

Etude N°2024-01

ACV et matériaux critiques

Synthèse

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.

WeLOOP a réalisé un travail en collaboration avec ISM-CyVi, BRGM et ScoreLCA sur les liens entre l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et la Criticité. En effet, 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'ACV, peuvent constituer un levier important pour l'évaluation de leur criticité. De plus, 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.

Les objectifs du projet sont les suivants :

- Comprendre comment les pratiques ACV pourraient évoluer pour intégrer les notions de disponibilité et de risques géopolitiques, donc de criticité ;
- Compléter les méthodes et pratiques d'ACV en intégrant l'évaluation de la criticité, en évaluant les indicateurs existants qui ne sont pas entièrement intégrés dans l'ACV mais dont l'inclusion est de plus en plus envisagée ;
- Analyser comment les impacts environnementaux de la production peuvent compléter l'analyse et la prise de décisions concernant la gestion des matières premières critiques

A travers un état de l'art, deux études de cas et une analyse de sensibilité, ce projet établit un état de l'art actuel sur les méthodes de criticité, d'évaluations des ressources et d'analyse environnementale en montrant la complexité d'associer ces méthodes. Ce projet a également établi des recommandations afin de lier l'ACV et la criticité pour des prises de décision à court terme et à moyen-long-terme et également à donner des recommandations sur les mesures d'atténuations de criticité.

1. État de l'art

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). 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.

Les matières premières sont considérées comme critiques si elles ont un score relativement élevé sur deux dimensions clés, souvent présentées comme les deux axes d'une matrice : la probabilité que l'approvisionnement d'une matière première soit perturbé (communément référencée comme « risque d'approvisionnement ») et la vulnérabilité d'un système spécifique à une telle perturbation (également appelée « importance »). Graedel et al. (2012) ont introduit une troisième dimension, les « implications environnementales », mais la plupart des méthodologies de criticité adhèrent à l'approche à deux axes (risque d'approvisionnement et vulnérabilité), s'alignant sur la théorie classique du risque.

La Commission Européenne a réalisé une première étude de criticité en 2011 et la plus récente date de 2023, les résultats sont présentés en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, dans cette étude les impacts environnementaux ne sont pas considérés comme facteur de risque. Cependant, il convient de noter qu'en raison de la diversité dans les périmètres des différentes études de criticité de la diversité des indicateurs de risque d'approvisionnement, les études produisent des listes divergentes de matières premières critiques ; il n'existe pas de liste universelle des matières premières critiques.

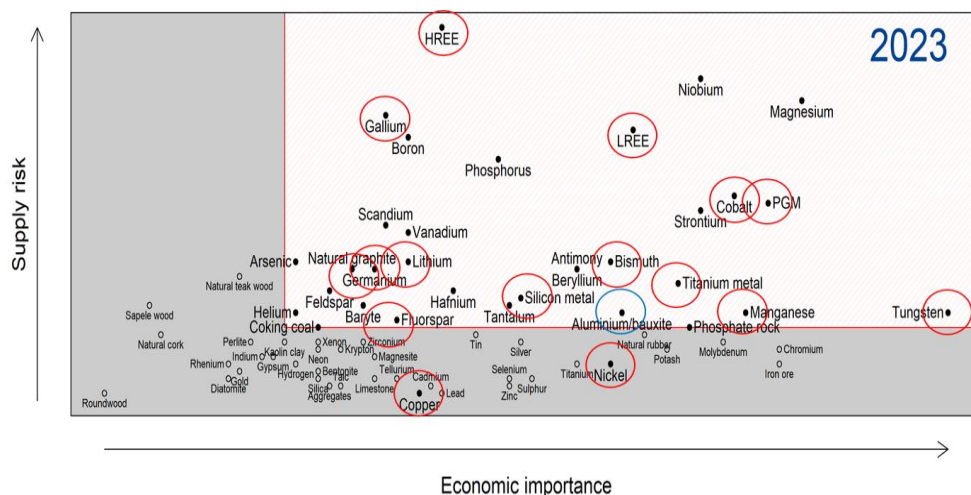


Figure 1 Résultats de l'évaluation de criticité de 2023 menée par la Commission Européenne

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. De plus, les impacts environnementaux sont parfois considérés comme facteurs de risque, étant donné que 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.

En même temps, la production de métaux contribue significativement aux impacts environnementaux globaux et sociaux. Un paradoxe émerge : la croissance exponentielle de la demande de matières premières pour les technologies essentielles aux transitions écologiques et énergétiques - destinées à créer un monde plus durable - génère 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, limitant par le fait même la sécurité d'approvisionnement en matériaux nécessaires à la transition énergétique.

La loi sur les matières premières critiques (Critical Raw Materials Act - CRMA) est 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.

La promotion de la durabilité et de la circularité est un aspect clé de la loi CRM. Elle habilite la Commission Européenne à réglementer l'empreinte environnementale des matières premières critiques qui doit être fondée sur des méthodes scientifiques et des normes d'évaluation du cycle de vie établies, y compris un processus de vérification.

Ces phénomènes peuvent être interprétés depuis les points de vue de l'ACV, de l'Analyse de Durabilité de Cycle de Vie (ADCV) ou d'analyses de criticité :

- En ACV, les impacts environnementaux sont pris en compte par de nombreux indicateurs, compris dans l'aire de protection « écosystème ». 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 ceux affectant 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 spécifiques 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.

