudainement critiques pour tous les autres utilisateurs. Une telle situation est à l'origine de la « crise des terres rares » en 2010-2011, un des éléments déclencheurs du développement rapide des méthodologies de criticité. Complémentairement, plus un utilisateur (ou système de produit) préserve la ressource dans l'économie (donc, préservant son accessibilité), moins celle-ci sera critique sur son périmètre d'activité, puisque le réemploi ou recyclage de la ressource diminuera la dépendance sur les imports de celle-ci.

En ce qui concerne le type de dommage pris en compte par les différentes méthodes d'évaluation, il est possible d'observer que la plupart d'entre elles (à la fois les méthodes de criticité et d'impact) tiennent compte **d'une perte de valeur économique**, souvent sous la forme d'une augmentation des coûts, ou encore comme une perte nette dans certaines approches de dissipation. Néanmoins, il est possible de distinguer en plus de la valeur économique, la valeur d'usage des produits, mais la quantification d'une telle valeur n'est pas évidente (Charpentier Poncelet et al., 2022a). L'accessibilité physique peut être considérée comme un facteur distinct ou comme un facteur intermédiaire entraînant une augmentation des coûts. Enfin, quelques méthodes de criticité prennent en compte l'atteinte à la réputation, ce qui peut également entraîner une augmentation des coûts ou une perte de revenus.

Les facteurs à l'origine des dommages potentiels divergent entre les méthodes de criticité et les méthodes d'impact sur les ressources. Les méthodes de criticité prennent généralement en compte une forte concentration de l'approvisionnement en matières premières, l'instabilité politique des pays fournisseurs, ainsi que les augmentations potentielles de la demande, les dépendances vis-à-vis des sous-produits, et les problématiques environnementales et sociales pouvant entraîner un durcissement des réglementations ou une atteinte à la réputation. Les méthodes d'impact sur les ressources considèrent généralement soit l'extraction d'une ressource, soit la dissipation d'une ressource, comme source de dommages potentiels, considérant que cela empêche d'autres utilisateurs potentiels de faire usage de la valeur de la ressource, que ce soit de manière permanente ou temporaire.

5.4. Utilisation conjointe des méthodes d'évaluation de la criticité et d'évaluation des impacts de la l'utilisation des ressources en ACV

D'après l'analyse effectuée dans l'état de l'art, les liens suivants ont été observés entre l'ACV environnementale, l'évaluation de l'impact sur les ressources dans l'ACV et les évaluations de criticité :

- Les impacts environnementaux (évalués via l'ACVA ou via d'autres indicateurs, tels que l'Indicateur de Performance Environnementale) peuvent être utilisés comme indicateur dans les méthodes d'évaluation de la criticité, pour évaluer les risques liés à la réglementation, au prix ou à la réputation.
- Une perturbation de l'approvisionnement en matières premières peut avoir des incidences sur l'environnement (évaluées par l'ACVC), par exemple lorsque les matières premières sont utilisées dans des technologies à faible émission de carbone.
- Si une matière première est principalement fournie en tant que sous-produit, cela peut entraîner les conséquences suivantes :
 - o De faibles impacts environnementaux sont attribués à la matière première dans une ACV attributionnelle
 - o La dépendance aux co-produits est considérée comme un facteur de risque dans plusieurs méthodes d'évaluation de la criticité

- Les sous-produits peuvent avoir des taux de dissipation élevés, tels qu'évalués par les méthodes d'impact sur les ressources
- Les matières premières à faible taux de recyclage peuvent avoir un score élevé sur les méthodes d'impact sur les ressources et peuvent être soumises à des réglementations, par exemple dans le cadre de la CRMA.
- L'augmentation d'un taux de recyclage des matières premières peut :
 - Réduire l'impact environnemental des produits utilisant cette matière première (ACVA et ACVC)
 - Réduire sa criticité, par exemple en augmentant la diversité et la quantité de l'approvisionnement
 - Réduire son score dans les méthodes d'impact sur les ressources, en rendant la matière première accessible à d'autres parties prenantes
- Les facteurs suivants, qui sont pris en compte dans les méthodes d'impact sur les ressources, peuvent être pertinents du point de vue de la criticité dans certaines conditions :
 - Le taux de déplétion d'une matière première peut être pertinent dans une évaluation de criticité centrée sur un acteur économique à très long terme. Cependant, les évaluations de criticité se concentrent généralement sur les utilisateurs actuels ou à court terme des matières premières.
 - Le prix d'une matière première pourrait être un bon indicateur dans les évaluations de criticité pour évaluer la *vulnérabilité* d'un acteur économique à une rupture d'approvisionnement, plutôt que la *probabilité* d'une rupture d'approvisionnement, par exemple en évaluant la part de son chiffre d'affaires affectée si l'acteur ne peut pas livrer ses produits.
- Le taux de dissipation d'une matière première peut être un indicateur indirect des risques réglementaires dans les évaluations de criticité, car ces matières premières peuvent être soumises à des exigences de recyclage. Cependant, d'autres indicateurs indirects (par exemple, si une matière première est considérée comme critique par la Commission Européenne) peuvent être plus utiles à cette fin.
- Les évaluations de criticité et les méthodes d'évaluation de l'impact sur les ressources représentent toutes des dommages économiques potentiels pour des parties prenantes spécifiques. Une bonne vue d'ensemble de la ou des parties prenantes spécifiques à chaque méthode pourrait permettre une combinaison de méthodes d'évaluation d'impact, afin d'évaluer la durabilité économique globale de l'utilisation des matières premières.

6. Recommandations

Dans ce rapport, les méthodes d'évaluation suivantes ont été testées sur deux types de batteries pour véhicules électriques :

- **Analyse du cycle de vie environnementale (ACV)** selon EF 3.1 et les catégories d'impact liées aux Aires de Protection « écosystèmes » et « santé humaine ».
- **ACV environnementale** selon EF 3.1 et les catégories d'impact liées à l'Aire de Protection « ressources », en mettant l'accent sur la méthode ADP pour évaluer l'utilisation des ressources minérales et métalliques.
- **Analyse de dissipation dans l'ACV environnementale.**
- **Évaluation de la criticité** via la méthode IRTC.
- **Évaluation de la criticité** via la méthode GeoPolRisk.
- **Évaluation de la criticité** via ESSENZ+.

En outre, une **ACV environnementale** selon EF 3.1 a été réalisée sur différentes filières de production de lithium, une matière première utilisée dans les deux types de batteries.

A présent des recommandations seront formulées sur l'utilisation conjointe d'analyses environnementales et de criticité pour la prise de décisions à court-terme, moyen-long-terme et sur des mesures d'atténuation.

6.1.Recommandations sur l'évaluation et la prise de décisions à court-terme - Intégrer une dimension environnementale dans la criticité

Une analyse de criticité est plus adaptée pour une prise de décision à court/moyen-terme. En effet, la criticité évalue la **vulnérabilité actuelle** d'un matériau ou d'une ressource, en fonction de facteurs économiques, géopolitiques et industriels. Elle permet également d'identifier les **risques immédiats** liés à l'approvisionnement et d'adapter rapidement la stratégie d'une entreprise ou d'un pays. On peut réaliser une analyse de criticité avec différentes méthodes et les recommandations portent sur ces méthodes. Cependant, les réglementations demandent de plus en plus d'inclure des évaluations environnementales des matériaux (cf. CRMA) et pouvoir intégrer une dimension environnementale à ces méthodes de criticité est recommandé.

6.1.1. Audiences des études de criticité et d'analyses environnementales

Concernant les études de criticité, le public cible des résultats des évaluations de la criticité est principalement limité à la « partie prenante économique à risque » (telle que définie dans l'objectif et le champ d'application de la méthode IRTC) et aux parties prenantes associées ayant des intérêts similaires. Le public cible peut donc comprendre :

- Les fournisseurs du système à risque, qui peuvent être impliqués dans la mise en œuvre de mesures d'atténuation (diversification de l'approvisionnement en amont, établissement de contrats à long terme ou constitution de stocks).
- Les décideurs politiques, en raison de leur rôle de soutien dans la mise en œuvre des mesures d'atténuation, telles que la stimulation de nouvelles activités minières et la mise en place d'activités circulaires.
- Les investisseurs, à la fois pour rassurer les investisseurs de l'entreprise en leur montrant que les risques sont anticipés, et pour identifier de nouvelles opportunités d'investissement pour des produits de substitution ou de nouvelles voies d'approvisionnement.

Les résultats de l'évaluation de la criticité sont moins susceptibles d'intéresser le consommateur général, qui est plus souple dans l'utilisation de produits de substitution lorsque certains produits deviennent inaccessibles ou trop chers. Toutefois, le grand public peut avoir besoin d'être sensibilisé

aux risques liés aux entreprises, lorsqu'ils constituent la base d'une intervention politique. Par exemple, l'étude sur les matières premières critiques pour l'UE et les interventions politiques associées, telles que formulées dans la CRMA (Critical Raw Materials Act), doivent être communiquées au grand public, afin de créer un soutien sociétal pour ces interventions (telles que la licence sociale d'exploitation pour les mines nouvellement développées)

Quant aux méthodes d'évaluation des ressources, étant donné que les méthodes d'évaluation des ressources dans le cadre de l'ACV (y compris l'ADP) tiennent compte de la perte potentielle de valeur pour les utilisateurs au-delà de la chaîne de valeur, une note élevée dans cette catégorie d'impact signifie que d'autres personnes subiront des dommages causés par ce système de produits. Par conséquent, il est intéressant de communiquer les résultats bénéfiques à un large public.

6.1.2. Réaliser une évaluation de criticité en utilisant la méthode IRTC pour aider la prise de décision

La réalisation d'une **évaluation de criticité** à l'aide du cadre IRTC (International Round Table on Criticality) soutient la prise de décision de plusieurs manières :

- **Formulation de l'acteur économique concerné ("système à risque")** : Dans l'étape de définition des objectifs et du champ d'application, cela permet d'établir un point de départ pour l'évaluation, afin d'identifier les flux intermédiaires pertinents devant être analysés dans l'évaluation de criticité.
- **Analyse des points critiques ("hotspot analysis")** : En tenant compte d'un grand nombre d'indicateurs de criticité et en évaluant le score relatif d'une matière première spécifique par rapport à d'autres, cette analyse sensibilise les utilisateurs de la matière première à la structure de son approvisionnement et aux risques associés ("signaux d'alerte").
- **Lien entre les indicateurs de criticité et les risques pour l'entreprise** : Ces risques incluent l'accessibilité, les prix et la réputation. Cela aide les utilisateurs d'une matière première à interpréter les conséquences potentielles des signaux d'alerte identifiés.
- **Mesures d'atténuation dans l'outil IRTC** : Des mesures d'atténuation sont suggérées en fonction des types spécifiques de signaux d'alerte et des risques pour l'entreprise. Ces mesures peuvent être choisies pour éviter qu'une perturbation ne survienne ou pour éviter que l'entreprise ne subisse des dommages en cas de perturbation. L'outil fournit également des considérations sur chaque mesure d'atténuation, notamment les obstacles et les facilitateurs à sa mise en œuvre, ainsi que les parties prenantes à impliquer.
- **Combinaison de l'analyse des points critiques avec un diagramme de flux de matières à travers la chaîne de valeur** : Utiliser la base de données des processus unitaires d'ecoinvent et des logiciels associés, tels que SimaPro, permet d'interpréter davantage la pertinence des points critiques identifiés (par exemple, dans quels composants les matières premières sont-elles utilisées ?), la pertinence des risques pour l'entreprise (une augmentation du prix d'une matière première affecte-t-elle réellement le coût de ces composants ?), et la faisabilité des mesures d'atténuation (par exemple, faut-il cibler la substitution au niveau des matières premières ou des composants ?).

Dans la deuxième étude de cas, des points critiques ont été identifiés pour deux types de batteries (NMC811 et LFP), considérées comme deux substituts possibles pour les fabricants de véhicules électriques (l'acteur économique "à risque"). La méthode IRTC ne fournit pas de résultat concluant quant au type de batterie à privilégier sur la base de l'évaluation de criticité. Cependant, elle permet une meilleure compréhension des risques associés à chaque type de batterie. Le fabricant peut alors sélectionner la batterie la plus adaptée à ses véhicules électriques en fonction des considérations suivantes (non exhaustives) :

- Les performances techniques et les coûts associés à chaque batterie.

- Les types spécifiques de perturbations dans la chaîne de valeur (signaux d'alerte) liés à chaque batterie, et la tolérance acceptée par le fabricant face à ces perturbations.
- Les effets potentiels de ces perturbations sur le fabricant (par exemple, ampleur des augmentations de prix, exposition aux dommages de réputation).
- La capacité du fabricant à éviter une perturbation (intégration verticale, diligence raisonnable, accords d'approvisionnement avec les fournisseurs) ou à limiter les dommages (par exemple, absorber les augmentations de prix, compenser les dommages à la réputation, constituer des stocks).

Considérations pour les décideurs politiques :

Les décideurs politiques peuvent examiner si les technologies spécifiques exposées aux perturbations d'approvisionnement sont :

- Importantes pour atteindre certains objectifs politiques (par exemple, la transition vers la mobilité électrique).
- Cruciales pour l'économie locale (par exemple, les constructeurs automobiles fournissant des emplois et des revenus).

Sur la base de ces considérations, les décideurs politiques peuvent contribuer à la mise en œuvre de mesures d'atténuation, telles que :

- Investir dans de nouvelles mines (locales).
- Améliorer les relations commerciales.
- Fournir des conditions favorables pour améliorer les taux de recyclage.

Le rôle potentiel des décideurs politiques dans diverses mesures d'atténuation est mentionné dans l'outil IRTC.

6.1.3. Réaliser une évaluation de criticité en utilisant la méthode GeoPolRisk pour aider la prise de décision

Conduite d'une évaluation de la criticité via le cadre GeoPolRisk et ses apports à la prise de décision :

- **Définition de l'unité économique à risque** : L'évaluation commence par l'identification du « système à risque », qui peut être une entreprise, un pays, un groupe de pays ou une région. L'analyse s'appuie sur les dernières données disponibles, et les résultats sont spécifiques à l'unité économique sélectionnée.
- **Calcul des Facteurs de Caractérisation (CFs)** : Les CFs sont calculés pour l'unité économique évaluée. Actuellement, ces facteurs sont disponibles pour 40 pays de l'OCDE. Ils sont combinés aux données LCI pour déterminer le score de risque d'approvisionnement d'un produit, ainsi que trois indicateurs supplémentaires, équivalents au risque d'approvisionnement global des matières clés (par exemple, le cuivre).
- **Analyse des points critiques (hotspots)** : En analysant la contribution de diverses activités, la méthode GeoPolRisk identifie les points critiques, comme des composants ou processus spécifiques ayant un impact significatif sur le risque d'approvisionnement. Par exemple, une étude de cas a identifié la cellule de batterie comme un point critique. Une analyse approfondie des contributions des matières premières peut mettre en évidence des matériaux critiques pour cette activité.
- **Décomposition de la criticité** : La méthode décompose la criticité en facteurs tels que la concentration de la production, le mix des importations ou les valeurs commerciales élevées

entraînant une hausse des prix. Cette décomposition aide à comprendre les causes sous-jacentes des risques d'approvisionnement.

- **Rôle du recyclage dans la mitigation** : Le recyclage est souvent considéré comme une mesure d'atténuation. Le cadre GeoPolRisk permet une analyse de scénarios basés sur différentes entrées de recyclage. Par exemple, si des taux de recyclage futurs sont planifiés, ces taux peuvent être intégrés pour prévoir les scénarios de risque d'approvisionnement futurs pour certaines matières premières.
- **Analyse de scénarios et projections futures** : GeoPolRisk favorise les évaluations comparatives entre différents pays ou mix d'approvisionnement. En exploitant les données historiques, le cadre identifie les tendances en matière de risque d'approvisionnement, aidant les entreprises et les décideurs à anticiper les défis futurs. Les analyses de scénarios modélisent également les évolutions géopolitiques, comme les changements de politique ou les conflits, pour informer les stratégies de gestion des risques.
- **Soutien aux décisions politiques et commerciales** : Le cadre fournit des informations sur les différences de risques de perturbation de l'approvisionnement entre pays ou mix d'approvisionnement. Il éclaire les stratégies des entreprises pour atténuer les risques et soutient les décideurs politiques dans l'élaboration de politiques visant à garantir un approvisionnement stable en matières premières.

6.1.4. Comparaison des méthodes IRTC, GeoPolRisk et ESSENZ

- **Objectifs et intégration dans l'ACV** :
 - GeoPolRisk et ESSENZ(+) sont conçues comme des facteurs de caractérisation dans le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).
 - La méthode IRTC, en revanche, est une évaluation de criticité autonome qui suit les mêmes phases qu'une ACV. Elle est particulièrement adaptée à l'analyse des points critiques ("hotspot analysis") et à l'optimisation des produits, permettant une utilisation complémentaire à l'ACV.
- **Complexité et nombre d'indicateurs** :
 - La méthode IRTC inclut un large éventail d'indicateurs de criticité, ce qui la rend plus exhaustive.
 - GeoPolRisk, avec un nombre limité d'indicateurs (concentration de l'approvisionnement, concentration des importations, taux de recyclage en fin de vie), est plus simple à mettre en œuvre et à interpréter, mais offre une analyse moins complète.
 - ESSENZ(+) intègre 21 indicateurs, ce qui en fait une méthode intermédiaire entre GeoPolRisk et IRTC en termes de couverture.
- **Approche d'agrégation des indicateurs** :
 - La méthode IRTC n'agrège pas les indicateurs, permettant une analyse détaillée sans perte d'informations.
 - GeoPolRisk, au contraire, propose une formule d'agrégation pour générer un score unique, simplifiant la prise de décision mais réduisant la transparence sur les indicateurs sous-jacents.
 - ESSENZ(+) exige une agrégation progressive des dimensions : environnementale (5 indicateurs), socio-économique (11 indicateurs), disponibilité physique (3 indicateurs) et acceptation sociétale (2 indicateurs). Toutefois, l'agrégation finale est complexe et n'est pas recommandée scientifiquement.
- **Approche méthodologique et cibles** :
 - IRTC classe les matières premières en fonction de leur criticité, définie par rapport à un seuil (par exemple, les 33 % des matières premières ayant les scores les plus élevés).
 - GeoPolRisk normalise les scores en les comparant au cuivre, réduisant le besoin d'évaluer un large éventail de matières premières pour une analyse comparative.

- **ESSENZ(+)** utilise une approche basée sur la distance à l'objectif, avec des cibles par défaut modifiables selon les préférences des entreprises ou des parties prenantes.
- **Perspectives économiques et adaptation :**
 - **IRTC** adopte une perspective centrée sur un acteur spécifique, défini par les objectifs et le champ d'application.
 - **ESSENZ(+)** peut être adapté aux besoins spécifiques des entreprises et des parties prenantes grâce à des facteurs personnalisés.
 - **GeoPolRisk** est moins explicite quant à l'acteur économique ciblé mais établit des facteurs de caractérisation spécifiques aux régions et aux pays, ce qui le rend pertinent à la fois pour les économies nationales et les entreprises opérant localement.
- **Limitation liée au commerce des composants :**
 - Les trois méthodes ont une limitation majeure : elles ne reflètent pas correctement le commerce des composants et des produits dans leurs scores ou facteurs de caractérisation.
 - **IRTC** met l'accent sur l'approvisionnement mondial en matières premières, en identifiant les goulets d'étranglement au niveau des composants.
 - **GeoPolRisk** prend en compte l'approvisionnement mondial en matières premières et la structure des importations d'un pays, mais reste limité au niveau des matières premières, en supposant que tous les composants sont produits dans le système économique étudié.

En conclusion :

IRTC se distingue comme un cadre d'évaluation de criticité exhaustif, adapté à une utilisation en parallèle avec une ACV. Il offre une analyse approfondie des compromis entre indicateurs, permettant d'identifier les points critiques et les sources de risque dans une chaîne de valeur.

GeoPolRisk, en tant que complément à une ACV, est plus simple à mettre en œuvre et fournit une évaluation rapide, bien qu'elle soit moins complète et détaillée.

ESSENZ se positionne comme une méthode intermédiaire pour évaluer les risques et la durabilité des ressources. Sa version étendue, **ESSENZ+**, offre une flexibilité accrue et est mieux adaptée aux besoins complexes ou spécifiques des utilisateurs. **ESSENZ** se distingue par l'utilisation de cibles prédéfinies, permettant de mesurer les écarts entre les conditions actuelles et des objectifs idéaux tels que la disponibilité durable ou la gestion responsable des ressources.