Pour l'évaluation des ressources, les méthodes en ACV distinguent l'épuisement et la dissipation des ressources. Les méthodes d'épuisement concernent la réduction de certains stocks (naturels et anthropiques), souvent utilisés comme indicateur pour déterminer la disponibilité des ressources minérales avec l'indicateur ADP, alors que la dissipation représente la diminution de la masse de métaux disponibles après leur extraction (donc dans la technosphère). Ces méthodes adoptent une approche "de l'intérieur vers l'extérieur" (**inside-out**), c'est-à-dire qu'elle évalue un système étudié (produit, procédé, industrie, région) à partir des flux élémentaires pour mesurer son impact (émissions, consommation de ressources, pollution) sur son cycle de vie sur l'environnement global.

L'étude de criticité, au contraire, suit une approche "de l'extérieur vers l'intérieur" (**outside-in**), elle évalue comment la dépendance à certaines ressources (ex. métaux rares, matières premières critiques) peut poser un risque économique et industriel sur un produit, un procédé, une industrie ou une région. Ces risques découlent de plusieurs facteurs tels que des tensions géopolitiques, d'une concentration de l'extraction dans certains pays ou de fluctuations de prix. En effet, le risque d'approvisionnement pourrait impacter négativement la performance d'un produit, entraînant une augmentation des coûts de production et par conséquent affectant la prospérité humaine. 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 (GeoPoRisk), le potentiel de rareté économique (ESP), et la méthode intégrée d'évaluation de l'efficacité des ressources (ESSENZ). 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 ».

D. Schrijvers et al. analysent comment la perspective environnementale dans les évaluations de la criticité des matières premières peut être évaluée via l'ACV selon 4 perspectives montrées en Figure 2.

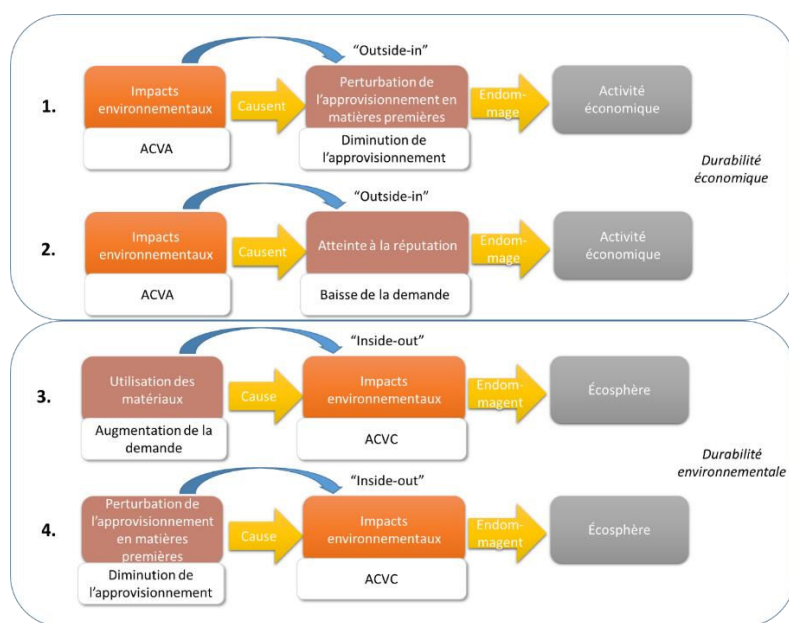


Figure 2 Mécanisme de cause à effet sous-jacent des 4 perspectives concernant les impacts environnementaux dans l'évaluation de la criticité des matières premières, leur classification en « outside-in » ou « inside-out », et l'approche ACV correspondante (D. Schrijvers et al., 2021a)

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.

La méthode IRTC a été créée pour remédier à l'absence de mécanismes de cause à effet explicitement appliqués dans les études de criticité antérieures afin de sensibiliser les entreprises aux risques d'approvisionnement en tenant compte des perspectives 1 et 2. Cette méthode comprend également des mesures d'atténuation liées à la chaîne de cause à effet, selon qu'elles puissent atténuer la source d'un risque, l'exposition potentielle d'une entreprise au risque ou les dommages subis par l'entreprise.

2. Etudes de cas

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 faisant un secteur stratégique. On retrouve donc dans leurs compositions des matériaux jugés stratégiques ou critiques en Europe (lithium, cobalt), pour lesquels le règlement relatif aux batteries et aux déchets de batteries (UE)2023/1542 fixe des objectifs pour améliorer l'efficacité du recyclage des LiBs en fin de vie. Les études de cas sont donc centrées autour avec dans la première, une évaluation de la production d'hydroxyde de lithium, dans la deuxième, une évaluation complète et conjointe d'ACV et de criticité de la production de batteries NMC811 (Nickel-Manganese-Cobalt) et LFP (Lithium-Fer-Phosphate) de véhicules électriques et dans l'analyse de sensibilité, une évaluation de production de cobalt et lithium recyclés à partir de batteries de véhicules électriques afin de respecter les réglementations.

2.1. Limites des inventaires de cycles de vie

Les évaluations de criticité et d'analyses environnementales sont basées sur les Inventaires De Cycle de Vie (ICV) d'ecoinvent 3.10, afin de faire un lien entre l'ACV et la criticité au niveau des méthodes d'applications. Les spécificités d'inventaires ont exercé une influence sur les résultats et leur interprétation. En effet, 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.

L'utilisation de composé minéral/métal miné inclus une allocation, économique ou massique, sur les différents éléments composants le minéral y compris les co-produits et sous-produits. Ainsi des éléments présents en faible quantités dans un minéral/métal utilisé pour fabriquer un produit se retrouve alloué dans l'inventaire du produit, sa quantité étant liée à la quantité de minéral/métal utilisé. C'est le cas par exemple du tellure dans le cuivre ou le fer/magnésium dans les sulfates de nickel et cobalt ou encore des terres rares comme le rhodium. Associés à de grandes masses en raison de l'utilisation réelle d'un composé associé et/ou d'un grand facteur de caractérisation, ces éléments ressortent dans les résultats en n'étant pas présents réellement dans la batterie. Il s'agit d'une limite de l'utilisation d'ICV de base de données comme ecoinvent ou Sphera dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats.

2.2. Résultats des deux études de cas

2.2.1. Etude de cas 1 : production d'hydroxyde de lithium en Europe

Le lithium a été considéré comme une matière critique lors de l'évaluation de criticité de l'Union Européenne en 2023. Etant donné la dépendance aux importations de matières premières constituant un des principaux facteurs contribuant à la criticité, diversifier la production d'hydroxyde de lithium en Europe a un effet positif sur la criticité du lithium en permettant de réduire la criticité européenne du lithium par la proximité de la production et sa diversification. Afin de voir l'effet sur les impacts environnementaux de la production de lithium en Europe et comparer avec les effets positifs que cela a sur la criticité, trois routes de production d'hydroxyde de lithium ont été comparées dans une étude ACV cradle-to-gate dans la première étude de cas, la production de Greenbushes en Australie (AU) qui est raffiné en Chine (CN), la production de Atacama au Chili (CL) et la production du projet Keliber en Finlande (FI).

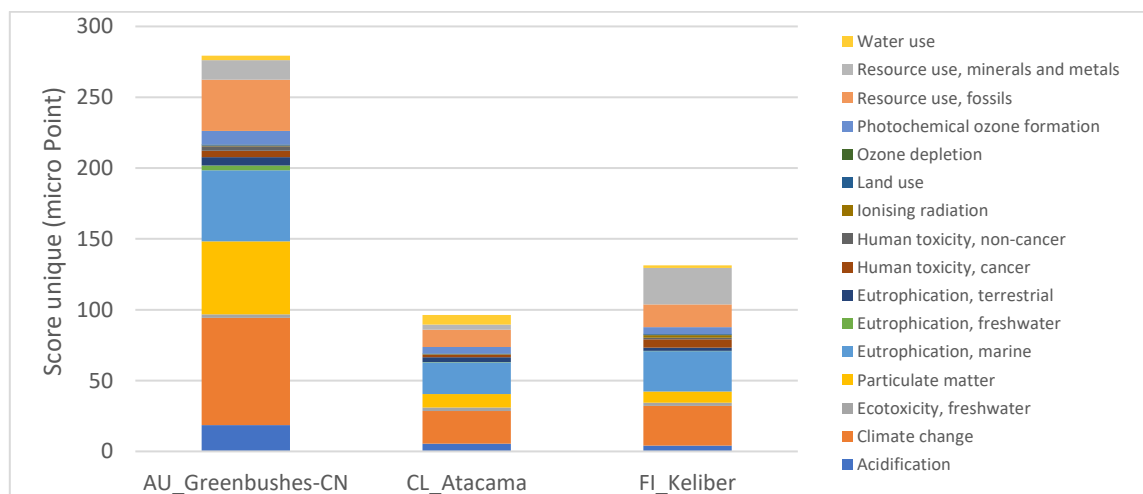


Figure 3 Résultats en score unique de la production d'hydroxyde de lithium via 3 routes de production

Les résultats (cf. Figure 3) 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 Australie/Chine, concordant ainsi avec les prédictions de criticité. Il reste néanmoins plus élevé que le cas chilien pour certaines catégories d'impacts.

2.2.2. Etude de cas 2 : Evaluations environnementales et de criticité de batteries NMC811 et LFP de véhicules électriques.

Étant donné que la deuxième étude de cas compare deux batteries aux caractéristiques différentes, l'unité fonctionnelle doit être choisie pour comparer des performances équivalentes. Une voiture électrique moyenne possède une capacité énergétique de 65 kWh, qui est utilisée comme unité fonctionnelle. Avec les données d'ICV cela équivaut à une masse de 562.3kg pour une batterie LFP et de 435.8kg pour une batterie NMC811.

Les analyses environnementales 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 d'impacts de cycle de vie EF 3.1 pour l'ACV et la méthode de dissipation des ressources pour comparer résultats d'épuisement des ressources avec celles de dissipations des ressources. L'épuisement des ressources concerne la diminution de la masse

de métaux disponibles dans la croûte terrestre et est évalué avec l'indicateur ADP_{ultimate reserves}, alors que la dissipation représente la diminution de la masse de métaux disponibles après leur extraction.