6.1.5. Réaliser une Analyse du Cycle de Vie (ACV) Environnementale pour aider la prise de décisions sur l'utilisation des matières premières

Dans le cadre de la méthode IRTC, il est considéré que, si un produit peut être associé à des impacts environnementaux élevés, cela peut être considéré comme un "signal d'alerte" ou un point critique dans une évaluation de criticité. Le produit pourrait être ciblé par des réglementations futures, être soumis à des taxes environnementales ou nuire à la réputation de l'utilisateur du produit. Ces effets peuvent également être envisagés dans le contexte de deux batteries présentant des performances différentes en termes d'impacts environnementaux :

- Les consommateurs sont susceptibles de préférer une batterie avec des impacts moindres (LFP a moins d'impacts que NMC811 dans la deuxième étude de cas), ce qui pourrait entraîner une diminution des ventes de véhicules équipés de batteries ayant des impacts environnementaux plus élevés.
- L'empreinte environnementale est déjà mentionnée dans la CRMA et une évaluation d'empreinte carbone est demandée dans la réglementation batterie (EU) 2023/1542. Les batteries avec une empreinte environnementale relativement élevée pourraient être

défavorisées par les décideurs politiques, par exemple par une réduction d'impact imposée, un accès réduit aux subventions, ou d'autres interventions politiques défavorables pour les batteries à fort impact.

- La première étude de cas a montré que l'extraction de lithium en Europe pourrait entraîner des impacts moindres sur plusieurs catégories d'impacts. Cela offre des opportunités pour réduire l'empreinte moyenne du lithium. Cependant, cela pourrait également établir une référence pour une production de lithium à faible impact, entraînant une augmentation des coûts d'investissement (et des prix) du lithium provenant d'autres régions, comme les investissements dans des énergies bas-carbone ou dans une meilleure gestion des déchets. Étant donné que l'accès au lithium d'origine européenne pourrait être limité, les entreprises qui s'approvisionnent en lithium ailleurs devraient investir dans des programmes de diligence raisonnable ou de certification pour montrer leur engagement envers des empreintes environnementales faibles, afin de maintenir une bonne réputation.

La méthode GeoPolRisk ne comporte pas de dimension environnementale mais la méthode ESSENZ comprend l'utilisation avec 5 indicateurs du CML permettant l'intégration d'une dimension environnementale. Il est néanmoins nécessaire de faire une évaluation des catégories d'impacts à prendre en compte afin de ne garder que des indicateurs pertinents. En effet, comme vu avec la première étude de cas sur l'hydroxyde de lithium, les catégories d'impacts majoritaire des procédés de production ne faisaient pas toutes parties des 5 indicateurs du CML recommandés par la méthode ESSENZ. Une ACV cradle-to-gate du procédé de fabrication est donc recommandé lors de l'évaluation d'un produit afin d'identifier les catégories d'impacts à prendre en compte dans la méthode ESSENZ qui peut s'écarter de ces catégories d'impacts par défaut pour couvrir une gamme plus large et plus récente de méthodes d'analyses d'impacts de cycle de vie et d'impacts pour des décisions avisées

Sur la base d'une cette analyse conjointe entre la criticité et les indicateurs environnementaux pertinents, il est bénéfique pour les entreprises d'investir dans des alternatives de produits avec l'empreinte environnementale la plus faible, de réduire les points critiques potentiels d'impact et de communiquer les résultats d'une ACV comparative (positive) à un large public, afin de renforcer la réputation de l'entreprise auprès des consommateurs ainsi que d'autres décideurs, tels que les responsables politiques et les investisseurs et de respecter les réglementations.

6.2.Recommandations sur l'évaluation pour le moyen/long terme des matières premières - Intégrer la criticité dans l'ACV

L'ACV et les méthodes d'analyses des ressources sont recommandés pour les prises de décision à moyen-long terme. En effet, l'ACV évalue les impacts environnementaux sur **l'ensemble du cycle de vie** d'un produit ou d'une ressource et ces impacts se manifestent souvent **sur le long terme** (épuisement des ressources, changement climatique, pollution). Des recommandations portent donc sur l'application de l'évaluation des méthodes de ressources. Cependant, ces méthodes ne tiennent pas compte des risques de disponibilité des ressources qui pourraient influencer les prises de décisions. C'est pour cela qu'intégrer la criticité à l'ACV est recommandé.

6.2.1. ADP (Abiotic Depletion Potential, ou Potentiel d'Épuisement des Ressources Abiotiques), recommandé par la méthodologie EF 3.1

Une limitation de la méthode ADP (Abiotic Depletion Potential, ou Potentiel d'Épuisement des Ressources Abiotiques) est qu'elle attribue un impact à l'extraction du tellure simplement parce qu'il est présent dans le minerai, sans tenir compte de sa valorisation (maintien dans la technosphère) ou de sa perte pour un usage futur. La méthode ADP ne différencie pas les ressources dissipées de celles qui sont récupérées et réutilisées.

En conséquence, la méthode ADP implique que le producteur ou utilisateur de batteries empêche d'autres utilisateurs potentiels d'accéder au tellure, sans tenir compte de sa récupération en tant que sous-produit. Cela conduit à une conclusion trompeuse dans les résultats de l'ACV, suggérant que le tellure devient moins disponible pour les autres, ce qui peut ne pas refléter la réalité.

Pour résoudre ce problème, la méthodologie PEF (Product Environmental Footprint, ou Empreinte Environnementale des Produits) devrait envisager de réviser son utilisation de la métrique ADP. Des méthodes alternatives, axées davantage sur la dissipation des ressources plutôt que sur leur extraction, pourraient fournir une représentation plus précise de la disponibilité des ressources et éviter de telles mauvaises interprétations.

6.2.2. L'usage des Inventaires d'ACV

Les inventaires utilisés en ACV présentent des limites qui influencent beaucoup les résultats comme vu dans la partie 5.2. Il est nécessaire de réaliser des mises à jour régulières des inventaires qui doivent être régulièrement mis à jour pour intégrer les efforts de valorisation des déchets, tels que la récupération du fer lors du raffinage du cobalt ou du tellure lors de l'extraction du cuivre.

En relevant ces défis grâce à des mises à jour régulières et des méthodologies de données avancées, les évaluations des ressources et de la criticité basées sur les ICV des bases de données pourront devenir plus précises.

Un développement idéal de la base de données ecoinvent consisterait en l'établissement de mélanges de production spécifiques à chaque pays pour un plus grand nombre de composants et de produits finis. Par exemple, il serait utile de disposer d'un marché "français" pour les batteries de véhicules électriques (VE), alors qu'actuellement, ecoinvent contient uniquement un marché mondial, intégrant la production en Chine et dans le "reste du monde". La production de batteries dans le "reste du monde" repose sur la production "mondiale" de composants électroniques, lesquels, à leur tour, extraient du tantale du marché "mondial". Le marché mondial du tantale est composé de la République démocratique du Congo, du Rwanda et du "reste du monde", une classification qui n'est pas suffisamment détaillée pour calculer une concentration de l'approvisionnement (car le nombre de pays agrégés dans le "reste du monde" n'est pas connu).

Par conséquent, les données d'inventaire d'ecoinvent sont principalement utiles pour identifier quels composants utilisent certaines matières premières, mais elles ne permettent pas d'évaluer les risques d'approvisionnement liés à la structure du marché.

Pour choisir l'inventaire à utiliser pour utiliser conjointement des études ACV et de criticité, la deuxième étude de cas a montré que les méthodes IRTC, GeoPolRisk et ESSENZ peuvent s'adapter aux ICV. Cependant, les inventaires utilisés dans l'ACV ne sont pas forcément adaptés aux méthodes de criticité, il y a des limites qui influencent beaucoup les résultats comme vu dans la partie 5.2.

Utiliser le Bill of Material (BOM) n'est pas suffisant car il ne comporte pas les données des procédés intermédiaires. Il est donc recommandé de combiner BOM et ICV pour avoir un inventaire fidèle au produit et complet en effectuant une analyse profonde de l'ICV pour identifier les éléments réellement utilisés. L'analyse profonde implique, la construction des inventaires à partir des quantités déclarées dans des ICV intermédiaires plutôt que de flux élémentaires permet d'obtenir des données plus précises et plus pertinentes. Cependant, cette approche nécessite du temps et une expertise approfondie des processus concernés, et ne peut pas se faire directement via un logiciel ACV.

Les facteurs de caractérisation (GeoPolRisk) et les scores des indicateurs (IRTC) nécessitent des mises à jour régulières en raison de l'importance des structures actuelles d'approvisionnement des matières premières, qui peuvent changer rapidement. Une stratégie de mise à jour à long terme doit être mise en œuvre par les développeurs des méthodes. Il n'existe pas de méthode commune pour évaluer la qualité des données dans les analyses de criticité et il serait bénéfique de développer un cadre d'évaluation de la qualité des données, communément accepté par les différents développeurs de méthodes.

6.2.3. Développement de la méthodologie et des données pour la méthode IRTC

Bien que l'outil IRTC couvre un grand nombre de matières premières, toutes ne sont pas évaluées pour chaque indicateur. Des lacunes dans les données existent à plusieurs niveaux :

- Tous les indicateurs ne sont pas actuellement quantifiés, comme le potentiel de catastrophes naturelles dans les pays fournisseurs ou la concentration des entreprises dans l'approvisionnement.
- Tous les indicateurs ne sont pas quantifiés pour toutes les matières premières, par exemple le taux de croissance annuel composé (Composed Annual Growth Rate (CAGR)).
- Toutes les matières premières ne sont pas incluses dans l'outil IRTC. Des investissements supplémentaires sont nécessaires pour rendre l'outil plus représentatif d'un large éventail de secteurs, y compris au-delà des métaux et minéraux.
- Pour les indicateurs spécifiques aux pays, tous les pays n'ont pas de score pour tous les indicateurs, ce qui réduit la représentativité du marché pour certains indicateurs (notamment, par exemple, le travail des enfants). Des indicateurs mieux adaptés pourraient être identifiés pour représenter les risques associés avec une couverture plus large des pays.

Les scores des indicateurs pour les matières premières sont actuellement visibles dans l'outil IRTC. Cependant, cet accès est moins utile pour une évaluation complète de la criticité, où des données sur de nombreuses matières premières et indicateurs doivent être disponibles pour une manipulation ultérieure. Les développements suivants de l'outil IRTC pourraient favoriser une utilisation plus large de la méthodologie dans la conduite des évaluations de criticité :

- Possibilité d'extraire les scores des indicateurs pour plusieurs matières premières.
- Correction des bugs dans la fonctionnalité "évaluation spécifique" de l'outil, afin d'identifier rapidement les points critiques pour une matière première donnée.
- Accès direct aux données sous-jacentes, comme la structure d'approvisionnement des matières premières, pour une meilleure interprétation des résultats.
- Développement d'un logiciel mature (similaire à openLCA ou SimaPro) qui permettrait d'évaluer les goulets d'étranglement potentiels à différents points de la chaîne de valeur, alors qu'actuellement, l'outil IRTC est limité à l'exploitation minière et au raffinage.

6.2.4. Développement de la méthodologie et des données pour la méthode GeoPolRisk

- **Couverture des matières premières** : La méthode GeoPolRisk couvre actuellement 42 matières premières, y compris 17 terres rares (REE) regroupées en une seule catégorie. Bien que cette couverture soit étendue, il est nécessaire de l'élargir pour inclure davantage de matières premières.
- **Matières premières sous-produits** : Certaines matières premières, comme le gallium, sont obtenues uniquement comme sous-produits lors du traitement minéral. Pour ces matières, la méthode attribue le risque à l'étape de traitement. De même, les PGMs sont évalués uniquement sur la base des données de traitement, ce qui constitue une limite en raison de l'absence de jeux de données détaillés et désagregés.
- **Défis liés à la disponibilité des données** : La méthode repose sur des données accessibles au public, mais des lacunes dans la couverture des données posent des problèmes. Des efforts sont en cours pour identifier des sources de données alternatives et améliorer leur disponibilité, ce qui renforcera la robustesse du cadre.
- **Étapes de la chaîne de valeur** : Une limitation majeure réside dans la difficulté d'appliquer la méthode GeoPolRisk à toutes les étapes de la chaîne de valeur d'un matériau. Pour remédier à cela, il est nécessaire d'appliquer des CFs aux flux intermédiaires au sein de la chaîne. Cette approche améliorerait la précision des évaluations et atténuerait les problèmes liés aux jeux de données préalloués, tels que ceux d'ecoinvent.

- **Développement d'un outil** : Un outil basé sur Python est en cours de développement pour simplifier l'accès aux flux intermédiaires et permettre des CFs différenciés spatialement à travers les différentes étapes de la chaîne de valeur. Cet outil augmentera la précision et la flexibilité de la méthode.
- **Risques liés à la gouvernance** : La méthode est en cours d'expansion pour inclure les risques liés à la gouvernance, tels que l'approvisionnement dans des régions affectées par des conflits ou des problèmes de corruption. Cette adaptation permettra une évaluation quantitative des risques de gouvernance, élargissant ainsi la portée au-delà des facteurs traditionnels de risque d'approvisionnement.

En relevant ces défis et en élargissant ses capacités, la méthode GeoPolRisk devient un outil plus complet pour évaluer la criticité des matières premières et guider les parties prenantes vers une prise de décision éclairée. Par son absence de dimension environnementale, la méthode **GeoPolRisk** est la méthode la plus adaptée parmi celles évaluée pour s'intégrer à une ACV, permettant d'identifier fidèlement les points chauds de criticité dans une étude.

6.2.5. Développement de la méthodologie et des données pour la méthode ESSENZ Plus

ESSENZ Plus peut être utilisé conjointement avec une ACV. Cependant, l'évaluation doit être réalisée à l'aide d'une combinaison de BoM et de LCI profondément analysé pour les indicateurs de criticité comme vu dans la partie 6.2.2.

Notez que la partie ACV d'ESSENZ Plus peut s'écarter des catégories d'impact ACV par défaut (changement climatique, acidification, eutrophisation, émissions de particules et consommation d'eau de la méthode CML) pour couvrir une gamme plus large et plus récente de méthodes d'analyses d'impacts de cycle de vie et d'impacts. Comme pour les décisions à court terme, les impacts environnementaux choisis doivent être pertinents en fonction des études de cas spécifiques.

6.3. Recommandations sur l'atténuation des risques

La sélection des mesures d'atténuation constitue une partie intégrante du cadre IRTC et est donc introduite à la section 4.2.3. Une liste complète des mesures d'atténuation incluses dans **l'outil IRTC** est fournie à l'Annexe 6. L'utilisation de cet outil, une fois les points chauds de criticité identifiés, est donc recommandée pour déterminer les mesures d'atténuation des risques à adopter.

Lors de la sélection des mesures d'atténuation, les aspects suivants doivent être pris en compte (Schrijvers et al. en préparation) :

- Les mesures d'atténuation doivent être évaluées en fonction de leur pertinence pour le type spécifique de risque lié à la matière première concernée.
- Les mesures d'atténuation peuvent soit réduire la probabilité d'une perturbation de l'approvisionnement, soit atténuer les dommages causés par une telle perturbation.
- Les mesures d'atténuation impliquent divers acteurs, peuvent être associées à certains facilitateurs et obstacles à leur mise en œuvre, comme résumé dans l'Annexe 6.
- Les stratégies de circularité forment un sous-ensemble des mesures d'atténuation ayant le potentiel de réduire les impacts environnementaux et la criticité des matières premières, comme spécifié plus en détail dans la section suivante.

Comment les stratégies de circularité affectent les résultats de l'ACV et les déterminations de criticité

Les stratégies de circularité sont souvent associées à une réduction des impacts environnementaux, mais elles permettent également de tirer davantage de valeur des ressources et ont le potentiel d'atténuer la criticité des matières premières. Ces perspectives, détaillées plus bas, sont résumées dans la Figure 71.

Les liens entre la circularité et la criticité ont été discutés, parmi des articles récents, par (Cimprich et al., 2023; Hool et al., 2022; Schrijvers et al., 2020a; Tercero Espinoza et al., 2020). L'économie circulaire a le potentiel de réduire les risques d'approvisionnement d'au moins quatre façons :

- **En diversifiant l'approvisionnement** : La production de matières premières recyclées, en plus des matières premières primaires, pourrait augmenter le nombre de fournisseurs potentiels. Les entreprises fournissant des matériaux recyclés peuvent être situées dans des régions différentes de celles des producteurs primaires. Ainsi, en cas d'interruption de l'approvisionnement en provenance d'un certain pays minier, il serait possible d'avoir encore accès aux matières premières recyclées. Cela est pertinent tant pour les matières premières qui sont uniquement fournies par quelques pays que pour celles qui sont principalement extraites comme co-produits. De plus, si la demande n'est pas satisfaite par une augmentation de la production primaire, le recyclage pourrait partiellement la combler. Cet avantage est intégré dans la méthode GeoPolRisk, en considérant que le contenu recyclé est exempt de risque, contrairement à l'importation de matières premières primaires.
- **En augmentant la quantité totale de production** : La demande pour certaines matières premières devrait augmenter fortement dans les années à venir. Idéalement, cette demande supplémentaire serait satisfaite par une augmentation de la production minière. Cependant, quelle que soit la diversité des sources d'approvisionnement, la capacité de production primaire pourrait être limitée. Cette limitation ne serait pas nécessairement due à la disponibilité géologique d'une ressource, mais plutôt à la flexibilité nécessaire pour intensifier la production primaire. En effet, les démarches préalables à l'ouverture d'une mine peuvent prendre de 10 à 15 ans après les demandes initiales de permis. Bien que la réduction de tels délais soit l'un des objectifs du CRMA, cela peut ne pas être entièrement sous le contrôle de l'Union européenne (par exemple, lorsque les mines sont situées en dehors de l'Europe). De plus, l'exploration des matières premières critiques n'est pas souvent priorisée par les investisseurs en raison de leurs marchés restreints et de leurs prix volatils. Ainsi, les pratiques d'économie circulaire (et notamment le recyclage) pourraient partiellement pallier ces éventuelles contraintes.
- **Limiter la demande en matériaux primaires** : Lors de l'analyse du potentiel des stratégies de circularité pour atténuer la criticité, l'accent est souvent mis sur le recyclage. Cependant, d'autres stratégies de circularité sont également importantes à considérer. Les boucles plus courtes, telles que le partage, la réutilisation, la remise à neuf et la réparation, permettent d'obtenir une utilisation plus fonctionnelle de la même quantité de matières premières. Par exemple, si une voiture électrique est partagée entre plusieurs foyers, la demande pour une batterie est inférieure à celle de chaque foyer achetant sa propre voiture. Limiter l'augmentation de la demande de matières premières entraîne une réduction du besoin d'intensifier la production, que ce soit par l'extraction minière ou le recyclage.
- **Augmenter la flexibilité** : Adopter des systèmes de produits circulaires implique l'identification de matières premières favorisant une plus grande circularité, telles que celles avec des taux de recyclage élevés. Cette recherche peut encourager l'identification de substituts pour les matières premières critiques. Anticiper ces besoins de substitution (par exemple, motivés par la circularité) permet d'avoir connaissance des possibilités de substitution en cas de perturbations soudaines de l'approvisionnement. De plus, plusieurs modèles économiques circulaires, qui permettent aux fabricants de conserver la propriété de leurs produits, se concentrent sur la fonctionnalité du produit plutôt que sur ses propriétés spécifiques. Cela inclut par exemple les modèles économiques de type « produit en tant que service » (ou l'économie de fonctionnalité), tels que la location et le leasing. Cette focalisation sur la fonctionnalité augmente la probabilité d'identifier des substituts, car la substitution peut être plus réalisable au niveau d'un produit ou d'une technologie qu'au niveau des matières premières. Une circularité accrue permet également de réduire les impacts environnementaux, bien que ce ne soit pas toujours la principale raison pour laquelle les entreprises mettent en œuvre des pratiques de circularité. Les motivations principales sont généralement plutôt les réductions de coûts, la sécurité de l'approvisionnement, ou les réglementations gouvernementales. (Hool et al., 2022).

Les études ACV peuvent être utilisées pour évaluer si une circularité accrue entraîne des bénéfices environnementaux ou non. Il convient de noter qu'une stratégie de circularité, telle que le recyclage, impacte à la fois la quantité de matières extraites des mines, et les matériaux nécessitant un traitement alternatif en fin de vie, comme le stockage en décharge ou l'incinération. Cela fait que les stratégies de circularité sont multifonctionnelles : l'évaluation environnementale doit soit appliquer une expansion du système (c'est-à-dire considérer tous les processus affectés dans les limites du système), soit appliquer une procédure d'allocation dans une ACV attributionnelle ou une substitution dans une ACV conséquentielle, pour déterminer si c'est le fournisseur ou l'utilisateur d'un matériau recyclé qui bénéficie d'un impact environnemental réduit (Schrijvers et al., 2020c). Des bénéfices environnementaux ne sont obtenus que si le processus de recyclage entraîne des impacts environnementaux inférieurs à ceux de la production primaire et des procédés de valorisation des déchets. Le recyclage peut avoir un impact plus important si la matière première est mélangée avec d'autres matériaux (par exemple, dans des alliages complexes), entraînant des besoins énergétiques élevés ou l'utilisation de produits chimiques nocifs. De plus, des efforts considérables peuvent être nécessaires pour collecter les produits en fin de vie, surtout si les taux de collecte sont faibles et qu'une petite quantité d'une matière première spécifique est utilisée dans chaque produit.