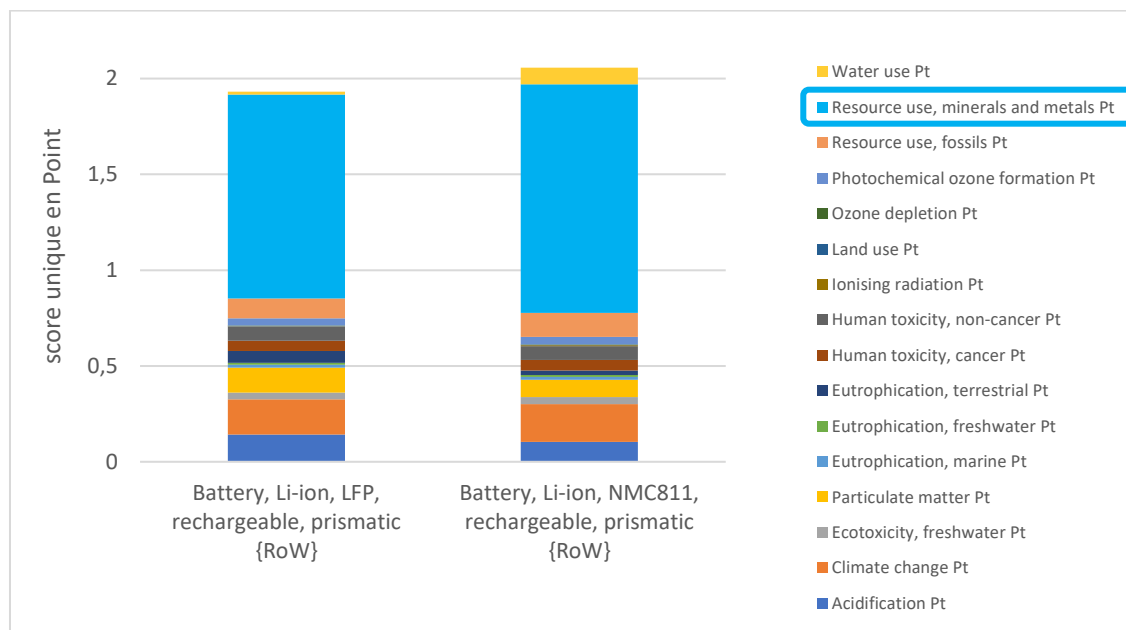


Figure 4 Résultats en score unique de batterie NMC811 et LFP

Les résultats de l'ACV, montrés en Figure 4, ont montré qu'une batterie NMC811 a un peu plus d'impact qu'une batterie LFP et que la catégorie d'impact principale dans les 2 cas est « ressource use, minerals and metals » (cf. Figure 5) ce qui en fait un cas d'étude adéquat pour comparer les résultats à des études de criticité.

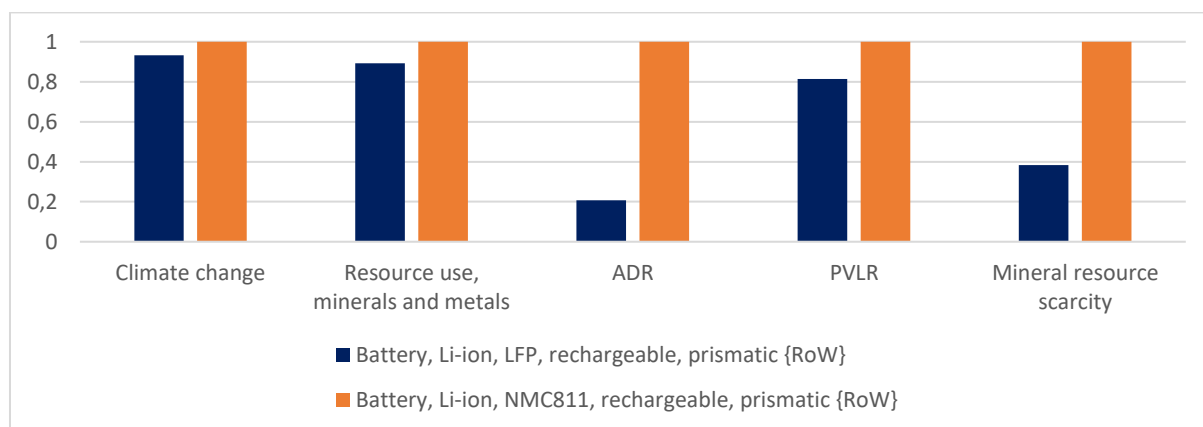


Figure 5 Résultats pour une batterie NMC811 et LFP pour différents indicateurs, avec la plus grande valeur reportée à 100%

Pour les indicateurs de dissipation des ressources, deux ont été comparés avec les résultats : L'**ADR (Annual Dissipative Rate)**, un indicateur mesurant 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, reflétant ainsi l'intensité de la dissipation d'une ressource et sa criticité en termes de durabilité, et le **PVL (Potential Value Loss Rate)** un indicateur évaluant la perte potentielle de valeur économique liée à la dissipation d'un métal. La batterie NMC811 a de plus grande valeur que la batterie LFP pour les deux indicateurs et l'écart entre les valeurs d'ADR pour les deux batteries est importante, supérieure à l'écart pour les indicateurs ACV étudiés.

Les éléments les plus contributeurs aux impacts de l'ACV sont :

- 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 venant des limites de l'inventaires expliqués plus haut. Il est associé 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. Avec un facteur de caractérisation élevé pour l'indicateur « resource use, minerals and metals », le tellure est le premier élément ressortant de l'analyse environnementale malgré son absence dans la batterie.

En comparaison avec les indicateurs de dissipation, le seul élément le plus contributif commun est le cuivre. Le Gallium et le Barium, présent dans l'électronique se retrouve dans les résultats de dissipation. Il y a également plus d'éléments réellement présents dans les batteries qui ressortent dans les résultats de dissipation et de l'indicateur « mineral scarcity » de la méthode Recipe 2016 Midpoint (H). On remarque également que le fer a une plus grande incidence dans les résultats de la batterie NMC811 que de la batterie LFP, ce qui peut sembler contre-intuitif mais qui vient également des limites de l'inventaire.

Pour les études de criticité, 3 méthodes ont été utilisées : IRTC, GeoPolRisk et ESSENZ Plus. Ces méthodes ont des périmètres différents et des indicateurs différents comme le montre le tableau 1 :

Tableau 1 Comparaison de trois méthodes d'évaluation de la criticité, les éléments en gras sont communs entre au moins deux méthodes

	IRTC	GeoPolRisk	ESSENZ Plus
Nombre de métaux	Plus de 50	56	48
Indicateurs	24	1	21
Périmètre (risques évalués)	Risques d'accessibilité, d'atteinte à la réputation, de fluctuations des prix	Risque géopolitique	Risque socio-économique et acceptabilité sociale
Données utilisés	ICV complet	ICV complet, mais les résultats sont présentés au premier niveau d'agrégation.	ICV complet
Éléments identifiés NMC811	Cobalt, Tantale, Antimoine, Graphite, Rhodium, Magnesium, Manganese, Silicium, Aluminium	Nickel, Cobalt, Lithium, Fer, Cuivre, Fluorine	Fer, Soufre, Nickel, Magnesium, Gallium, Lithium, Tantale
Éléments identifiés LFP	Tantale, Antimoine, Graphite, Rhodium, Aluminium	Lithium, Cuivre, Fluorine	Aluminium, Fer, Selenium, Gallium, Lithium, Tantale

La méthode IRTC est basée sur les scores de tous les éléments de l'inventaire pour différents indicateurs où une valeur de seuil est fixée pour être jugée de critique pour un indicateur. Les éléments avec le plus d'indicateurs critiques sont ceux identifiés dans le tableau 1. Ainsi des éléments tels que le Rhodium ou le Magnésium ou l'antimoine ont été identifiés alors qu'ils ne sont pas dans les batteries.

ESSENZ possède des facteurs de caractérisation pour les 21 indicateurs qui ont été multipliés par les masses de chaque élément de l'inventaire ainsi le tantale ou le Sélénium ne font pas partie de la batterie mais sont présents dans les résultats, on note cependant plus d'éléments. Les résultats obtenus pour les indicateurs d'acceptabilité sociétales ont été inattendus pour la batterie NMC811 mais la majeure contribution à ces indicateurs vient du fer. Comme exprimé précédemment la grande quantité de fer allouée à cette partie vient des limites de l'inventaire et en pondérant les facteurs de caractérisation par la masse le fer ressort fortement pour ces indicateurs.

La méthode GeoPolRisk est appliquée à un ICV complet, mais les résultats sont présentés au premier niveau d'agrégation. Elle utilise des facteurs de caractérisation spécifiques à une région géographique telle que l'UE. Elle se concentre sur les risques géopolitiques associés aux éléments en tenant compte de la concentration de la production de matières premières, de leurs prix négociés et de l'instabilité des pays producteurs. Cette méthode prend en compte tous les éléments impliqués dans les processus d'avant-plan et d'arrière-plan, y compris les matières premières primaires et les matières premières énergétiques. Malgré l'attribution, la méthode GeoPolRisk a identifié le nickel, le cobalt, le lithium et le cuivre comme des points chauds pour les piles de type NMC, ce qui la rend plus complémentaire des résultats obtenus par l'ACV.

Il est intéressant de noter que comme dans les évaluations environnementales, GeoPolRisk et ESSENZ Plus ont identifiés le fer dans NMC811 plutôt que dans LFP et que le cuivre n'a été identifié que dans GeoPolRisk.

Cependant, même si les résultats de la méthode IRTC au niveau des éléments identifiés diffèrent des résultats des autres méthodes de criticité ou d'analyses environnementales. Cela est sûrement dû aux limites d'inventaires. Elle permet, cependant, de donner des mesures d'atténuation des risques pour les éléments identifiés afin d'atténuer les risques d'approvisionnement identifiés à l'aide de l'outil d'aide à la décision IRTC [Decision Tool – IRTC](#).

Afin de comparer globalement les résultats de criticité et les résultats environnementaux des scores globaux par indicateurs ont été calculés par batteries en mettant à 100% la valeur globale la plus haute pour chaque batterie pour chaque indicateur. La figure 6 montre que bien que les écarts entre les valeurs des deux batteries diffèrent pour toutes les méthodes, la batterie NMC811 a plus d'impact environnementaux, de criticité et de dissipation.