La diminution des impacts environnementaux liés à l'utilisation des matières premières peut par la suite réduire les dommages potentiels à la réputation, si une matière première est associée à des impacts environnementaux élevés, qui sont évalués au moyen d'une ACV attributionnelle. En outre, une ACV conséquentielle pourrait indiquer si le recyclage supplémentaire, ou l'utilisation de matières premières recyclées, est bénéfique du point de vue de la durabilité environnementale (de même que les conséquences environnementales indirectes sont évaluées dans une ACVC).

Enfin, la circularité réduit également l'impact causé par l'utilisation des ressources dans l'ACV, car les stratégies de circularité (notamment le recyclage) permettent à d'autres utilisateurs potentiels de matières premières d'extraire également de la valeur de ces matières premières. Les méthodes d'évaluation d'impact des ressources considérées dans le présent rapport considèrent pour la plupart la récupérabilité ou le recyclage des matériaux. En effet, les méthodes de dissipation prennent en compte les taux de recyclage soit à l'échelle des procédés (par exemple, l'approche JRC-LCI), ou à l'échelle des FCs. Par exemple, la méthode CTI-LCIA prend en compte la durée restante avant l'accessibilité à la ressource pour l'ensemble du cycle de vie, même après que celle-ci se retrouve dans un site d'enfouissement en fin de vie du produit. Les méthodes ADR/LPST, elles, prennent en compte les taux de recyclage des métaux dans leur différentes application dans le calcul des FCs. Seules les méthodes JRC *price-based* (n'appliquant qu'un facteur de prix aux flux dissipatifs) et les méthodes développées pour prendre en compte la déplétion des réserves (ADP et Future welfare loss) ne prennent pas en compte le recyclage ; néanmoins, ce dernier peut être comptabilisé indirectement au niveau de l'inventaire.

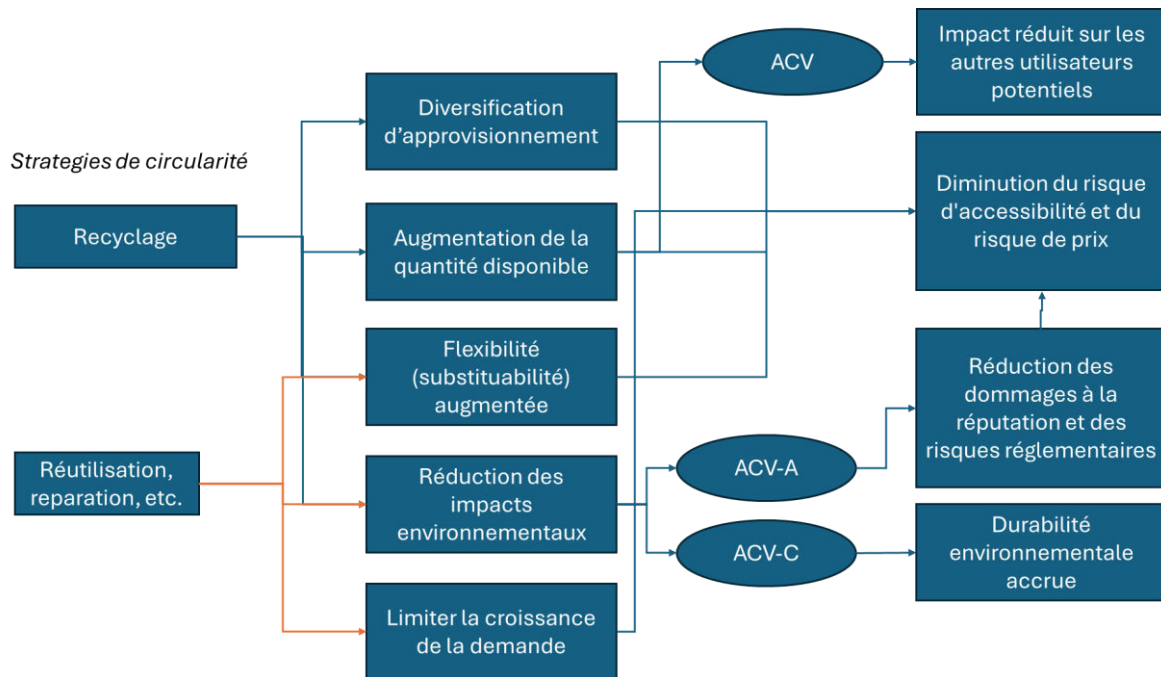


Figure 71 Effets potentiels des stratégies d'économie circulaire sur les résultats d'une ACV et des scores d'impacts d'indicateurs ressources. ACV-A = ACV attributionnelle, ACV-C = ACV conséquentielle.

7. Références

- Adamas Intelligence, 2019. Rare Earth Elements: Small Market, Big Necessity.
- ANR, 2024. PEPR Exploratoires | ANR [WWW Document]. URL <https://anr.fr/en/france-2030/programmes-et-equipements-prioritaires-de-recherche-pepr/pepr-exploratoires/> (accessed 8.27.24).
- Ardente, F., Beylot, A., Zampori, L., 2023. A price-based life cycle impact assessment method to quantify the reduced accessibility to mineral resources value. *Int. J. Life Cycle Assess.* 28, 95–109.
- Bach, V., Berger, M., Finogenova, N., Finkbeiner, M., 2017. Assessing the availability of terrestrial Biotic Materials in Product Systems (BIRD). *Sustain.* 9, 1–28.
- Bach, V., Berger, M., Henßler, M., Kirchner, M., Leiser, S., Mohr, L., Rother, E., Ruhland, K., Schneider, L., Tikana, L., Volkhausen, W., Walachowicz, F., Finkbeiner, M., 2016. Integrated method to assess resource efficiency – ESSENZ. *J. Clean. Prod.* 137, 118–130.
- Bach, V., Marinova, S., Finkbeiner, M., 2024. Updated data and characterization factors of the criticality assessment for the integrated method to assess resource efficiency (ESSENZ and ESSENZ+). *Discov. Sustain.* 5.
- Barber, M., Ceska, S., Noilhetas, V., Ventura, Y., 2023. Étude des risques environnementaux, socio-sociétaux et juridiques des approvisionnements en minerais stratégiques pour les transitions énergétique et numérique.
- Bastein, T., Rietveld, E., Zyl, S. Van, 2015. Materials in the Dutch Economy – a vulnerability assessment - 144.
- Bauer, D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., Telleen, P., Wanner, B., 2010. US Department of Energy: Critical Materials Strategy, December 2010, Agenda.
- Berger, M., 2024. Dissipation-based life cycle impact assessment of mineral resource use—a review, case study, and implications for the product environmental footprint. *Int. J. Life Cycle Assess.* 29, 1177–1189.
- Berger, M., Sonderegger, T., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Peña, C.A., Rugani, B., Sahnoun, A., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., Valero, A., Weidema, B.P., 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. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 798–813.
- Berr, M., Beloin-Saint-Pierre, D., Hischier, R., Hool, A., Wäger, P., 2022. SPOTTER: Assessing supply disruption impacts along the supply chain within Life Cycle Sustainability Assessment. *Clean. Logist. Supply Chain* 4.
- 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. *Resour. Conserv. Recycl.* 157, 104748.
- Beylot, A., Ardente, F., Sala, S., Zampori, L., 2021. Mineral resource dissipation in life cycle inventories. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 497–510.
- Beylot, A., Dewulf, J., Greffe, T., Muller, S., Blengini, G.A., 2024. Mineral resources depletion, dissipation and accessibility in LCA: a critical analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 29, 890–908.
- Blengini, G.A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Others, A., 2017. Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials - Background report.
- Boubault, A., Victor, F., Leguérinel, M., Lefebvre, G., Gleuher, M. Le, Charles, N., 2023. New method to study mineral criticality from a French Administration's perspective.
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, Á., Somers, J., Telsnig, T.,

- Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., Christou, M., 2023a. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study.
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzov, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Prior Arce, A., Somers, J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., Christou, M., European Commission. Joint Research Centre., 2023b. Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study.
- Charpentier Poncelet, A., 2021. Addressing the dissipation of mineral resources in life cycle assessment : Improving concepts and development of impact assessment methods for 61 metals. Université de Bordeaux.
- Charpentier Poncelet, A., Beylot, A., Loubet, P., Laratte, B., Muller, S., Villeneuve, J., Sonnemann, G., 2022a. Linkage of impact pathways to cultural perspectives to account for multiple aspects of mineral resource use in life cycle assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* 176, 105912.
- 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.
- Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A., Sonnemann, G., 2022b. Losses and lifetimes of metals in the economy. *Nat. Sustain.* 5, 717–726.
- Charpentier Poncelet, A., Loubet, P., Helbig, C., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A., Sonnemann, G., 2022c. Midpoint and endpoint characterization factors for mineral resource dissipation: methods and application to 6000 data sets. *Int. J. Life Cycle Assess.* 27, 1180–1198.
- Chordia, M., Wickerts, S., Nordelöf, A., Arvidsson, R., 2022. Life cycle environmental impacts of current and future battery-grade lithium supply from brine and spodumene. *Resour. Conserv. Recycl.* 187, 106634.
- Chung, H., Friedrich, S., Becker, J., Friedrich, B., 2024. Purification principles and methodologies to produce high-purity tellurium. *Can. Metall. Q.* 63, 1626–1642.
- Cimprich, A., 2017. From the outside in. *Bmj* 338.
- Cimprich, A., Bach, V., Helbig, C., Thorenz, A., Schrijvers, D., Sonnemann, G., Young, S.B., Sonderegger, T., Berger, M., 2019. Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment: Examining methods for product-level supply risk assessment. *J. Ind. Ecol.* 23, 1226–1236.
- 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. *J. Clean. Prod.* 162, 754–763.
- Cimprich, A., Young, S.B., Schrijvers, D., Ku, A.Y., Hagelüken, C., Christmann, P., Eggert, R., Habib, K., Hirohata, A., Hurd, A.J., Lee, M.-H., Peck, D., Petavratzi, E., Tercero Espinoza, L.A., Wäger, P., Hool, A., 2023. The role of industrial actors in the circular economy for critical raw materials: a framework with case studies across a range of industries. *Miner. Econ.* 36, 301–319.
- Commission Européenne, 2023. RÈGLEMENT (UE) 2023/1542 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 12 juillet 2023 relatif aux batteries et aux déchets de batteries, modifiant la directive 2008/98/CE et le règlement (UE) 2019/1020, et abrogeant la directive 2006/66/CE. *J. Off. l'Union Eur.*
- Consequential-LCA, 2015. Marginal Suppliers [WWW Document]. URL <https://consequential-lca.org/clca/marginal-suppliers/> (accessed 1.30.19).
- de Caemel, B., Huppertz, T., Beylot, A., 2022. Méthodes innovantes de comptabilisation des ressources.
- Dewulf, J., Benini, L., Mancini, L., Sala, S., Blengini, G.A., Ardente, F., Recchioni, M., Maes, J., Pant,

- R., Pennington, D., 2015. Rethinking the area of protection “natural resources” in life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.* 49, 5310–5317.
- Dewulf, J., Beylot, A., Monfort, D., Lai, F., Saldivar, J.S., Muller, S., Mathieux, F., 2024. Contribution to inaccessibility as resource impact method: A base for sustainable resource management along the life cycle. *Resour. Conserv. Recycl.* 202, 107363.
- Dewulf, J., Hellweg, S., Pfister, S., León, M.F.G., Sonderegger, T., de Matos, C.T., Blengini, G.A., Mathieux, F., 2021. Towards sustainable resource management: identification and quantification of human actions that compromise the accessibility of metal resources. *Resour. Conserv. Recycl.* 167, 105403.
- Ding, Y., Cano, Z.P., Yu, A., Lu, J., Chen, Z., 2019. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochem. Energy Rev.* 2, 1–28.
- Drielsma, J., Allington, R., Brady, T., Guinée, J., Hammarstrom, J., Hummen, T., Russell-Vaccari, A., Schneider, L., Sonnemann, G., Weihed, P., 2016. Abiotic Raw-Materials in Life Cycle Impact Assessments: An Emerging Consensus across Disciplines. *Resources* 5, 1–10.
- ECHA, 2023. Candidate List of substances of very high concern for Authorisation [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/candidate-list-table> (accessed 6.8.23).
- EEB, 2023. EU’s Critical Raw Materials Act: A Mixed Bag of Aspirations and Shortcomings [WWW Document].
- EIT Raw Materials, 2022. TripleLink Project.
- European Commission, 2010. Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. *Eucom* 39, 1–84.
- European Commission, 2014. Report on critical raw materials for the EU, Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials.
- European Commission, 2019. Raw Materials Information System [WWW Document]. URL <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/> (accessed 6.8.23).
- European Commission, 2020a. Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Critical Raw Materials Factsheets, Critical Raw Materials Factsheets.
- European Commission, 2020b. Study on the EU’s list of Critical Raw Materials: Factsheets on Critical Raw Materials.
- European Commission, 2020c. Study on the EU’s list of Critical Raw Materials: Non-Critical Raw Materials Factsheets.
- European Commission, 2022. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive (EU) 2019/1937, European Commission.
- European Commission, 2023a. Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final report.
- European Commission, 2023b. The Green Deal Industrial Plan - European Commission [WWW Document]. URL https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_en (accessed 8.27.24).
- European Commission, 2023c. Net-Zero Industry Act - European Commission [WWW Document]. URL https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan/net-zero-industry-act_en (accessed 8.27.24).
- European Commission, 2023d. Q&A: The Net-Zero Industry Act and European Hydrogen Bank [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_1666 (accessed 8.27.24).
- European Commission, 2023e. European Critical Raw Materials Act [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661 (accessed 8.27.24).

- European Commission, 2024a. Critical Raw Materials Act [WWW Document]. URL https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en#contact (accessed 3.21.24).
- European Commission, 2024b. Corporate sustainability due diligence: Council gives its final approval - Consilium [WWW Document]. URL <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/05/24/corporate-sustainability-due-diligence-council-gives-its-final-approval/> (accessed 8.27.24).
- European Commission, 2024c. European Critical Raw Materials Act - EU secures access to diversified, affordable, and sustainable supply of critical raw materials [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2748 (accessed 1.6.25).
- European Parliament and Council of the European Union, 2024. REGULATION (EU) 2024/1252 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/17.
- European Standards, 2019. BS EN 45558:2019 General method to declare the use of critical raw materials in energy-related products [WWW Document]. URL <https://www.en-standard.eu/bs-en-45558-2019-general-method-to-declare-the-use-of-critical-raw-materials-in-energy-related-products/> (accessed 8.27.24).
- Fiorletta, M., Tomasetta, C., Lai, F., 2020. Impacts environnementaux des activités minières pour quelques matières premières.
- FMRA, 2023. Federal ministry republic of Austria [WWW Document].
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M.A., Gutzmer, J., 2017. Raw material “criticality” - Sense or nonsense? J. Phys. D. Appl. Phys. 50.
- Gaulier, G., Zignago, S., 2012. BACI: International Trade Database at the Product-Level (the 1994-2007 Version). SSRN Electron. J.
- Gemechu, E.D., Helbig, C., Sonnemann, G., Thorenz, A., Tuma, A., 2015a. Import-based Indicator for the Geopolitical Supply Risk of Raw Materials in Life Cycle Sustainability Assessments. J. Ind. Ecol. 20, 154–165.
- Gemechu, E.D., Sonnemann, G., Young, S.B., 2015b. Geopolitical-related supply risk assessment as a complement to environmental impact assessment: the case of electric vehicles. Int. J. Life Cycle Assess. 22, 31–39.
- Gemechu, E.D., Sonnemann, G., Young, S.B., 2017. Geopolitical-related supply risk assessment as a complement to environmental impact assessment: the case of electric vehicles. Int. J. Life Cycle Assess. 22, 31–39.
- Glöser, S., Tercero Espinoza, L., Gandenberger, C., Faulstich, M., 2015. Raw material criticality in the context of classical risk assessment. Resour. Policy 44, 35–46.
- Graedel, T.E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N.T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M.-Y., Zhu, C., 2012. Methodology of metal criticality determination. Environ. Sci. Technol. 46, 1063–70.
- Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T., Nuss, P., Reck, B.K., 2015. Criticality of metals and metalloids. Proc. Natl. Acad. Sci. 112, 4257–4262.
- Gregoir, L., Acker, K. Van, 2022. Metals for Clean Energy.
- Gregoir, L., van Acker, K., Beretta, S., Heron, C., 2022. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe’s raw materials challenge.
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., 2004. Economic allocation: Examples and derived decision tree. Int. J. Life Cycle Assess. 9, 23.
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Vijver, M.G., Peijnenburg, W.J.G.M., 2017. Setting the stage for debating

- the roles of risk assessment and life-cycle assessment of engineered nanomaterials. *Nat. Nanotechnol.* 12, 727–733.
- Hackenhaar, I., Alvarenga, R.A.F., Bachmann, T.M., Riva, F., Horn, R., Graf, R., Dewulf, J., 2022. A critical review of criticality methods for a European Life Cycle Sustainability Assessment. *Procedia CIRP* 105, 428–433.
- Hackenhaar, I.C., Moraga, G., Thomassen, G., Taelman, S.E., Dewulf, J., Bachmann, T.M., 2024. A comprehensive framework covering Life Cycle Sustainability Assessment, resource circularity and criticality. *Sustain. Prod. Consum.* 45, 509–524.
- Heidelberg Institute for International Conflict Research, 2022. Conflict Barometer - 2021.
- Helbig, C., Schrijvers, D., Hool, A., 2021. Selecting and prioritizing material resources by criticality assessments. *One Earth* 4, 339–345.
- Hool, A., Schrijvers, D., 2024. Spotlight: International Round Table on Materials Criticality (IRTC). *Miner. Econ.*
- Hool, A., Schrijvers, D., van Nielen, S., Clifton, A., Ganzeboom, S., Hagelueken, C., Harada, Y., Kim, H., Y. Ku, A., Meese-Marktscheffel, J., Nemoto, T., 2022. How companies improve critical raw material circularity: 5 use cases. *Miner. Econ.* 35, 325–335.
- Huppertz, T., Weidema, B.P., Standaert, S., de Caemel, B., van Overbeke, E., 2019. The social cost of sub-soil resource use. *Resources* 8.
- INL, 2023. It's your nickel: Small changes in materials could lead to big improvements in fast charging - Idaho National Laboratory [WWW Document]. URL <https://inl.gov/integrated-energy/its-your-nickel-small-changes-in-materials-could-lead-to-big-improvements-in-fast-charging/> (accessed 1.6.25).
- Institute for Economics & Peace, 2022. Global Peace Index 2022: Measuring Peace in a Complex World [WWW Document]. URL <http://visionofhumanity.org/resources> (accessed 6.8.23).
- International Energy Agency, 2022. Global EV Outlook 2022 - Securing supplies for an electric future.
- International Lithium Association, 2024. Determining the Product Carbon Footprint of Lithium Products.
- IRTC, 2023. IRTC Decision Tool [WWW Document]. URL <https://www.irtc-decision-tool.weloop.org/> (accessed 1.19.23).
- Kaufmann, D., Kraay, A., Mastruzzi, M., 2011. The worldwide governance indicators: Methodology and analytical issues. *Hague J. Rule Law* 3, 220–246.
- Kim, T., Song, W., Son, D.-Y., Ono, L.K., Qi, Y., 2019. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *J. Mater. Chem. A* 7, 2942–2964.
- Koyampambath, A., 2023. Mise en oeuvre et élargissement d'une méthode d'évaluation de la criticité du cycle de vie à l'aide de techniques informatiques.
- Koyampambath, A., Loubet, P., Young, S.B., Sonnemann, G., 2024. Spatially and temporally differentiated characterization factors for supply risk of abiotic resources in life cycle assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* 209, 107801.
- Koyampambath, A., Santillán-Saldivar, J., Young, S.B., Sonnemann, G., 2023. A python library to calculate the GeoPolRisk method - "GeoPolRisk.py." GitHub.
- KPMG, 2024. Progress on the EU Corporate Sustainability Due... - KPMG Global [WWW Document]. URL <https://kpmg.com/xx/en/home/insights/2024/02/progress-on-the-eu-corporate-sustainability.html> (accessed 8.27.24).
- Lai, F., Beylot, A., 2023. Loss of mineral resource value in LCA: application of the JRC-LCI method to multiple case studies combined with inaccessibility and value-based impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 28, 38–52.