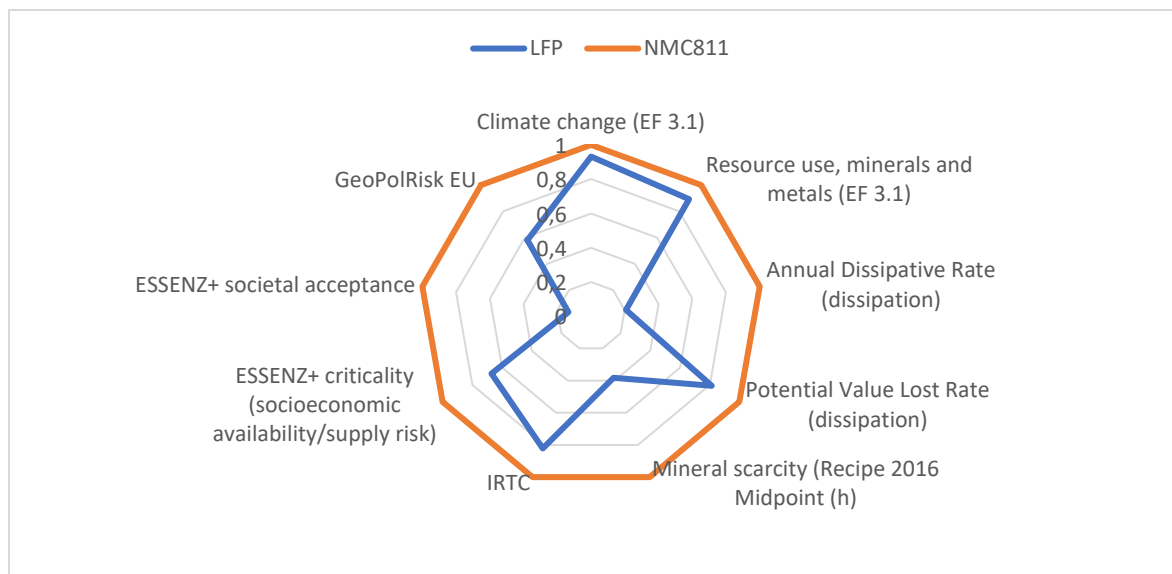
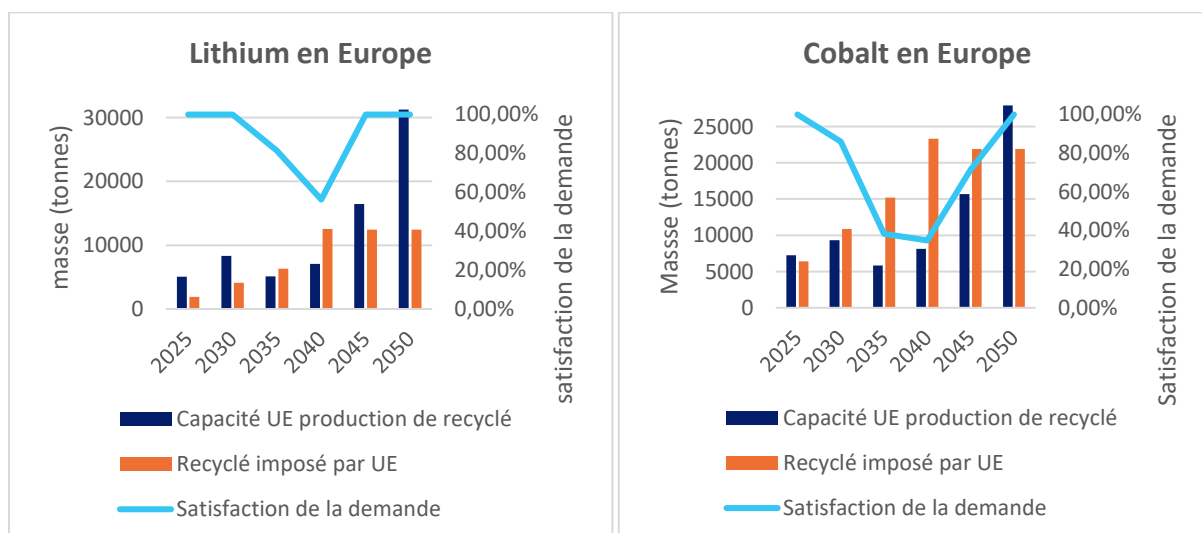


Figure 6 Résultats pour une batterie NMC811 et LFP pour différents indicateurs de méthodes d'évaluations environnementales et de criticité

2.3. Analyse de sensibilité : Contenu recyclé

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 a été proposé en septembre 2023 et a été adopté en mai 2024 avec un objectif d'atteindre un taux de **25% de recyclage des matériaux critiques** afin de les réutiliser en tant que contenu recyclé d'ici 2030. L'objectif de l'analyse de sensibilité est donc d'évaluer la capacité de recyclage des batterie lithium-ion en Europe pour respecter le CRMA et de rencontre des objectifs de la réglementation (EU)2023/1542 sur taux de matériaux recyclés. Les calculs sont basés sur une étude menée par WeLOOP lors du projet BATTERS.