- Lai, F., Istrate, R., Fons, A.M., Lefebvre, G., Collignon, V., et al., 2024a. Towards a better understanding of current and future environmental impacts of raw materials supply for Li-ion batteries Vers une meilleure connaissance des impacts environnementaux actuels et futurs de l'approvisionnement en matières premières pour batter. In: MCV.
- Lai, F., Muller, S., Santillán-Saldivar, J., Philippe, A., Beylot, A., Al., E., 2024b. The global environmental footprint of metal commodities. In: SETAC Europe 34th Annual Meeting. Sevilla.
- Lappalainen, H., Rinne, M., Elomaa, H., Aromaa, J., Lundström, M., 2024. Environmental impacts of lithium hydroxide monohydrate production from spodumene concentrate – A simulation-based life cycle assessment. *Miner. Eng.* 209, 108632.
- Lèbre, É., Owen, J.R., Corder, G.D., Kemp, D., Stringer, M., Valenta, R.K., 2019. Source Risks As Constraints to Future Metal Supply. *Environ. Sci. Technol.* 53, 10571–10579.
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J.R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., Valenta, R.K., 2020. The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nat. Commun.* 11, 1–8.
- Mancini, L., Benini, L., Sala, S., 2016. Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe. *Int. J. Life Cycle Assess.*
- Margonelli, L., 2009. Clean Energy's Dirty Little Secret [WWW Document]. *Atl.* URL <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/2009/05/clean-energys-dirty-little-secret/307377/> (accessed 11.10.20).
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Baur, S.-J., Billaud, M., Deubzer, O., Eberling, E., Erdmann, L., Haendel, M., Krail, M., Loibl, A., Maisel, F., Marwede, M., Neef, C., Neuwirth, M., Rostek, L., Rückschloss, J., Shirinzadeh, S., Stijepic, D., Tercero Espinoza, L., Tippner, M., 2021. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. – DERA Rohstoffinformationen 50. Berlin.
- Marscheider-Weidemann, Frank, Langkau, S., Eberling, E., Erdmann, L., Haendel, M., Krail, M., Loibl, A., Neef, C., Neuwirth, M., Rostek, L., Shirinzadeh, S., Stijepic, D., Tercero Espinoza, L., Baur, S.-J., Billaud, M., Deubzer, O., Maisel, F., Marwede, M., Rückschloss, J., Tippner, M., 2021. Raw materials for emerging technologies 2021 – DERA Rohstoffinformationen. Berlin, Germany.
- Mistry, M., Gediga, J., Boonzaier, S., 2016. Life cycle assessment of nickel products. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1559–1572.
- Motoshita, M., Yokoi, R., Greffe, T., Jolliet, O., Alvarenga, R., Beylot, A., Drielsma, J., Huppertz, T., Kumar, M., Northey, S., Owsianiak, M., Pastor, A., Pradinaud, C., Pfister, S., Schulze, R., Grant, T., 2024. Recommended model for the endpoint assessment of mineral resource use in GLAM3 project. In: SETAC Europe 34th Annual Meeting. Sevilla.
- Muller, S., 2024. Issue of Long-term Estimates of Metal Leaching in LCIA (In Workshop “Towards Improving Life Cycle Impact Assessment (LCIA) of Mine Tailings organized by the ICA” during SETAC2024 conference, Sevilla).
- Muller, S., Lassin, A., Lai, F., Thiéry, D., Guignot, S., 2022. Modelling releases from tailings in life cycle assessments of the mining sector: From generic models to reactive transport modelling. *Miner. Eng.* 180, 107481.
- Nassar, N.T., Graedel, T.E., Harper, E.M., 2015a. By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Sci. Adv.* 1, e1400180–e1400180.
- Nassar, N.T., Graedel, T.E., Harper, E.M., 2015b. By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Sci. Adv.* 1, e1400180.
- Nordelöf, A., Grunditz, E., Tillman, A.M., Thiringer, T., Alatalo, M., 2018. A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part I: design and composition. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 55–69.
- Nordelöf, A., Tillman, A.M., 2018. A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part II: manufacturing processes. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 295–313.

- Nuss, P., 2019. Losses and environmental aspects of a byproduct metal: tellurium. *Environ. Chem.* 16, 243.
- Nuss, P., Eckelman, M.J., 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLoS One* 9, e101298.
- OECD, 2022. Methodological note to the Inventory of Export Restrictions on Industrial Raw Materials.
- Oers, L. van, Koning, A. de, Guinée, J.B., Huppes, G., 2002. Abiotic Resource Depletion in LCA - Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook.
- ORIENTING, 2024. Operational Life Cycle Sustainability Assessment Methodology Supporting Decisions Towards a Circular Economy.
- Owsianiak, M., van Oers, L., Drielsma, J., Laurent, A., Hauschild, M.Z., 2022. Identification of dissipative emissions for improved assessment of metal resources in life cycle assessment. *J. Ind. Ecol.* 26, 406–420.
- Owsianiak, M.M., van Oers, L., Drielsma, J., Laurent, A., Hauschild, M.Z., Oers, L., Drielsma, J., Laurent, A., Hauschild, M.Z., 2021. Identification of dissipative emissions for improved assessment of metal resources in life cycle assessment. *J. Ind. Ecol.* 1–15.
- Pelzeter, J., Bach, V., Henßler, M., Ruhland, K., Finkbeiner, M., 2022. Enhancement of the ESSENZ Method and Application in a Case Study on Batteries. *Resources* 11, 52.
- R.L. Moss, Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Thompson, P., Chapman, A., Morley, N., Sims, E., Bryson, R., Pearson, J., Espinoza, L.T., Marscheider-Weidemann, F., Soulier, M., Lüllmann, A., Sartorius, C., Ostertag, K., 2013. Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. JRC Scientific & Policy Report, European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Rachid, S., Taha, Y., Benzaazoua, M., 2023. Environmental evaluation of metals and minerals production based on a life cycle assessment approach: A systematic review. *Miner. Eng.* 198, 108076.
- Rauch, J.N., Pacyna, J.M., 2009. Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles. *Global Biogeochem. Cycles* 23, 1–16.
- Ridoutt, B.G., Pfister, S., 2010. Reducing humanity's water footprint. *Environ. Sci. Technol.* 44, 6019–6021.
- Roelich, K., Dawson, D.A., Purnell, P., Knoeri, C., Revell, R., Busch, J., Steinberger, J.K., 2014. Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity. *Appl. Energy* 123, 378–386.
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 532–546.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2014. Composition of the Continental Crust. In: *Treatise on Geochemistry: Second Edition*. Elsevier Ltd., pp. 1–51.
- S&P Global Market Intelligence, 2022. S&P Capital IQ Online Database [Database].
- Santillán-Saldivar, J., Beylot, A., Cor, E., Monnier, E., Muller, S., 2023. Economic value dissipation potential (EVDp): an improved method to estimate the potential economic value loss due to resource dissipation in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 28, 1400–1418.
- 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.

- Resour. Conserv. Recycl. 164, 105108.
- Santillán-Saldivar, J., Gaugler, T., Helbig, C., Rathgeber, A., Sonnemann, G., Thorenz, A., Tuma, A., 2020. Design of an endpoint indicator for mineral resource supply risks in life cycle sustainability assessment The case of Li-ion batteries. *J. Ind. Ecol.* 1–12.
- Santillán-Saldivar, J., Gemechu, E., Muller, S., Villeneuve, J., Young, S.B., Sonnemann, G., 2022. An improved resource midpoint characterization method for supply risk of resources: integrated assessment of Li-ion batteries. *Int. J. Life Cycle Assess.* 27, 457–468.
- Schenker, V., Kulionis, V., Oberschelp, C., Pfister, S., 2022. Metals for low-carbon technologies: Environmental impacts and relation to planetary boundaries. *J. Clean. Prod.* 372, 133620.
- Schneider, L., Berger, M., Schüler-Hainsch, E., Knöfel, S., Ruhland, K., Mosig, J., Bach, V., Finkbeiner, M., 2014. The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 601–610.
- Schrijvers, D., Blengini, G.A., Cimprich, A., Chen, W., Correia, V., Eggert, R., Gupta, V., Hagelüken, C., Hirohata, A., Ku, A., Lee, M.-H., Mudd, G., Nansai, K., Peiter, C., Saldivar, J.S., Sonnemann, G., Tyagi, A., Wäger, P., Young, S., Hool, A., 2020a. Material criticality: an overview for decision-makers.
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G.A., Chen, W.-Q., Dewulf, J., Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M.-H., Liu, G., Nansai, K., Nuss, P., Peck, D., Reller, A., Sonnemann, G., Tercero, L., Thorenz, A., Wäger, P.A., 2020b. A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resour. Conserv. Recycl.* 155, 104617.
- Schrijvers, D., Loubet, P., Sonnemann, G., 2020c. Archetypes of Goal and Scope Definitions for Consistent Allocation in LCA. *Sustainability* 12, 5587.
- Schrijvers, D., Loubet, P., Sonnemann, G., 2021a. LCA for Criticality Assessments. In: Pradel, M. (Ed.), *Développement Durable*. Presses des Mines.
- Schrijvers, D., Loubet, P., Sonnemann, G., 2021b. Using results of Attributional LCA in an economic sustainability assessment. In: SETAC Europe 31st Annual Meeting.
- Schrijvers, D., Loubet, P., Sonnemann, G., 2022. The influence of market factors on the potential environmental benefits of the recycling of Rare Earth Elements. *Clean Technol. Recycl.* 2, 64–79.
- Schrijvers, Dieuwertje, Poncelet, A.C., Adibi, N., Amaral, M., Entrena-barbero, E., Rydberg, T., Schaubroeck, T., 2024. Evaluating the economic sustainability in LCSA – learnings from the International Round Table of Materials Criticality. In: SETAC Europe 34th Annual Meeting Annual Meeting.
- Schrijvers, D., Vidinha, M., Adibi, N., Charpentier, A., Schaubroeck, T., Saidani, M., Rydberg, T., Barbero, E.E., Amaral, M., 2024. D3.3. Circular economy and criticality assessment methodology definition.
- Schrijvers, D.L., Loubet, P., Sonnemann, G., 2021. An axiomatic method for goal-dependent allocation in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 1223–1235.
- Sevdari, K., Marinelli, M., Pastorelli, F., 2024. Overview of EV battery types and degradation measurement for Renault Zoe NMC batteries. In: 2024 International Conference on Renewable Energies and Smart Technologies (REST). IEEE, pp. 1–5.
- Sonderegger, T., Berger, M., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Rugani, B., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., Valero, A., Weidema, B.P., Young, S.B., 2020. Mineral resources in life cycle impact assessment—part I: a critical review of existing methods. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 784–797.
- Sonderegger, T., Dewulf, J., Fantke, P., Maia de Souza, D., Pfister, S., Stoessel, F., Verones, F., Vieira, M., Weidema, B., Hellweg, S., 2017. Towards harmonizing natural resources as an area of

- protection in Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.*
- Sonnemann, G., Gemechu, E.D., Adibi, N., De Bruille, V., Bulle, C., 2015. From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into Life Cycle Sustainability Assessment. *J. Clean. Prod.* 94, 20–34.
- Sonnemann, G., Tsang, M., Schuhmacher, M., 2018. *Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes and Products*. Taylor & Francis, Boca Raton.
- Sonnemann, G.W., Vigon, B.W., 2011. *Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases - A Basis for Greener Processes and Products*. Paris, France.
- Tercero Espinoza, L., Schrijvers, D., Chen, W., Dewulf, J., Eggert, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hurd, A.J., Kleijn, R., Ku, A.Y., Lee, M.-H., Nansai, K., Nuss, P., Peck, D., Petavratzi, E., Sonnemann, G., van der Voet, E., Wäger, P.A., Young, S.B., Hool, A., 2020. Greater circularity leads to lower criticality, and other links between criticality and the circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* 159, 104718.
- The Fund for Peace, 2023. *Fragile States Index* [WWW Document]. URL <https://fragilestatesindex.org/> (accessed 6.8.23).
- Transparency International, 2021. *Corruption Perceptions Index* [WWW Document]. URL <https://www.transparency.org/en/cpi/2021> (accessed 6.8.23).
- Tsang, M.P., Kikuchi-Uehara, E., Sonnemann, G.W., Aymonier, C., Hirao, M., 2017. Evaluating nanotechnology opportunities and risks through integration of life-cycle and risk assessment. *Nat. Nanotechnol.* 12, 734–739.
- TU Berlin, n.d. *ESSENZ method - TU Berlin* [WWW Document]. URL <https://www.tu.berlin/en/see/research-projects/data-sets-methods-and-tools/essenz-method> (accessed 1.6.25).
- U.S. Geological Survey, 2022. *Mineral commodity summaries 2022*. U.S. Geol. Surv. p 202.
- UNDP, 2022. *Human Development Index* [WWW Document]. URL <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI> (accessed 6.8.23).
- UNSDG, 2022. *Proportion of children engaged in economic activity and household chores, by sex and age (%) - Indicator 8.7.1. Proportion and number of children age 5-17 years engaged in child labour, by sex and age*.
- USGS, 2022. *Mineral commodity summaries 2021*.
- Valenta, R.K., Kemp, D., Owen, J.R., Corder, G.D., Lèbre, 2019. Re-thinking complex orebodies: Consequences for the future world supply of copper. *J. Clean. Prod.* 220, 816–826.
- Van Genderen, E., Wildnauer, M., Santero, N., Sidi, N., 2016. A global life cycle assessment for primary zinc production. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1580–1593.
- van Oers, L., Guinée, J.B., Heijungs, R., 2020a. 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.
- van Oers, L., Guinée, J.B., Heijungs, R., Schulze, R., Alvarenga, R.A.F., Dewulf, J., Drielsma, J., Sanjuan-Delmás, D., Kampmann, T.C., Bark, G., Uriarte, A.G., Menger, P., Lindblom, M., Alcon, L., Ramos, M.S., Torres, J.M.E., 2020b. 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.
- Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., 2021. Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resour. Conserv. Recycl.* 164, 105107.
- WeLOOP, 2023. *Blog | Analyse du Cycle de Vie (ACV), économie circulaire et éco-conception* [WWW Document]. URL <https://www.weloop.org/batters-acv-territoriale-et-feuille-de-route/> (accessed 1.6.25).

Wendling, Z.A., Emerson, J.W., de Sherbinin, A., Esty, D.C., et al., 2020. Environmental Performance Index. New Haven.

World Bank, 2022. WGI 2022 Interactive [WWW Document]. URL <https://info.worldbank.org/governance/wgi/> (accessed 6.8.23).

World Economic Forum, 2016. The Global Enabling Trade Report 2016 [WWW Document]. URL <https://www.weforum.org/reports/the-global-enabling-trade-report-2016/> (accessed 6.8.23).

Yavor, K.M., Bach, V., Finkbeiner, M., 2021. Adapting the ESSENZ method to assess company-specific criticality aspects. Resources 10.

Young, S.B., 2018. Responsible sourcing of metals: certification approaches for conflict minerals and conflict-free metals. Int. J. Life Cycle Assess. 23, 1429–1447.

Yunis, J., Aliakbari, E., 2022. Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2021.

Zampori, L., Pant, R., 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, Eur 29682 En.

Annexe 1.

Tableau 56 Analyse de l'inventaire des batteries NMC811 et LFP, en se concentrant sur les matériaux extraits du sol

Substance	Quantity (kg) attributed to one NMC811 battery (435.8 kg)	Quantity (kg) attributed to one LFP battery (562.3 kg)
Aluminium	1,19E+02	1,15E+02
Aluminium	1,192E+02	1,155E+02
Anhydrite	4,558E-05	4,842E-05
Antimony	3,035E-05	3,203E-05
Arsenic	7,593E-02	1,866E-03
Barium	8,966E+00	7,105E+00
Basalt	2,905E+00	3,007E+00
Borax	1,510E-05	1,614E-05
Boron	2,397E-02	2,047E-02
Cadmium	9,904E-04	1,079E-03
Calcite	5,710E+02	5,069E+02
Calcium	5,830E+00	1,257E+00
Carbon, organic, in soil or biomass stock	2,149E-01	2,447E-01
Cerium	3,944E-02	6,247E-02
Chromium	1,311E+01	2,931E+00
Chrysotile	1,286E-02	1,196E-02
Clay, bentonite	3,823E+00	3,932E+00
Clay, unspecified	1,574E+02	1,574E+02
Coal, brown	4,421E+02	3,343E+02
Coal, hard	1,515E+03	1,622E+03
Cobalt	3,553E+00	8,816E-02
Copper	1,271E+02	6,068E+01
Diatomite	1,716E-07	9,716E-08
Dolomite	2,014E+00	1,967E+00
Dysprosium	1,057E-05	5,888E-06
Erbium	5,880E-07	4,607E-07
Europium	1,609E-04	2,516E-04
Feldspar	6,823E-07	7,313E-07
Fluorine	1,112E+00	4,679E+00
Fluorspar	5,843E+01	1,035E+02
Gadolinium	5,503E-04	8,740E-04
Gallium	2,736E-02	3,560E-02
Gangue	1,580E+04	1,645E+04
Gold	4,841E-03	5,442E-03
Granite	3,772E+01	3,435E+01
Graphite	2,835E-01	1,827E-01
Gravel	1,916E+03	1,384E+03
Gypsum	7,045E+00	5,528E+00
Hafnium	1,716E-03	1,747E-03

Substance	Quantity (kg) attributed to one NMC811 battery (435.8 kg)	Quantity (kg) attributed to one LFP battery (562.3 kg)
Holmium	2,251E-07	1,763E-07
Indium	1,404E-04	1,532E-04
Iron	1,144E+03	1,135E+02
Kaolinite	1,184E-01	1,219E-01
Kieserite	6,618E-10	6,961E-10
Lanthanum	1,888E-02	2,913E-02
Laterite	1,071E+00	8,698E-01
Lead	1,954E+00	2,047E+00
Lithium	4,389E+00	5,582E+00
Lutetium	6,534E-08	5,119E-08
Magnesite	6,422E+00	1,076E+00
Magnesium	4,989E+01	2,166E+00
Manganese	1,606E+01	1,361E+00
Mercury	1,425E-05	7,511E-06
Molybdenum	1,312E+00	1,494E+00
Neodymium	1,442E-02	2,303E-02
Nickel	4,582E+01	3,705E+00
Niobium	3,674E-03	3,656E-03
Oil, crude, 43.4 MJ per kg	4,289E+02	3,685E+02
Olivine	2,436E-05	2,552E-05
Palladium	3,874E-04	1,292E-04
Perlite	3,312E-04	2,611E-04
Phosphorus	7,984E+00	3,479E+01
Platinum	2,234E-04	9,913E-05
Potassium	2,649E-01	2,120E-01
Potassium chloride	1,236E+00	9,632E-01
Praseodymium	4,824E-03	7,712E-03
Rhenium	1,375E-04	1,566E-04
Rhodium	3,173E-05	1,198E-05
Samarium	6,639E-04	1,017E-03
Sand	1,299E+02	1,142E+02
Scandium	6,756E-05	1,126E-04
Selenium	1,215E-01	1,384E-01
Shale	4,585E+02	4,069E+02
Silicon	1,912E+02	4,724E+00
Silver	5,078E-02	5,716E-02
Sodium	1,152E-03	1,254E-03
Sodium chloride	2,470E+02	1,688E+02
Sodium nitrate	4,307E-03	3,201E-03
Sodium sulfate	1,606E-01	8,514E-02
Spodumene	2,492E+02	3,170E+02
Steatite	5,868E-09	5,936E-09
Strontium	2,869E-03	2,573E-03
Sulfur	5,491E+02	1,366E+01

Substance	Quantity (kg) attributed to one NMC811 battery (435.8 kg)	Quantity (kg) attributed to one LFP battery (562.3 kg)
Talc	1,416E-02	1,489E-02
Tantalum	1,881E-01	2,165E-01
Tellurium	8,167E-03	9,301E-03
Terbium	5,847E-06	3,147E-06
Thulium	6,534E-08	5,119E-08
Tin	4,307E-01	4,795E-01
Titanium	5,964E-01	7,099E-01
Ulexite	1,174E-02	1,188E-02
Uranium	2,330E-02	1,085E-02
Vanadium	3,852E-05	4,196E-05
Ytterbium	5,808E-07	4,550E-07
Yttrium	4,197E-05	2,412E-05
Zinc	8,734E+00	9,354E+00
Zirconium	9,331E-02	9,490E-02

Tableau 57 Couverture d'une liste agrégée de matières premières (basée sur de multiples méthodes d'évaluation des ressources telles que présentées dans ce rapport) par l'outil IRTC

Nomenclature SCORE LCA report	Nomenclature ecoinvent	Indicator representativeness (number of indicators assessed / total number of indicators quantified in the IRTC tool (=24))
Abrasives (natural)		0%
Aluminium	Aluminium	96%
Antimony	Antimony	88%
Arsenic	Arsenic	79%
Asbestos	Chrysotile	0%
Barium / barytes	Barium	75%
Bauxite		0%
Beryllium		79%
Bismuth		0%
Boron/borax	Boron	88%
Bromine	Bromine	0%
Cadmium	Cadmium	83%
Caesium		0%
Calcium	Calcium	0%
Carbon		0%
Cement		0%
Cerium	Cerium	83%
Cesium		0%
Chlorine		0%
Chromium	Chromium	92%
Clays	Clay, unspecified	0%
Clays	Clay, bentonite	0%
Coal	Coal, brown	0%
Coal	Coal, hard	0%
Cobalt	Cobalt	100%