Figures 7 Satisfaction de la demande en lithium et cobalt recyclé pour les batteries lithium-ion en Europe

Les résultats en Figure 7 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

L'analyse de sensibilité a posé la question de **l'intégration 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. Cependant, dans les méthodes de criticité, il existe peu de méthodes ou de facteurs de caractérisation pour évaluer l'influence de contenu recyclé sur les résultats de criticité. Nous recommandons donc de réaliser une **étude spécifique** sur le développement de méthodes de criticité pour les matériaux recyclés dans le futur afin de combler les lacunes dans un domaine qui deviendra plus important dans les années à venir.

3. Recommandations pour l'usage conjoint d'analyses environnementales et de criticité

3.1. Intégrer une dimension environnementale dans la criticité pour une prise de décision à court terme

Les analyses de criticité sont bien adaptées pour des prises de décisions ayant un effet sur du court-terme, car elles évaluent la vulnérabilité d'une ressource (ex. métaux, minéraux) en fonction de risques d'approvisionnement et de son importance économique qui varient en raison de facteurs qui sont souvent dynamiques et peuvent évoluer rapidement (ex. nouvelles réglementations, tensions géopolitiques, innovations technologiques). Le public cible des résultats des évaluations de la criticité est principalement limité à la « partie prenante économique à risque » et aux parties prenantes associées ayant des intérêts similaires. 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.

Cependant, les réglementations comme le CRMA prône de la durabilité et de la circularité en habilitant la Commission Européenne à réglementer l'empreinte environnementale des matières premières critiques en précisant 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. Il est donc nécessaire d'intégrer une dimension environnementale dans les évaluations pour un effet court-terme.

Pour cela, il est recommandé d'utiliser des méthodes de criticité intégrant des indicateurs environnementaux tels qu'ESSENZ qui inclue cinq indicateurs : changement climatique, acidification, eutrophisation, émissions de particules et consommations d'eau, ou IRTC qui considère des impacts environnementaux élevés comme un "signal d'alerte" ou un point critique dans une évaluation de criticité. Elle prend donc en compte des indicateurs environnementaux avec l'utilisation d'ACV cradle-to-gate ou d'Indicateurs de Performance Environnementale.

Pour l'évaluation des risques d'approvisionnement à court terme, la méthode GeoPolRisk offre une perspective plus détaillée et complémentaire, en se concentrant spécifiquement sur la « partie prenante économique », contrairement à la perspective globale offerte par d'autres méthodes de criticité. Lorsque l'on utilise la méthode GeoPolRisk ou d'autres méthodes de criticité, il est recommandé de l'associer à des catégories d'impacts environnementaux pertinentes pour des études de cas spécifiques, comme celle concernant l'hydroxyde de lithium. Le choix des indicateurs doit être fait en fonction de l'objectif de l'étude. Par exemple, la première étude de cas sur l'hydroxyde de lithium a révélé une forte consommation d'eau lors de la production de sel, de sorte qu'une catégorie d'impact environnemental connexe serait pertinente pour compléter l'évaluation de la criticité.

3.2. Intégrer la criticité dans l'ACV pour une prise de décision à moyen / long terme

Pour des prises de décisions ayant un effet sur du moyen-long-terme, l'ACV est plus adaptée car il s'agit d'une évaluation environnementale tout au long du cycle de vie d'un produit, incluant extraction, production, utilisation et fin de vie. En termes d'audience pour les méthodes d'évaluation des ressources, étant donné que les méthodes d'évaluation des ressources 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.

Cependant, l'ACV repose sur des moyennes et des scénarios stables, et ne prend pas en compte les fluctuations économiques ou politiques à court terme. L'usage de matériaux critiques et stratégiques dans les technologies stratégiques comme les équipements électroniques ou les batteries implique également un lien avec la CRMA. Inclure des évaluations de criticité dans les études environnementales est donc préférable.

La deuxième étude de cas a montré que les méthodes IRTC, GeoPolRisk et ESSENZ Plus peuvent s'adapter aux ICV. Cependant, les inventaires utilisés dans l'ACV ne sont pas forcément adaptés à cet usage, il y a des limites qui influencent les résultats comme vu dans la partie 2.1. Utiliser le Bill of Materials (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. Cela peut être obtenu en effectuant une analyse profonde de l'ICV pour identifier les éléments réellement utilisés dans la chaîne de valeur du produit. Ainsi la construction des inventaires à se fait à partir des quantités déclarées dans des ICV intermédiaires plutôt que de flux élémentaires permettant 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.

De plus, les méthodes et indicateurs de criticité ne présentent pas les mêmes caractéristiques que l'ACV au niveau temporel (ACV : long/court terme, criticité : court terme), de la façon de faire (ACV : inside-out, criticité : outside-in) et de la géographie (ACV : Globale, Criticité : locale). Il est donc recommandé de réaliser les méthodes environnementales et de criticité séparément ou combiner avec une analyse profonde de l'inventaire et des messages donnés par chacune des méthodes

Compte tenu des différents outils disponibles et des divers matériaux et périmètres couverts par les méthodes, GeoPolRisk est une méthode de criticité qui s'aligne sur l'ACV. Elle peut être utilisée comme un outil de sélection initial pour identifier les points chauds des matières premières qui sont spécifiques à l'acteur économique. En outre, GeoPolRisk comprend des facteurs de caractérisation similaires à ceux utilisés dans l'ACV, ce qui le rend compatible avec les logiciels d'ACV pour une intégration transparente. ESSENZ Plus peut également être utilisé ; cependant, l'évaluation doit être réalisée à l'aide de BoM et d'ICV pour les indicateurs de criticité. Notez que la partie ACV d'ESSENZ peut s'écarter des catégories d'impact ACV par défaut pour couvrir un éventail plus large et des méthodes et impacts LCIA plus récents (catégories d'impacts environnementaux pertinentes pour des études de cas spécifiques)..