Nomenclature SCORE LCA report	Nomenclature ecoinvent	Indicator representativeness (number of indicators assessed / total number of indicators quantified in the IRTC tool (=24))
Copper	Copper	100%
Crude petroleum		0%
Diamond (industrial)		0%
Diatomite	Diatomite	0%
Dysprosium	Dysprosium	100%
Erbium	Erbium	0%
Europium	Europium	83%
Feldspar	Feldspar	71%
Fluorine	Fluorine	0%
Fluorspar	Fluorspar	71%
Gadolinium	Gadolinium	83%
Gallium	Gallium	88%
Garnet		0%
Gemstone		0%
Germanium		88%
Gold	Gold	92%
Graphite	Graphite	88%
Gypsum	Gypsum	67%
Hafnium	Hafnium	75%
Helium		75%
Holmium	Holmium	83%
Hydrogen		67%
Indium	Indium	96%
Iodine	Iodine	0%
Iridium		92%
Iron	Iron	88%
Iron oxide pigments		0%
Kyanite		0%
Lanthanum	Lanthanum	88%
Lead	Lead	92%
Lime		8%
Lithium	Lithium	100%
Lutetium	Lutetium	83%
Magnesium	Magnesium	79%
Manganese	Manganese	92%
Mercury	Mercury	0%
Mica (scrap&flake)		0%
Molybdenum	Molybdenum	92%
Natural gas EUROPE		0%
Natural gas LNG		0%
Natural gas US		0%
Neodymium	Neodymium	100%
Nickel	Nickel	96%

Nomenclature SCORE LCA report	Nomenclature ecoinvent	Indicator representativeness (number of indicators assessed / total number of indicators quantified in the IRTC tool (=24))
Niobium	Niobium	88%
Nitrogen	Nitrogen, atmospheric	0%
Osmium		0%
Oxygen	Oxygen	0%
Palladium	Palladium	88%
Peat	Peat	0%
Perlite	Perlite	71%
PGMs		0%
Phosphate / phosphorus (ADP)	Phosphorus	8%
Phosphate rock		79%
Platinum	Platinum	100%
Potash		71%
Potassium	Potassium	0%
Praseodymium	Praseodymium	100%
Propane		0%
Pumice		0%
Quartz		0%
REE		0%
Rhenium	Rhenium	88%
Rhodium	Rhodium	83%
Rhutenium		88%
Salt / sodium (ADP)		0%
Samarium	Samarium	83%
Sand & gravel	Sand	67%
Sand & gravel	Gravel	67%
Scandium	Scandium	88%
Selenium	Selenium	88%
Silicon	Silicon	75%
Silver	Silver	92%
Sodium carbonate		0%
Sodium sulfate	Sodium sulfate	0%
Stone (crushed)		0%
Stone / stone (dimension) FWL		0%
Strontium, in ground	Strontium	79%
Sulfur	Sulfur	71%
Talc	Talc	71%
Tantalum	Tantalum	92%
Tellurium	Tellurium	92%
Terbium	Terbium	96%
Thallium		0%
Thorium		0%
Thulium	Thulium	83%
Tin	Tin	96%

Nomenclature SCORE LCA report	Nomenclature ecoinvent	Indicator representativeness (number of indicators assessed / total number of indicators quantified in the IRTC tool (=24))
Titanium	Titanium	88%
Titanium dioxyde		0%
Tungsten		88%
Uranium	Uranium	0%
Vanadium	Vanadium	92%
Vermiculite		0%
Wollastonite		0%
Yttrium	Yttrium	88%
Zinc	Zinc	92%
Zirconium	Zirconium	88%

Tableau 58 Part des matières premières du
Tableau 57 notées dans chaque indicateur de l'outil IRTC (triées par ordre décroissant)

Indicator	Percentage of materials scored
Substance of very high concern for Authorisation (REACH framework)	58%
Export restrictions (bottleneck)	57%
Enabling Trade Index (bottleneck)	56%
WGI Rule of law (bottleneck)	56%
Fragile States Index (bottleneck)	56%
WGI Regulatory Quality (bottleneck)	56%
WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)	56%
WGI Government effectiveness (bottleneck)	56%
Environmental Performance Index (bottleneck)	56%
Global Peace Index (bottleneck)	56%
Corruption Perception Index (bottleneck)	56%
WGI Control of Corruption (bottleneck)	56%
Child labor (bottleneck)	56%
WGI Voice and Accountability (bottleneck)	56%
Human Development Index (bottleneck)	56%
Supply is dominated in a few countries (bottleneck)	55%
% supplied as a by-product	46%
Cumulative energy demand [MJ-eq/kg]	45%
Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index)	44%
Cradle-to-gate LCA	44%
Share of current production capacity used in mining (production to reserves ratio)	24%
Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 for sustainable development scenario (KU Leuven)	22%
Compound Annual Growth Rate between 2018-2040 for sustainable development scenario (DERA)	17%
Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)	12%

Annexe 2.

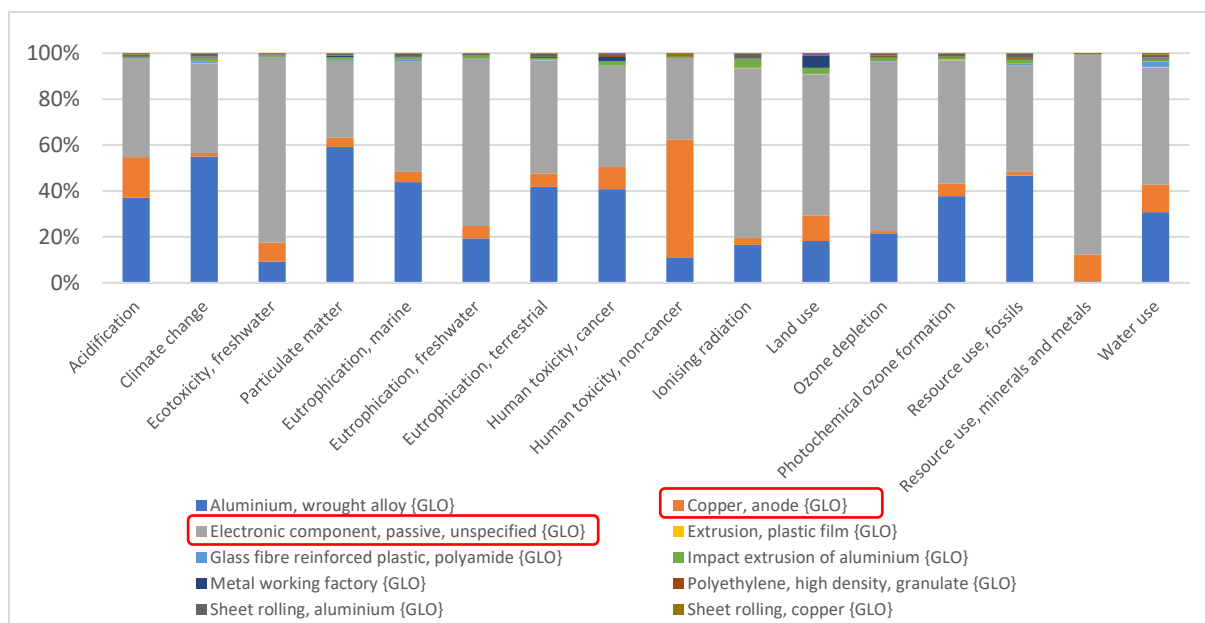


Figure 72 Analyse de points chauds pour l'emballage de la batterie

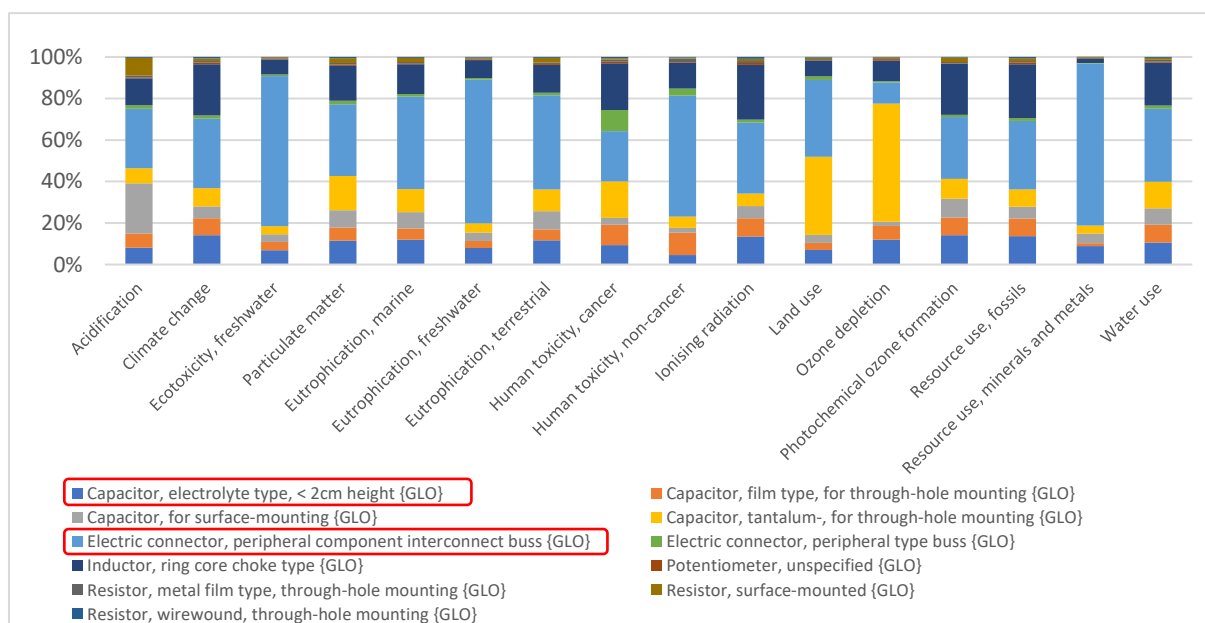


Figure 73 Analyse de points chauds des composants électroniques

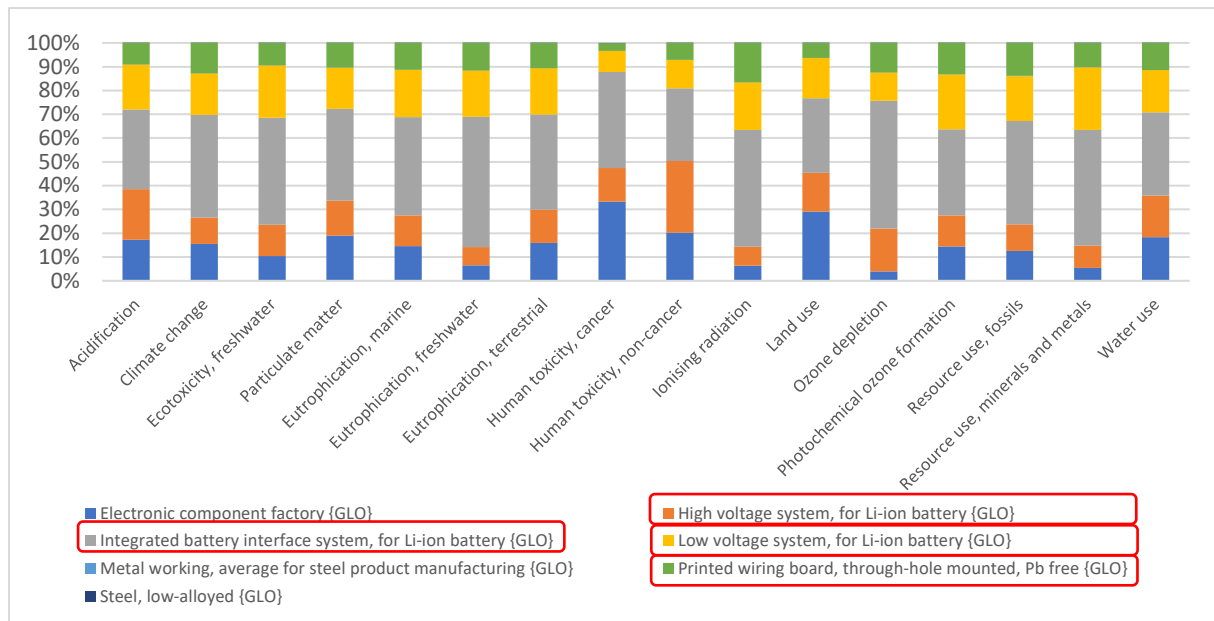


Figure 74 Analyse de points chauds pour le système de gestion de la batterie

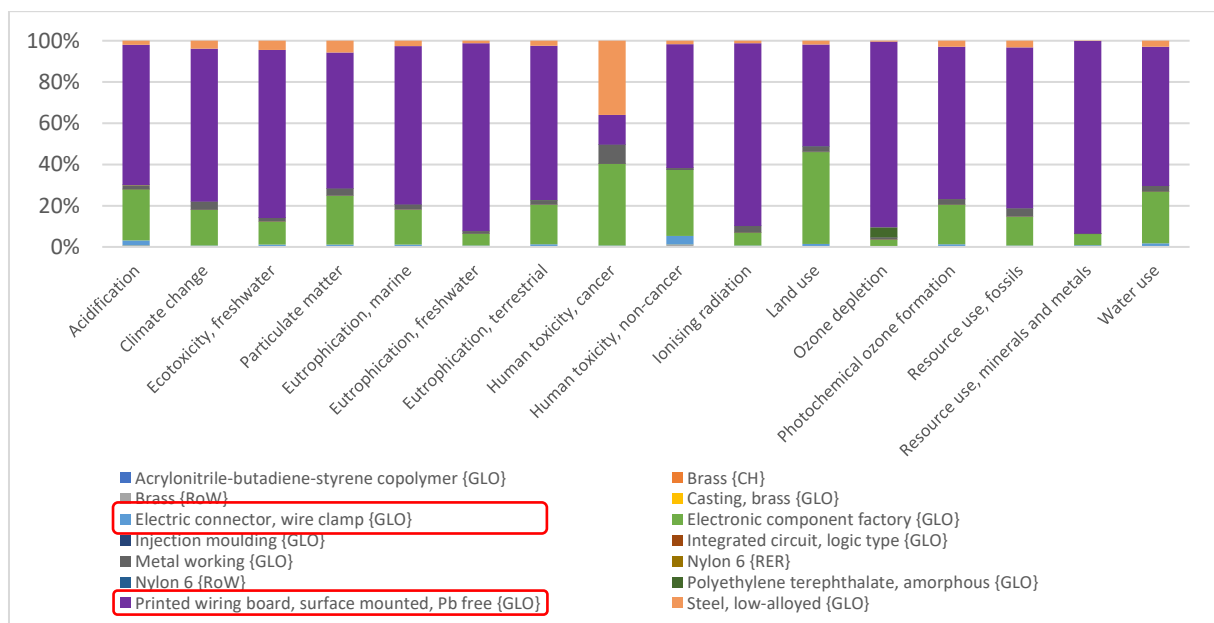


Figure 75 Analyse de points chauds pour le système d'interface

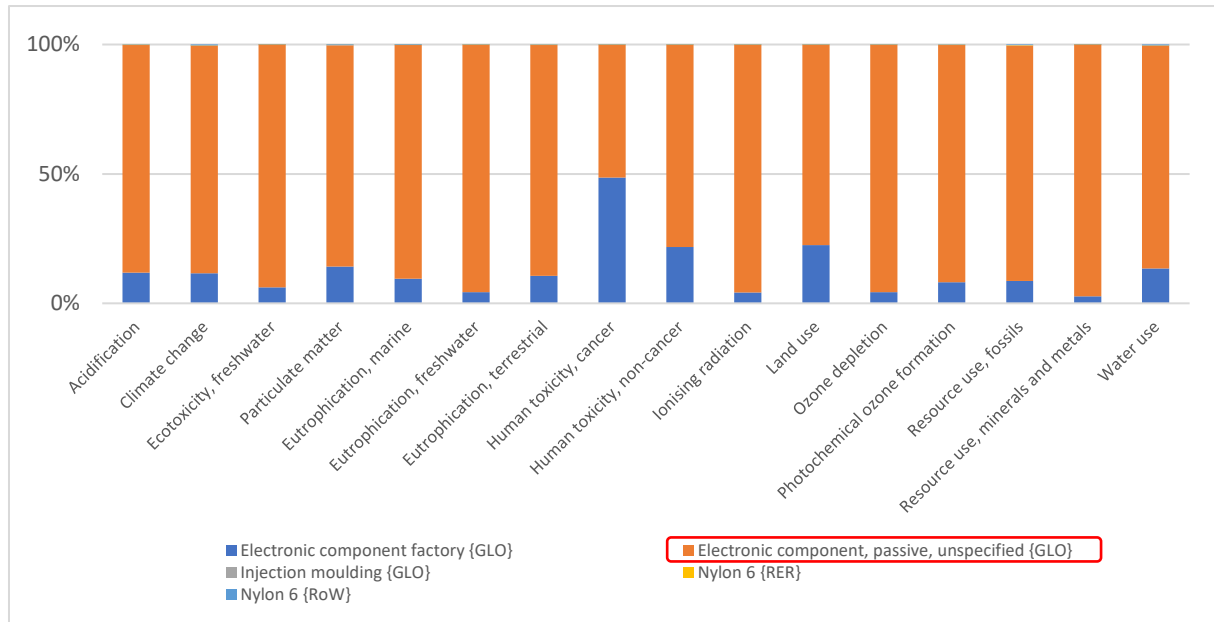


Figure 76 Analyse de points chauds du système de courant faible

Annexe 3.