3.3. Mesures d'atténuation des risques

L'atténuation des risques est fondamentale dans la criticité car l'objectif des études de criticité est d'identifier les éléments à risques et quels sont les risques notamment d'approvisionnement contrairement à l'ACV qui se concentre plus sur l'obtention de résultats chiffrée. L'atténuation des risques en étude de criticité vise à réduire la vulnérabilité face aux ressources critiques. Elle repose sur plusieurs stratégies qui peuvent être technologiques, économiques, politiques ou environnementales.

Pour cela il est recommandé de voir l'annexe 6 du rapport qui comprend une liste non exhaustive de mesures d'atténuation de risques. Elles doivent être évaluées en fonction de leur **pertinence** pour le

type de risque lié à la matière première concernée à la suite d'une interprétation des risques identifiés. Cela est nécessaire avec ESSENZ, GeoPolRisk et d'autres méthodes criticité

L'**outil de prise de décision IRTC**, en revanche est conçu pour proposer des mesures d'atténuation adaptées aux risques dans deux secteurs à ce jour : Energie et Transport. **D'autres secteurs** sont visés pour le développement futur de l'outil.

4. Conclusion

La criticité et l'ACV présentent deux approches différentes. La criticité a une approche « outside-in » et ne s'intéresse pas directement aux incidences environnementales d'un matériau donné, mais plutôt aux risques économiques et industriels liés à la disponibilité des ressources. D'autre part, l'ACV offre une approche « inside-out » centrée sur les impacts environnementaux. Bien que l'ACV et la criticité ne répondent pas aux mêmes questions, ces méthodes sont complémentaires et leur croisement est essentiel pour prendre des décisions durables et stratégiques, comme l'illustre la figure 8

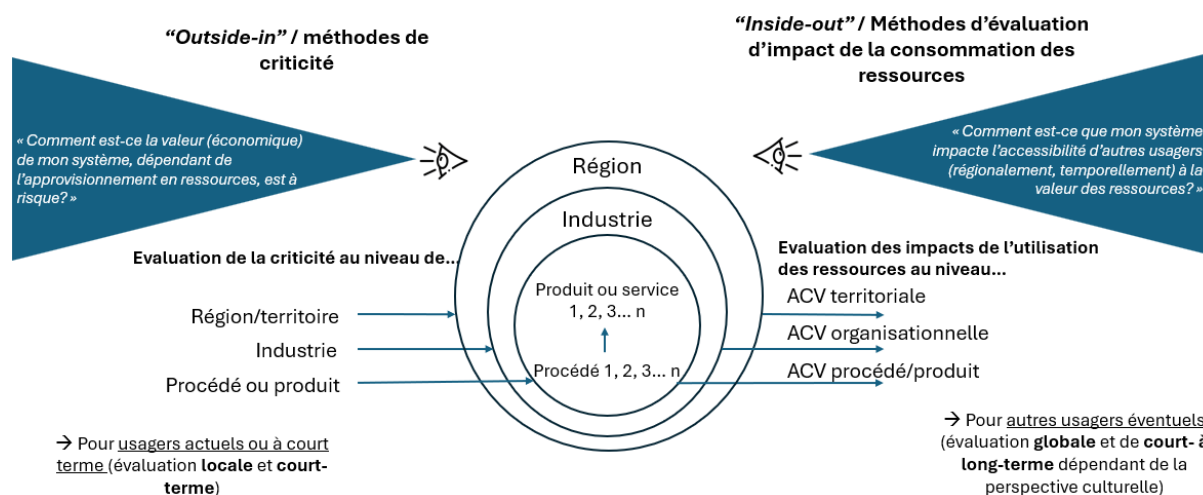


Figure 8 Opposition entre les approches « outside-in » de la criticité, et « inside-out » des méthodes d'évaluation des impacts de la consommation de ressources en ACV

Par exemple, les impacts environnementaux (évalués via l'ACV 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. Également, une perturbation de l'approvisionnement en matières premières peut avoir des incidences sur l'environnement (évaluées par l'ACV), par exemple lorsque les matières premières sont utilisées dans des technologies à faible émission de carbone

Pour conclure, afin d'optimiser l'utilisation conjointe d'étude environnementale et de criticité, cette étude a montré qu'il est recommandé, de réaliser une combinaison de BoM et d'ICV analysés en profondeur pour avoir les inventaires pertinents à utiliser pour l'analyse de la criticité étant donné que les ICV peuvent présenter des limites. Cet inventaire combiné peut être intégré à la méthode GeoPolRisk/ESSENZ pour identifier les points chauds des matières premières qui sont spécifiques à l'acteur économique. Cette analyse peut être suivie d'une analyse plus approfondie à l'aide de la méthode IRTC et de l'outil de prise de décision IRTC afin d'élaborer des stratégies d'atténuation.