Tableau 59 Vue d'ensemble des indicateurs tels qu'ils sont mis en œuvre dans l'outil IRTC (IRTC, 2023) (Schrijvers et al., *in preparation*)

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
Supply is dominated in a few countries	Concentration of mining countries	The concentration of mining countries gives an indication of the diversity of the supply from mines. It is calculated by the Herfindahl–Hirschman Index (HHI), based on the number of mining countries and their contribution (in %) to the annual production. The Herfindahl–Hirschman Index (HHI) is calculated as follows: $HHI(a) = \sum_{i=1}^N (a_i^2), \text{ where:}$ N is the number of mining countries, and a_i is the contribution (in %) of a country to the annual production from mining multiplied by 100.	[0 – 10 000] from highly diversified (0) to highly concentrated (10 000)	$17.5 \times \ln (HHI) - 61.18$ (see (Graedel et al., 2012))	(U.S. Geological Survey, 2022)	2021
					(European Commission, 2019)	2019
					(European Commission, 2020b)	2012-2019
					(European Commission, 2020c)	2012-2019
	Concentration of refining countries	The refining/processing stage, also called the post-mining stage, is a series of operations that transform raw materials into substances that are used to make products. The concentration of refining countries gives an indication of the diversity of the supply from refineries. It is calculated by the Herfindahl–Hirschman Index (HHI), based on the number of refining countries and their contribution (in %) to the annual production. The Herfindahl–Hirschman Index (HHI) is calculated as follows:	[0 – 10 000] from highly diversified (0) to highly concentrated (10 000)	$17.5 \times \ln (HHI) - 61.18$ (see (Graedel et al., 2012))	(U.S. Geological Survey, 2022)	2021
					(European Commission, 2019)	2019

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
		$HHI(a) = \sum_{i=1}^N (a_i^2)$, where: N is the number of refining countries, and a_i is the contribution (in %) of a country to the annual production from refining/processing multiplied by 100.			(European Commission, 2020b)	2012-2019
					(Adamas Intelligence, 2019)	2018
Supplying country is subject to an unstable investment climate	WGI – Political stability & absence of Violence/terrorism	The Worldwide Governance Indicator “Political stability & absence of violence/terrorism” indicates the likelihood of destabilization or overthrowing of the government by unconstitutional or violent means, including politically motivated violence and terrorism.	[0-100] From weak to strong	100-WGI _{percentile score}	(World Bank, 2022)	2020
	WGI – Government effectiveness	The Worldwide Governance Indicator “Government effectiveness” gives information about the quality of public services, civil service, the degree of its independence from political pressures, the quality of policy formulation and implementation, and the credibility of the government’s commitment to such policies.	[0-100] From weak to strong	100-WGI _{percentile score}	(World Bank, 2022)	2020
	WGI – Regulatory Quality	The Worldwide Governance Indicator “Regulatory quality” gives information about the ability of the government to formulate and implement sound policies and regulations that permit and promote the development of the private sector.	[0-100] From weak to strong	100-WGI _{percentile score}	(World Bank, 2022)	2020
	Fragile States Index	This index provides information about the vulnerability to conflict or collapse of countries, based on the following indicators: Security Apparatus, Factionalized Elites, Group Grievance, Economic Decline and Poverty, Uneven Economic Development, Human Flight and Brain Drain, State Legitimacy, Public Services, Human Rights and Rule of Law, Demographic Pressures,	[0-120] The higher the index, the worse the situation	100 x (FSI value/120)	(The Fund for Peace, 2023)	2022

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
		Refugees and Internally Displaced Persons, and External Intervention.				
Supplying country is subject to societal unrest	WGI – Rule of law	The Worldwide Governance Indicator “Rule of law” indicates to which extent agents have confidence in and abide by the rules of society, especially the quality of contract enforcement, property rights, the police, and the courts, and the likelihood of crime and violence.	[0-100] From weak to strong	100-WGI _{percentile score}	(World Bank, 2022)	2020
	WGI – Political stability & absence of Violence/terrorism	The Worldwide Governance Indicator “Political stability & absence of violence/terrorism” indicates the likelihood of destabilization or overthrowing of the government by unconstitutional or violent means, including politically motivated violence and terrorism.	[0-100] From weak to strong	100-WGI _{percentile score}	(World Bank, 2022)	2020
Supplying country is subject to trade restrictions/ resource nationalism	Export restrictions between 2017-2020	Share of supply (%) subjected to trade restrictions between 2017-2020	Percentage % The higher the worse	No conversion needed	(OECD, 2022)	2021
	Enabling trade index	Evaluates to which extent economies facilitate the free flow of goods over borders (and to their destination).	[1-7] A higher score represents a better facilitation of trade	100 x (1-(ETI value-1)/6)	(World Economic Forum, 2016)	2016
Supplying country is subject to natural disasters	Not quantified	When a supplying country suffers from natural disasters, such as flooding, tsunamis, landslides, earthquakes, and storms, this can cause damages to mines, refiners, or other production facilities. This can lead to the (temporary) closure of these facilities, causing a supply shortage. There is currently no quantified indicator for this risk source.				
A product can be associated	Cradle-to-gate Life Cycle	Cradle-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) is a method used to quantify the environmental burdens associated with producing 1 kg of raw material, covering the resource extraction, refining, and	[0 – 100], a higher score		(Graedel et al., 2015)	2015

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
with environmental impacts that are deemed unacceptable by social norms	Assessment	distribution stages. These current scores refer to the “environmental implications” (EI) score of Graedel et al., which is based on the endpoint environmental damages to human health and ecosystems. The impacts are given per kilogram of material (cradle-to-gate) using the ReCiPe 1.10 (World) H/H method. Damages to human health and ecosystems refer to the results after normalization and weighting using the hierarchical perspective and weighting set.	represents a higher impact			
	Environmental Performance Index	Assesses and ranks the environmental health and the ecosystem vitality in 180 countries. EPI provides the state of sustainability in these countries by evaluating how close those countries are to established environmental policy targets.	[0-100] The higher the EPI, the better the country's environmental performance	100-EPI value	(Wendling et al., 2020)	2020
The supply of a product can be associated with the violation of human rights	Human Development Index (HDI)	The Human Development Index (HDI) is a country-specific measure of the average achievement in three basic dimensions of human development: long and healthy life, knowledge, and a decent standard of living.	[0-1] The higher the HDI, the better	(1- HDI value) x 100	(UNDP, 2022)	2019
	WGI – Voice and accountability	The Worldwide Governance Indicator “Voice and accountability” indicates to which extent a country's citizens can participate in selecting their government. It also shows the freedom of expression and association and free media.	[0-100] From weak to strong	100-WGI _{percentile score}	(World Bank, 2022)	2020
The supply of a product can be associated with conflict	Heidelberg Conflict Barometer (not quantified)	Heidelberg Conflict Barometer evaluates and documents the political conflicts worldwide. It presents the Conflict's name, parties, items, start date, and the Levels of intensity (Int). The level of intensity is quantified as follow: Int= 5 (war); Int= 4 (limited war); Int= 3 (violent crisis); Int= 2 (non-violent crisis); and Int= 1 (dispute). This indicator is currently not integrated into the model due to the lack of a single available score per country.	<i>Not implemented</i>	<i>Not implemented</i>	(Heidelberg Institute for International Conflict Research, 2022)	2022

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
	Global Peace Index	Analyses and quantifies which nations are the most peaceful, and which nations are the most dangerous by evaluating three distinct categories (militarization, safety and security, and domestic and international conflict).	[1-5] The lower the score the more peaceful the country	$100 \times (\text{GPI value} - 1)/4$	(Institute for Economics & Peace, 2022)	2022
The supply of a product can be associated with corruption	Corruption Perception Index	Evaluates the perceived levels of public sector corruption in 180 countries worldwide.	[0-100] From highly corrupted (0) to very clean (100)	100 - CPI value	(Transparency International, 2021)	2021
	WGI – Control of corruption	The Worldwide Governance Indicator “Control of corruption” indicates to which extent public power benefits from private gain, covering all forms of corruption and the control of the state by elites and special interests.	[0-100] From weak to strong	100 - WGI percentile score	(World Bank, 2022)	2020
The supply of a product can be associated with child labour	Child labour (% ages 5-17)	Country-specific percentage of children involved in child labour, measured by their engagement in economic activities, substantial unpaid household services, or hazardous working conditions, considering age-dependent threshold values.	Percentage % The higher the worse	No conversion needed	(UNSDG, 2022)	2022
The product is potentially toxic	Candidate List of substances of very high concern for Authorisation	Inclusion in the Candidate List of substances of very high concern for Authorisation, under the REACH framework.	Yes/no	Yes = 100, No = 0	(ECHA, 2023)	2023
The material is mainly produced	By-product dependency	The percentage of a raw material which is supplied as a by-product. A by-product is a mineral, metal, or other type of product whose supply is dependent on the production of another product,	Percentage % The higher the worse	No conversion needed		

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
as a by-product of another product. If the demand of the main product decreases, the supply of the by-product decreases as well		such as the main carrier metal. By-product dependency affects the supply elasticity and the temporal availability of resources.			(Nassar et al., 2015b)	2008
Demand is expected to strongly increase	Expected demand increase in energy technologies between 2020-2050	KU Leuven and Eurometaux's study on "Metals for Clean Energy" evaluates how Europe can fulfil its goal of "achieving resource security" and "reducing strategic dependencies" for its energy transition metals. The expected demand increase is reflected by the Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 of global total demand in the Sustainable Development Scenario of the International Energy Agency. Only a limited number of raw materials is quantified via this indicator.	Percentage % The higher the worse	No conversion needed	(Gregoir et al., 2022)	2020

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
	Expected demand increase in emerging technologies between 2020-2040	The DERA study on raw materials for emerging technologies evaluates potentially critical mineral raw materials that are essential for economic, environmental and socio-cultural developments. The expected demand growth is reflected by the Compound Annual Growth Rate between 2018-2040 of global total demand in the Sustainable Development Scenario of the International Energy Agency. The indicator includes a limited number of metals for the following 5 technologies: Mobility and aerospace, Digitisation and Industry 4.0, Energy technologies and decarbonisation, Recycling and water management and Power and data networks.	Percentage % The higher the worse	No conversion needed	(Frank Marscheider-Weidmann et al., 2021)	2018
	Expected demand increase in strategic sectors between 2020-2030	The JRC study "supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU" assesses the material demand for entire supply chains for 15 key technologies across five strategic sectors. The expected demand growth is reflected by the Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 of global total demand in a High Demand Scenario. The High Demand Scenario is in line with the ambitious energy and climate change mitigation targets set by various countries. The indicator includes a limited number of metals relevant for the following five strategic sectors: Renewable energy, Electromobility, Energy-intensive industry, Digital, and Aerospace/defence.	Percentage % The higher the worse	No conversion needed	(Carrara et al., 2023a)	2020
Low potential to increase supply from mines	Policy Perception Index of countries holding reserves	The Policy Perception Index indicates the overall attractiveness of governmental policies for the investment in exploration. The PPI is evaluated for countries holding raw material reserves.	[0-100] The higher the PPI, the more attractive the country's policies	100-PPI value	(U.S. Geological Survey, 2022)	2021
					(European Commission, 2019)	2019

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
					(European Commission, 2020b)	2012-2019
					(European Commission, 2020c)	2012-2019
					(Yunis and Aliakbari, 2022)	2021
High share of (current) production capacity used in mining and refining	Production to reserves ratio	The ratio (expressed in %) of current annual production to reserves gives an estimation of the potential increase in supply from mines. Since “reserves” is a dynamic concept, this indicator does not reflect absolute scarcity, but rather highlights the need for further exploration and perhaps technological development in the mining sector.	[0-1], the higher the ratio, the faster current reserves will be depleted	Value * 100	(U.S. Geological Survey, 2022)	2021
Production is dependent on the availability of energy at a reasonable price	Cumulative energy demand	Energy use for the mining, concentration, purification, and refining of the raw materials, from cradle (extraction) to gate (after refining/smelting).	MJ/kg		(Nuss and Eckelman, 2014)	2014

Source of risk	Overview of identified potential indicators	Description	Original score range	Transformation to 0-100 scale, with a higher score reflecting a higher risk	Data source(s)	Reference year
Competing use in high-margin or high-priority products (e.g. health care, strategic sectors)	Overview of main uses of raw materials, to be provided in raw material factsheets.					
Supply is dominated by a few companies, which may misuse their pricing power	Concentration of supplying companies	The concentration of supplying companies gives an indication of the company diversity of the supply. It is calculated by the Herfindahl–Hirschman Index (HHI), based on the number of supplying companies and their contribution (in %) to the annual production. This indicator is not yet quantified based on a large number of data gaps. The Herfindahl–Hirschman Index (HHI) is calculated as follows: $HHI(a) = \sum_{i=1}^N (a_i^2)$, where: N is the number of supplying companies, and a_i is the contribution (in %) of a company to the annual production multiplied by 100. This indicator is not yet quantified due to a large number of data gaps.	[0 – 10 000] from highly diversified (0) to highly concentrated (10 000)	$17.5 \times \ln(HHI) - 61.18$ (see (Graedel et al., 2012))	Various	Various
Speculation	Aggravating factor. Not quantified.					

Annexe 4.

Tableau 60 Points chauds de la criticité par matière première évalués via l'outil IRTC

Substance	
Supply is dominated in a few countries (bottleneck)	
Export restrictions (bottleneck)	
Enabling Trade Index (bottleneck)	
WGI Rule of law (bottleneck)	
Fragile States Index (bottleneck)	
WGI Regulatory Quality (bottleneck)	
WGI Political stability and absence of violence/terrorism (bottleneck)	
WGI Government effectiveness (bottleneck)	
% supplied as a by-product	
Compound Annual Growth Rate between 2020-2030 for sustainable development	
Compound Annual Growth Rate between 2018-2040 for sustainable development	
Compound Annual Growth Rate between 2020-2050 for High Demand Scenario (JRC)	
Share of current production capacity used in mining (production to reserves ratio)	
Potential to increase supply from mines (reserves)-Policy Perception Index	
Cradle-to-gate LCA	
Environmental Performance Index (bottleneck)	
Global Peace Index (bottleneck)	
Corruption Perception Index (bottleneck)	
WGI Control of Corruption (bottleneck)	
Child labor (bottleneck)	
WGI Voice and Accountability (bottleneck)	
Human Development Index (bottleneck)	
Cumulative energy demand [MJ-eq/kg]	
Substance of very high concern for Authorisation (REACH framework)	
Global CO2 emissions	
On the 2023 EU list of CRM	
Strategic according to the EC in 2024	

Cobalt	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		X	X	X	X	X	X	X				X	X
Tantalum		X	X	X	X	X	X	X						X		X	X	X	X	X		X				X	
Antimony	X	X	X	X	X	X	X		X					X		X		X	X		X					X	
Graphite	X	X	X		X		X					X		X		X		X			X					X	X
Rhodium	X	X	X		X				X					X	X	X		X						X		X	X
Palladium		X	X				X		X					X	X	X	X	X								X	X
Vanadium	X	X	X				X		X					X		X		X			X					X	
Cerium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Dysprosium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Gadolinium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Lanthanum	X	X							X		X			X		X		X			X					X	
Magnesium	X				X		X									X		X			X				X	X	X
Neodymium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Platinum	X	X										X		X	X	X		X								X	X
Praseodymium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Samarium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Terbium	X	X							X					X		X		X			X					X	X
Tin		X		X	X		X						X	X		X		X	X								
Europium	X	X							X					X		X		X			X					X	
Gallium	X				X				X							X		X			X					X	X
Holmium	X	X							X					X		X		X			X					X	
Lutetium	X	X							X					X		X		X			X					X	
Thulium	X	X							X					X		X		X			X					X	
Yttrium	X	X									X			X		X		X			X					X	
Fluorspar	X	X	X													X		X			X					X	
Manganese		X	X											X		X		X								X	X
Scandium	X	X							X	X						X					X					X	
Barium			X				X									X		X			X					X	
Lithium	X									X	X					X										X	X
Niobium	X		X					X						X				X								X	

Silicon	X	X													X						X					X	X
Titanium	X														X						X				X	X	X
Arsenic	X							X							X		X									X	
Boron	X						X									X										X	X
Aluminium															X										X	X	X
Chromium		X									X	X			X												
Feldspar							X								X		X									X	
Indium	X							X					X		X												
Lead		X											X		X									X			
Nickel										X		X													X		X
Tellurium	X							X							X						X						
Gold											X		X												X		
Perlite							X								X		X										
Cadmium								X															X				
Copper																									X		X
Hafnium								X																		X	
Molybdenum												X		X													
Rhenium								X					X														
Strontium																	X									X	
Zinc											X														X		
Calcium																									X		
Erbium																										X	
Iron																									X		
Phosphorus																										X	
Selenium								X																			
Silver								X																			
Sulfur								X																			
Zirconium								X																			

Annexe 5.

Tableau 61 Nombre d'indicateurs pour lesquels chaque matière première utilisée dans le NMC811 est considérée comme « critique » via l'outil IRTC, et représentativité du score pour l'évaluation des matériaux, classés par substance associée à la batterie en plus grande quantité.

Substance	Quantity associated with NMC811 per kg of battery (kg)	Number of indicators with score "critical"	Representativeness of indicator scoring (number of indicators assessed)
Gangue	36,251877	0	0%
Gangue	36,251877	0	0%
Gravel	4,3970543	0	67%
Coal, hard	3,4770522	0	0%
Iron	2,6239971	1	88%
Calcite	1,310302	0	0%
Sulfur	1,259898	1	71%
Shale	1,0521421	0	0%
Coal, brown	1,0144272	0	0%
Oil, crude, 43.4 MJ per kg	0,98406627	0	0%
Spodumene	0,57188529	0	0%
Sodium chloride	0,56671635	0	0%
Silicon	0,43864585	6	75%
Clay, unspecified	0,36109753	0	0%
Sand	0,29809286	0	67%
Copper	0,29175149	2	100%
Aluminium	0,2735999	4	96%
Fluorspar	0,134072	7	71%
Magnesium	0,11447748	9	79%
Nickel	0,10514816	4	96%
Granite	0,08654308	0	0%
Manganese	0,03685998	7	92%
Chromium	0,0300765	4	92%
Barium	0,02057281	6	75%
Zinc	0,02004174	2	92%
Phosphorus	0,01831944	1	4%
Gypsum	0,01616576	0	67%
Magnesite	0,01473699	0	0%
Calcium	0,01337853	1	0%
Lithium	0,0100709	6	100%
Clay, bentonite	0,00877209	0	0%
Cobalt	0,00815198	19	100%
Basalt	0,00666603	0	0%
Dolomite	0,00462149	0	0%
Lead	0,00448288	4	92%
Molybdenum	0,00301023	2	92%
Potassium chloride	0,00283663	0	0%
Fluorine	0,00255203	0	0%
Laterite	0,00245819	0	0%
Titanium	0,0013686	6	88%
Tin	0,00098836	9	96%
Graphite	0,00065061	12	88%
Potassium	0,00060791	0	0%

Carbon, organic, in soil or biomass stock	0,00049302	0	0%
Tantalum	0,00043157	15	92%
Sodium sulfate	0,0003685	0	0%
Selenium	0,00027887	1	88%
Kaolinite	0,0002717	0	0%
Zirconium	0,00021412	1	88%
Arsenic	0,00017424	5	79%
Silver	0,00011652	1	92%
Cerium	9,05E-05	9	83%
Gallium	6,28E-05	8	88%
Boron	5,50E-05	5	88%
Uranium	5,35E-05	0	0%
Lanthanum	4,33E-05	9	88%
Neodymium	3,31E-05	9	100%
Talc	3,25E-05	0	71%
Chrysotile	2,95E-05	0	0%
Ulexite	2,69E-05	0	0%
Tellurium	1,87E-05	4	92%
Gold	1,11E-05	3	92%
Praseodymium	1,11E-05	9	100%
Sodium nitrate	9,88E-06	0	0%
Niobium	8,43E-06	6	88%
Strontium	6,58E-06	2	79%
Hafnium	3,94E-06	2	75%
Sodium	2,64E-06	0	0%
Cadmium	2,27E-06	2	83%
Samarium	1,52E-06	9	83%
Gadolinium	1,26E-06	9	83%
Palladium	8,89E-07	11	88%
Perlite	7,60E-07	3	71%
Platinum	5,13E-07	9	100%
Europium	3,69E-07	8	83%
Indium	3,22E-07	4	96%
Rhenium	3,16E-07	2	88%
Scandium	1,55E-07	7	88%
Anhydrite	1,05E-07	0	0%
Yttrium	9,63E-08	8	88%
Vanadium	8,84E-08	10	92%
Rhodium	7,28E-08	12	83%
Antimony	6,96E-08	14	88%
Olivine	5,59E-08	0	0%
Borax	3,46E-08	0	0%
Mercury	3,27E-08	0	0%
Dysprosium	2,42E-08	9	100%
Terbium	1,34E-08	9	96%
Feldspar	1,57E-09	4	71%
Erbium	1,35E-09	1	0%
Ytterbium	1,33E-09	0	0%
Holmium	5,16E-10	8	83%
Diatomite	3,94E-10	0	0%
Lutetium	1,50E-10	8	83%
Thulium	1,50E-10	8	83%

Steatite	1,35E-11	0	0%
Kieserite	1,52E-12	0	0%

Tableau 62 Nombre d'indicateurs pour lesquels chaque matière première utilisée dans les LFP est considérée comme « critique » via l'outil IRTC, et représentativité du score pour l'évaluation des matériaux, classés par substance utilisée en plus grande quantité.

Substance	Quantity associated with LFP (kg) per kg of battery	Number of indicators with score "critical"	Representativeness of indicator scoring (number of indicators assessed)
Gangue	29,263256	0	0%
Gangue	29,263256	0	0%
Coal, hard	2,88544	0	0%
Gravel	2,460675	0	67%
Calcite	0,90144929	0	0%
Shale	0,72354901	0	0%
Oil, crude, 43.4 MJ per kg	0,65540671	0	0%
Coal, brown	0,59447681	0	0%
Spodumene	0,56370204	0	0%
Sodium chloride	0,30012281	0	0%
Clay, unspecified	0,27995146	0	0%
Aluminium	0,20537803	4	96%
Sand	0,20316357	0	67%
Iron	0,20183257	1	88%
Fluorspar	0,18409233	7	71%
Copper	0,10790662	2	100%
Phosphorus	0,06187299	1	4%
Granite	0,06108912	0	0%
Sulfur	0,02428988	1	71%
Zinc	0,01663476	2	92%
Barium	0,0126348	6	75%
Lithium	0,00992683	6	100%
Gypsum	0,0098307	0	67%
Silicon	0,00840167	6	75%
Fluorine	0,00832095	0	0%
Clay, bentonite	0,00699183	0	0%
Nickel	0,00658832	4	96%
Basalt	0,00534752	0	0%
Chromium	0,00521272	4	92%
Magnesium	0,0038513	9	79%
Lead	0,00364127	4	92%
Dolomite	0,00349872	0	0%
Molybdenum	0,00265637	2	92%
Manganese	0,00241998	7	92%
Calcium	0,00223632	1	0%
Magnesite	0,0019139	0	0%
Potassium chloride	0,00171304	0	0%

Laterite	0,00154678	0	0%
Titanium	0,00126242	6	88%
Tin	0,00085273	9	96%
Carbon, organic, in soil or biomass stock	0,00043521	0	0%
Tantalum	0,00038505	15	92%
Potassium	0,00037701	0	0%
Graphite	0,00032497	12	88%
Selenium	0,00024616	1	88%
Kaolinite	0,00021678	0	0%
Zirconium	0,00016877	1	88%
Cobalt	0,00015678	19	100%
Sodium sulfate	0,00015141	0	0%
Cerium	0,0001111	9	83%
Silver	0,00010165	1	92%
Gallium	6,33E-05	8	88%
Lanthanum	5,18E-05	9	88%
Neodymium	4,10E-05	9	100%
Boron	3,64E-05	5	88%
Talc	2,65E-05	0	71%
Chrysotile	2,13E-05	0	0%
Ulexite	2,11E-05	0	0%
Uranium	1,93E-05	0	0%
Tellurium	1,65E-05	4	92%
Praseodymium	1,37E-05	9	100%
Gold	9,68E-06	3	92%
Niobium	6,50E-06	6	88%
Sodium nitrate	5,69E-06	0	0%
Strontium	4,58E-06	2	79%
Arsenic	3,32E-06	5	79%
Hafnium	3,11E-06	2	75%
Sodium	2,23E-06	0	0%
Cadmium	1,92E-06	2	83%
Samarium	1,81E-06	9	83%
Gadolinium	1,55E-06	9	83%
Perlite	4,64E-07	3	71%
Europium	4,47E-07	8	83%
Rhenium	2,79E-07	2	88%
Indium	2,72E-07	4	96%
Palladium	2,30E-07	11	88%
Scandium	2,00E-07	7	88%
Platinum	1,76E-07	9	100%
Anhydrite	8,61E-08	0	0%
Vanadium	7,46E-08	10	92%
Antimony	5,70E-08	14	88%
Olivine	4,54E-08	0	0%

Yttrium	4,29E-08	8	88%
Borax	2,87E-08	0	0%
Rhodium	2,13E-08	12	83%
Mercury	1,34E-08	0	0%
Dysprosium	1,05E-08	9	100%
Terbium	5,60E-09	9	96%
Feldspar	1,30E-09	4	71%
Erbium	8,19E-10	1	0%
Ytterbium	8,09E-10	0	0%
Holmium	3,14E-10	8	83%
Diatomite	1,73E-10	0	0%
Lutetium	9,10E-11	8	83%
Thulium	9,10E-11	8	83%
Steatite	1,06E-11	0	0%
Kieserite	1,24E-12	0	0%

Annexe 6.

Tableau 63 Description et classification des mesures d'atténuation telles qu'elles figurent dans l'outil IRTC (IRTC, 2023)(Schrijvers et al. en préparation)

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
Use available substitutes	Substitution is the ability to use an alternative raw material if one is unavailable or too expensive. This avoids supply chain bottlenecks if the production of a good is hindered by the availability of a raw material.	Within a company: - R&D - Purchasing - Operations/ Production - Marketing / Business development	- Requires R&D and can therefore be expensive - Substitutes may be subject to the same, or different, supply-chain risks - Production lines may be temporarily disrupted to accommodate the substitute - Product performance could be affected	- R&D - Flexible product requirements	Structural solution
Use less	A more efficient raw material use at a product level could be obtained by minimizing production losses or by accepting trade-offs in performance.	Within a company: - R&D - Operations/ Production - Marketing / Business development	- Requires R&D and can therefore be expensive - Product performance could be affected	- R&D - Flexible product requirements	Structural solution
Internal recycling	The internal recycling of raw materials, for example via the recycling of production scraps or	All value-chain actors Within a company:		- R&D	Structural solution

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
	the take-back of end-of-life products allows a company to be less exposed by market-wide supply disruptions.	- R&D - Production/Operations		- Vertical integration to keep materials in closed loops - Take-back programs - Inhouse recycling or contractual agreements with recyclers	
Stockpiling	The availability of stocks of raw materials may help a company to continue operations when a material becomes inaccessible on the market or when prices surge.	- Policymakers Within a company: - Finance - Purchasing	- Risk of replenishing stocks at high raw material prices - High costs of storage - Risk of decreased need for existing stocks with technological progress/innovation	- Build strategic alliances with other businesses to minimize investment risks	Short-term fix
Exploration / opening new mines	Exploration allows to identify new geological sources of raw materials, ideally in countries that are not yet major producers of these raw materials. Subsequently opening new mines (or reopening old mines) enables the diversification of supply, in case the supply from one country is disrupted.	- Mining companies - Policy makers - Investors - Citizens	- Need for capacity building and (local) policy support, e.g. for supportive infrastructure - Concerns of the local population must be addressed to obtain a social license to operate - The process of opening new mines is long and must	- Tolerance to invest in small, uncertain markets - Supportive policy framework	Structural solution, depending on the size of the identified deposits

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
			therefore be anticipated well in advance of future needs - Lack of necessary skills and of workforce - Various investment risks, including water scarcity or abundance, tailings management, access to energy (Valenta et al., 2019)		
Increase access to recycled materials	Recycling processes provide a supplementary source of raw materials, besides the supply from primary sources (e.g. mines). Recycling processes can be located in regions that do not contain mineral deposits, and recycling may be associated with lower environmental impacts and social concerns than primary production activities.	- All actors in the value chain - Policymakers - Within a company - o Purchasing	- Recycling of raw materials may be more expensive than the primary production - Recycling may be environmentally impactful if the process is highly energy or material consuming - Raw materials used in products with a long lifetime may not be readily available for recycling	- Tolerance to invest in small, uncertain markets - Supportive policy framework (e.g. avoiding export of recyclable goods, collection programs, standards) - Design for recycling - Innovative recycling technologies to improve the end-of-life recycling rate	Structural solution

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
				- Vertical integration to keep materials in closed loops	
Improve trade relationships	Trade agreements favour the exchange of goods among different countries and avoid that the accessibility of goods is disrupted by unilateral political decisions such as export quotas or export taxes.	- Policymakers Within a company: - Purchasing	- Slow process		Structural solution
Lobbying	The involvement of companies in political decision-making processes enables to anticipate the potential consequences of political decisions on the (local) economies	- Policymakers	- Benefits obtained for the sphere of influence of a company may be harmful for the environmental or social performance of a product throughout its life cycle		Short-term fix
Relocate production site	Relocation of a company's operations may avoid that this company is subject to certain legislative requirements or taxes	- Local governments - Local community Within a company: - All local employees - Finance - Legal	- Very costly - Affects the local provision of goods, jobs, and taxes - Does not provide a solution that is sustainable to the society		Structural solution
Responsible sourcing/ Due	Responsible sourcing, due diligence and adherence to certification programs allows to	Within a company:	- Administrative burden - Costly	- Vertical integration - Direct engagement with suppliers	Structural solution

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
Diligence / Certification	trace back the origin of raw materials and provide the assurance that their supply does not inflict social or environmental harm, ideally by engaging with suppliers and sub-suppliers in order to collaboratively increase their sustainability performance in a continuous process.	- Health, Environment, Safety / CSR - Legal - Marketing / Business development - Purchasing	- Potential disadvantage of local suppliers that are not included in certification programs (e.g. due to costs)		
Vertical integration	Integrating upstream or downstream companies within a company's group allows for a closer control and influence on the partner's operations and on material and product flows.				Structural solution
Eco-design	Eco-design is the consideration of environmental impacts throughout a product's life cycle (i.e. production, use, and end-of-life treatment) at the product design phase, e.g. by selecting materials that generate the lowest environmental impact, or by making a product recyclable.	Within a company: - Health, Environment, Safety / CSR - Marketing / Business development - Purchasing - R&D	- Requires access to data on the environmental performance of materials throughout their life cycle - Requires collaboration with value-chain actors to achieve an accurate vision on life cycle performance	- R&D	Structural solution
Increased substitutability	Substitution is the ability to use an alternative raw material if one is unavailable or too expensive.	- All companies that use a specific raw material	- Requires R&D and can therefore be expensive	- R&D	Structural solution

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
ility in the market	This avoids supply chain bottlenecks if the production of a good is hindered by the availability of a raw material.	- o R&D - Public researchers - Investors	- Requires flexible systems that accommodate all substitutes (avoid lock-in of technologies) - Substitutes may be subject to the same, or different, supply-chain risks		
Increase resource efficiency (narrow/slow loops, circularity) in the market	The circular use of raw materials (via increased reuse, repair, remanufacturing, or recycling) as well as lifetime extension of products allow for a decreased (growth of the) demand for raw materials.	- Policymakers - All value-chain actors, including manufacturers, product users, collectors, recyclers, etc. - Within a company: - o Sourcing/purchasing - o Health, Environment, Safety / CSR - o Legal - o Marketing / Business development - o R&D	- Requires adaptations in user behaviour - Requires infrastructure for collection / take-back schemes	- R&D - Circular business models - Close collaboration among value-chain actors - Supportive policy framework (e.g. supporting new business models, allowing to trade end-of-life products, collection programs) - Design for repair, recycling, etc. - Innovative recycling technologies to improve the end-of-life recycling rate -	Structural solution

Mitigation measure	What is it and how does it mitigate the problem?	Whom does it concern? (e.g. business department, policymakers, other societal actors)	Hurdles to consider (e.g. needs for resources, collaboration with value-chain actors...)	Enabling strategies	Short-term fix or structural solution?
Price agreement s/ forward contracting / hedging	Financial constructs such as price agreements, forward contracting, and hedging allow to have guaranteed stable and predictable costs related to raw material use, instead of being subject to the volatility of raw material prices. This enables companies to make decisions on the short/mid-term while decreasing financial risks.	Within a company: - Purchasing	- Price agreements may appear to be unfavourable if raw material costs decrease over time, e.g. due to an oversupply or decreased demand. -		Short-term fix
Pass on costs to customers/ escalation clauses	The ability to make a product more expensive as a result of increasing costs of raw materials allows a company to maintain its profitability	Within a company: - Finance - Marketing / Business development - Purchasing -	- May reduce the competitiveness of a company's product -	- Operating in niche markets - Providing a highly differentiated product	Short-term fix
Compensation for environmental impacts	If environmental impacts cannot be directly decreased within the supply chain, impacts may be compensated via an activity that is not directly related to the supply chain. A typical example is the plantation of trees to compensate CO ₂ emissions	Within a company: - Health, Environment, Safety / CSR - Legal - Marketing / Business development	- Ensure credibility by reliable compensation activities		Short-term fix

Annexe 7.

Tableau 64 Facteurs de Caractérisation de la méthode ESSENZ Plus pour les indicateurs de criticité (disponibilité socioéconomique/ risque d'approvisionnement)

Commodity	Concentration of reserves	Concentration of production	Feasibility of exploration projects	Political instability	Mining capacity	Trade barriers	Demand growth plus	Price fluctuation plus	Primary material use	Occurrence of co-production
Aluminium	1,73E+06	4,15E+06	0,00E+00	1,64E+07	0,00E+00	2,14E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Antimony	0,00E+00	3,20E+09	1,67E+10	1,65E+10	1,14E+10	1,63E+10	9,59E+09	5,05E+09	1,85E+10	1,76E+09
Arsen	4,75E+10	2,39E+10	1,01E+11	4,25E+10	0,00E+00	4,34E+10	0,00E+00	0,00E+00	8,39E+10	2,38E+10
Beryllium	5,19E+12	2,51E+12	0,00E+00	0,00E+00	1,70E+13	3,80E+12	2,59E+12	1,88E+12	7,37E+12	7,45E+11
Bismuth	5,41E+10	5,17E+10	1,52E+11	6,72E+10	6,42E+10	7,41E+10	2,31E+10	2,34E+10	1,36E+11	8,77E+10
Cadmium	4,14E+09	4,26E+09	0,00E+00	0,00E+00	4,24E+10	4,82E+10	0,00E+00	1,28E+10	9,08E+10	7,08E+10
Calcium	1,85E+06	1,80E+06	0,00E+00	2,87E+06	0,00E+00	3,43E+06	1,29E+06	0,00E+00	6,65E+06	0,00E+00
Chromium	1,33E+07	5,38E+06	5,93E+07	3,69E+07	5,37E+07	3,90E+07	1,23E+07	0,00E+00	4,62E+07	0,00E+00
Coal	1,98E+04	2,92E+04	0,00E+00	1,78E+05	0,00E+00	2,24E+05	0,00E+00	5,54E+04	4,25E+05	0,00E+00
Cobalt	3,99E+09	4,07E+09	1,59E+10	2,15E+10	1,39E+09	1,81E+10	1,26E+10	4,12E+09	7,77E+09	4,77E+09
Copper	4,20E+06	0,00E+00	0,00E+00	6,07E+07	1,36E+07	6,22E+07	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+07	8,19E+06
Crude oils	0,00E+00	0,00E+00	5,78E+05	3,37E+05	0,00E+00	4,17E+05	1,66E+05	5,91E+05	6,79E+05	0,00E+00
Gallium	2,63E+11	5,09E+12	0,00E+00	3,04E+12	0,00E+00	3,41E+12	8,67E+11	1,53E+12	0,00E+00	4,07E+12
Germanium	1,39E+12	1,70E+13	0,00E+00	1,28E+13	0,00E+00	1,44E+13	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,70E+13
Gold	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,60E+11	4,46E+11	5,30E+11	3,93E+11	0,00E+00	4,52E+11	0,00E+00
Graphite	1,60E+08	6,30E+08	2,16E+09	1,37E+09	0,00E+00	1,46E+09	1,68E+09	0,00E+00	2,41E+09	0,00E+00
Indium	2,77E+12	3,91E+11	4,52E+12	0,00E+00	2,89E+12	1,26E+12	5,35E+11	9,37E+11	0,00E+00	8,44E+11
Iron	5,44E+04	3,24E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,81E+05	4,40E+05	0,00E+00	3,59E+05	0,00E+00	0,00E+00
Lead	6,44E+07	2,39E+07	0,00E+00	2,72E+08	2,88E+08	3,07E+08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,18E+07
Lignite	1,51E+05	1,96E+05	0,00E+00	2,04E+06	0,00E+00	2,09E+06	7,56E+05	5,42E+05	3,16E+06	0,00E+00
Lithium	2,25E+09	2,89E+09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,44E+10	2,15E+10	2,54E+10	0,00E+00
Magnesium	2,77E+08	1,33E+09	0,00E+00	1,30E+09	0,00E+00	1,44E+09	5,62E+08	1,24E+09	0,00E+00	1,79E+08
Manganese	9,88E+06	5,24E+06	1,22E+08	7,05E+07	0,00E+00	8,46E+07	2,31E+07	4,01E+07	0,00E+00	0,00E+00

Molybdenum	9,40E+08	4,82E+08	9,14E+09	4,23E+09	8,39E+08	4,68E+09	0,00E+00	1,69E+09	0,00E+00	0,00E+00
Natural gas	0,00E+00	0,00E+00	5,20E+05	0,00E+00	0,00E+00	2,61E+05	3,00E+05	5,64E+05	6,71E+05	0,00E+00
Nickel	1,21E+09	3,03E+07	0,00E+00	4,03E+08	0,00E+00	5,02E+08	1,55E+08	1,65E+08	0,00E+00	6,97E+07
Niobium	4,46E+10	2,00E+10	0,00E+00	2,33E+10	0,00E+00	2,94E+10	9,16E+09	0,00E+00	2,25E+10	2,55E+09
Palladium	1,70E+13	1,24E+12	1,70E+13	8,27E+12	0,00E+00	8,71E+12	5,95E+12	2,55E+12	0,00E+00	3,97E+12
Phosphorus	5,24E+06	4,56E+05	0,00E+00	6,04E+06	0,00E+00	6,54E+06	4,71E+06	1,41E+06	1,11E+07	0,00E+00
Platinum	1,41E+13	4,01E+12	1,64E+13	8,39E+12	0,00E+00	8,23E+12	0,00E+00	1,83E+12	0,00E+00	9,93E+11
Potassium	2,63E+07	1,75E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,02E+07	0,00E+00	5,04E+07	6,00E+07	4,13E+06
Rare earths	1,40E+09	1,45E+09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,73E+09	7,20E+09	1,50E+09	9,81E+09	2,84E+09
Rhenium	2,10E+12	2,83E+12	0,00E+00	1,70E+13	0,00E+00	1,70E+13	1,70E+13	1,70E+13	1,70E+13	1,58E+13
Selenium	5,81E+10	4,64E+10	0,00E+00	0,00E+00	2,07E+11	3,58E+11	1,37E+11	2,36E+11	8,08E+11	5,66E+11
Silicium	4,65E+07	7,43E+07	0,00E+00	1,40E+08	1,40E+08	1,72E+08	4,60E+07	2,78E+08	0,00E+00	0,00E+00
Silver	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,38E+10	3,86E+10	5,65E+10	4,71E+10	2,11E+10	5,90E+10	3,14E+10
Sodium	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,65E+06	3,14E+06	9,11E+06	1,08E+07	7,46E+05
Strontium	1,40E+10	6,16E+08	1,39E+10	4,10E+09	6,05E+08	4,12E+09	1,57E+09	2,36E+09	0,00E+00	0,00E+00
Sulfur	4,92E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E+07	0,00E+00	2,97E+07	0,00E+00	1,00E+07
Tantalum	4,26E+11	5,01E+10	8,58E+11	1,34E+12	0,00E+00	1,24E+12	0,00E+00	0,00E+00	8,87E+11	9,30E+10
Tellur	1,30E+12	6,27E+11	0,00E+00	0,00E+00	2,42E+11	2,25E+12	0,00E+00	5,40E+11	0,00E+00	3,03E+12
Tin	4,73E+08	2,46E+08	0,00E+00	4,62E+09	3,05E+10	4,68E+09	0,00E+00	0,00E+00	5,56E+09	0,00E+00
Titanium	4,57E+08	6,87E+06	0,00E+00	1,39E+08	0,00E+00	1,67E+08	7,82E+07	3,92E+08	0,00E+00	0,00E+00
Tungsten	8,49E+09	1,50E+10	0,00E+00	1,63E+10	2,57E+09	1,80E+10	1,41E+10	4,29E+09	0,00E+00	0,00E+00
Uranium	2,71E+09	3,31E+09	3,70E+10	2,84E+10	1,33E+10	3,76E+10	5,61E+10	8,89E+09	5,29E+10	0,00E+00
Vanadium	2,13E+10	1,97E+10	1,35E+11	9,08E+10	0,00E+00	9,34E+10	2,53E+10	9,66E+10	0,00E+00	9,64E+10
Zinc	1,18E+07	4,99E+06	0,00E+00	9,87E+07	1,22E+08	1,13E+08	4,58E+07	2,65E+07	1,37E+08	1,57E+07
Zirconium	3,14E+09	4,72E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,13E+08	4,91E+08	0,00E+00	1,88E+09	1,21E+09

Tableau 65 Facteurs de Caractérisation de la méthode ESSENZ+ pour les indicateurs d'acceptation sociétale

Commodity	(Non) Compliance of environmental standards plus	(Non) Compliance of social standards plus
Aluminium	0,72	0,42
Antimony	0,8	0,98
Arsen	0,45	0,39
Beryllium	0,23	0,17
Bismuth	0,97	0,33
Cadmium	0,53	0,26
Calcium	0,85	0,38
Chromium	0,67	0,68
Coal	0,74	0,48
Cobalt	0,69	0,9
Copper	0,59	0,36
Crude oils	0,32	0,33
Gallium	1	0,43
Germanium	0,97	0,42
Gold	0,52	0,38
Graphite	0,97	0,97
Indium	0,66	0,28
Iron	0,57	0,36
Lead	0,63	0,44
Lignite	0,57	0,27
Lithium	0,37	0,14
Magnesium	0,96	0,42
Manganese	0,56	0,44
Molybdenum	0,6	0,3
Natural gas	0,23	0,21
Nickel	0,4	0,25

Niobium	0,74	0,52
Palladium	0,53	0,37
Phosphorus	0,35	0,37
Platinum	0,57	0,44
Potassium	0,23	0,18
Rare earths	0,53	0,23
Rhenium	0,57	0,33
Selenium	0,55	0,14
Silicium	0,86	0,36
Silver	0,59	0,42
Sodium	0,26	0,17
Strontium	0,53	0,33
Sulfur	0,41	0,29
Tantalum	0,78	0,73
Tellur	0,74	0,27
Tin	0,58	0,55
Titanium	0,69	0,35
Tungsten	0,95	1
Uranium	0,4	0,32
Vanadium	0,87	0,51
Zinc	0,61	0,43
Zirconium	0,46	0,2

Annexe 8.

Tableau 66 Résultats des calculs de l'étude ESSENZ+ pour la batterie NMC811, les éléments en orange sont les éléments les plus critiques avec cette méthode

Commodity	Concentration of reserves	Concentration of production	Feasibility of exploration projects	Political instability	Mining capacity	Trade barriers	Demand growth plus	Price fluctuation plus	Primary material use	Occurrence of co-production	Compliance of Environmental standards plus	Compliance of Social standards plus
Tantalum	1,84E+08	2,16E+07	3,70E+08	5,78E+08	0,00E+00	5,35E+08	0,00E+00	0,00E+00	3,83E+08	4,01E+07	3,35E-04	3,16E-04
Lithium	2,26E+07	2,91E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,50E+08	2,17E+08	2,56E+08	0,00E+00	3,76E-03	1,39E-03
Gallium	1,65E+07	3,19E+08	0,00E+00	1,91E+08	0,00E+00	2,14E+08	5,45E+07	9,62E+07	0,00E+00	2,56E+08	6,28E-05	2,69E-05
Cobalt	3,25E+07	3,31E+07	1,29E+08	1,75E+08	1,14E+07	1,48E+08	1,03E+08	3,36E+07	6,34E+07	3,89E+07	5,63E-03	7,37E-03
Magnesium	3,18E+07	1,52E+08	0,00E+00	1,49E+08	0,00E+00	1,65E+08	6,43E+07	1,42E+08	0,00E+00	2,05E+07	1,10E-01	4,83E-02
Selenium	1,62E+07	1,29E+07	0,00E+00	0,00E+00	5,78E+07	1,00E+08	3,82E+07	6,58E+07	2,25E+08	1,58E+08	1,54E-04	3,84E-05
Silicon	2,04E+07	3,26E+07	0,00E+00	6,15E+07	6,16E+07	7,54E+07	2,02E+07	1,22E+08	0,00E+00	0,00E+00	3,75E-01	1,59E-01
Nickel	1,28E+08	3,19E+06	0,00E+00	4,24E+07	0,00E+00	5,27E+07	1,63E+07	1,73E+07	0,00E+00	7,33E+06	4,24E-02	2,60E-02
Tellurium	2,43E+07	1,17E+07	0,00E+00	0,00E+00	4,53E+06	4,22E+07	0,00E+00	1,01E+07	0,00E+00	5,68E+07	1,39E-05	4,99E-06
Sulfur	6,19E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,19E+07	0,00E+00	3,74E+07	0,00E+00	1,26E+07	5,11E-01	3,70E-01
Molybdenum	2,83E+06	1,45E+06	2,75E+07	1,27E+07	2,52E+06	1,41E+07	0,00E+00	5,08E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,80E-03	8,92E-04
Arsenic	8,28E+06	4,16E+06	1,76E+07	7,41E+06	0,00E+00	7,56E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,46E+07	4,15E+06	7,81E-05	6,80E-05
Copper	1,22E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,77E+07	3,98E+06	1,82E+07	0,00E+00	0,00E+00	1,75E+07	2,39E+06	1,72E-01	1,05E-01

Aluminium	4,74E+05	1,14E+06	0,00E+00	4,49E+06	0,00E+00	5,86E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,96E-01	1,16E-01
Iron	1,43E+05	8,50E+04	0,00E+00	0,00E+00	4,76E+05	1,16E+06	0,00E+00	9,43E+05	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+00	9,44E-01
Tin	4,67E+05	2,44E+05	0,00E+00	4,57E+06	3,01E+07	4,62E+06	0,00E+00	0,00E+00	5,50E+06	0,00E+00	5,76E-04	5,47E-04
Autre	2,76E+07	5,83E+06	3,47E+07	3,94E+07	1,66E+07	4,28E+07	2,86E+07	1,47E+07	2,87E+07	1,44E+07	7,55E-02	6,04E-02
Palladium	1,51E+07	1,10E+06	1,51E+07	7,35E+06	0,00E+00	7,74E+06	5,29E+06	2,27E+06	0,00E+00	3,53E+06	4,70E-07	3,26E-07
Silver	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,43E+06	4,50E+06	6,59E+06	5,49E+06	2,46E+06	6,88E+06	3,66E+06	6,88E-05	4,86E-05
Rhenium	6,61E+05	8,94E+05	0,00E+00	5,36E+06	0,00E+00	5,36E+06	5,36E+06	5,36E+06	5,36E+06	4,98E+06	1,80E-07	1,04E-07
Platinum	7,24E+06	2,06E+06	8,41E+06	4,30E+06	0,00E+00	4,22E+06	0,00E+00	9,36E+05	0,00E+00	5,09E+05	2,94E-07	2,28E-07
Gold	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,11E+06	4,96E+06	5,88E+06	4,36E+06	0,00E+00	5,03E+06	0,00E+00	5,73E-06	4,25E-06
Manganese	3,64E+05	1,93E+05	4,50E+06	2,60E+06	0,00E+00	3,12E+06	8,52E+05	1,48E+06	0,00E+00	0,00E+00	2,07E-02	1,62E-02
Uranium	1,45E+05	1,77E+05	1,98E+06	1,52E+06	7,12E+05	2,01E+06	3,00E+06	4,75E+05	2,83E+06	0,00E+00	2,15E-05	1,71E-05
Zinc	2,36E+05	1,00E+05	0,00E+00	1,98E+06	2,45E+06	2,27E+06	9,19E+05	5,31E+05	2,75E+06	3,14E+05	1,22E-02	8,56E-03
Chromium	4,01E+05	1,62E+05	1,78E+06	1,11E+06	1,61E+06	1,17E+06	3,70E+05	0,00E+00	1,39E+06	0,00E+00	2,00E-02	2,05E-02
Graphite	1,04E+05	4,10E+05	1,41E+06	8,91E+05	0,00E+00	9,48E+05	1,10E+06	0,00E+00	1,57E+06	0,00E+00	6,33E-04	6,29E-04
Indium	8,92E+05	1,26E+05	1,46E+06	0,00E+00	9,31E+05	4,07E+05	1,72E+05	3,02E+05	0,00E+00	2,72E+05	2,13E-07	9,08E-08
Lead	2,89E+05	1,07E+05	0,00E+00	1,22E+06	1,29E+06	1,38E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,87E+05	2,81E-03	1,97E-03
Cerium	1,27E+05	1,31E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,38E+05	6,51E+05	1,35E+05	8,88E+05	2,57E+05	4,80E-05	2,08E-05
Titanium	6,26E+05	9,40E+03	0,00E+00	1,90E+05	0,00E+00	2,28E+05	1,07E+05	5,36E+05	0,00E+00	0,00E+00	9,38E-04	4,83E-04

Zirconium	6,72E+05	1,01E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E+05	1,05E+05	0,00E+00	4,02E+05	2,59E+05	9,76E-05	4,21E-05
Niobium	3,76E+05	1,68E+05	0,00E+00	1,97E+05	0,00E+00	2,48E+05	7,73E+04	0,00E+00	1,90E+05	2,15E+04	6,23E-06	4,41E-06
Lanthanum	6,06E+04	6,28E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,62E+05	3,12E+05	6,48E+04	4,25E+05	1,23E+05	2,30E-05	9,96E-06
Neodymium	4,63E+04	4,80E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,23E+05	2,38E+05	4,95E+04	3,25E+05	9,40E+04	1,75E-05	7,61E-06
Phosphorus	9,61E+04	8,35E+03	0,00E+00	1,11E+05	0,00E+00	1,20E+05	8,63E+04	2,59E+04	2,03E+05	0,00E+00	6,39E-03	6,76E-03
Cadmium	9,42E+03	9,67E+03	0,00E+00	0,00E+00	9,63E+04	1,10E+05	0,00E+00	2,90E+04	2,06E+05	1,61E+05	1,21E-06	5,82E-07
Praseodymium	1,55E+04	1,61E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,13E+04	7,97E+04	1,66E+04	1,09E+05	3,14E+04	5,87E-06	2,55E-06
Strontium	9,20E+04	4,06E+03	9,14E+04	2,70E+04	3,98E+03	2,71E+04	1,03E+04	1,55E+04	0,00E+00	0,00E+00	3,50E-06	2,16E-06
Calcium	2,47E+04	2,41E+04	0,00E+00	3,84E+04	0,00E+00	4,59E+04	1,73E+04	0,00E+00	8,90E+04	0,00E+00	1,14E-02	5,02E-03
Potassium	1,60E+04	1,07E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,83E+04	0,00E+00	3,06E+04	3,65E+04	2,51E+03	1,37E-04	1,10E-04
Vanadium	1,88E+03	1,75E+03	1,20E+04	8,03E+03	0,00E+00	8,26E+03	2,24E+03	8,54E+03	0,00E+00	8,52E+03	7,66E-08	4,49E-08
Samarium	2,13E+03	2,21E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,68E+03	1,10E+04	2,28E+03	1,50E+04	4,33E+03	8,07E-07	3,50E-07
Gadolinium	1,77E+03	1,83E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,71E+03	9,09E+03	1,89E+03	1,24E+04	3,59E+03	6,69E-07	2,90E-07
Europium	5,17E+02	5,35E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,38E+03	2,66E+03	5,52E+02	3,62E+03	1,05E+03	1,96E-07	8,49E-08
Antimony	0,00E+00	2,23E+02	1,16E+03	1,15E+03	7,93E+02	1,13E+03	6,68E+02	3,52E+02	1,29E+03	1,23E+02	5,59E-08	6,83E-08
Scandium	2,17E+02	2,25E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,78E+02	1,12E+03	2,32E+02	1,52E+03	4,40E+02	8,22E-08	3,57E-08
Yttrium	1,35E+02	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,59E+02	6,93E+02	1,44E+02	9,45E+02	2,74E+02	5,10E-08	2,22E-08
Dysprosium	3,39E+01	3,52E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,04E+01	1,74E+02	3,62E+01	2,38E+02	6,88E+01	1,28E-08	5,58E-09

Terbium	1,88E+01	1,95E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	5,00E+01	9,66E+01	2,01E+01	1,32E+02	3,81E+01	7,11E-09	3,09E-09
Sodium	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	9,65E+00	8,29E+00	2,41E+01	2,86E+01	1,97E+00	6,87E-07	4,55E-07
Erbium	1,89E+00	1,96E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	5,03E+00	9,71E+00	2,02E+00	1,32E+01	3,83E+00	7,15E-10	3,10E-10
Ytterbium	1,86E+00	1,93E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	4,97E+00	9,59E+00	1,99E+00	1,31E+01	3,78E+00	7,06E-10	3,07E-10
Lutetium	2,10E-01	2,17E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	5,59E-01	1,08E+00	2,24E-01	1,47E+00	4,26E-01	7,95E-11	3,45E-11
Thulium	2,10E-01	2,17E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	5,59E-01	1,08E+00	2,24E-01	1,47E+00	4,26E-01	7,95E-11	3,45E-11

Tableau 67 Tableau de résultats de l'étude ESSENZ+ pour la batterie LFP, les éléments en orange sont les éléments les plus critiques avec cette méthode

Commodity	Concentration of reserves	Concentration of production	Feasibility of exploration projects	Political instability	Mining capacity	Trade barriers	Demand growth plus	Price fluctuation plus	Primary material use	Occurrence of co-production	Compliance of Environmental standards plus	Compliance of Social standards plus
Tantalum	1,64E+08	1,93E+07	3,31E+08	5,15E+08	0,00E+00	4,77E+08	0,00E+00	0,00E+00	3,41E+08	3,58E+07	2,99E-04	2,82E-04
Lithium	2,23E+07	2,87E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,37E+08	2,14E+08	2,52E+08	0,00E+00	3,71E-03	1,37E-03
Gallium	1,66E+07	3,22E+08	0,00E+00	1,92E+08	0,00E+00	2,16E+08	5,49E+07	9,70E+07	0,00E+00	2,58E+08	6,33E-05	2,71E-05
Selenium	1,43E+07	1,14E+07	0,00E+00	0,00E+00	5,11E+07	8,82E+07	3,37E+07	5,81E+07	1,99E+08	1,39E+08	1,36E-04	3,39E-05
Tellurium	2,14E+07	1,04E+07	0,00E+00	0,00E+00	4,00E+06	3,72E+07	0,00E+00	8,93E+06	0,00E+00	5,01E+07	1,23E-05	4,41E-06
Molybdenum	2,50E+06	1,28E+06	2,43E+07	1,12E+07	2,23E+06	1,24E+07	0,00E+00	4,48E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,59E-03	7,88E-04
Tin	4,03E+05	2,10E+05	0,00E+00	3,94E+06	2,60E+07	3,99E+06	0,00E+00	0,00E+00	4,74E+06	0,00E+00	4,97E-04	4,72E-04
Silver	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,48E+06	3,93E+06	5,75E+06	4,79E+06	2,14E+06	6,00E+06	3,19E+06	6,01E-05	4,24E-05
Rhenium	5,84E+05	7,89E+05	0,00E+00	4,74E+06	0,00E+00	4,74E+06	4,74E+06	4,74E+06	4,74E+06	4,40E+06	1,59E-07	9,18E-08
Magnesium	1,07E+06	5,10E+06	0,00E+00	5,00E+06	0,00E+00	5,54E+06	2,16E+06	4,76E+06	0,00E+00	6,90E+05	3,70E-03	1,62E-03
Copper	4,53E+05	0,00E+00	0,00E+00	6,55E+06	1,47E+06	6,71E+06	0,00E+00	0,00E+00	6,48E+06	8,84E+05	6,35E-02	3,90E-02
Gold	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,45E+06	4,32E+06	5,13E+06	3,80E+06	0,00E+00	4,38E+06	0,00E+00	4,99E-06	3,71E-06
Nickel	8,00E+06	2,00E+05	0,00E+00	2,66E+06	0,00E+00	3,31E+06	1,02E+06	1,09E+06	0,00E+00	4,59E+05	2,66E-03	1,63E-03
Iron	1,10E+04	6,54E+03	0,00E+00	0,00E+00	3,66E+04	8,89E+04	0,00E+00	7,25E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,15E-01	7,26E-02

Aluminium	3,56E+05	8,53E+05	0,00E+00	3,37E+06	0,00E+00	4,40E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,47E-01	8,68E-02
Autre	1,12E+07	3,43E+06	1,29E+07	1,28E+07	5,89E+06	1,52E+07	8,53E+06	6,55E+06	9,36E+06	3,80E+06	5,93E-02	4,82E-02
Palladium	3,91E+06	2,85E+05	3,91E+06	1,90E+06	0,00E+00	2,00E+06	1,37E+06	5,87E+05	0,00E+00	9,12E+05	1,21E-07	8,43E-08
Cobalt	6,25E+05	6,37E+05	2,49E+06	3,37E+06	2,18E+05	2,84E+06	1,97E+06	6,46E+05	1,22E+06	7,48E+05	1,08E-04	1,42E-04
Zinc	1,96E+05	8,30E+04	0,00E+00	1,64E+06	2,03E+06	1,88E+06	7,63E+05	4,41E+05	2,28E+06	2,61E+05	1,01E-02	7,11E-03
Platinum	2,49E+06	7,08E+05	2,89E+06	1,48E+06	0,00E+00	1,45E+06	0,00E+00	3,22E+05	0,00E+00	1,75E+05	1,01E-07	7,84E-08
Silicon	3,91E+05	6,24E+05	0,00E+00	1,18E+06	1,18E+06	1,44E+06	3,86E+05	2,34E+06	0,00E+00	0,00E+00	7,19E-03	3,04E-03
Uranium	5,23E+04	6,40E+04	7,14E+05	5,49E+05	2,57E+05	7,26E+05	1,08E+06	1,72E+05	1,02E+06	0,00E+00	7,75E-06	6,15E-06
Indium	7,54E+05	1,07E+05	1,23E+06	0,00E+00	7,87E+05	3,44E+05	1,46E+05	2,55E+05	0,00E+00	2,30E+05	1,80E-07	7,68E-08
Lead	2,35E+05	8,72E+04	0,00E+00	9,89E+05	1,05E+06	1,12E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,52E+05	2,28E-03	1,60E-03
Graphite	5,20E+04	2,05E+05	7,03E+05	4,45E+05	0,00E+00	4,74E+05	5,47E+05	0,00E+00	7,84E+05	0,00E+00	3,16E-04	3,14E-04
Cerium	1,55E+05	1,61E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,14E+05	8,00E+05	1,66E+05	1,09E+06	3,15E+05	5,87E-05	2,56E-05
Phosphorus	3,24E+05	2,82E+04	0,00E+00	3,74E+05	0,00E+00	4,05E+05	2,92E+05	8,74E+04	6,86E+05	0,00E+00	2,16E-02	2,28E-02
Titanium	5,78E+05	8,67E+03	0,00E+00	1,76E+05	0,00E+00	2,11E+05	9,88E+04	4,95E+05	0,00E+00	0,00E+00	8,66E-04	4,46E-04
Sulfur	1,19E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,22E+05	0,00E+00	7,22E+05	0,00E+00	2,44E+05	9,85E-03	7,13E-03
Lanthanum	7,25E+04	7,51E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,93E+05	3,73E+05	7,75E+04	5,08E+05	1,47E+05	2,75E-05	1,19E-05
Chromium	6,94E+04	2,80E+04	3,09E+05	1,92E+05	2,80E+05	2,03E+05	6,42E+04	0,00E+00	2,41E+05	0,00E+00	3,47E-03	3,55E-03
Zirconium	5,29E+05	7,97E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,37E+05	8,29E+04	0,00E+00	3,17E+05	2,04E+05	7,69E-05	3,32E-05

Arsenic	1,58E+05	7,92E+04	3,36E+05	1,41E+05	0,00E+00	1,44E+05	0,00E+00	0,00E+00	2,78E+05	7,90E+04	1,49E-06	1,30E-06
Neodymium	5,73E+04	5,94E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,53E+05	2,95E+05	6,12E+04	4,02E+05	1,16E+05	2,17E-05	9,42E-06
Niobium	2,90E+05	1,30E+05	0,00E+00	1,52E+05	0,00E+00	1,91E+05	5,96E+04	0,00E+00	1,47E+05	1,66E+04	4,80E-06	3,40E-06
Manganese	2,39E+04	1,27E+04	2,96E+05	1,71E+05	0,00E+00	2,05E+05	5,59E+04	9,70E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,36E-03	1,06E-03
Cadmium	7,95E+03	8,16E+03	0,00E+00	0,00E+00	8,13E+04	9,25E+04	0,00E+00	2,45E+04	1,74E+05	1,36E+05	1,02E-06	4,91E-07
Praseodymium	1,92E+04	1,99E+04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,12E+04	9,87E+04	2,05E+04	1,35E+05	3,89E+04	7,27E-06	3,15E-06
Strontium	6,40E+04	2,82E+03	6,35E+04	1,88E+04	2,77E+03	1,89E+04	7,17E+03	1,08E+04	0,00E+00	0,00E+00	2,43E-06	1,50E-06
Potassium	9,90E+03	6,61E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E+04	0,00E+00	1,90E+04	2,26E+04	1,56E+03	8,49E-05	6,80E-05
Samarium	2,53E+03	2,62E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,75E+03	1,30E+04	2,71E+03	1,78E+04	5,14E+03	9,59E-07	4,16E-07
Gadolinium	2,18E+03	2,25E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,80E+03	1,12E+04	2,32E+03	1,53E+04	4,41E+03	8,24E-07	3,57E-07
Vanadium	1,59E+03	1,47E+03	1,01E+04	6,77E+03	0,00E+00	6,97E+03	1,89E+03	7,21E+03	0,00E+00	7,19E+03	6,47E-08	3,79E-08
Calcium	4,13E+03	4,03E+03	0,00E+00	6,41E+03	0,00E+00	7,67E+03	2,88E+03	0,00E+00	1,49E+04	0,00E+00	1,91E-03	8,39E-04
Europium	6,26E+02	6,49E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,67E+03	3,22E+03	6,69E+02	4,39E+03	1,27E+03	2,37E-07	1,03E-07
Antimony	0,00E+00	1,82E+02	9,51E+02	9,38E+02	6,49E+02	9,27E+02	5,46E+02	2,88E+02	1,06E+03	1,01E+02	4,57E-08	5,58E-08
Scandium	2,80E+02	2,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,47E+02	1,44E+03	2,99E+02	1,97E+03	5,69E+02	1,06E-07	4,61E-08
Yttrium	6,00E+01	6,22E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	3,09E+02	6,42E+01	4,21E+02	1,22E+02	2,27E-08	9,87E-09
Dysprosium	1,47E+01	1,52E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,91E+01	7,54E+01	1,57E+01	1,03E+02	2,97E+01	5,53E-09	2,42E-09
Terbium	7,83E+00	8,12E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,09E+01	4,03E+01	8,37E+00	5,49E+01	1,59E+01	2,97E-09	1,29E-09

Sodium	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	8,15E+00 0	7,00E+00 0	2,03E+01	2,42E+01 1	1,66E+00	5,80E-07	3,84E-07
Erbium	1,15E+00	1,19E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	3,06E+00 0	5,90E+00 0	1,23E+00	8,04E+00 0	2,33E+00	4,34E-10	1,88E-10
Ytterbium	1,13E+00	1,17E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	3,02E+00 0	5,82E+00 0	1,21E+00	7,94E+00 0	2,30E+00	4,29E-10	1,86E-10
Lutetium	1,27E-01	1,32E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	3,40E-01	6,55E-01	1,36E-01	8,93E-01	2,59E-01	4,83E-11	2,09E-11
Thulium	1,27E-01	1,32E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00 0	3,40E-01	6,55E-01	1,36E-01	8,93E-01	2,59E-01	4,83E-11	2,09E-11